

RAPPORT MONDIAL  
SUR LA SCIENCE

1993



Éditions UNESCO

RAPPORT MONDIAL SUR LA SCIENCE  
1993

# RAPPORT MONDIAL SUR LA SCIENCE 1993



Éditions UNESCO

Les désignations utilisées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l'UNESCO aucune prise de position quant au statut juridique de tel ou tel pays ou territoire, ville ou région, ou de ses autorités, ni quant au tracé de ses frontières.

Les opinions exprimées dans cet ouvrage sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement le point de vue de l'UNESCO.

Publié en 1994 par  
l'Organisation des Nations Unies  
pour l'éducation, la science et la culture  
7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP, France

ISBN 92-3-202938-3

© UNESCO 1994

Composé par **Banson**, Londres  
Imprimé par **Hérissey**, Evreux

Page de couverture : Gregory Sams/Science Photo Library

## PRÉFACE

Federico Mayor

---

La science et la technologie ont joué un rôle déterminant dans le développement économique et social au cours de ce siècle qui touche maintenant à sa fin. Dans un contexte d'expansion accélérée de la recherche fondamentale et d'application toujours plus rapide de ses résultats, elles se sont progressivement imposées comme de puissants instruments de promotion de l'un des buts essentiels des Nations Unies selon sa Charte, à savoir « favoriser le progrès social et instaurer de meilleures conditions de vie dans une liberté plus grande ».

Mais la répartition du capital scientifique et technologique, comme des fruits qu'il produit, demeure très inégale d'une région à l'autre et d'un pays à l'autre. Les activités de recherche-développement sont à plus de 80 % concentrées dans une poignée de pays industrialisés. En 1990, les dépenses de R-D représentaient 2,9 % du produit national brut de l'ensemble du monde industrialisé, alors que bon nombre de pays en développement avaient les plus grandes peines à atteindre un niveau dix fois moindre. C'est dire à quel point la lettre S a bien sa place dans le sigle UNESCO : l'une des missions de l'Organisation est tout simplement d'aider à corriger ce déséquilibre.

La coopération pour le développement n'est cependant pour l'UNESCO qu'un aspect de sa fonction plus large de coopération intellectuelle — laquelle a pour but d'aider à l'avancement et à la diffusion du savoir à travers le monde, en particulier dans les domaines où une approche internationale se révèle chaque jour plus indispensable, et de favoriser par là même cette solidarité éthique sans laquelle il ne peut y avoir d'échanges intellectuels vivants. Lorsque, dans cette perspective, l'UNESCO — seule organisation du système des Nations Unies chargée de la coopération proprement scientifique — a entrepris de publier une série de rapports mondiaux périodiques sur les domaines relevant de sa compétence, elle a tout naturellement décidé de consacrer l'un de ces rapports à la science et la technologie dans le

monde d'aujourd'hui. Puis, à sa vingt-sixième session, en novembre 1991, la Conférence générale de l'UNESCO a donné son aval à la préparation et la publication de ce premier *Rapport mondial sur la science*.

Le *Rapport* a été établi avec le concours d'un groupe consultatif composé de personnes qui ont consacré toute leur carrière à étudier l'organisation et la conduite de l'action scientifique. C'est donc une œuvre plurielle. Des scientifiques de haut niveau et des observateurs exercés de la scène scientifique ont été invités à nous faire profiter de leur connaissance et de leur expérience des choses scientifiques en rédigeant tel ou tel chapitre.

La première partie de l'ouvrage veut être un « état des lieux » de la science dans le monde aujourd'hui. Les chapitres qui la composent sont consacrés soit à des régions entières, soit à des pays ou groupes de pays qui, pour une raison ou une autre, en sont à un stade de développement particulièrement intéressant. Pour chaque région, les auteurs ont été invités à livrer leur appréciation personnelle de l'état de la science. Certains ont opté pour un bilan riche en données chiffrées sur le financement et les effectifs de la recherche, d'où il ressort que certaines régions possèdent une mine de documents statistiques sur la recherche, la formation et le développement scientifiques, d'autres ont préféré présenter une analyse plus théorique.

La deuxième partie du *Rapport*, consacrée aux systèmes scientifiques et technologiques, expose les modes et moyens d'organisation et d'exercice de la science, en montrant comment interpréter un certain nombre d'indicateurs de l'activité scientifique pour brosser un tableau global de la science dans le monde.

La coopération internationale, qu'elle soit intergouvernementale ou non gouvernementale, constitue aujourd'hui un aspect majeur de la science et de la technologie. Beaucoup de disciplines scientifiques exigent de vastes recherches — et bien souvent coûteuses — qui ne sauraient être menées que moyennant une action collective

---

associant des gouvernements, institutions ou particuliers. Dans la troisième partie, trois partisans de cette forme de coopération décrivent et examinent les multiples profits et les nombreux succès à porter à l'actif des partenariats internationaux.

Dès lors qu'on prétend rendre compte de l'état de la science dans le monde, il est impossible de faire totalement l'impasse sur la matière de la recherche scientifique. Pour tenter de faire partager au lecteur un peu de l'exaltation de la découverte dans la science moderne, nous avons demandé à quatre scientifiques qui, par leurs travaux, sont bien au fait de toutes les avancées de leur discipline, de présenter, dans un langage compréhensible pour le profane, quelques-unes des nouveautés importantes apparues dans leurs domaines respectifs ces deux ou trois dernières années. Nous espérons que ces quatre chapitres intéresseront tous ceux qui, sans être nécessairement des spécialistes de ces quatre disciplines, aimeraient en avoir un aperçu. Les sujets dignes d'intérêt étant innombrables, il fallait bien faire un choix, et nous n'avons retenu pour cette première édition du *Rapport* que les quatre sciences fondamentales par excellence, mathématiques, physique, chimie et biologie. Dans les éditions ultérieures, seront à leur tour examinées les sciences appliquées, notamment les sciences de la Terre et l'environnement, les sciences de l'ingénieur, l'informatique et les sciences de l'information.

Le corps du *Rapport* est complété par une annexe statistique présentant des données sur les effectifs et les dépenses scientifiques dans les différents pays, provenant de la dernière édition de l'*Annuaire statistique* de l'UNESCO.

Ce *Rapport* paraît à un moment où il est plus que jamais nécessaire de stimuler la contribution de la science aux processus de décision — laquelle ne procède que trop souvent de considérations exclusivement économiques et politiques. Il faut trouver les moyens de faire en

sorte que les décisions des pouvoirs publics et des entreprises fassent une place aux avis les plus éclairés de la communauté scientifique. Par ailleurs, les scientifiques sont aussi appelés à assumer d'autres fonctions essentielles sur le plan du développement, comme la sélection, l'adaptation et l'entretien des technologies importées, et notamment à occuper les nouveaux postes (les « éco-emplois » requis pour l'application du programme « Action 21 », par exemple) qu'il faudra créer, à l'échelon municipal en particulier, pour s'attaquer à certains des grands défis de notre temps (protection de l'environnement, exploitation rationnelle des ressources en eau, gestion des sources d'énergie non renouvelables).

Publier un rapport qui se veut complet et à jour sur un sujet aussi complexe que la science et la technologie, c'est inmanquablement s'exposer à un certain nombre de risques. De toute évidence, on aurait très bien pu faire figurer certains autres domaines dans cette première édition, mais, faute de place, il a fallu y renoncer pour le moment. Nous n'en espérons pas moins que ce premier *Rapport mondial sur la science* et ceux qui suivront auront leur utilité et leur intérêt, pour un large public, et notamment pour les décideurs et responsables qui s'occupent des questions de science et de technologie, les chercheurs et enseignants désireux d'avoir la vue d'ensemble qui fait si souvent défaut et les non spécialistes qui souhaitent, simplement pour leur édification personnelle, en savoir un peu plus sur l'état de la science dans le monde aujourd'hui.

Federico Mayor  
Directeur général de l'UNESCO

---

# SOMMAIRE

---

<b>1 L'ÉTAT DE LA SCIENCE DANS LE MONDE</b>	<b>1</b>	<b>RECHERCHE FONDAMENTALE ET INNOVATION</b>	
INTRODUCTION		<i>Keith Pavitt</i>	133
<i>M. G. K. Menon</i>	2	LES INDICATEURS : OBJET ET LIMITES	
L'AMÉRIQUE DU NORD		<i>Rémi Barré et Pierre Papon</i>	136
<i>Rodney W. Nichols et J. Thomas Ratchford</i>	12	APERÇU MONDIAL	
L'AMÉRIQUE LATINE		<i>Rémi Barré et Pierre Papon</i>	139
<i>Raimundo Villegas et Guillermo Cardoza</i>	30	<b>3 LE PARTENARIAT EN SCIENCE</b>	<b>151</b>
L'EUROPE OCCIDENTALE		LA COOPÉRATION INTERGOUVERNEMENTALE	
<i>Sam J. Lloyd</i>	45	<i>Michel Batisse</i>	152
L'EUROPE CENTRALE ET ORIENTALE		L'EXEMPLE DE L'OCÉANOGRAPHIE	
<i>Blagovest Sendov</i>	59	<i>Ulf Lie</i>	162
LA RUSSIE		LA COOPÉRATION AUX FINS DU DÉVELOPPEMENT	
<i>Sergei Kapitza</i>	65	<i>Abdus Salam</i>	168
LES ÉTATS ARABES		<b>4 ÉVOLUTION RÉCENTE</b>	<b>177</b>
<i>Fakhruddin Al-Daghestani</i>	73	MATHÉMATIQUES	
L'AFRIQUE		<i>Ian Stewart</i>	178
<i>Thomas R. Odhiambo</i>	86	PHYSIQUE	
L'ASIE DU SUD		<i>Phillip F. Schewe</i>	195
<i>Prabhakar J. Lavakare et Kishore Singh</i>	96	CHIMIE	
LA CHINE		<i>Michael Freemantle</i>	212
<i>Shen Chenru et Zhang Shaozong</i>	105	BIOLOGIE	
LE JAPON ET LES NOUVEAUX PAYS INDUSTRIALISÉS		<i>Peter Newmark</i>	228
<i>Sogo Okamura et Reg Henry</i>	112	ANNEXE : TABLEAUX STATISTIQUES	243
L'AUSTRALIE ET L'ASIE DE L'EST			
<i>Reg Henry</i>	121		
<b>2 LES SYSTÈMES DE SCIENCE ET TECHNOLOGIE</b>	<b>123</b>		
LES INSTITUTIONS			
<i>Pierre Papon et Rémi Barré</i>	124		

---

## REMERCIEMENTS

---

L'UNESCO exprime sa reconnaissance à tous les membres du Groupe consultatif *ad hoc* qui ont bien voulu apporter leur conseil et leur assistance à la conception du *Rapport* :

Rémi Barré (Directeur de l'Observatoire des sciences et des techniques, Paris); Lennart Hasselgren (International Science Programs, Université d'Uppsala, Suède); Abdul-Razzak Kaddoura (ancien Sous-Directeur général pour les sciences, UNESCO); Thomas Odhiambo (Président de l'Académie africaine des sciences, Nairobi, Kenya); Geoffrey Oldham (ancien Directeur de l'Unité de recherche sur les politiques scientifiques, Université de Sussex, Royaume-Uni); Raimundo Villegas (Chancelier de l'Académie des sciences de l'Amérique latine, Caracas, Venezuela); David Waddington (professeur de chimie, Université de York, Royaume-Uni); Kenneth Warren (Vice-Président des affaires académiques, Picower Institute for Medical Research, New York).

# I L'ÉTAT DE LA SCIENCE DANS LE MONDE

---

## INTRODUCTION

M. G. K. Menon

L'un des événements majeurs du présent millénaire a incontestablement été la naissance de la science moderne et sa croissance exponentielle. Certes, la science a été de tout temps partie intégrante de l'activité et de la vie sociale humaines. La faculté d'étonnement et la curiosité face au monde environnant, la coordination des cinq sens, ainsi que de la main, de l'œil et du cerveau, la quête de réponses à des interrogations et l'apprentissage du raisonnement logique furent autant d'étapes décisives dans le développement de la méthode scientifique.

Les grands foyers de civilisation et de culture de l'humanité, et en particulier la Chine, l'Inde, la Mésopotamie, l'Asie centrale, l'Amérique du Sud, l'Égypte, la Grèce et Rome, nous ont légué d'importantes découvertes qui servirent d'assises aux progrès ultérieurs de la science. En ces temps reculés, l'activité scientifique se limitait toutefois à de brefs moments féconds, sans que l'on puisse parler de développement régulier. Puis, voici quelques centaines d'années, la révolution scientifique et industrielle germa et prit racine en Europe. Depuis, la science n'a cessé de progresser, mais seulement dans des régions privilégiées — essentiellement l'Europe, l'Amérique du Nord et le Japon. Les luttes intestines, les structures féodales, l'absence de tolérance et de libéralisme et la domination coloniale ont empêché les régions du globe que l'on désigne sous le nom de « Tiers Monde » de connaître le même essor et les privent encore aujourd'hui d'un développement fondé sur le savoir.

Notre siècle, dernier de ce millénaire, a été marqué par une explosion de l'information et de la connaissance qui est le fruit de la recherche scientifique. Les applications technologiques des connaissances ainsi acquises ont ouvert simultanément de multiples ères nouvelles. Aux premiers temps de l'histoire humaine, l'âge de la pierre, ceux du cuivre, du fer et du bronze se sont étendus sur de longues périodes. Le *XX<sup>e</sup>* siècle a vu s'inaugurer tout à la fois l'ère de l'atome, l'ère de l'espace, l'ère de l'électronique et de l'informatique, l'ère de la biologie moderne, l'ère des matériaux nouveaux et l'ère de la compréhension de la structure de l'univers.

### UNITÉ ET INTERDISCIPLINARITÉ DE LA SCIENCE

Au cours de l'histoire de la science, des observations incertaines et la formulation de théories articulées ont abouti au développement de multiples champs d'investigation caractérisés chacun par une phénoménologie qui leur est propre. Il est néanmoins possible de regrouper au sein d'un système d'explication commun ces champs que l'on a considérés comme distincts et séparés (et qui, à certains niveaux et à certaines fins, peuvent conserver ce caractère).

Un autre aspect très important pour le progrès de la science est la manière dont différentes disciplines viennent s'épauler les unes les autres et, mieux encore, donner naissance à des champs et des disciplines entièrement nouveaux. De nos jours, les mathématiques et la physique jouent un rôle considérable en chimie ; de même la physique et la chimie en biologie. Ces quatre disciplines occupent à présent une place décisive dans notre compréhension du système terrestre, en particulier dans le domaine des sciences de la Terre et de l'écologie. Ce sont de telles approches interdisciplinaires qui ont permis toutes les avancées révolutionnaires de la biologie moléculaire, du génie génétique et des biotechnologies.

Outre cette unité et cette interdisciplinarité des sciences exactes et naturelles, on note une interaction de plus en plus étroite entre recherche fondamentale et recherche appliquée, en particulier dans les sciences de l'ingénieur, l'agriculture et les disciplines médicales et vétérinaires. Ces interactions sont à l'origine du nombre prodigieux de produits et de procédés dérivés de découvertes scientifiques qui sont utilisés dans diverses sphères de la vie sociale.

Toutefois, il est au moins un cas dans lequel ces échanges demeurent limités : entre sciences exactes et naturelles et sciences sociales. La maîtrise de disciplines telles que la géographie, l'anthropologie et la psychologie exige à n'en pas douter des incursions sur le terrain des premières. L'économie emprunte de plus en plus aux mathématiques et exploite de nombreuses avancées conceptuelles de la physique, de la chimie et de l'étude des systèmes biologiques. Étant donné la place croissante de la science dans la société, il est capital que l'interdisciplinarité qui s'est révélée si fructueuse dans le champ des sciences exactes et naturelles se développe aussi entre celles-ci et les sciences sociales.

## LES CARACTÉRISTIQUES DE LA SCIENCE MODERNE

Les progrès accomplis par la science au cours des trois dernières décennies ont pris une ampleur qui défie l'imagination, que l'on mesure l'entreprise scientifique au nombre de chercheurs en activité, aux dépenses consacrées à la science, au nombre de travaux publiés ou au volume de biens produits dans le monde sur la base de découvertes scientifiques. Un changement d'échelle aussi remarquable a nécessairement de profondes répercussions sur la nature même de la science et de ses rapports avec la société. La science n'est plus un domaine d'activité coupé des autres, aux franges de la société; elle est étroitement liée à des secteurs productifs tels que la médecine, l'industrie ou l'agriculture ainsi qu'aux mécanismes gouvernementaux ou intergouvernementaux, et ce d'une manière et à un degré tels qu'elle envahit et affecte la société tout entière.

Une deuxième grande caractéristique de l'histoire récente de la science est la rapidité avec laquelle les découvertes scientifiques trouvent des applications pratiques. Si l'activité productrice dérive encore en partie de pratiques traditionnelles, notamment dans les pays en développement, elle est pour l'essentiel tributaire de découvertes scientifiques récentes auxquelles elle peut être directement reliée. De plus en plus, ces découvertes datent du XX<sup>e</sup> siècle, et souvent des dernières décennies. L'électronique et la technologie de l'information, les matières plastiques et les fibres synthétiques, les hormones et les antibiotiques, l'énergie nucléaire, la technologie de l'espace et ses nombreuses applications et le génie génétique sont autant de domaines où les avancées de la recherche fondamentale donnent rapidement naissance à des produits et à des procédés utilisés dans la vie quotidienne.

Une troisième caractéristique est le rôle joué par la science en matière d'armement. L'intérêt des savants et inventeurs pour les machines de guerre et leurs activités de conseillers auprès des militaires ne datent pas d'hier. Léonard de Vinci ne fut pas seulement l'artiste de génie que chacun connaît, mais aussi un grand savant. Dans une lettre adressée au duc de Milan pour lui offrir ses services, il s'étend longuement sur sa capacité d'inventer des machines de guerre et ne mentionne ses talents d'architecte, de sculpteur et de peintre, utiles en temps de paix, qu'en tout dernier lieu. Léonard reconnaissait la nécessité, dans certaines circonstances, de s'associer à l'œuvre militaire. « Assié-

par d'ambitieux tyrans, écrit-il, j'imagine des moyens offensifs et défensifs de préserver le don le plus précieux de la nature, la liberté. » Mais il savait aussi que les inventions pouvaient être détournées de leurs fins premières. Il commente son projet de sous-marin en ces termes : « Un dispositif permet à présent à de nombreuses personnes de séjourner un certain temps sous l'eau. Comment et pourquoi? Je ne dirai rien de la méthode que j'ai conçue... et je ne la publierai ni ne la divulguerai, connaissant la nature malicieuse des hommes, qui tueraient au fond des mers en endommageant les parties inférieures des navires et en les coulant avec leurs équipages. »

Il s'opposait donc à la conception aveugle d'armes meurtrières qui ne serviraient qu'à la conquête et à l'exploitation. Il faudra attendre notre siècle pour que la science se mette véritablement au service de l'armée, lui fournissant avions, chars et gaz toxiques durant la première guerre mondiale, puis radars, sonars, fusées et armes atomiques d'une puissance terrifiante durant la seconde.

Au cours des cinq dernières décennies, les gouvernements n'ont cessé d'accroître dans des proportions considérables les crédits accordés aux chercheurs pour qu'ils inventent des moyens nouveaux et toujours plus scientifiques de faire la guerre. Celle-ci n'est plus simplement l'affaire d'armées engagées dans des combats rapprochés; c'est toute la population du globe qui risque désormais d'y être plongée. Et ce n'est pas seulement dans le domaine des armes meurtrières, mais aussi pour tout ce qui touche à la logistique que la science moderne est devenue un rouage essentiel de la machine militaire.

Jusqu'à une date relativement récente, on craignait que des guerres n'éclatent entre des nations et des gouvernements se servant d'armements déterminés. Mais les nombreux progrès réalisés dans la production d'explosifs et d'armes automatiques et biologiques susceptibles d'être utilisés par de petits groupes d'anarchistes ou de terroristes ont ajouté une dimension supplémentaire aux effroyables menaces dont la science est en partie responsable.

La science entretient aujourd'hui des rapports de synergie et de symbiose avec la technologie. Aux premiers temps de l'histoire des techniques, les progrès résultaient en grande partie de l'exploitation de savoir-faire et de techniques acquis de façon empirique, l'intelligence des phénomènes qui intervenaient ne jouant qu'un rôle mineur. Ainsi, l'une des inventions les plus remarquables et qui eut d'importantes conséquences sociales — la machine à vapeur — ne fut

pas conçue, comme on pourrait le penser de prime abord, sur la base d'une compréhension des principes de la thermodynamique. De telles avancées techniques avaient toujours comme point de départ des idées originales, mais simples, et une part d'innovation. Depuis quelques décennies, au contraire, la technologie progresse parce que la recherche fondamentale a fait la lumière sur tel ou tel processus. L'électrotechnique, élément important de la technologie, a été, dès l'origine, entièrement fondée sur les acquis de la science. En revanche, les débuts du génie chimique ont été pour une bonne part empiriques. Tous les progrès réalisés dans des domaines tels que le génie nucléaire, les biotechnologies, la technologie de l'espace ou la technologie de l'information reposent sur des découvertes, des connaissances et des explications scientifiques. A leur tour, ces progrès permettent à la science d'avancer beaucoup plus vite. Les puissants outils que sont les nouveaux matériaux, l'électronique et les instruments modernes facilitent la recherche scientifique en améliorant la rapidité et la fiabilité. C'est ainsi que l'informatique est aujourd'hui au cœur même de l'activité et du progrès scientifiques. Ce sont ces rapports étroits entre la science et la technologie qui permettent à l'une et à l'autre de progresser beaucoup plus rapidement qu'autrefois.

#### LES CHANGEMENTS DANS L'ORGANISATION DE LA SCIENCE

Tout au long de l'histoire de la science moderne, la recherche a été menée en grande partie dans les institutions éducatives, et cela est encore vrai aujourd'hui. Les plus grandes découvertes scientifiques ont toutes été le produit des motivations profondes, de la curiosité, de l'intuition et de la puissance intellectuelle d'esprits isolés. Pour que ces dispositions fleurissent et portent leurs fruits, il faut un environnement qui laisse l'esprit libre de vagabonder aux frontières du savoir. L'existence de structures d'appui appropriées est certes indispensable, mais l'impératif premier est la liberté de pensée et d'expression, et un contexte culturel qui encourage l'érudition. Ce sont les jeunes qui font preuve de la plus grande originalité, car sans être encombrés d'un lourd bagage de connaissances et d'expérience, ils possèdent les compétences techniques qu'exigent des recherches de pointe.

Avant la seconde guerre mondiale, la recherche était une activité menée sans hâte, sans grands moyens financiers, souvent par des groupes au sein desquels les relations maître-étudiant étaient extrêmement fécondes. Depuis la fin

de la guerre, la science s'est organisée et des crédits beaucoup plus importants ont été alloués à la recherche. De vastes laboratoires et d'ambitieux projets et programmes de recherche ont vu le jour. Le succès, durant la seconde guerre mondiale, de projets organisés tels que la mise au point et le déploiement de radars ou le Projet Manhattan (fabrication de la bombe atomique) avait démontré l'efficacité d'activités très spécifiques visant un objectif précis. Les laboratoires de recherche industriels, qui existaient longtemps avant la guerre, s'agrandirent, et certains s'intéressèrent à des domaines de pointe, et même à la recherche pure. Le Bell Laboratory est un exemple de ces centres de recherche industriels devenus une pépinière de lauréats du prix Nobel. C'est dans ses murs que fut inventé le transistor, qui allait révolutionner l'électronique. C'est également le Bell Laboratory qui a apporté la première preuve expérimentale du rayonnement cosmologique dans la gamme des micro-ondes, ce bruit de fond révélateur du Big Bang ayant présidé à la naissance de l'Univers, qui nous fournit certainement une mesure de la température actuelle de ce dernier. On peut dire que la radioastronomie a vu le jour dans ce laboratoire. De nombreux autres laboratoires industriels ont également mené des recherches récompensées par des prix Nobel.

De nos jours, l'industrie et le secteur public financent une très large part des dépenses consacrées à la science dans des domaines tels que la défense, l'équipement et la mise en place de moyens de surveillance, ainsi que de vastes programmes de recherche spatiale, météorologique, océanographique, etc. Dans ce contexte, la recherche universitaire peut sembler reléguée au second plan, et c'est sans doute le cas financièrement, mais elle demeure le moteur même de la science.

#### L'AVÈNEMENT DE LA « MÉGASCIENCE »

Depuis la fin de la seconde guerre mondiale, de vastes recherches sont entreprises dans le cadre de projets de « mégascience » nécessitant de multiples lieux d'expérience ou un unique laboratoire aux installations complexes et sophistiquées, dont la mise en œuvre exige d'importantes équipes de scientifiques et des dépenses auxquelles un pays isolé pourrait difficilement faire face. Les premiers de ces projets intéressaient la physique des particules élémentaires et des hautes énergies et les sciences de l'espace. Le principe a été étendu à d'autres disciplines, comme les sciences de la Terre et la biologie moderne.

Dans le cas de la physique des hautes énergies, l'intérêt

de tels projets se comprend aisément. L'exploration de la structure de la matière fait intervenir des échelles de plus en plus petites qui exigent des détecteurs fonctionnant sur des longueurs d'onde d'échelles proportionnelles. Étant donné qu'il existe un rapport inverse entre la longueur d'onde et l'énergie requise, de tels détecteurs nécessitent une puissance de plus en plus considérable. On a donc construit des accélérateurs géants, comme celui du CERN à Genève, entreprise de collaboration créée et exploitée par un consortium de pays européens.

Les satellites, les systèmes de lancement et les sondes envoyées dans l'espace lointain supposent également des programmes de vaste envergure. Dans un premier temps, les États-Unis d'Amérique et l'ex-URSS avaient le monopole du lancement des satellites et des sondes spatiales. Puis l'Agence spatiale européenne (autre consortium européen), le Japon, la Chine et l'Inde leur ont emboîté le pas, quoique à des échelles plus modestes. Ces projets devenant de plus en plus coûteux, il a été proposé de les mener à l'avenir dans le cadre d'une collaboration multinationale.

Le projet de séquençage du génome humain peut être considéré comme la première incursion de la biologie dans le domaine de la mégascience. Différents pays y travaillent actuellement de façon isolée, ce qui soulève des problèmes de droits de propriété intellectuelle, et beaucoup plaident pour un Projet de génome humain mené en collaboration à l'échelle internationale. Au dire de certains experts, les caractères communs du génome humain auront été cartographiés d'ici à l'an 2000 et les différences génomiques entre individus peu de temps après.

Nombreux dans la communauté scientifique sont ceux qui redoutent que les besoins de plus en plus considérables de ces mégaprojets ne privent de ressources les recherches d'envergure plus modeste. La nature même de la recherche scientifique risquerait de s'en trouver modifiée : plus organisée, gérée comme une industrie, elle se verrait assigner des tâches bien définies. En fait, une telle structuration pourrait bien avoir pour effet de paralyser cet élan créatif dont les motivations et les dispositions individuelles sont le plus puissant moteur. Il est donc capital, à l'ère de la mégascience, d'assurer un équilibre entre cette dernière et les recherches plus modestes ou menées dans les établissements d'enseignement qui continuent d'offrir à de jeunes scientifiques les moyens d'approfondir leurs idées originales.

## RÉPERCUSSIONS DES CHANGEMENTS MONDIAUX RÉCENTS SUR LA SCIENCE

Les bouleversements géopolitiques qui se sont produits au cours de la dernière décennie ont surpris, semble-t-il, les analystes les plus avisés. Durant les quarante ans de guerre froide — marqués par le face-à-face de deux blocs dominés chacun par une superpuissance — qui ont suivi la fin de la seconde guerre mondiale, le monde a assisté à une escalade dans l'acquisition d'armes toujours plus sophistiquées et de moyens de destruction de masse. Puis l'effondrement total de la structure de commandement de l'Europe centrale et orientale a brusquement mis fin au conflit entre les deux systèmes politico-économiques. Nous sommes entrés dans une période de restructuration et de réalignement à l'échelle du globe, aboutissant à de nouveaux groupements économiques et de nouvelles alliances stratégiques. Dans la sphère économique, les forces du marché, la concurrence et la libre circulation des biens et des services l'emportent aujourd'hui, et les barrières (droits de douane et subventions) sont réduites au strict minimum.

Les effets de cette tournure des événements sur la science ne se font pas encore sentir. On avait espéré, en particulier, que l'effondrement de l'une des superpuissances et la réduction correspondante de la menace militaire rendraient en grande partie inutiles les dépenses militaires énormes et sans cesse croissantes qui avaient caractérisé l'après-guerre. Les sommes ainsi économisées — les « dividendes de la paix » — allaient pouvoir être investies à des fins civiles, notamment pour assurer le développement durable, et par voie de conséquence servir à financer la recherche scientifique, activité culturelle fondée sur les capacités novatrices et créatrices de l'être humain.

Deux facteurs au moins ont empêché ces rajustements budgétaires. Premièrement, le mauvais état général de l'économie mondiale durant la dernière décennie. Les grandes économies de marché de l'Amérique du Nord et de l'Europe occidentale, ainsi que le Japon, ont dû faire face à la récession et à la montée du chômage. Celles de l'Europe centrale et orientale et de l'ancienne URSS sont au bord de l'effondrement. Aussi ne perçoit-on aucun signe d'un accroissement de l'aide des pays riches aux pays pauvres ou des crédits alloués à la recherche scientifique.

Un deuxième facteur, dont on ne mesure généralement pas l'importance, est le fait que les gouvernements ont de plus en plus de difficultés à mobiliser des moyens suffisants

pour financer des activités qui relèvent légitimement de leurs compétences. En d'autres termes, les ressources investies dans la société le sont de façon beaucoup plus décentralisée, et une part importante d'entre elles sont destinées à entretenir la consommation. Les entreprises industrielles qui acquièrent ces ressources ne sont guère enclines à les investir dans la recherche pure et la recherche fondamentale. Dans notre système de libre concurrence, où l'impératif pour ces entreprises est de mettre au point des produits et des procédés qui se vendent, elles financent plus volontiers la recherche appliquée et l'innovation technologique. Il importe donc d'imaginer des méthodes d'organisation qui permettent aux gouvernements et aux entreprises les plus puissantes d'allouer des ressources à la recherche scientifique, en particulier à la recherche fondamentale, en soutenant les efforts de coopération mondiale tels que la recherche sur les systèmes terrestres et autres mégaprojets hautement prioritaires, mais aussi le développement permanent des infrastructures nécessaires à la science pour remplir sa mission en tant que manifestation de la créativité humaine.

#### L'AVENIR DE LA SCIENCE DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

Si certains des pays en développement dotés de ressources naturelles telles que le pétrole peuvent afficher un revenu par habitant élevé, la vaste majorité sont pauvres, mais s'accrochent à l'espoir de progresser sur la voie empruntée avant eux par les pays riches et d'atteindre un niveau de vie comparable. Les technologies modernes d'information, en particulier la télévision, et les vastes mouvements de population facilités par les transports aériens permettent aux habitants de toutes les régions du monde de découvrir comment on vit ailleurs. De ce fait, les populations toujours plus nombreuses des pays en développement se montrent de plus en plus exigeantes et aspirent au confort des sociétés prospères, ce qui soulève la question de savoir si les systèmes dont dépend la vie sur la Terre suffiraient aux besoins de l'ensemble de la population mondiale si celle-ci adoptait les habitudes de consommation effrénée qui sont actuellement celles du Nord. Il importe avant tout que les pays pauvres du Sud puissent offrir à leur population les moyens élémentaires de vivre dans la dignité. Un tel développement doit non seulement préserver l'avenir du Sud, mais encore celui de la planète tout entière. Or il ne peut être obtenu que par l'usage le plus intense et le plus judicieux des pou-

voirs que la science et la technologie ont mis à la disposition de l'humanité. Le Nord devra également y contribuer et montrer l'exemple en réduisant sa consommation. Si les contributions respectives de la main-d'œuvre, du capital et de la technologie à la croissance socio-économique varient considérablement selon les contextes, on s'accorde en général pour attribuer à la technologie un rôle prépondérant dans les progrès économiques globaux réalisés dans un passé récent. On peut aussi faire valoir que d'autres facteurs freinant le progrès, comme la pression démographique et l'instabilité politique, résultent du sous-développement.

A l'ère postcoloniale inaugurée après la fin de la seconde guerre mondiale, on a avancé de nombreuses théories du développement et du rôle qu'y jouent la science et la technologie (S et T). Il devient de plus en plus évident que le développement ne peut être apporté de l'extérieur, qu'il doit avoir des racines dans les pays concernés, ce qui suppose des capacités endogènes en matière de S et T. Là où existe une solide infrastructure scientifique et technologique, l'aide extérieure agit comme un puissant catalyseur : elle peut être assimilée et utilisée à bon escient. A l'inverse, cette aide est en grande partie gaspillée dans un pays incapable de l'absorber. Il faut donc impérativement promouvoir la science et la technologie dans les pays en développement.

Bien que leurs politiques économiques aient divergé durant une bonne partie de ce siècle, les pays industrialisés de l'Occident et les pays de l'Europe centrale et orientale possèdent des traditions scientifiques assez proches, les uns et les autres ayant contribué à l'essor de la science moderne depuis la révolution industrielle. La science et la technologie sont profondément ancrées dans leur culture. Aujourd'hui, cela est vrai aussi du Japon.

En revanche, les pays en développement ne se sont pas suffisamment ouverts à la science. De vastes portions de la population n'ont pas bénéficié d'une formation scolaire et continuent, comme par le passé, à travailler de façon traditionnelle. Un changement est nécessaire sur ces deux points : l'alphabétisation et la généralisation de l'enseignement primaire, en particulier de l'enseignement de la science, doivent devenir de très importantes priorités nationales. Il est également nécessaire de propager des systèmes de valeurs conférant à ceux qui se consacrent à l'étude un prestige élevé au sein de la société. Pour commencer, en attendant que les entreprises commerciales et industrielles puissent consacrer des ressources importantes à la recherche et au développement, les gouvernements des pays en

développement, s'appuyant sur toutes les formes d'assistance qu'ils peuvent obtenir de l'étranger dans le cadre de programmes d'aide extérieure ou par l'intermédiaire d'organisations intergouvernementales, doivent affecter les ressources nécessaires à l'enseignement des sciences et au renforcement de leurs capacités scientifiques. C'est à cette condition seulement qu'ils parviendront à créer une base et une infrastructure endogènes pour la recherche scientifique et prépareront les citoyens à participer à un développement socio-économique innovateur et fondé sur la connaissance.

## LA RECHERCHE MONDIALE ET LA COOPÉRATION INTERNATIONALE

De tout temps, les scientifiques ont formé une communauté internationale, collaborant et coopérant les uns avec les autres par-delà les frontières nationales et les continents. Cela est moins vrai dans le domaine de la technologie, où les considérations d'ordre commercial ou stratégique ont fait obstacle à la libre circulation de l'information. La situation a récemment évolué en raison de la très forte interdépendance à l'échelle du globe qui caractérise les entreprises multinationales.

En dehors de cette collaboration individuelle entre scientifiques ou groupes de scientifiques, un nombre croissant de problèmes requièrent désormais une coopération internationale. Il y a tout d'abord les projets de mégascience, que nous avons déjà évoqués. Puis les projets qui portent sur des problèmes d'envergure planétaire exigeant de vastes réseaux d'observation, de mesure et d'analyse. La cartographie du champ magnétique terrestre, qui a nécessité des relevés en de nombreux points de la surface du globe, en a été l'un des premiers exemples. Appartiennent aujourd'hui à cette catégorie les recherches consacrées à la météorologie, à l'océanographie et à l'environnement terrestre en général. Ces programmes supposent une vaste infrastructure, avec des navires, des avions, des satellites, des systèmes de collecte, de stockage et d'analyse des données, et un très grand nombre de points d'observation; leur succès exige en outre une répartition claire des tâches, des crédits de recherche, des programmes, une organisation et une gestion obéissant à un calendrier précis, et des mécanismes de coordination des activités.

Le Conseil international des unions scientifiques (CIUS) a joué au cours des cinq dernières décennies un rôle déterminant dans l'organisation d'activités scientifiques internationales, en particulier dans le domaine de l'environnement,

menées avec le concours de scientifiques indépendants, mais aussi d'organisations intergouvernementales et non gouvernementales. De vastes réseaux d'observation tels que le Système mondial d'observation du climat, le Système mondial d'observation de l'océan et le Système mondial d'observation terrestre sont mis en place en collaboration avec l'Organisation météorologique mondiale et la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO en vue d'appuyer les grands programmes relatifs à l'environnement planétaire. Ces systèmes sont conçus pour compléter le Programme sur l'homme et la biosphère (programme MAB) et le Programme hydrologique international (PHI), deux initiatives de longue date de l'UNESCO.

De tels programmes mondiaux offrent aux scientifiques des pays en développement une occasion unique de participer à des recherches d'avant-garde, puisqu'ils nécessitent des observations en de multiples points de la surface de la Terre, dont beaucoup sont situés sur le territoire de ces pays. L'échange d'informations et la formation, qui sont des composantes importantes de ces programmes, aident en outre les pays en développement qui y participent à renforcer leurs capacités endogènes en matière de science et de technologie.

## LA SCIENCE AU SERVICE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Durant les précédentes périodes de l'histoire, lorsque la planète était encore faiblement peuplée, l'échelle des activités humaines ne présentait aucune menace irréversible pour l'environnement terrestre. Or la population du globe, estimée à 300 millions au début de l'ère chrétienne, est passée à 1,7 milliard en 1900 et devrait atteindre 6 milliards en l'an 2000. Selon la rapidité avec laquelle les mesures de stabilisation porteront leurs fruits, nous risquons d'atteindre un seuil de saturation compris entre 8 et 15 milliards d'habitants. Cette croissance démographique se produit presque exclusivement dans les pays en développement. Il est clair qu'il faudra répondre aux besoins élémentaires de cette société humaine, aussi peuplée soit-elle, sur le plan de l'alimentation, du logement, de l'habillement, de l'eau, de l'énergie, de l'emploi, de l'éducation de base et des soins de santé. Le développement doit donc obéir à un modèle propre à assurer la satisfaction de ces besoins fondamentaux. Depuis la révolution industrielle, l'échelle des activités humaines s'est considérablement accrue; la production industrielle a plus que centuplé. Cela ne s'est pas fait entiè-

rement au détriment des ressources naturelles ou de l'environnement, comme le croient certains, parce que la science et la technologie n'ont cessé de fournir de nouveaux moyens d'exploiter plus rationnellement ces ressources en améliorant notablement la productivité et le rendement et en mettant en valeur des ressources encore jamais utilisées. Et pourtant, nous savons aujourd'hui que cet énorme accroissement de l'activité humaine épuise les systèmes dont dépend la vie sur la Terre. Les habitants de plus en plus nombreux des pays en développement aspirant tout naturellement à connaître le niveau de vie élevé des pays développés et à imiter leur mode de développement, les dommages causés à l'environnement risquent de devenir irréversibles, voire de mettre en péril la survie de l'humanité.

Les effets de l'activité humaine sur l'environnement ont d'abord eu un caractère local : pollution de l'air et de l'eau et déforestation. Puis ils ont pris une dimension régionale et débordé le cadre d'une localité ou d'une nation. Les pluies acides, la désertification, les rejets d'hydrocarbures dans les océans, la pollution industrielle des grands systèmes fluviaux et les conséquences des accidents nucléaires et chimiques ignorent les frontières locales et nationales. Les récentes révélations des scientifiques concernant des effets sur l'environnement qui échappent à nos sens ont suscité de nouvelles inquiétudes ; des phénomènes tels que la raréfaction de l'ozone stratosphérique ou l'accumulation rapide de gaz à effet de serre pourraient provoquer un réchauffement de la planète et des changements climatiques et une élévation du niveau des mers lourds de conséquences pour l'espèce humaine. Tous les secteurs de la société devront, dans leur intérêt commun, agir de concert pour remédier à ces effets sur l'environnement planétaire.

Les habitudes de consommation des riches sociétés industrielles modernes favorisées par les progrès de la science et de la technologie et la démographie galopante des pays en développement sont manifestement les deux principales causes de dégradation de l'environnement.

Seul un développement rapide centré sur l'être humain permettra de stabiliser la démographie des pays en développement. Le défi est de faire en sorte que ces pays continuent de se développer, mais selon des voies qui n'obèrent pas l'avenir à long terme. Comme l'indique clairement le Rapport de la Commission mondiale sur l'environnement et le développement présidée par M<sup>me</sup> Gro Harlem Brundtland (document désigné couramment sous le nom de « Rapport Brundtland »), le développement durable doit répondre

« aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ».

Vers la fin des années 60, le Club de Rome a publié un rapport intitulé *Halte à la croissance* dans lequel il se demandait si l'humanité pourrait se permettre de conserver son rythme de croissance en dilapidant ses ressources, et si le caractère limité de ces ressources n'allait pas sévèrement restreindre les possibilités de développement. La question qui se pose à nous aujourd'hui, face à la nécessité d'un développement continu, n'est pas tant de savoir si nos ressources sont limitées, mais de savoir si les systèmes vitaux de notre planète ont la capacité d'absorber les effets anthropiques liés à nos styles de vie et à nos modes de développement, effets qui ne peuvent que s'accroître avec le temps. L'enjeu n'est donc plus la simple conservation des ressources, mais un développement durable et écologiquement rationnel.

Même si de nombreuses solutions relèvent à n'en pas douter de la science et de la technologie, on n'instaurera pas un tel développement par des moyens purement techniques. Il faut aussi que la société comprenne et accepte la nécessité d'un changement des styles et des modes de vie. Il s'agit donc pour nous de formuler nos conclusions et nos recommandations sous une forme que les gouvernements, les citoyens, les entrepreneurs et les industriels puissent accepter et qui les incite à agir.

Lorsqu'ils s'adressent aux responsables politiques et aux décideurs, les scientifiques doivent exposer leurs raisonnements en termes simples, dans la langue de tous les jours, s'abstenir d'assortir leurs recommandations de diverses réserves, et surtout prendre clairement position dans les domaines où l'on est parvenu à un degré de certitude suffisant. De leur côté, les responsables politiques agissent à des échelles de temps plus courtes, déterminées par des échéances telles que les élections, et préfèrent appliquer des recettes éprouvées dont on sait qu'elles donnent rapidement des résultats tangibles. Les horizons temporels plus lointains faisant intervenir la notion d'équité entre les générations débordent le cadre de leurs plans d'action. Il importe par conséquent que les spécialistes des sciences exactes et naturelles et de la technologie s'associent aux chercheurs en sciences sociales, aux hommes d'affaires et aux industriels, aux responsables politiques et aux décideurs, appartenant ou non au gouvernement, et à tous ceux qui s'occupent du développement et de l'action sociale au niveau local, en vue de mettre sur pied un mécanisme interactif d'éducation, de sensibilisation, d'analyse et de décision radicalement nouveau. En

outre, il n'est plus possible d'utiliser des termes comme « croissance », « développement », « produit national brut » ou « analyse coûts-avantages » dans l'acception étroite qui est actuellement la leur : il convient de les redéfinir en fonction des situations que l'on rencontrera dans l'avenir. Il nous faudra repenser en partie nos systèmes éducatifs afin de promouvoir une meilleure compréhension de l'environnement et d'inculquer des systèmes de valeurs qui érigent en principe le respect des droits des générations futures.

Il importe de reconnaître le caractère fini de la capacité biologique de la Terre et la nécessité de préserver une certaine harmonie ou un certain équilibre entre les populations humaines et leurs activités et les autres systèmes, vivants ou non, de la planète. Il n'est plus admissible qu'une population se développe continuellement aux dépens d'une autre. On peut donc se demander si une telle coexistence harmonieuse pourrait perdurer ou si elle se dégraderait avec le temps. La réponse réside dans un changement permanent ; il nous faut rechercher un équilibre dynamique qui nous permette de jouir de meilleures conditions d'existence en utilisant de nouvelles techniques de mise en valeur des ressources plutôt qu'en surexploitant une plus ou moins grande partie du système terrestre. La science et la technologie sont des outils extraordinairement puissants qui pourraient nous aider à imaginer des méthodes novatrices pour exploiter les mêmes ressources ; encore faut-il que ces nouvelles méthodes soient socialement acceptables. Tel est le défi que nous nous devons de relever lorsque nous cherchons dans quelles nouvelles directions engager la science pour assurer à chacun de meilleures conditions d'existence.

## LA CNUED ET LE DOCUMENT ACTION 21

La Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement (CNUED), qui s'est tenue à Rio de Janeiro (Brésil) en juin 1992, s'inscrit dans le droit fil du Rapport Brundtland publié quelques années plus tôt. Ce rapport plaidait, on l'a vu, pour un développement durable, en harmonie avec les systèmes d'entretien de la vie sur la Terre et avec la capacité biologique de cette dernière. Il situait le développement dans une perspective dépassant largement le cadre strictement économique : le développement devait être équitable non seulement pour les générations présentes, mais encore pour celles qui étaient encore à naître. Il serait fondé sur la nécessité de changer de cap, d'abandonner les

modes de développement et de consommation actuels pour préserver l'avenir. Précédée par d'importants travaux préparatoires, la CNUED était l'occasion unique d'examiner ces questions au plus haut niveau intergouvernemental.

Le document Action 21 fut clairement au centre des débats. Il s'agit essentiellement d'un très ambitieux programme d'action dans lequel les problèmes relatifs au développement et à l'environnement sont abordés selon une approche intégrée. Il faut savoir que ce document a été négocié par les gouvernements paragraphe par paragraphe, phrase par phrase. Le CIUS a aidé à la rédaction du chapitre 35 intitulé « La science au service d'un développement durable ». Mais la science a également un rôle très important à jouer dans la solution de nombreux problèmes traités dans d'autres chapitres qui lui sont moins spécifiquement consacrés, comme ceux sur la protection de l'atmosphère, sur la planification et la gestion des ressources terrestres, des ressources des océans et d'eau douce, la préservation de la diversité biologique, la gestion écologiquement rationnelle des biotechnologies, la lutte contre le déboisement, la gestion des écosystèmes fragiles et la gestion des substances chimiques toxiques, des déchets radioactifs et autres déchets dangereux. Le chapitre 31, « La communauté scientifique et technique », traite de la collaboration souhaitable entre scientifiques, décideurs et responsables de l'information du public ; le chapitre 36, de la promotion de l'éducation, de la sensibilisation du public et de la formation ; et le chapitre 37, des mécanismes nationaux et de la coopération internationale pour le renforcement des capacités dans les pays en développement. Ce dernier chapitre intéresse tout particulièrement la communauté scientifique, car le renforcement des capacités de S et T est un maillon essentiel du développement durable.

### *Les priorités de la science à la lumière de la CNUED*

Les priorités qui peuvent être assignées à la science à la lumière du consensus auquel on est parvenu à Rio intéressent au plus haut point la communauté scientifique. En gros, elles sont de trois ordres :

Mettre en application, de toute urgence, les connaissances déjà acquises permettant d'atténuer dans une mesure importante les contraintes s'exerçant sur l'environnement dans de nombreux domaines ; les scientifiques doivent, en liaison avec les chercheurs en sciences sociales, les entreprises commerciales et industrielles, les responsables gouvernementaux et les organisations non gou-

vernementales, examiner les obstacles à de telles applications et concevoir des moyens de les surmonter.

- ❑ Élaborer de nouvelles approches, en particulier dans des domaines cruciaux où la nécessité de répondre aux besoins et aux aspirations de la population empêche de réduire ou d'éliminer facilement les agressions environnementales d'origine humaine.
- ❑ Mettre sur pied des programmes visant à permettre une meilleure compréhension de l'environnement terrestre, de manière à disposer de connaissances de base concernant les nombreux paramètres que les activités humaines risquent de modifier avec le temps, et à pouvoir surveiller les changements au fur et à mesure qu'ils se produisent, en évaluant les incidences suffisamment tôt pour entreprendre des actions préventives. Les données issues des observations effectuées en permanence, à l'échelle planétaire et de façon synoptique, doivent être ensuite analysées, en vue d'en comprendre les corrélations à l'intérieur des systèmes complexes qui constituent l'environnement terrestre. Il y a lieu par conséquent de créer une nouvelle science interdisciplinaire — la « recherche sur les systèmes terrestres ».

## PROBLÈMES ÉTHIQUES, DROITS DE L'HOMME ET IMAGE DE LA SCIENCE

Les progrès vertigineux de la science et de la technologie ont accru leur capacité d'affecter la société humaine pour le meilleur ou pour le pire. Aussi les considérations d'ordre éthique et les questions relatives aux droits de l'homme et à l'image de la science dans le public retiennent-elles de plus en plus l'attention. Le sujet est si vaste que nous devons nous contenter ici de l'illustrer par quelques exemples.

Examinons d'abord les questions relevant de la pratique de la science. Le fait que les résultats des travaux scientifiques peuvent être protégés au titre des droits sur la propriété intellectuelle amène à s'interroger sur la liberté de l'information, et en particulier sur le droit de débattre librement de questions scientifiques et celui de communiquer au sein de la communauté scientifique. Si des disputes éclataient déjà dans le passé à propos d'hypothèses ou de découvertes faites simultanément par plusieurs personnes, les polémiques et les procès entre scientifiques revendiquant la priorité sont beaucoup plus fréquents aujourd'hui. Ces problèmes et les intérêts commerciaux, ou encore stratégiques, font que la recherche scientifique se déroule dans une atmo-

sphère de secret et non de transparence. La presse se fait l'écho de supercheries, de plagiats et d'informations tronquées, et les enquêtes publiques sont hélas devenues courantes.

Depuis longtemps déjà, les défenseurs des droits des animaux protestent contre l'utilisation de ces derniers aux fins d'expériences scientifiques pouvant causer des souffrances ou la mort. Certains de leurs arguments sont tout à fait légitimes, et il est vrai que dans des cas qui demeurent exceptionnels on a abusé de l'expérimentation animale sans se préoccuper du sort des sujets utilisés. Ceux qui jugent nécessaire de mener des expériences sur les animaux en prenant certaines précautions répondent qu'un grand nombre d'êtres humains, et peut-être aussi d'animaux, bénéficieront à long terme des résultats de ces recherches.

Dans le domaine des nouvelles sciences biologiques, des activités telles que le Projet du génome humain et les programmes qui s'y rattachent posent de multiples problèmes éthiques et sociaux d'une extraordinaire complexité. Devrait-on imposer des limites éthiques à la recherche et aux manipulations du matériel génétique humain et à l'utilisation de l'information qui en découlerait? Peut-on se livrer à des manipulations des cellules reproductrices humaines et procéder à des expériences sur des embryons? De telles expériences risquent-elles de modifier de manière dangereuse notre patrimoine génétique? Les efforts pour décoder le génome humain vont-ils porter atteinte à l'intégrité de notre espèce? Sera-t-il possible d'empêcher les manipulations visant à doter les générations futures de caractères « souhaitables »? Même si les gènes sont au cœur même de notre être, nous relient au passé à travers l'évolution et déterminent notre avenir, l'éducation, le milieu et les facteurs culturels ne contribuent-ils pas eux aussi à nous façonner? Sommes-nous les simples produits de codes génétiques, dépourvus de liberté, non comptables de nos actes? La police et la médecine légale peuvent-elles utiliser le matériel génétique? Le recours aux données eugéniques aux fins de politiques sociales coercitives et comme instrument de discrimination n'a pas totalement disparu. Telles sont quelques-unes des nombreuses questions que soulèvent les progrès de la recherche sur le matériel génétique humain.

La puissance des technologies modernes de l'information pose également certains problèmes éthiques concernant l'invasion de la vie privée et la collecte par différents moyens et à différents moments dans le temps d'informations susceptibles d'être ultérieurement utilisées pour frapper de discrimination certains individus ou certains groupes.

S'agissant de l'image de la science, Bishop a noté ceci : « Nous vivons à l'ère de la science, où bon nombre des grands mystères de la nature ont été élucidés. Les fruits de la science nous ont permis d'améliorer considérablement notre bien-être et nos connaissances. Pourtant, la science se trouve aujourd'hui paradoxalement en conflit avec la société : admirée, mais en même temps soupçonnée, porteuse d'espoir pour l'avenir, mais obligeant aussi à des choix ambigus, généreusement financée, mais incapable aujourd'hui de tenir toutes ses promesses, affichant à son actif des réussites spectaculaires, mais accusée de ne pas servir plus directement les objectifs de la société. »

## EN GUISE DE CONCLUSION

Pour conclure, je voudrais m'arrêter sur deux problèmes qui me semblent les plus lourds de conséquences pour l'avenir de l'humanité. Ces problèmes, la science moderne peut — et doit — les résoudre de toute urgence. Premièrement, la population du globe va continuer de s'accroître, principalement dans les pays en développement, jusqu'à dépasser largement le chiffre de 8 milliards, avant de se stabiliser, sans doute entre 8,5 et 12 milliards selon les projections démographiques. Si l'on veut atteindre un niveau démographique stable et équilibré correspondant à la valeur la plus faible de cette fourchette, il faut mettre en œuvre rapidement des programmes efficaces de développement et de lutte contre la pauvreté. Le monde devra ensuite apprendre à s'accommoder de sa population et à répondre équitablement à ses besoins fondamentaux.

Deuxièmement, la consommation totale d'énergie dans le monde va plus que doubler. Selon les estimations actuelles, la demande sera, à son niveau maximum, de l'ordre de 22 à 26 terawatts par an (1 TW =  $10^{12}$  watts). Les combustibles fossiles demeureront la principale source d'énergie : aucune autre méthode efficace et acceptable pour produire de l'énergie en grandes quantités ne se profile à l'horizon. Puisque la planète devra donc supporter des niveaux d'émission de CO<sub>2</sub> plus élevés, il convient de lancer de vastes travaux scientifiques afin de déterminer avec un degré de certitude raisonnable quels seront les effets sur l'environnement. Il faudra aussi mettre au point des procédés permettant de capturer ou de détruire les gaz à effet de serre et entreprendre des recherches étendues sur les nouvelles sources d'énergie.

Démographie et énergie ne sont que deux des problèmes auxquels nous sommes confrontés. Une multitude

d'autres problèmes connexes devront être résolus si l'on veut répondre aux besoins élémentaires de la population du globe et lui donner les moyens de mener une existence décente. Par conséquent, s'il faut laisser la science continuer de fleurir en tant que grande activité créative et culturelle, il importe aussi de l'orienter afin qu'elle réponde aux besoins et aux attentes de la société. Cela étant, il faut reconnaître que la science et la technologie n'offrent pas, en elles-mêmes, de solutions à la majorité de nos problèmes socio-économiques actuels, contrairement aux vues de certains scientifiques qui sont convaincus que la technologie détient à elle seule toutes les clefs. Le plus grand nombre pensent que les solutions que nous cherchons dépendent aussi de choix politiques, économiques et sociaux. La science et la technologie devront donc jeter des ponts en direction de la société et tendre à une plus grande interdisciplinarité.

La science et la technologie sont aujourd'hui des outils extrêmement puissants, mais la science et l'enseignement de la science ignorent en soi les valeurs morales et spirituelles. Il incombe donc aux scientifiques de tempérer les progrès de la science et de la technologie en faisant preuve de mesure et de sagesse. Comme toute entreprise culturelle, la science se doit assurément d'enrichir notre existence, non de la dégrader. Ma conviction est toutefois que si la science tempérée par la sagesse peut encore nous assurer un avenir radieux, sans la science, toute la sagesse du monde ne suffira pas à résoudre les problèmes socio-économiques de notre temps.

M. G. K. MENON est Président du Conseil international des unions scientifiques (CIUS), principale organisation internationale non gouvernementale représentant la communauté scientifique. Il siège également à la Chambre haute du Parlement indien.

Il est diplômé de physique des Universités de Bombay et de Bristol (Royaume-Uni). Entré à l'Institut Tata de recherche fondamentale en qualité de maître de conférences, il en est devenu le directeur. Il a créé et présidé la Commission de l'électronique et a été nommé Secrétaire au Ministère indien de l'électronique. Il a également occupé divers postes de haut niveau aux départements indiens de la défense, de l'environnement et de la science et la technologie, ainsi que ceux de Président de l'Indian Space Research Organization, Directeur général du Council of Scientific and Industrial Research (CSIR), membre de la commission de planification et Conseiller scientifique du Premier Ministre de l'Inde. Il a été Ministre de la science et de la technologie et de l'éducation de son pays de 1989 à 1990.

## L'AMÉRIQUE DU NORD

Rodney W. Nichols et J. Thomas Ratchford

### VUE D'ENSEMBLE

Parler de la science en Amérique du Nord, c'est évoquer les efforts intenses de recherche-développement (R-D) déployés au Canada, aux États-Unis d'Amérique et au Mexique. Ces activités diverses intéressent aussi bien le secteur public que le secteur privé et couvrent un large éventail d'objectifs et de marchés nationaux et internationaux. Entre 1990 et 1992, les dépenses annuelles de R-D dans la région ont atteint un total de quelque 165 milliards de dollars des États-Unis, pour une population proche de 400 millions et dont le produit intérieur brut combiné a été d'environ 6 000 milliards de dollars. Le groupement de ces trois pays dans une même région est arbitraire — compte tenu des différences substantielles qui existent entre ces trois pays du point de vue des ressources, des infrastructures, de la population, de la langue, etc. —, et peut paraître moins significatif que dans le cas d'autres régions. Pourtant, les liens se resserrent entre les trois pays et des thèmes communs se font jour.

#### *Les voies ouvertes à la recherche*

Les progrès considérables de la science au cours des dernières années ont largement contribué à ouvrir de nouvelles possibilités de recherche. La prise de conscience, largement partagée, de la nécessité de protéger l'environnement a conduit, par exemple, à accorder une priorité élevée à la recherche de pointe en océanographie et dans les sciences de l'atmosphère, ainsi qu'en écologie et en génie industriel. Parallèlement, des problèmes aussi divers que la protection de la santé des femmes et des enfants, la compréhension des mécanismes cérébraux, le traitement des maladies des personnes âgées, pour ne rien dire de la lutte contre le SIDA, ont conduit à des efforts intenses et fructueux de recherche dans tous les secteurs des sciences de la vie; ces mêmes efforts ont suscité la naissance de la biotechnologie, dont les résultats pourraient bientôt révolutionner l'agriculture. La révolution de l'information se poursuit également avec vigueur, engendrant des progrès en microphysique, en électronique, en informatique (conception des ordinateurs et logiciels) et dans les systèmes de télécommunication, grâce auxquels commencent à se construire des « autoroutes de l'information » reliant les foyers, les bureaux et traversant

les frontières nationales. Des énigmes, vieilles comme le monde, concernant l'origine de l'univers et bien d'autres questions plus ou moins obscures de la recherche fondamentale commencent à être élucidées par l'apparition de concepts nouveaux en mathématiques et en physique.

Cette vitalité de l'activité scientifique donne au public comme aux responsables gouvernementaux la conviction que le potentiel intellectuel, social et économique de la science et de la technologie (S et T) — en particulier celui des travaux fondamentaux généralement menés dans les universités ou avec leur concours — est pratiquement illimité. Dans toute l'Amérique du Nord, la plupart des entreprises privées croient elles aussi que l'application de technologies nouvelles ou améliorées à leurs produits et services recèlent d'importantes opportunités commerciales qui justifient un investissement de leur part.

#### *Contraintes*

Deux contraintes lourdes ont cependant ralenti les initiatives visant à mettre à profit ces potentialités dans la période de l'après-guerre. La première est le coût croissant de la recherche scientifique de haut niveau. Les gouvernements ne peuvent assumer à eux seuls la charge financière de ces activités, et les grandes entreprises, aux prises avec une concurrence farouche, hésitent à consentir des investissements importants et à long terme dans des activités de R-D aux résultats incertains. Des phénomènes de restriction — choix difficiles qu'il est impossible d'éviter quand les occasions d'investir excèdent les ressources — ont été observés récemment au Canada comme aux États-Unis, dans le contexte d'une large base de R-D préexistante et d'une situation économique difficile.

La seconde contrainte découle de l'intérêt renouvelé pour les actions économiques et sociales à court terme aux dépens des investissements à long terme dans les sciences fondamentales. La volonté de rentabiliser plus rapidement les résultats de la recherche se manifeste dans les trois pays. Les responsables de la recherche recentrent leur attention sur des buts techniques spécifiques et susceptibles de s'inscrire dans un calendrier précis. Les chercheurs, notamment ceux qui travaillent dans les « sciences légères » où la curiosité joue un grand rôle, sont plus prompts à répondre aux objectifs à court terme des pouvoirs publics et des entreprises.

Ces contraintes sont ressenties dans tous les secteurs. Ne disposant que de ressources limitées, les gouvernements tentent de concilier leurs stratégies de soutien à la science et à la technologie avec la poursuite des objectifs économiques nationaux. La vitalité de la R-D dans les universités et le secteur privé dépend des apports combinés du secteur public et du secteur privé, et la question de savoir quelle serait la combinaison la plus efficace fait partout l'objet de vifs débats.

### *Canada*

Les restrictions budgétaires entravent le Gouvernement canadien dans son double désir d'élargir la répartition géographique des centres de recherche et de rendre plus efficace la contribution des acquis de la recherche à l'amélioration des résultats économiques. Les institutions publiques canadiennes ont fait récemment l'objet de réaménagements profonds. C'est ainsi que la principale unité s'occupant du réseau scientifique et technologique au sein du Département des affaires extérieures a été supprimée. Les conseils scientifiques et économiques ont été dissous. L'une des raisons avancées pour justifier ces changements, en dehors des économies budgétaires, était la volonté d'intégrer la politique scientifique et technologique avec la politique économique et industrielle. On observe néanmoins un effort concerté pour maintenir le financement des excellentes équipes scientifiques dont la qualité est depuis longtemps reconnue. Un nouvel axe d'action consiste à mettre l'accent sur la création de réseaux de communication et sur l'établissement de collaborations entre les centres d'excellence des institutions canadiennes et d'autres centres situés à l'étranger.

### *Mexique*

Depuis quelques années, le Mexique accorde une priorité élevée à la science et à la technologie. Après un fléchissement marqué des dépenses de R-D au début et au milieu des années 60, les aides publiques se sont redressées en même temps qu'étaient mis en place de nouveaux mécanismes consultatifs. Comme le Canada, le Mexique a le double souci d'élargir sa base scientifique et d'en resserrer les liens avec le potentiel de croissance économique. Le Mexique met également en place de nouveaux réseaux de communication destinés à interconnecter les centres de recherche nationaux et à les relier à leurs homologues du monde entier. Avec la croissance de l'économie et des échanges, le financement de la recherche par le secteur privé pourrait

fort bien connaître une forte augmentation pour atteindre le niveau des apports publics.

### *États-Unis d'Amérique*

Après une phase de forte croissance, le soutien à la recherche scientifique marque désormais le pas aux États-Unis, et il est peu probable que le volume déjà important de ces investissements progresse rapidement dans le proche avenir. Le gouvernement fédéral utilise de nouveaux mécanismes très sophistiqués pour optimiser la gestion des budgets scientifiques et techniques des divers organismes publics et pour élaborer des initiatives spéciales bénéficiant d'un soutien public, par exemple dans les domaines des supercalculateurs et du changement climatique mondial. L'accent est mis sur les liens entre la recherche du secteur public et les objectifs économiques du pays. Les États-Unis continuent de consacrer des sommes importantes à la recherche biologique et médicale, mais celles-ci croissent à un rythme moins soutenu. Les dépenses de R-D militaire sont en recul. Quant à la recherche présentant un intérêt commercial, elle est en progression grâce au soutien du gouvernement, alors que les dépenses des entreprises se sont tassées au cours de la récession récente. Un vif débat s'est instauré quant à la priorité relative et aux coûts croissants des projets de « science lourde » (*big science*), comme la station spatiale et le supercollisionneur supraconducteur.

### *Thèmes communs*

Dans les trois pays, l'impératif premier de la politique scientifique est la compétitivité de l'économie nationale. Même lorsqu'il s'agit de science fondamentale, les considérations relatives à l'emploi, à la croissance et à la compétition économique internationale ont gagné en importance; les effets de ces préoccupations sautent aux yeux. La politique technologique — telle que la révèlent les objectifs retenus pour les nouveaux matériaux, la diffusion du savoir-faire industriel et les progrès de la biotechnologie — est devenue un élément clé de la planification pour les gouvernements d'Amérique du Nord.

Un autre point commun est l'internationalisation croissante des efforts de recherche : les réseaux mondiaux d'information prennent de l'ampleur; la coopération pour une meilleure intelligence de l'environnement naturel s'intensifie; les négociations et consultations intergouvernementales concernant les droits de propriété intellectuelle et la « science lourde » font l'objet d'une attention croissante;

et les alliances destinées à réduire les coûts dans le domaine de la R-D industrielle se multiplient à l'intérieur de chaque pays, entre les pays, et entre les entreprises nationales et les organismes gouvernementaux. Cette puissante tendance conduit les groupes nationaux axés sur la recherche à une plus large ouverture internationale et les ministères des affaires étrangères et les organismes à vocation internationale à s'investir davantage dans la science et la technologie.

En résumé, les trois pays d'Amérique du Nord voient dans la science et la technologie un facteur de progrès plus essentiel que jamais. En conséquence, les financements progresseront probablement au cours des années 90, dans la mesure où la situation économique le permettra. Dans le même temps, le rôle de la science et de la technologie se modifie face à des exigences sociales et économiques nouvelles, et ce changement ne manquera pas d'influer sur les investissements publics et privés. Les trois pays sont par ailleurs conscients que chaque nation, si elle doit être particulièrement sélective dans le financement des activités scientifiques, doit chercher à la fois à apporter sa contribution à la recherche mondiale et à en tirer parti.

#### *Champ et limites de l'étude*

L'étude qui suit se fonde sur une définition large de la R-D dans l'ensemble des secteurs public et privé. Par manque de place et compte tenu de la répartition des matières dans le présent rapport, la situation particulière des diverses disciplines sera rarement évoquée. L'accent sera plutôt mis sur l'action publique, le financement et les mécanismes institutionnels, et ce n'est que rarement qu'on tentera des comparaisons avec d'autres régions. On ne dispose pas de séries complètes de statistiques strictement comparables pour l'Amérique du Nord dans son ensemble, et il existe des divergences minimales mais persistantes entre les données de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), celles de l'UNESCO et celles des sources nationales ; ces divergences sont sans conséquences pour les besoins de la présente étude. Mais il est devenu clair qu'il faudra renforcer la coopération internationale en vue d'obtenir des données cohérentes et à jour correspondant aux objectifs envisagés dans les Rapports de l'UNESCO. Les techniques originales utilisées par la National Science Foundation dans sa publication biennale *Indicators* et les travaux de l'OCDE visant à définir des normes pour la collecte statistique offrent le modèle de ce vers quoi doit tendre la communauté internationale.

## LE RÔLE DE L'OPINION PUBLIQUE

Dans les milieux de la politique, on entend parfois dire que ce n'est pas la vérité qui importe, mais la façon dont elle est perçue. Si cette affirmation est au moins en partie exacte et si l'on accepte de définir la science comme « l'habitude de la vérité », ce que le public pense de la science et de la technologie — et des scientifiques et ingénieurs — est extrêmement important pour le processus d'élaboration de la décision publique.

#### *L'importance des attitudes collectives*

Les attitudes collectives envers la science sont importantes aussi bien pour les scientifiques et les ingénieurs que pour l'ensemble des citoyens. Les opinions et les perceptions collectives influent sur les décisions des législateurs concernant les budgets de la recherche et de l'éducation et sur celles des fondations et des entreprises privées qui apportent un soutien à la R-D. Plus fondamentalement, ces attitudes ont une incidence sur l'acceptation des technologies nouvelles, gages de richesse et de meilleure santé, mais aussi parfois sources de risque pour les personnes ou l'environnement.

Les États-Unis disposent d'abondantes données d'enquêtes sur l'attitude du public à l'égard de la science et de la technologie, dont certaines remontent aux années 50. Les données recueillies au Canada donnent des résultats similaires à ceux des États-Unis ; en revanche, il y a peu de données d'enquêtes concernant le Mexique.

#### *L'opinion publique des États-Unis est favorable à la science*

L'immense majorité des citoyens des États-Unis estime que « la science est une source de progrès pour le monde ». Lors d'une enquête réalisée en 1957, avant le lancement de Spoutnik par l'URSS, 88 % des sondés se sont déclarés en accord avec cette affirmation. Un sondage fait en 1988 a donné des résultats identiques.

Dans les enquêtes sur la confiance que le public accorde à diverses professions, les scientifiques se situent vers le haut de la hiérarchie. Par ailleurs, quatre Américains sur cinq estiment que les programmes du second cycle secondaire doivent comporter quatre années de mathématiques et de sciences.

L'attitude envers la science et la technologie est sensiblement plus favorable aux États-Unis que dans la plupart des autres pays. Les pays d'Europe se situent derrière les États-

Unis, et le Japon est dans le peloton de queue des pays industrialisés.

*Difficultés à l'horizon*

Cela ne signifie pas que l'horizon soit sans nuages. L'opposition aux applications des technologies nouvelles et aux nouveaux concepts scientifiques remonte à plusieurs siècles. Au XIX<sup>e</sup> siècle, les idées de Charles Darwin se sont heurtées à une forte opposition, et aujourd'hui encore une fraction non négligeable de la population des États-Unis n'accepte pas l'évolution comme un fait scientifique. Ned Ludd, ouvrier anglais qui, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, détruisait les machines à tisser, a donné son nom aux Luddites — terme encore employé pour désigner ceux qui refusent les applications des techniques nouvelles.

Mais il y a aussi de nombreux citoyens réfléchis, y compris parmi les scientifiques, qui s'inquiètent des effets secondaires ou indirects non recherchés qui pourraient accompagner l'application généralisée de nouvelles technologies. Cette préoccupation, s'exprimant au travers du système politique, a conduit à la création, en 1972, de l'Office of Technology Assessment (OTA), rattaché au Congrès des États-Unis. Depuis lors, l'OTA s'est acquis une réputation justement méritée par la publication d'évaluations technologiques approfondies et fiables qui contribuent à la qualité du processus de décision sur un large éventail de questions ayant un lien avec la science et la technologie.

La biotechnologie ne fait que commencer à apporter sa contribution à la santé humaine et à l'économie mondiale.

Elle offre des perspectives considérables pour l'amélioration de la productivité agricole, mais de nombreux citoyens des États-Unis et d'ailleurs ont, pour des raisons d'éthique et de sécurité, des réserves quant à son utilisation dans la production alimentaire. Alors que, comme on l'a noté plus haut, la science et la technologie en général suscitent l'intérêt et le soutien du public, deux tiers seulement des citoyens américains sont favorables à l'application des biotechnologies à la production agricole et alimentaire. Les techniques de modification génétique sont moins bien acceptées pour les animaux que pour les végétaux. Les motivations sont d'ordre affectif, moral et religieux, mais aussi d'ordre économique. Une large part de la population s'inquiète des éventuelles incidences de la biotechnologie sur l'environnement, en particulier des changements qu'elle pourrait provoquer dans l'environnement naturel et des effets négatifs qu'elle pourrait avoir sur les poissons, et sur la flore et la faune en général.

Au Canada, les rapports récents sur la protection de la vie privée et des lignes directrices régissant la divulgation d'informations de caractère personnel révèlent la préoccupation que suscite l'impact de la technologie sur la vie sociale. La Commission royale sur les nouvelles techniques de reproduction doit publier sous peu un rapport qui est l'aboutissement de trois ans de travaux.

De nombreuses enquêtes réalisées aux États-Unis montrent que les personnes s'intéressant à la science et à la technologie et possédant une culture scientifique sont généralement plus favorables que d'autres au financement de la recherche et à la mise en application des technologies nou-

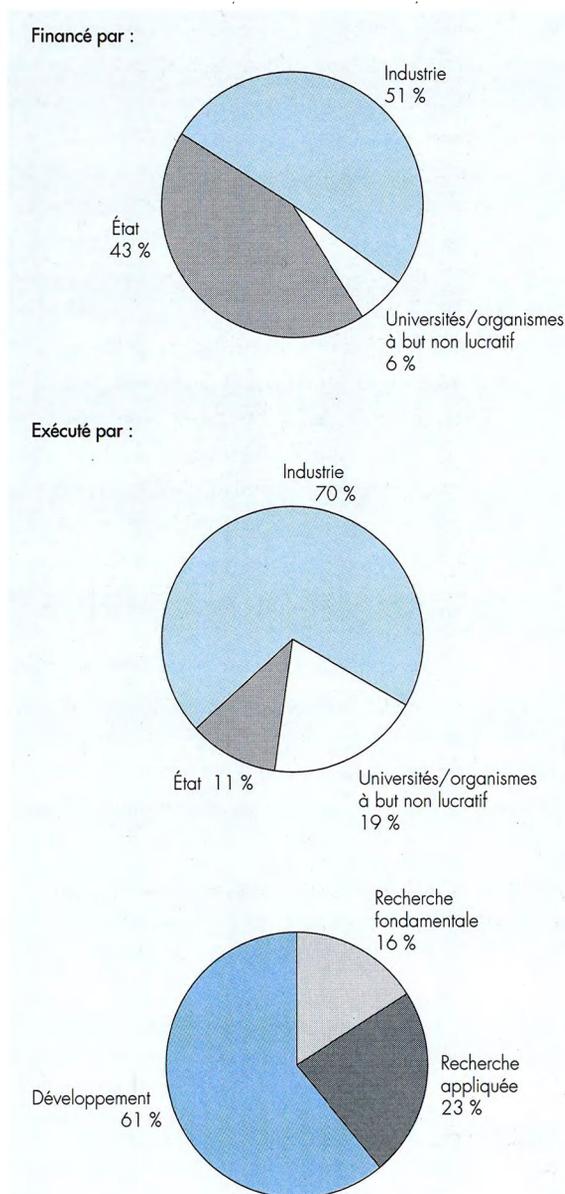
TABLEAU 1  
ÉVALUATION PAR LE PUBLIC AMÉRICAIN DES AVANTAGES (A), DES RISQUES (R), ET DES COÛTS (C) DE LA RECHERCHE ET DE CERTAINES TECHNOLOGIES

Niveau d'éducation	Dans l'ensemble, la recherche est		Risques et avantages du génie génétique		Risques et avantages de l'énergie nucléaire		Avantages et coûts de la recherche spatiale	
	Bénéfique	Nuisible	A>R	R>A	A>R	R>A	A>C	C>A
Inférieur à fin secondaire	47%	20%	42%	31%	41%	36%	35%	47%
Fin secondaire ou début universitaire	74%	13%	45%	41%	46%	45%	42%	49%
Fin premier cycle universitaire	88%	4%	54%	29%	54%	38%	52%	39%

Source : National Science Board, 1991 et Miller, 1992.

FIGURE 1  
EFFORT DE R-D AUX ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE, 1992

Dépense nationale totale : 157 milliards de dollars  
Pourcentage du PIB : 2,8 %



Source : NSF, octobre 1992, NSF 92-230.

velles, ainsi qu'en témoigne le tableau 1. Les citoyens ayant un niveau d'instruction générale élevé, et ayant reçu une formation scientifique en particulier, sont de loin les plus nombreux à estimer que les avantages de la recherche scientifique l'emportent sur les risques potentiels. La marge est moindre lorsque la question porte sur le génie génétique, l'énergie nucléaire et l'exploration spatiale, mais le public instruit demeure sensiblement plus favorable que les autres.

Des considérations morales et religieuses influencent aussi l'attitude des Américains envers la science et la technologie. Aux États-Unis d'Amérique, plus de la moitié des adultes rejettent ou mettent en doute la théorie de l'évolution, et une enquête de 1990 révèle que 45 % des adultes ne sont pas convaincus de la nécessité d'utiliser des animaux comme les chiens ou les chimpanzés dans les recherches de laboratoire.

Ces réactions face à la science et à la technologie soulignent la nécessité de renforcer l'éducation scientifique. En l'absence d'une population ayant un minimum de culture scientifique et d'intérêt pour la science et la technologie, il est bien difficile d'aborder rationnellement les questions complexes qui se posent et d'élaborer des stratégies d'action efficaces pour y répondre.

#### *L'intégrité de l'activité scientifique*

Des soupçons sur la moralité des chercheurs se sont exprimés récemment aux États-Unis. Plusieurs cas de conduite douteuse, portant sur la fabrication ou la falsification de résultats ou sur le plagiat de publications, ont été largement commentés dans la presse et évoqués au Congrès. Des critiques se sont également élevées contre des chercheurs dont la situation était susceptible de susciter des conflits d'intérêts d'ordre financier. Face à ces problèmes, la communauté scientifique s'est attachée à prendre des mesures propres à assurer l'intégrité du processus de recherche. Les universités et organismes publics qui contribuent au soutien ou à la réalisation de recherches financées sur fonds publics ont entrepris d'élaborer des directives, notamment en ce qui concerne les conflits d'intérêts potentiels.

Un autre sujet de préoccupation est la participation d'experts scientifiques aux procédures judiciaires. Il s'agit de savoir si une déposition d'expert de caractère scientifique peut être reçue comme telle lorsqu'elle ne répond pas aux critères de validation normalement applicables aux communications scientifiques. Le risque de voir la « pseudo-science » mise sur un pied d'égalité avec les travaux scienti-

fiques traditionnels est un souci majeur pour nombre de chercheurs et d'institutions scientifiques.

La comparaison des attitudes envers le financement de la recherche selon le degré de culture scientifique montre bien que « ce que l'on pense dépend de ce que l'on sait ». Mais il n'est pas moins vrai que « ce que l'on sait dépend de ce que l'on pense ». L'idée que la motivation influe sur la connaissance n'est certes pas nouvelle. Mais il est cependant intéressant de s'arrêter sur la corrélation que l'on peut observer entre la culture scientifique et l'âge. Dans la plupart des pays, il s'agit d'une relation inverse : les jeunes adultes ont, en moyenne, plus de connaissances scientifiques que leurs aînés. Aux États-Unis, en revanche, c'est la cohorte des 35-44 ans qui apparaît comme la plus cultivée sur le plan scientifique. Elle correspond à la fraction de la population qui a effectué ses études dans la période qui a suivi le lancement de Spoutnik.

## L'INVESTISSEMENT SCIENTIFIQUE

### Dépenses globales de R-D

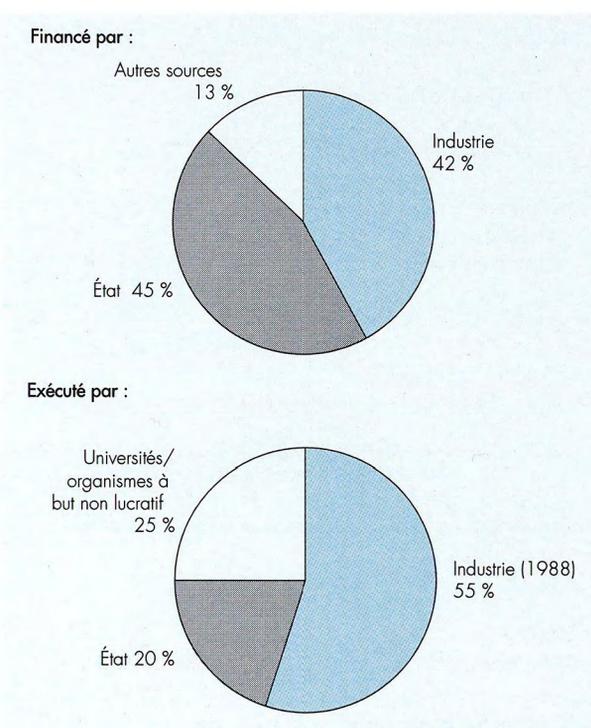
En ce qui concerne les États-Unis, la figure 1 présente une analyse des dépenses globales de R-D, recherche fondamentale comprise, en 1992. En dollars constants, la croissance de ces dépenses sur la période 1985-1992 a été moins élevée (1 % par an environ) que sur la période 1975-1985 (5 à 6 % par an environ, en raison essentiellement de l'expansion de la recherche dans les sciences de la vie et des technologies militaires). Dans les années récentes, les dépenses de R-D industrielle ont peu progressé, alors que les dépenses des universités tendaient à s'accroître. La part du PIB consacré à l'ensemble de la R-D a légèrement fléchi entre 1985 et 1992, passant de 2,8 % à 2,6 %.

Les figures 2 et 3 présentent des données similaires pour le Canada et le Mexique en 1991. Les définitions diffèrent d'un pays à l'autre et l'on ne dispose pas de données similaires pour les mêmes années, ce qui interdit des comparaisons directes à l'échelle de la région. C'est au Mexique que sont intervenus les changements les plus marqués au cours de la période récente : après une baisse au début des années 80, les montants consacrés à l'activité scientifique ont fortement augmenté, les dépenses totales de R-D progressant au rythme de 20 % par an ou davantage à partir de 1988.

Le tableau 2, se fondant sur des données nationales et sur celles de la Banque mondiale et de l'OCDE, propose

FIGURE 2  
EFFORT DE R-D AU CANADA, 1991

Dépense nationale totale : 7,5 milliards de dollars des États-Unis  
Pourcentage du PIB : 1,4 %



Note : dépenses en dollars calculés d'après les parités de pouvoir d'achat.

Source : OCDE, 1992.

une comparaison des trois pays. Les indicateurs présentés mettent en lumière l'intensité relative de la R-D dans les trois pays ainsi que la part prise par l'industrie et l'université, ces données étant éclairées par les chiffres de la population et du PNB. On peut y voir, par exemple, que plus un pays est industrialisé, plus l'intensité de R-D est élevée et plus grande est la part prise par l'industrie privée.

**TABLEAU 2**  
QUELQUES INDICATEURS COMPARATIFS, 1990-1992

	États-Unis d'Amérique (1992)	Canada (1991)	Mexique (1991)
Dépenses totales de R-D (milliards de dollars des États-Unis)	157	8	1
R-D totale en pourcentage du PIB	2,8	1,4	0,4
Pourcentage de la R-D totale financé par l'industrie	51	42	7
exécuté par l'industrie	70	55	nd
Pourcentage de la R-D totale exécuté par les universités et les organismes à but non lucratif	18	25	31
Population (1990) (millions)	250	27	86
PNB par habitant (1990) (milliers de dollars des États-Unis)	21,8	20,5	2,5

Source : National Science Board, 1991 ; Miller, 1992 ; National Science Foundation, 1992 ; OCDE, 1992 ; Banque mondiale, 1992.

**TABLEAU 3**  
QUELQUES DONNÉES SUR LES RESSOURCES HUMAINES

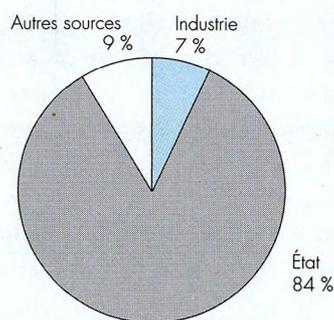
<b>Scientifiques et ingénieurs de R-D</b>	
États-Unis d'Amérique (1989)	950 000
Canada (1988)	63 000
Mexique (1991)	10 000
<b>Scientifiques et ingénieurs de R-D par dizaine de milliers de salariés</b>	
États-Unis d'Amérique (1989)	76
Canada (1988)	46
Mexique (1991)	5
<b>Scientifiques et ingénieurs de R-D par million d'habitants, 1990</b>	
Amérique du Nord	3 360
Amérique latine et Caraïbes	365
Europe	2 210
Afrique	120
Asie	400

Source : NSF 93-330 ; CONACYT, 1992 ; OCDE, 1992 ; *Annuaire statistique de l'UNESCO 1991*, Paris.

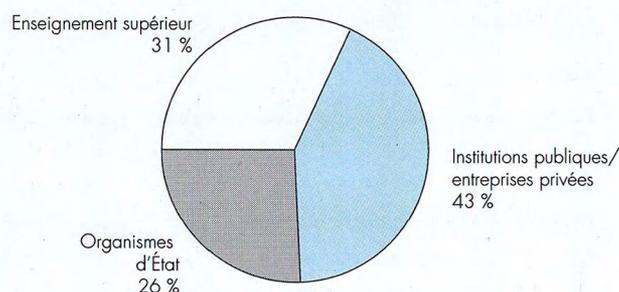
**FIGURE 3**  
EFFORT DE R-D AU MEXIQUE, 1991

Dépense totale du gouvernement fédéral : 1,1 milliard de dollars des États-Unis  
Pourcentage du PIB : 0,4 %

Financé par :



Exécuté par :



Note : des données préliminaires récentes indiquent que les dépenses de R-D de l'industrie ont fortement augmenté entre 1989 et 1992.

Source : CONACYT, 1992.

### Ressources humaines et ONG

Pour aider à apprécier les ressources humaines — facteur essentiel du développement scientifique et économique — le tableau 3 présente des données comparatives sur le nombre de scientifiques et d'ingénieurs et sur les effectifs du personnel de R-D pour 10 000 actifs, éclairées par des données plus globales à l'échelle des régions. Le nombre de Mexicains titulaires d'un diplôme scientifique ou technique a considérablement augmenté entre 1986 et 1991. Avec la multiplication des bourses d'étude, des flux croissants d'étudiants mexicains vont se former aux États-Unis et au

Canada, ce qui contribue à resserrer les liens entre les trois pays de la région.

Les États-Unis continuent d'accueillir un nombre énorme d'étudiants étrangers (400 000 en 1991), en particulier dans les disciplines scientifiques et techniques. En 1990/91, quelque 18 000 Canadiens et 7 000 Mexicains poursuivaient des études aux États-Unis (toutes disciplines confondues). Bien qu'il soit difficile d'obtenir des données globales sur les ressources humaines à orientation scientifique, en Amérique du Nord comme ailleurs, il est clair que les investissements dans l'éducation à tous les niveaux — et dans la diffusion des connaissances résultant de la recherche scientifique et technique — sont indispensables à la croissance de la productivité et de l'activité économique.

Les organisations non gouvernementales sont un puissant facteur de vitalité et de diversité dans les domaines de la science et de l'éducation ainsi que dans les débats sur les problèmes liés à la politique scientifique et technologique. Aux États-Unis surtout, mais aussi de plus en plus dans d'autres pays du monde, ces organisations — qui vont des groupements professionnels aux sociétés savantes — fournissent des réseaux de communication et expriment des avis sur les choix publics dans des domaines comme l'énergie, l'éducation et les principes éthiques qui doivent présider à la recherche.

### *Évolution des apports financiers*

Si les trois pays portent un intérêt croissant à la recherche appliquée, le soutien à la recherche fondamentale demeure plus ou moins constant en termes réels. De même, le financement des activités scientifiques est de plus en plus axé sur des objectifs civils visant à répondre aux préoccupations de la société (énergie, communications, environnement) ou à des préoccupations internationales (marchés de produits de technologie relativement avancée et coopération internationale dans des domaines où la recherche est particulièrement coûteuse, par exemple).

On observe des différences marquées entre les trois pays en ce qui concerne le traitement accordé aux diverses disciplines. Aux États-Unis par exemple, ainsi que le montre le tableau 4, les apports financiers à la biologie et à la médecine ont enregistré une croissance très rapide. Il y a vingt ans, les apports totaux à la physique et aux sciences de l'ingénieur étaient bien supérieurs à ceux dont bénéficiaient les sciences de la vie; aujourd'hui, le volume des ressources allouées à ces deux grands domaines est à peu près identique. Il est à noter que l'explosion des industries de l'infor-

TABLEAU 4  
VENTILATION DES APPORTS FINANCIERS DU GOUVERNEMENT  
DES ÉTATS-UNIS A LA RECHERCHE FONDAMENTALE ET  
APPLIQUÉE PAR GRANDS DOMAINES  
(en milliards de dollars constants 1981)

	1969	1979	1989
Sciences biologiques	3,7	4,9	6,8
Sciences de l'environnement	1,1	1,5	1,7
Mathématiques/informatique	0,3	0,3	0,5
Sciences physiques	2,5	2,3	3,0
Sciences de l'ingénieur	3,4	3,3	3,3
Sciences sociales	0,6	0,7	0,5
Total	11,0	13,0	15,8

Source: NSF, OTA.

mation a été essentiellement financée par le secteur privé, alors que les apports publics aux mathématiques et à l'informatique restaient à peu près stables.

Au Canada et au Mexique, il semble que des évolutions analogues soient en train de se dessiner. Le Mexique s'est particulièrement attaché aux sciences de l'environnement, dont le financement a triplé entre 1987 et 1991. Le Canada, s'appuyant sur ses trois conseils universitaires, a soutenu un ensemble de travaux couvrant la physique, les techniques de l'ingénieur, et les sciences biomédicales et sociales.

### *La R-D militaire aux États-Unis : changement et reconversion*

L'histoire et la situation présente de la recherche militaire sont fort différentes dans les trois pays considérés. Aux États-Unis, celle-ci a absorbé plus de la moitié des apports publics à la R-D pendant de nombreuses années. Si la part de la R-D militaire est en baisse depuis un certain temps et devrait se réduire encore dans les années qui viennent, elle n'en continuera pas moins de représenter une composante importante de la R-D totale de ce pays. Au Canada, la R-D militaire, qui absorbe une part bien moindre (8 % environ) de l'effort total de recherche, a été intégrée à la R-D civile. Au Mexique, le gouvernement ne finance pratiquement aucune recherche de caractère militaire.

Le tableau 5 indique la part de la R-D militaire dans l'ensemble des crédits de R-D inscrits au budget des États-Unis en 1992. Le projet de budget pour 1994 présenté par le président Clinton maintient la tendance à une modéra-

tion des dépenses de R-D militaire, avec une réduction générale comportant une baisse particulièrement marquée des crédits affectés à la recherche fondamentale (5 % environ en dollars constants).

TABLEAU 5  
RÉPARTITION DES DÉPENSES DE R-D DU GOUVERNEMENT  
DES ÉTATS-UNIS, 1992

Fonction	% de la R-D totale	% de la recherche fondamentale
Défense	59	9
Santé	14	41
Espace	10	12
Énergie	4	7
Activités scientifiques générales	4	20
Autres (y compris environnement et agriculture)	9	11

Source : NSF, 1992a.

Le budget du programme spatial a été lui aussi très contesté au cours de l'année 1993, la hausse des coûts et le prolongement du calendrier de construction de la station orbitale ayant suscité de vifs débats à l'échelle nationale et internationale. Ces tensions ont conduit le Département de la défense comme la NASA à réexaminer en profondeur leur stratégie à long terme de recherche-développement. Les résultats de cet examen auront une incidence sur les efforts de recherche fondamentale dans le domaine spatial.

Les décisions qui seront prises dans les domaines de la défense et de l'espace n'auront pas d'impact majeur sur la politique générale des États-Unis en matière scientifique, mais les changements d'orientation qu'elles entraîneront pourraient se traduire par une redistribution marquée des financements, touchant un grand nombre d'acteurs traditionnels de la R-D. Les conséquences de ces réaménagements budgétaires se feront sentir dans tous les laboratoires internes de l'administration fédérale et dans de nombreux laboratoires nationaux administrés directement ou sous contrat par des universités — l'ensemble représentant un budget annuel de plus de 20 milliards de dollars. Ces conséquences toucheront aussi les entreprises de haute technologie dont l'activité est étroitement liée aux programmes militaires, énergétiques et spatiaux.

Depuis plusieurs années, la mission, le budget et les effectifs des « laboratoires d'armement » administrés par le Département de l'énergie — Los Alamos, Livermore et Sandia — font l'objet d'un réexamen à la lumière des nouveaux objectifs de sécurité nationale. Une des solutions envisagées consiste à transformer une partie des programmes de chaque laboratoire en des activités portant sur l'environnement et d'autres problèmes civils, menées en partenariat avec des entreprises industrielles et des administrations locales. Étant donné que chaque laboratoire emploie quelque 8 000 personnes et gère un budget d'un milliard de dollars, ces réorientations sont lourdes de conséquences, notamment sur le plan économique. En fait, les États-Unis vont engager une vaste expérience de transfert de ressources humaines et techniques.

Des comparaisons avec les réorientations intervenues à la fin de la seconde guerre mondiale et avec les changements radicaux qui s'opèrent dans l'ex-URSS et en Europe orientale sont évoquées dans un esprit de profond scepticisme. Certains observateurs doutent que des laboratoires publics, marqués comme ils le sont par une longue histoire, aient une capacité d'adaptation suffisante pour créer de nouvelles incitations et redéployer leur vaste somme de compétences au service de tâches à visée commerciale et/ou civile. Dans le cadre de ce mouvement général, l'Agence des projets de recherche avancée du Département de la défense a lancé en 1993 un nouveau programme d'appels à propositions, pour un montant de 500 millions de dollars, dont le but est de favoriser la conversion des technologies militaires par une attention accrue à la R-D « à double finalité » (c'est-à-dire à des projets visant à satisfaire à la fois des objectifs économiques et de sécurité nationale).

## LA SCIENCE ET LES UNIVERSITÉS

La plupart des pays accordent un soutien à des centres spécifiques de recherche; certains sont autonomes et fonctionnent essentiellement sur fonds publics, tandis que d'autres sont implantés dans des universités et cherchent à compléter les fonds publics par diverses autres sources de financement. Aux États-Unis, les activités relatives à la science fondamentale tendent à se concentrer dans les universités, alors que le Canada et le Mexique ont adopté sur ce point une approche plus diversifiée. On trouvera ci-après les données disponibles sur le financement de la R-D dans les universités.

tés ainsi qu'une réflexion sur diverses questions qui se posent dans ce domaine.

### *Les universités et la recherche aux États-Unis*

Les orientations, le niveau, les priorités et la répartition géographique du soutien public à la recherche scientifique dans les établissements universitaires font actuellement l'objet d'un réexamen approfondi aux États-Unis. La longue tradition du couplage de la recherche et de l'enseignement universitaire s'est traduite par une croissance des montants investis (quelque 19 milliards de dollars pour la R-D en 1992). La R-D universitaire a triplé en volume au cours des trente dernières années, et l'on compte aujourd'hui de 150 à 200 grandes universités faisant de la recherche aux États-Unis, dont deux tiers sont des établissements publics et un tiers des institutions privées, et réalisant 90 % environ de la R-D universitaire.

En 1992, le Conseil consultatif du Président en matière de science et de technologie a étudié les tendances de la recherche universitaire et engagé les autorités fédérales et les universités à adopter une politique plus sélective. Le budget initial présenté par le président Clinton au printemps 1993 continue de privilégier la politique technologique et prévoit une croissance modeste des crédits affectés à la science fondamentale pour toutes les agences fédérales. On trouvera au tableau 6 les propositions budgétaires relatives à la recherche présentées pour chacune de ces agences.

La tendance qui a dominé dans la société américaine pendant une grande partie de l'après-guerre — priorité à la politique scientifique et souci des autorités fédérales de soutenir la recherche dans les universités — n'a pas disparu. Mais il s'opère une réévaluation critique qui tend à réunir en un ensemble élargi la science fondamentale, les sciences appliquées et les diverses filières de la technologie — développement, application, fabrication — dans le contexte global de l'économie nationale. A l'intérieur de ce processus, l'un des critères explicites de financement est la contribution qu'un projet peut apporter à la compétitivité économique.

De ce fait, nombre d'universités au budget déjà serré ont été contraintes de faire des coupes substantielles dans leurs programmes de recherche, et les gestionnaires éprouvent des difficultés croissantes pour en financer les personnels, les équipements et les fournitures. Les partenariats avec l'industrie et les administrations d'État se multiplient, d'une part pour obtenir les fonds nécessaires à la poursuite des recherches, et, d'autre part, pour mettre les résultats de ces dernières au ser-

**TABLEAU 6**  
APPORTS FINANCIERS DU GOUVERNEMENT DES ÉTATS-UNIS  
À LA RECHERCHE FONDAMENTALE DANS LES AGENCES  
FÉDÉRALES ET LES UNIVERSITÉS, PRINTEMPS 1993  
(milliards de dollars)

	1992	1993	1994*
Total recherche fondamentale	12,9	13,5	13,9
Instituts nationaux de la santé (NIH)	5,5	5,7	5,8
National Science Foundation (NSF)	1,7	1,7	2,0
Département de la défense (DOD)	1,1	1,3	1,2
Département de l'énergie (DOE)	1,7	1,7	1,7
Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA)	1,8	1,9	2,0
Département de l'agriculture (USDA)	0,6	0,6	0,6
Autres	0,5	0,6	0,6
Total R-D universitaire	10,9	11,0	11,2

\* Projet de budget

Source : AAAS (avril 1993), plus NSF, OSTP.

vice de la croissance économique. La recherche de moyens pour assurer la modernisation des équipements universitaires, notamment la construction de laboratoires, est une tâche qui se révèle de plus en plus ardue aux États-Unis. On observe une situation similaire au Canada, aggravée par la détermination des provinces à faire reconnaître le rôle que leur donne la constitution dans le domaine éducatif.

### *Évolution des financements dans la région*

On possède peu de données sur les évolutions globales des financements dans les universités des trois pays. Les informations présentées au tableau 7 corroborent les nombreux indices selon lesquels le Mexique est loin derrière le Canada et les États-Unis en ce qui concerne aussi bien la construction des universités que les activités de R-D. On dispose de certaines données sur le Canada qui peuvent être utilisées pour établir des comparaisons avec les États-Unis; elles sont reproduites dans la partie inférieure du tableau 7.

Aux États-Unis, la part des crédits fédéraux dans le financement de la R-D universitaire tend à reculer — de deux tiers environ il y a une dizaine d'années, elle n'est plus que de 57 % en 1992 — alors que les apports de l'industrie, des organisations philanthropiques privées, des États et

TABLEAU 7  
DÉPENSES DE R-D DANS LES UNIVERSITÉS, 1987  
(milliards de dollars des États-Unis constants 1980)

	Dépenses	% de la R-D nationale	% du PIB
Mexique	0,1	20	0,06
Canada	1,4	23	0,32
États-Unis d'Amérique	18,5	14	0,41

	Dépenses de R-D de l'enseignement supérieur (parités de pouvoir d'achat)	
	1986	1991
Canada	1,4	1,9
États-Unis d'Amérique*	16,6	25,3

\*Y compris les centres de R-D financés par le gouvernement fédéral, c'est-à-dire les unités spéciales affiliées à des universités ou administrées par celles-ci.

Source : CONACYT, 1992, d'après l'Observateur de l'OCDE, 164, 1990, et OCDE, 1992.

des fonds autonomes des universités sont en augmentation. Les apports de l'industrie aux universités se sont accrus de 89 % en termes réels entre 1985 et 1992, représentant 7 % en 1992 (1,4 milliard de dollars) du budget total de la R-D universitaire aux États-Unis. Vu les contraintes économiques qui pèsent sur le secteur public dans les pays d'Amérique du Nord, le soutien de l'industrie aux universités et aux centres de recherche indépendants pourrait bien continuer à croître au Canada comme au Mexique. Néanmoins, les apports de l'industrie ne représenteront probablement jamais qu'une part minime des budgets universitaires. La plupart des observateurs estiment que seuls les pouvoirs publics sont à même d'apporter les soutiens indispensables aux sciences fondamentales et l'essentiel des aides aux institutions ayant un cycle de doctorat.

#### Critères de sélection des projets

Aux États-Unis, une grande part de la recherche universitaire est essentiellement financée non par un soutien global aux institutions, mais par un système d'appel à propositions et de sélection sur dossier. Cette forme traditionnelle de compétition entre chercheurs universitaires à l'intérieur d'une même discipline s'est toujours maintenue. Mais la méthode de sélection selon la valeur du projet, dite « examen par les pairs » (*peer review*), commence à être contes-

tée pour diverses raisons. L'une des causes de désaffection est simplement le fait que — vu le nombre de chercheurs et la rareté des ressources — les demandes de subvention déposées par des chercheurs compétents ne sont plus acceptées que dans la proportion d'une pour quatre ou cinq. Il est alors bien compréhensible que les chercheurs se demandent avec anxiété en fonction de quels subtils critères on peut opérer une sélection entre des demandes qui sont toutes de haute qualité.

En outre, les énormes pressions qui s'exercent pour réclamer la déconcentration des capacités de recherche et la modernisation des équipements ont souvent conduit les hommes politiques à souligner la nécessité d'accorder des subventions à des régions ou à des institutions n'ayant reçu jusqu'alors qu'une assistance limitée. Ces appels à une répartition géographique équitable des activités de recherche se font entendre dans les trois pays de la région. Aux États-Unis, les fonds soustraits au système de sélection des projets pour soutenir des régions ou institutions particulières dépassent aujourd'hui largement le milliard de dollars et ont donné naissance à d'amères controverses. Dans les provinces canadiennes comme au Mexique (notamment en dehors de la capitale), des efforts analogues sont déployés pour redistribuer les compétences scientifiques et techniques.

#### Renforcement des capacités

L'expression « renforcement des capacités » désigne habituellement les efforts des pays en développement visant à se doter d'une infrastructure qui leur permette de s'engager dans la recherche scientifique et de diffuser les connaissances techniques de base dans l'ensemble de la population. Mais elle peut aussi s'appliquer aux pays développés.

Aux États-Unis et au Canada, par exemple, les efforts s'intensifient pour réformer l'enseignement des sciences et des mathématiques dans le premier et le deuxième cycles (de la maternelle à la fin du secondaire). Cette initiative se fonde non seulement sur les résultats relativement médiocres des enfants américains dans les comparaisons internationales, mais aussi sur la nécessité de préparer une main-d'œuvre nettement plus qualifiée pour assurer la compétitivité de l'économie au XXI<sup>e</sup> siècle. Au Mexique, l'expression « renforcement des capacités », prise en son sens traditionnel, désigne l'action menée pour donner un élan nouveau à la science et à la technologie et fournir ainsi à l'économie nationale les moyens de se faire une place sur les marchés mondiaux.

En résumé, dans toute l'Amérique du Nord, quel que soit le degré de développement des sociétés, secteur public et secteur privé manifestent une volonté croissante d'assurer l'avenir des capacités scientifiques et techniques nationales.

## L'INTERNATIONALISATION DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE

Science et technologie sont au nombre des activités humaines dont le caractère international est le plus affirmé. Cela est vrai depuis des siècles, les idées ayant le pouvoir de franchir librement les frontières. Mais aujourd'hui, grâce aux réseaux d'ordinateurs, de téléphones et de télécopieurs reliant pratiquement toutes les universités et tous les laboratoires, les contacts internationaux sont presque instantanés. Scientifiques et ingénieurs travaillent aussi facilement avec des collègues de l'étranger qu'avec ceux qui se trouvent dans un bureau voisin à l'intérieur du même laboratoire. Une tendance analogue est perceptible dans l'enseignement scientifique et technique. Les étudiants de tous niveaux, et notamment au stade du doctorat et au-delà, fréquentent l'établissement de leur choix sans tenir compte des frontières nationales. Les universités des États-Unis et, à un moindre degré, du Canada sont les grandes bénéficiaires de ce mouvement. En 1991, les collèges et universités américaines comptaient plus de 100 000 étudiants étrangers suivant un enseignement de second cycle dans les domaines de la science, de la technologie et de la santé. Ils représentaient 28 % des étudiants du second cycle scientifique et 47 % des étudiants préparant un diplôme d'ingénieur.

### *La quête de l'excellence*

La coopération scientifique et technologique à l'échelle mondiale se développe dans un climat d'intense compétition, qu'il s'agisse de la recherche industrielle, de la recherche fondamentale ou de l'enseignement. Elle est de plus en plus alimentée par la quête de l'excellence, dans le but de se porter ou de se maintenir au premier rang dans un domaine hautement concurrentiel.

L'application de ce principe est particulièrement manifeste dans les secteurs de la R-D, des services et de l'éducation. En ce qui concerne la R-D, les alliances entre grandes firmes multinationales ayant leur siège dans des pays différents n'attirent plus guère l'attention de la presse. Les services d'ingénierie fournis à l'étranger par des sociétés américaines et canadiennes sont monnaie courante. Et les recettes

annuelles que les États-Unis retirent de services éducatifs (essentiellement d'étudiants étrangers inscrits dans des universités nationales) atteignent aujourd'hui 5 milliards de dollars, dont une large portion correspond à des études scientifiques et techniques. Dans certaines disciplines en expansion — sciences de l'environnement ou télécommunications —, la formation de coalitions *ad hoc* entre universités et groupes industriels va sans doute s'intensifier avec la croissance accélérée des montants et du nombre de chercheurs mis en jeu.

### *La coopération entre le Canada, les États-Unis et le Mexique*

Il y a des années qu'existe et se développe une coopération informelle entre chercheurs du Mexique, du Canada et des États-Unis. Une grande part de cette coopération échappe aux rapports officiels, mais est aisément perceptible sur les campus et dans les laboratoires des sociétés. Les associations professionnelles comme les sociétés américaines et mexicaines de science physique et d'ingénieurs commencent également à s'y intéresser.

Au niveau gouvernemental, une coopération scientifique et technique extrêmement active s'est instaurée entre des douzaines d'agences des États-Unis et leurs homologues canadiennes. Les projets communs couvrent un éventail allant de la recherche fondamentale à la recherche dans les domaines de l'espace, de la santé, de l'agriculture et de l'énergie. Il convient de signaler en particulier la planification et la réalisation de plusieurs projets de science et technologie « lourdes », parmi lesquels la station spatiale, l'accélérateur KAON de physique nucléaire qui doit être construit en Colombie britannique, le supercollisionneur supraconducteur (en chantier au Texas) et une paire de télescopes de huit mètres qui doivent être mis au point en collaboration avec le Royaume-Uni.

L'accord bilatéral de coopération scientifique et technologique conclu entre les États-Unis et le Mexique a ouvert un vaste cadre d'action, avec une trentaine de programmes engagés en application de mémorandums d'accord signés entre des agences des deux pays. Les domaines prioritaires sont la formation scientifique et technique, les matériaux et la biotechnologie. L'application du génie génétique à la mise au point de végétaux résistant à la sécheresse est l'un des principaux axes de coopération. La création en 1992 d'une fondation binationale indépendante destinée à soutenir les recherches

menées en collaboration laisse bien augurer de l'avenir des relations entre les deux pays en ce domaine.

Les universités du Canada et du Mexique sont désormais connectées au réseau de supercalculateurs des États-Unis; l'expansion de ce réseau est une priorité pour les trois pays. Dans les années à venir, l'Accord de libre échange nord-américain (ALENA) devrait accélérer le processus, déjà bien engagé, d'intégration des activités scientifiques et techniques à l'échelle de la région.

#### Collaboration dans les domaines de la « mégascience »

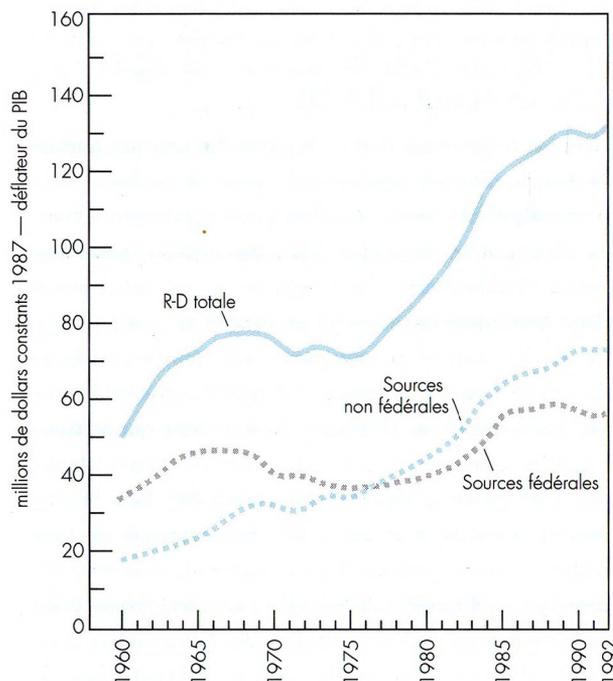
Aujourd'hui, le coût d'un grand nombre de projets de science lourde (« mégascience ») en cours ou envisagés dépasse les capacités de financement d'un seul pays, aussi riche soit-il. Cela est vrai aussi bien des installations construites sur un site unique (accélérateurs de particules, par exemple) que des travaux géographiquement répartis (programmes de recherche sur les changements planétaires (*global change*). Ces deux types de projets se caractérisent par d'énormes besoins en gestion de données et par des besoins financiers encore plus considérables.

Reconnaissant la nécessité d'une collaboration internationale accrue en ce domaine, les États-Unis et le Canada ont milité pour la création d'un Forum mégascience au sein de l'OCDE. Lors d'une réunion tenue en mars 1992, les ministres de la science et de la technologie des pays de l'OCDE ont approuvé cette création à titre prioritaire. Le Forum mégascience de l'OCDE, qui a tenu sa première réunion en juillet de la même année, a une double fonction d'analyse et d'échange. S'il n'a pas vocation à délibérer sur l'affectation des ressources ou sur les décisions politiques requises pour développer l'internationalisation de la science lourde, le Forum a néanmoins un rôle essentiel à jouer en assurant les échanges d'informations sur les plans relatifs aux grands projets scientifiques.

#### LES POLITIQUES SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

La politique scientifique et technologique est la résultante des décisions explicitement prises dans ce domaine, de décisions prises dans d'autres domaines et de décisions budgétaires. Le débat reste ouvert sur le point de savoir si les politiques explicites précèdent ou suivent les décisions d'ordre budgétaire.

FIGURE 4  
SOURCES DE FINANCEMENT DE LA R-D AUX ÉTATS-UNIS



Source : NSF 92-230, octobre 1992.

#### Les États-Unis d'Amérique

Aux États-Unis, les budgets de la R-D fournissent souvent un indicateur clé de l'orientation des politiques. Sur la période qui va de la seconde guerre mondiale à nos jours, l'examen des budgets de R-D éclaire les évolutions des politiques.

Dans le secteur privé, le financement de la R-D a triplé en termes réels entre 1960 et 1990, et a atteint un total de 89 milliards de dollars en 1992. Plus de 90 % de ces ressources sont fournies par les entreprises. Cette croissance soutenue reflète la conviction des chefs d'entreprises que la progression des investissements de R-D est une clé de la réussite sur le marché mondial des produits et services de haute technologie. Il faut sans cesse accélérer pour rester à niveau dans ce domaine. Le léger fléchissement (en termes réels) de la R-D financée par les entreprises en 1990 et

1991 et la reprise à peine supérieure à l'inflation prévue pour 1992 sont inquiétants. Il est encore trop tôt pour savoir s'il s'agit ou non d'une fluctuation temporaire.

La contribution du budget fédéral au financement de la R-D totale depuis 1960 présente un profil moins régulier, comportant quatre phases distinctes perceptibles sur la figure 4. De 1960 à 1968, la croissance est soutenue, alimentée qu'elle est par la course au déploiement des missiles balistiques intercontinentaux et au débarquement sur la Lune. La période 1968-1975 est marquée par une baisse sensible en termes réels, alors que le net redressement observé entre 1975 et 1985 est essentiellement dû au développement des technologies militaires sous le président Reagan et à l'expansion des sciences de la vie. Depuis 1985, la progression du financement public de la R-D est à peine supérieure au taux d'inflation.

Si l'on considère le seul secteur de la recherche fondamentale, presque exclusivement financé sur fonds publics, les évolutions sont plus régulières. A l'exception de la période 1968-1975 (juste après le projet Apollo), où l'on observe un léger fléchissement des apports publics en données corrigées de l'inflation, le financement de la recherche fondamentale a connu une croissance forte et régulière. Une forte part de cette croissance a joué au bénéfice des sciences de la vie, ainsi qu'en témoignent les budgets des Instituts nationaux de la santé (NIH).

Les orientations de la politique gouvernementale que l'on peut déduire de ces évolutions se caractérisent par un soutien constant et vigoureux à la recherche fondamentale et par des variations dans l'appui accordé à la recherche appliquée et au développement induites par des changements dans d'autres domaines de l'action gouvernementale et par des préoccupations concernant la sécurité nationale, l'exploration spatiale et la compétitivité internationale de l'économie.

#### *La politique technologique des États-Unis*

La plus importante des actions publiques récentes concerne non pas la science mais la technologie. En février 1993, le président Clinton a annoncé son « initiative technologique », axée sur trois objectifs fondamentaux : une croissance économique à long terme de nature à créer des emplois et à protéger l'environnement; un gouvernement plus efficace et plus à l'écoute des besoins; et la conquête du *leadership* mondial dans les sciences fondamentales, les mathématiques et la technologie. John H. Gibbons, conseiller du Président pour la science et la technologie, est le

principal responsable de la mise en œuvre de cette initiative.

La décision du président Clinton inaugure une politique visant à promouvoir la technologie en tant que catalyseur de la croissance par les moyens suivants : renforcement des soutiens publics directs au développement, à la commercialisation et à la diffusion des technologies nouvelles; amélioration des incitations à l'innovation par des aménagements du cadre fiscal, commercial et réglementaire, ainsi que du régime des marchés publics; augmentation des crédits pour l'enseignement, l'éducation permanente et la technologie éducative; mise en place rapide d'une infrastructure de communications à grande vitesse (« autoroutes de l'information »); modernisation des infrastructures de transport; et amélioration de l'efficacité gouvernementale dans des domaines tels que les technologies de l'information.

Par contraste, la politique technologique de l'Administration Bush, lancée en septembre 1990, accordait un rôle moins actif aux pouvoirs publics. Elle soulignait que c'était essentiellement au secteur privé qu'il appartenait d'identifier et de mettre en œuvre les technologies exploitables dans des produits et procédés commerciaux et que l'action gouvernementale, si elle pouvait contribuer à établir un environnement favorable, ne pouvait se substituer à l'initiative des entreprises.

L'Administration Clinton a annoncé une augmentation sensible des crédits affectés au soutien de la technologie civile pour les exercices 1994 à 1997. Cette augmentation correspond à l'engagement de l'Administration de faire passer le rapport du budget de la R-D civile à celui de la R-D militaire de 60/40 à 50/50 en cinq ans. Compte tenu des lourdes contraintes auxquelles est soumis le budget fédéral, il est peu probable que le soutien global à la R-D puisse progresser à un rythme supérieur à celui de l'inflation.

#### *La politique technologique du Mexique*

Au Mexique, le soutien accordé à la science et à la technologie est faible par comparaison avec les États-Unis. Le Mexique consacre 0,4 % environ de son PIB à la R-D, contre 2,8 % pour les États-Unis et 1,4 % pour le Canada. Ce pourcentage, qui est à peu près identique à celui qui avait été enregistré en 1980, marque un redressement sensible après la chute qu'avait entraîné l'effondrement des prix pétroliers au début des années 80. C'est le gouvernement fédéral qui assure l'essentiel (84 %) du financement de la R-D.

Comme bien d'autres pays, le Mexique concentre ses ressources sur un certain nombre de technologies critiques,

la biotechnologie notamment, et s'attache à mettre les technologies nouvelles au service de la croissance économique. La plupart de ces technologies sont d'origine étrangère. Cependant, une enquête récente fait apparaître que l'industrie privée prend une part croissante au développement de la R-D (22 % en 1992). Le Mexique prend aussi des mesures pour participer aux grands projets de recherche internationaux, comme le supercollisionneur supraconducteur et ceux qui concernent les changements planétaires et le génome humain.

Le gouvernement fédéral investit dans les ressources humaines, et le nombre de scientifiques et d'ingénieurs est en progression. Le Conseil national de la science et de la technologie (CONACYT) manifeste une vitalité nouvelle, son budget ayant doublé depuis 1989. Conscient de la nécessité d'assurer un suivi plus strict de ses dépenses, le Conseil est en train de mettre au point, avec la collaboration des États-Unis ainsi que de l'OCDE et de l'UNESCO, un système d'indicateurs scientifiques.

#### *La politique technologique du Canada*

Les dépenses de R-D du Canada représentent 5 % environ de celles des États-Unis, les pouvoirs publics et le secteur privé s'en partageant à peu près également la charge. Cette saine répartition des dépenses est rare dans un pays relativement petit, car les entreprises multinationales ont tendance à réaliser leurs activités de R-D dans le pays où elles ont leur siège. Les progrès de la R-D industrielle sont essentiellement imputables à l'action énergique du Gouvernement canadien. Le Canada a pris de généreuses mesures fiscales en faveur de la R-D et les données préliminaires pour 1993 indiquent que les entreprises ont accru leurs dépenses à ce titre alors même que la croissance économique globale s'est ralentie.

L'« initiative de la prospérité » lancée par le Gouvernement canadien a pour but de mobiliser l'ensemble des citoyens en faveur de programmes visant le marché mondial des produits de haute technologie. Dans ce cadre, une étude sur les facteurs de compétitivité, publiée sous le titre *Innover pour l'avenir* à la fin de 1992, mettait l'accent, entre autres, sur la nécessité de renforcer les infrastructures, les capacités et les qualifications des Canadiens dans les domaines scientifiques et techniques.

Au cours de l'année 1992, le Conseil des sciences du Canada a été supprimé et les laboratoires publics ont recherché les moyens de se placer davantage en adéquation avec les forces du marché. Le budget public de R-D, maintenu constant, a été réorienté vers l'infrastructure scientifique et techno-

logique, la santé et les applications spatiales civiles. Le Canada a, en matière de politique industrielle, une tradition plus interventionniste que les États-Unis, et la création récente du Département de l'industrie et des sciences manifeste le souci du gouvernement de cultiver sa capacité d'adaptation.

#### *Les mécanismes consultatifs en matière de science et de technologie*

Cette section traite principalement des politiques de la science et de la technologie et des mécanismes consultatifs en la matière afin que les décideurs puissent s'appuyer sur des avis fiables et pertinents lorsqu'ils élaborent leur politique générale. Dans les trois pays, il existe des mécanismes efficaces pour remplir cette double fonction au plus haut niveau du gouvernement.

Au Mexique, le Président de la République est assisté par un conseiller scientifique et par le Conseil consultatif des sciences (Consejo Consultivo de Ciencias — CCC). Le CCC est composé de scientifiques et d'ingénieurs de renom venant de secteurs et de disciplines variés. Le CONACYT et son directeur jouent aussi un rôle important dans la définition des politiques.

Aux États-Unis, le lancement de Spoutnik par l'URSS a conduit en 1958 à la création d'un poste de Conseiller scientifique et du Comité consultatif des sciences auprès du Président (PSAC). Ce dernier a été supprimé en 1973. De 1981 à 1989, le Conseiller scientifique a été assisté d'un Conseil des sciences de la Maison Blanche. Un décret présidentiel de 1990 a donné naissance au Conseil des conseillers du Président en matière de science et de technologie (PCAST), composé d'hommes de science et d'ingénieurs éminents. Ce Conseil, présidé par D. Allan Broomley, directeur de l'Office de la politique scientifique et technologique sous le président Bush, a eu des rencontres régulières avec le Président et a publié un certain nombre de rapports sur des sujets importants. Le Conseil national des sciences (National Science Board) détermine la politique de la National Science Foundation et exerce une certaine influence sur la politique du gouvernement en la matière.

Au Canada, le Conseil consultatif national des sciences et de la technologie (CCNST), créé en 1987, a pour mission d'assister le Premier Ministre dans le choix des moyens propres à conduire à une pleine exploitation de la science et de la technique au Canada. Présidé par le Premier Ministre lui-même, il réunit des représentants des administrations, des dirigeants d'entreprise, des syndicats et des universités.

## L'ALENA

L'adoption de l'Accord de libre-échange nord-américain (ALENA) ne pourra qu'accélérer l'évolution des relations scientifiques et technologiques entre les trois pays parties. Les questions les plus urgentes concernent les droits de propriété intellectuelle, la R-D industrielle et la coopération dans le cadre de programmes de recherche universitaire. La domination des États-Unis dans ce secteur est source de malaise parmi les ingénieurs mexicains, mais offre par ailleurs plus d'occasions de participer à des projets de recherche qui sont sans équivalents.

Au niveau officiel, des groupes consultatifs mixtes ont été créés entre les États-Unis et le Canada et entre les États-Unis et le Mexique. Ils servent de cadre à des échanges informels entre hauts fonctionnaires sur tout un éventail de questions et pour la définition, l'étude et la stimulation d'activités menées en collaboration. Des groupes consultatifs du PCAST des États-Unis et du CCNST canadien ont également tenu des réunions communes, alors que le CCC mexicain a copatronné en 1991 un important séminaire international sur la science et la technologie et l'accord de libre-échange.

## CONCLUSION

Dans l'ensemble de la région nord-américaine, la recherche scientifique, technique et médicale demeure vigoureuse en dépit des contraintes financières. Ses efforts ont un caractère nettement international — qui se renforce chaque jour davantage — et sont en même temps bien intégrés aux idées nouvelles sur la contribution que la science et la technologie doivent apporter à la réalisation d'objectifs nationaux eux-mêmes en évolution. La détermination d'un dosage optimal entre la concurrence privée, le soutien des pouvoirs publics et la coopération internationale sera au centre des débats sur le rôle de la science et de la technologie en Amérique du Nord dans les années à venir.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur reconnaissance à Jennifer Bond de la National Science Foundation (États-Unis) pour ses avis éclairés sur l'ensemble du texte et son assistance compétente pour les données. Ils tiennent également à adresser leurs remerciements à Jesse Ausubel, Victor Bradley, Paul Dufour, Don Kash, Catherine McMullen, Jaime Martuscelli, Jon Miller, Philip Schambra, Jeff Schweitzer et Michael Stephens pour leurs commentaires sur la version initiale du texte.

**RODNEY W. NICHOLS** est directeur général de la New York Academy of Science, institution créée il y a près de deux siècles. Auparavant, il avait été successivement vice-président et vice-directeur général de l'Université Rockefeller et du programme de chercheurs résidents de la Carnegie Corporation de New York.

Diplômé de l'Université Harvard, M. Nichols a travaillé dans la physique appliquée, l'analyse de systèmes et la gestion de la R-D aussi bien pour des entreprises privées que pour des organismes publics. Il a servi comme consultant auprès de l'Office de la science et de la technologie de la Maison Blanche, des Départements d'État, de la Défense et de l'Énergie, des Instituts nationaux de la santé, de la National Science Foundation et de l'Organisation des Nations Unies. Il a représenté les États-Unis d'Amérique dans les négociations internationales sur le contrôle des armements et à des conférences sur le transfert de technologie, et il a été l'assistant direct de l'ancien président Jimmy Carter pour l'établissement du rapport *Partnership for Global Development* publié par la Carnegie Commission en décembre 1992. M. Nichols a reçu la « Medal for Distinguished and Meritorious Civilian Service » du Secrétariat à la Défense. Il se consacre actuellement à la collaboration internationale dans les domaines de l'énergie, de la santé et des sciences fondamentales.

**J. THOMAS RATCHFORD** est professeur de politique scientifique et technologique internationale à la George Mason University. Parmi les nombreux sujets qu'il aborde dans son enseignement et ses recherches, il accorde une place spéciale à l'interface entre les échanges et la technologie.

M. Ratchford, dont la spécialité est la physique de l'état solide, a enseigné à la Washington University et à la Lee University et a travaillé comme chercheur dans divers laboratoires publics et privés. Il a été par la suite chargé de définir et d'administrer un programme de recherche fondamentale pour l'Office de la recherche scientifique de l'Armée de l'air, avant d'entrer comme administrateur dans les services du Congrès des États-Unis.

M. Ratchford a ultérieurement été nommé directeur associé de l'American Association for the Advancement of Science (AAAS), où il a été appelé aux fonctions de directeur général adjoint et placé à la tête des trois directions de l'éducation et des ressources humaines, des programmes internationaux et des programmes relatifs à la science et à la politique.

Avant son arrivée récente à la George Mason University, il était directeur adjoint chargé des politiques et des affaires internationales à l'Office de la politique scientifique et technologique de la Maison Blanche.

BIBLIOGRAPHIE

- Banque mondiale. 1991. *Rapport sur le développement dans le monde*, Washington, D.C., Banque mondiale, 1991.
- . 1992. *Rapport sur le développement dans le monde*, Washington, D.C., Banque mondiale, 1992.
- Branscomb, L. M. (dir. publ.). 1993. *Empowering technology : implementing a US strategy*, Cambridge, Mass., The MIT Press.
- Carnegie Commission. 1992a. *Science and technology in US international affairs*, New York, Carnegie Commission on Science, Technology, and Government.
- . 1992b. *Enabling the future : linking science and technology to societal goals*, New York, Carnegie Commission on Science, Technology, and Government.
- . 1993a. *Facing toward governments : non-governmental organizations and scientific and technical advice*, New York, Carnegie Commission on Science, Technology, and Government.
- . 1993b. *Science and technology in judicial decision making : creating opportunities and meeting challenges*, New York, Carnegie Commission on Science, Technology, and Government.
- . 1993c. *Science, technology, and government for a changing world*, New York, Carnegie Commission on Science, Technology, and Government.
- Clinton, W. J. et Gore, A. Jr. 1993. *Technology for America's economic growth : a new direction to build economic strength*, Washington, D.C., The White House.
- Comité de l'acquisition et de la diffusion de la technologie. 1992. *L'étalon d'excellence : à égaler, à surpasser*, Ottawa, Conseil consultatif national des sciences et de la technologie.
- CONACYT. 1992. *Indicators, scientific and technological activities : Mexico, 1992*, Mexico, Secrétariat de l'enseignement public (SEP) et Conseil national de la science et de la technologie (CONACYT).
- Conseil des sciences du Canada. 1991. *Prendre les devants : état de la politique scientifique et technologique au Canada*, Ottawa.
- Einsiedel, E. F. 1990. *Scientific literacy : a survey of adult Canadians*, Calgary, University of Calgary Press.
- Hoban, T. J. et Kendall, P. A. 1992. *Consumer attitudes about the use of biotechnology in agriculture and food production*, Raleigh, North Carolina State University Press.
- Huber, P. W. 1993. *Galileo's revenge : junk science in the courtroom*, New York, Basic Books.
- Johnson Foundation. 1992. *Proceedings of the Wingspread Conference on North American higher education cooperation : identifying the agenda*.
- Latouche, D. 1992. *The new continentalism : prospects for regional integration in North America*, Montréal, INRS.
- Leclerc, M. et Dufour, P. International S and T collaboration, dans *Science and Technology in Canada*, Ottawa.
- Martin, B. R. et Irwing, J. Trends in government spending on academic and related research : an international comparison, dans *Science and Public Policy*, 19(5), Guildford (Royaume-Uni), International Science Policy Foundation.
- Miller, J. D. 1992. *The public understanding of science in the United States, 1990*, Washington, D.C., National Science Foundation.
- National Academy of Sciences, National Academy of Engineering, Institute of Medicine. 1992. *Responsible science : ensuring the integrity of the research progress*, Washington, D.C., National Academy Press.
- . 1993. *Science, technology, and the federal government : national goals for a new era*, Washington, D.C., National Academy Press.
- National Science Board. 1989. *Science and engineering indicators - 19*, Washington, D.C., US Government Printing Office. (NSB 89-1.)
- . 1991. *Science and engineering indicators - 1991*, Washington, D.C., US Government Printing Office. (NSB 91-1.)
- NSF. 1992a. *Science and technology pocket data book, 1992*, Washington, D.C., National Science Foundation. (NSF 92-331.)
- . 1992b. *National patterns of R&D resources : 1992*, Washington, D.C., National Science Foundation. (NSF 92-930.)
- . 1993. *Foreign participation in US academic science and engineering : 1991*, Washington, D.C., National Science Foundation. (NSF 93-302.)
- OCDE. 1992. *Principaux indicateurs de la science et de la technologie, 1992*, Paris, Organisation de coopération et de développement économiques.
- Office of Science and Technology Policy. 1990. *US technology policy*, Washington, D.C., US Government Printing Office.
- Office of Technology Assessment. 1991. *Federally funded research : decisions for a decade*, Washington, D.C., US Government Printing Office. (OTA-SET-490.)
- . 1993. *Annual report to the Congress - 20th anniversary edition*, Washington, D.C., Office of Technology Assessment. (OTA-A-554.)
- Porter, M. E. 1991. *Canada at the crossroads : the reality of a new competitive environment*, Canada.
- President's Council of Advisors on Science and Technology. 1992a. *Megaprojects in the sciences*, Washington, D.C., US Government Printing Office.

—. 1992b. *Renewing the promise : research-intensive universities and the nation*, Washington, D.C., US Government Printing Office.

Ministère canadien des approvisionnements et services. 1993. *Statistiques choisies en sciences et technologie, 1992*, Industrie, Science et Technologie, Ministère canadien des approvisionnements et services. (Cat. No. CI-4/1992.)

Task Forces on Challenges in Science, Technology, and Related Skills. 1992. *Prosperity through innovations : summary report*, Ottawa, Conference Board of Canada.

## L'AMÉRIQUE LATINE

*Raimundo Villegas et Guillermo Cardoza*

À la fin de la seconde guerre mondiale, la science n'en était qu'à ses débuts ou au mieux considérée comme une activité humaine incertaine dans la plupart des pays d'Amérique latine. Sur bien des points, la situation est incontestablement différente aujourd'hui, grâce aux efforts nationaux et à la coopération internationale. Mais on constate malheureusement que ces pays, après avoir amélioré leur niveau, ont marqué le pas ou sont parvenus au mieux à maintenir une faible progression. Afin d'atteindre un niveau de progrès scientifique suffisamment élevé pour avoir une incidence sur leur développement, les pays latino-américains doivent réorienter profondément leur politique.

Dans la plupart des pays en développement, la recherche scientifique et les activités qui s'y rattachent n'ont qu'un rôle marginal et un impact limité sur la société et le processus du développement. Dans les pays développés, au contraire, la science est un élément essentiel de l'éducation et de la culture et se trouve étroitement liée, par le biais de ses applications, aux autres aspects de la vie sociale, y compris l'aspect économique.

L'objet du présent chapitre est d'exposer l'évolution et l'état présent de la science en Amérique latine ; on tentera, en guise de conclusion, de poser un regard critique sur les facteurs qui paraissent freiner le progrès scientifique et d'avancer quelques idées sur la façon dont ceux-ci pourraient être neutralisés.

Le mot « science » est ici employé dans son sens le plus large, en y englobant la recherche et les nombreuses activités qui dépendent d'elle. Nous considérons que la recherche (de la recherche fondamentale à l'innovation technologique, en passant par la recherche appliquée et la recherche-développement) est l'élément essentiel de la science. En disant cela, nous voulons souligner que ce sont les nouvelles connaissances scientifiques acquises par la recherche que nous enseignons, diffusons, appliquons et mettons en question jusqu'à ce qu'elles se transforment en un nouveau thème de recherche.

### L'AMÉRIQUE LATINE ET LES PAYS DES CARAÏBES

Le Tiers Monde couvre les deux tiers de la surface terrestre, dont un quart pour l'Amérique latine et les Caraïbes. Il abrite 78 % de la population mondiale, dont 10 % se trouvent dans la région ici étudiée (Banque mondiale, 1991). Les différentes régions du Tiers Monde se caractérisent par une grande hétérogénéité — politique, économique, sociale — trait qui se retrouve au sein de chacune de ces régions.

La région de l'Amérique latine et des Caraïbes est composée de 27 pays, couvre une superficie de 20 millions de kilomètres carrés et compte une population de 421 millions d'habitants, ces deux derniers chiffres correspondant à peu près à ceux des États-Unis et du Canada pris ensemble (Banque mondiale, 1991). Si à première vue la région donne une certaine impression d'homogénéité, des variations d'un pays à l'autre sont perceptibles lorsqu'on examine le développement atteint dans différents domaines.

#### *L'Amérique latine*

L'Amérique latine est habituellement définie comme l'ensemble des 19 pays de langue hispanique et portugaise qui se répartissent du nord au sud de la manière suivante : Mexique, Amérique centrale (Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua et Panama), pays hispanophones des Caraïbes (Cuba et République dominicaine), sous-région andine (Bolivie, Colombie, Équateur, Pérou et Venezuela), Brésil et sous-région du Cône sud (Argentine, Chili, Paraguay et Uruguay). L'Amérique centrale et les îles hispanophones des Caraïbes sont parfois considérées comme une sous-région unique. D'autre part, Haïti, île francophone des Caraïbes, est considérée comme faisant partie des Caraïbes.

Ces pays ont une histoire, une culture, une religion et une langue communes (l'espagnol et le portugais sont des langues voisines), mais c'est au niveau des sous-régions que l'on observe le plus d'homogénéité, à ceci près que, dans les sous-régions comptant trois pays ou davantage, l'un d'entre eux au moins présente des différences marquées par rapport à la moyenne.

### *Les Caraïbes*

Les pays des Caraïbes, au sens courant du terme, sont ceux qui se situent dans les îles de la mer des Caraïbes. Ils sont généralement groupés par langue : pays anglophones (Bahamas, Barbade, Grenade, Jamaïque et Trinité-et-Tobago) ; pays francophone (Haïti) et pays hispanophones (Cuba et République dominicaine). Il est intéressant de noter que certains pays continentaux riverains de la mer des Caraïbes, comme le Mexique, ceux d'Amérique centrale et le Venezuela, se considèrent comme membres de l'Amérique caraïbe continentale, qui comprend aussi la Guyane anglophone et le Suriname, de langue néerlandaise. L'histoire et la langue ont conduit ces pays à s'associer avec la sous-région des Caraïbes, alors qu'ils se situent sur la côte atlantique.

## L'ÉVOLUTION DE LA SCIENCE EN AMÉRIQUE LATINE

### *De la période précolombienne à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle*

Avant l'arrivée de Christophe Colomb en Amérique, les civilisations aztèque, maya et inca avaient atteint un certain niveau de développement dans divers domaines du savoir, comme les mathématiques, l'astronomie, l'agriculture et la médecine — connaissances empiriques et spéculatives que les autochtones étaient capables de transmettre aussi bien par oral que par écrit (Sagasti, 1978). Mais la création scientifique, c'est-à-dire la science telle qu'elle est aujourd'hui conçue dans les pays développés occidentaux, n'a fait son apparition dans la région que bien après Colomb et les conquistadors espagnols et portugais, ne serait-ce que parce qu'elle était encore une activité naissante en Europe à la fin du XV<sup>e</sup> siècle.

Christophe Colomb a touché l'île d'Hispaniola (aujourd'hui partagée entre Haïti et la République dominicaine) dans la mer des Caraïbes en 1492 et la Tierra de Gracia (le Venezuela d'aujourd'hui) sur le continent américain en 1498. En Europe, la science a commencé à prendre un caractère institutionnel plus d'un siècle plus tard, avec la création des premières académies scientifiques (Accademia dei Lincei, Rome, 1603 ; Accademia del Cimento, Florence, 1657 ; Royal Society, Londres, 1660 ; Académie des sciences, Paris, 1666). Du dernier tiers du XVI<sup>e</sup> siècle à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle, l'histoire de l'Espagne et du Portugal a été

marquée par la Contre-Réforme, l'élimination de la communauté juive espagnole et la colonisation de l'Amérique latine (López-Piñero, 1969). Ces faits ont eu deux séries de conséquences : d'une part, l'isolement intellectuel de l'Espagne et de ses colonies — au point que, sous le règne de Philippe II, il était interdit aux Espagnols d'étudier ou d'enseigner à l'étranger —, et, d'autre part, le fait que la science pure a été négligée au profit des questions pratiques et des connaissances appliquées. Paradoxalement, cette obsession pragmatique n'a pas conduit à une valorisation du travail manuel (Sagasti, 1978), si important pour le progrès du savoir expérimental et de l'activité humaine en général. Ces divers facteurs ont empêché l'Espagne de prendre part à l'émergence de la science moderne dont l'Europe a été le théâtre au cours du XVII<sup>e</sup> siècle.

L'Espagne a connu une renaissance scientifique notable mais éphémère sous le règne de Charles III. C'est au cours de cette période des Lumières que se sont diffusées dans l'Amérique latine coloniale, essentiellement par le biais des universités, les idées philosophiques qui avaient cours en Europe ainsi que de nouvelles perspectives scientifiques pour l'enseignement de la médecine, de la botanique et des sciences physiques (Steger, 1974). Si la création scientifique n'a jamais joué de rôle important pendant la période de formation de l'Amérique latine, il y eut cependant certaines activités de science appliquée, comme des expéditions menées pour étudier la nature ou les tentatives faites pour acclimater certains végétaux ou animaux d'origine européenne (Roche, 1976).

Le XVIII<sup>e</sup> siècle a été celui de la fin de la période dite coloniale pour la plupart des pays d'Amérique latine. L'ère de l'indépendance politique a commencé au début du XIX<sup>e</sup> siècle et a été suivie par une longue période de consolidation des nouveaux gouvernements nationaux autonomes.

Pendant les quatre siècles qui ont suivi le débarquement de Christophe Colomb — de la fin du XV<sup>e</sup> siècle à la fin du XIX<sup>e</sup> —, l'Amérique latine a accueilli des naturalistes, des explorateurs et des observateurs de la nature qui ont alimenté un intérêt croissant pour la science. A titre d'exemple, on peut citer, au XVI<sup>e</sup> siècle, Francisco Hernández au Mexique et, au XVIII<sup>e</sup> siècle et au début du suivant, Charles Marie de La Condamine, Louis Godin et Pierre Bouguer en Équateur, Hipólito Ruíz et José Antonio Pavón dans des territoires aujourd'hui partagés entre le Chili et le Pérou, José Celestino Mutis, qui a dirigé une expédition botanique en Colombie, accompagné de Francisco José Caldas, de

Jorge Tadeo Lozano et de Francisco Zea en Colombie, et Alexander von Humboldt, qui a parcouru le Venezuela, la Colombie, l'Équateur et le Pérou. Ces travaux ont été poursuivis au XIX<sup>e</sup> siècle par des hommes de science éminents comme Agustin Codazzi au Venezuela, Francisco Javier Muñiz en Argentine, et Charles Darwin, qui s'est rendu au Brésil, au Chili, au Pérou et jusqu'aux îles Galapagos en Équateur. Il convient aussi de mentionner des chercheurs en médecine comme José Hipólito Unanue et Daniel A. Carrión au Pérou, José María Vargas et Luis Daniel Beaupertuy au Venezuela, et Carlos Finlay à Cuba. Certains estiment que ces hommes sont à l'origine de la tradition scientifique en Amérique latine (Weinberg, 1978). D'autres voient en eux des cas isolés. Quoi qu'il en soit, ils représentent, avec un certain nombre d'autres, un élément important du passé scientifique de la région.

#### *Les débuts de la recherche scientifique professionnelle*

Aux noms qui viennent d'être mentionnés, il conviendrait d'ajouter ceux d'hommes de science du début du XX<sup>e</sup> siècle et des années suivantes. On pourrait citer, par exemple, Bernardo Houssay, Eduardo De Robertis et Luis Leloir en Argentine, Oswaldo Cruz et Carlos Chagas au Brésil, Eduardo Cruz-Coke au Chili, Arturo Rosenblueth au Mexique, Pio del Rio Horta et Clemente Estable en Uruguay, Carlos Monge au Pérou, et Augusto Pi-Suñer et Francisco De Venanzi au Venezuela. Il est intéressant de noter que tous ces chercheurs étaient des biologistes ou des médecins. La plupart d'entre eux étaient nés en Amérique latine, certains étaient fils d'émigrants et deux étaient originaires d'Espagne. C'est à ces hommes et aux nombreux autres qui les entouraient que revient le mérite d'avoir commencé à structurer la recherche scientifique ainsi que l'enseignement et la pratique des sciences dans les pays latino-américains, en fixant des normes d'admission et d'exercice pour les diverses disciplines.

Qu'il y ait des liens entre l'Amérique latine et l'Europe n'a pas de quoi surprendre, mais il est à noter que les progrès des diverses sous-régions au cours de ce siècle semblent directement liés à des flux migratoires en provenance de divers pays européens. C'est ainsi que le développement scientifique relativement précoce des pays du Cône sud, notamment l'Argentine, le Chili et l'Uruguay, paraît être la conséquence de l'immigration de scientifiques originaires de pays européens bien précis. De même, les progrès plus récents du Mexique et du Venezuela peuvent être mis en

relation avec l'arrivée de scientifiques venus d'Espagne et d'autres pays européens.

Mais pour que les activités scientifiques s'épanouissent, il faut que d'autres conditions soient remplies, par exemple la présence d'une communauté de chercheurs et d'étudiants capable d'offrir un terrain d'accueil aux immigrants. Il faut en outre que le niveau de bien-être économique soit suffisant pour permettre l'acquisition des équipements et fournitures requis. C'est dans les universités et les centres de recherche que ces conditions sont habituellement réunies. L'étape suivante consiste à assurer la formation de ressortissants du pays. La très grande majorité des groupes de recherche a été fondé par des Latino-Américains qui avaient accompli les derniers cycles de leurs études universitaires à l'étranger ou reçu une formation avancée, généralement hors de la région.

La création de groupes de recherche scientifique dans certains départements ou établissements universitaires de plusieurs pays latino-américains a eu pour premier effet d'améliorer la qualité de l'enseignement et de la pratique professionnelle dans un certain nombre de disciplines comme la médecine, l'agronomie, la médecine vétérinaire et les sciences de l'ingénieur. Ce n'est qu'ultérieurement qu'ont été créés des facultés des sciences et des centres de recherche où les sciences fondamentales et certains aspects des sciences appliquées ont pu se développer.

Il est intéressant de noter que dans la plupart des pays d'Amérique latine, c'est la biologie, en tant que science pure et appliquée (médecine, agronomie, écologie), qui a toujours été en tête des activités de recherche. Viennent ensuite, en général, les techniques, notamment celles qui sont directement liées à l'existence humaine (construction, génie sanitaire), suivies par des disciplines complexes en rapport avec les sciences fondamentales (chimie, physique et mathématiques) ou le développement industriel (génie chimique, mécanique, électronique).

Au milieu de ce siècle, la plupart des pays d'Amérique latine (mais pas tous, malheureusement) avaient atteint un certain niveau de développement scientifique. Il y avait des unités de recherche universitaires et des centres de recherche rattachés à l'État ou à des services publics et communautaires, ainsi que quelques unités de recherche-développement liées à l'industrie.

Dans certains pays, il existait des académies nationales, généralement dénommées académies des sciences exactes, physiques et naturelles, créées et financées par l'État et

comptant un nombre limité de membres perpétuels (une trentaine ou une quarantaine).

Des sociétés scientifiques ouvertes ou des sociétés privées créées par des amis de la science existaient déjà ou étaient en cours de création dans les différents pays. Celles d'entre elles ayant pour objet le progrès des sciences ont joué un rôle essentiel. Dans de nombreux pays, elles ont servi à faire connaître les normes fondamentales à respecter dans la pratique scientifique.

#### *La structuration des systèmes scientifiques*

C'est peu après la seconde guerre mondiale qu'ont vu le jour l'Organisation des Nations Unies (ONU) et son institution spécialisée responsable des activités scientifiques, l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO). L'un des buts premiers de l'UNESCO était de promouvoir et de faciliter le développement scientifique des pays en développement par l'étude de leur situation scientifique et l'élaboration de propositions concernant les politiques et les actions à mener.

Conseils nationaux de la recherche. La création de conseils nationaux pour la promotion et le soutien des activités scientifiques fut l'un des événements majeurs qui devait apporter une contribution importante au progrès des sciences en Amérique latine. Ces conseils, dont l'idée avait été préconisée par l'UNESCO (Behrman, 1979), étaient composés de représentants des gouvernements, des institutions de recherche publiques et privées, des universités, des milieux industriels, des hommes de science et des utilisateurs des savoir-faire et des connaissances (Comisión Preparatoria, 1965; Roche, 1992). Ils portaient généralement la dénomination de « conseil national de la recherche scientifique et technologique » et étaient la plupart du temps rattachés à des organismes très proches du chef de l'État, le plus souvent décentralisés (c'est-à-dire séparés de l'administration centrale) de façon à souligner leur autonomie et leur caractère technique. Ils recevaient des crédits pour financer des projets de recherche et des projets éducatifs. L'un des programmes récents mis en œuvre avec succès par ces conseils est celui de la carrière de chercheur (ou programme de promotion des chercheurs), qui répond à un double objectif : promouvoir la reconnaissance de ce type d'activité et renforcer l'enracinement des chercheurs dans leur propre pays.

Bien que ce processus ait conduit à une certaine institutionnalisation des activités scientifiques dans la région, on

ne peut encore dire que la science a pleinement acquis sa « légitimité sociale ». L'activité scientifique demeure encore marginale et les pays d'Amérique latine doivent poursuivre leurs efforts pour renforcer l'assise d'une culture scientifique authentique et sensibiliser la population au rôle de la science dans le développement.

Centres et réseaux régionaux. Un autre axe important de l'action de l'UNESCO dans la région a consisté à y promouvoir l'intégration scientifique par la création, en concertation avec les gouvernements de plusieurs pays, de centres régionaux ayant pour mission de favoriser les rencontres entre les scientifiques à l'occasion de colloques, de journées d'étude et de cycles de formation. On peut citer comme exemple le Centre latino-américain de physique (CLAF), le Centre latino-américain des sciences biologiques (CLAB), le Centre international d'écologie tropicale (CIET) et le Centre international de coopération scientifique Simon Bolivar (CICCSB). Le premier a son siège au Brésil, les autres au Venezuela.

Le Réseau latino-américain de sciences biologiques (RELAB), qui fait partie du Réseau international pour la bioscience (RIB), a été créé il y a moins de vingt ans par l'UNESCO, le Conseil international des unions scientifiques (CIUS) et l'Organisation des États américains (OEA), avec l'appui du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD). Ce réseau scientifique a permis d'établir des liens entre un grand nombre de chercheurs et de promouvoir l'organisation de programmes de recherche binationaux ou multinationaux. Récemment, le Réseau latino-américain de biotechnologie a été constitué dans le même esprit, sous les auspices du PNUD, de l'UNESCO et de l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI).

Des centres de recherche à vocation internationale ont également été créés pour encourager les travaux dans des domaines vitaux pour la région, comme l'agriculture : le Centre international d'agriculture tropicale (CIAT) en Colombie, le Centre international de la pomme de terre (CIP) au Pérou, l'Institut de recherche et de technologie industrielles pour l'Amérique centrale (ICAITI) au Guatemala et l'Institut interaméricain des sciences agricoles (IICA) au Costa Rica.

Programmes régionaux de science et technologie. Outre ces centres scientifiques, des programmes de recherche scientifique et technologique ont été mis en place dans diverses

organisations régionales et sous-régionales. Il y a une vingtaine d'années, le programme de l'OEA a joué un rôle très important en tant que support de la coopération Nord-Sud entre les États-Unis d'Amérique et les pays d'Amérique latine.

Comme exemple de programme sous-régional, on peut mentionner la Convention Andres Bello entre les pays andins, dont le Secrétariat exécutif (SECAB) est en Colombie. L'un des objectifs de cette convention est de promouvoir le développement et l'intégration scientifique au niveau de la sous-région. Compte tenu de l'importance de la science pour l'amélioration de l'éducation et de la qualité de vie ainsi que pour la modernisation des pays andins, ce programme devrait jouer un très grand rôle dans les années à venir.

Parmi les programmes en cours, le Programme Bolivar, dispositif régional lancé sous le patronage du Venezuela avec l'appui de la Banque interaméricaine de développement (BID), s'emploie à rapprocher les centres de recherche des entreprises industrielles dans différents pays de la région.

Ministères, secrétariats et offices de la science et de la technologie. La mise en place récente, dans plusieurs pays, de programmes scientifiques et technologiques liés à divers domaines d'intervention de l'État a conduit à la création d'organismes gouvernementaux (ministères, secrétariats ou offices) chargés de superviser le lancement de ces activités et d'assumer, dans certains cas, une fonction de planification et de coordination horizontales par-delà les liens que les chercheurs ou institutions de recherche peuvent avoir avec un secteur déterminé, qu'il s'agisse de l'éducation, de la santé, de l'agriculture, de l'environnement, des ressources naturelles ou de l'énergie. Ces organismes ont dans certains cas rempli avec efficacité leurs fonctions de liaison et de promotion.

Organisations non gouvernementales (ONG). Depuis quelques années, ces organisations ont assumé un rôle important dans la promotion de la science et des tâches liées à la recherche dans les pays de la région. Certaines d'entre elles ont apporté une contribution importante à des activités de recherche dans plusieurs pays.

L'Académie des sciences de l'Amérique latine. Fondée il y a une dizaine d'années par un groupe de scientifiques dans le but de promouvoir le développement des sciences dans une perspective d'intégration régionale, l'Académie des sciences

de l'Amérique latine (ACAL) est une organisation non gouvernementale privée. Ses membres sont élus par cooptation, sur la base de leurs travaux scientifiques, sans discrimination aucune. L'Académie a un programme de coopération régionale dont les principales activités sont l'information et les échanges scientifiques, la coopération avec les centres régionaux et la promotion de différents réseaux. Le Programme régional de l'ACAL est une entreprise commune de la Fondation Simon Bolivar pour l'ACAL (FSB-ACAL), du Comité sur la science et la technique dans les pays en développement (COSTED) du CIUS, de l'UNESCO et de l'Académie des sciences du Tiers Monde (Twas).

## LA SITUATION ACTUELLE DE LA SCIENCE EN AMÉRIQUE LATINE

Le panorama de la science en Amérique latine présenté ci-dessous s'appuie sur les informations que l'ACAL a recueillies dans ses bases de données (Cardoza et Azuaje, 1992; Villegas et Cardoza, 1987, 1991 et sous presse) ou, à défaut, sur les données tirées des sources indiquées dans les tableaux et figures. Le plus souvent, les données sont présentées par sous-régions et pour chacun des dix pays ayant produit le plus grand nombre de publications scientifiques pendant l'année 1991.

Le tableau 1 présente des données sur les ressources humaines, les dépenses et les publications scientifiques pour chaque pays et sous-région d'Amérique latine. Ces données ont servi à calculer les valeurs représentées dans la plupart des figures de cet article. La réflexion sur la signification possible des données observées prend en compte la population, le niveau d'éducation et l'activité économique de chaque pays et sous-région.

### *Ressources humaines*

Les figures 1 et 2 montrent les ressources humaines affectées à la recherche respectivement dans les sous-régions et dans chacun des dix pays d'Amérique latine ayant produit le plus grand nombre de publications scientifiques pendant l'année 1991. Le nombre total de chercheurs des dix-neuf pays de langue espagnole et portugaise enregistré dans la base de données de l'ACAL est de 142 904.

La figure 1 fait apparaître que les sous-régions du Brésil, du Cône sud et des Caraïbes comptent plus de 400 chercheurs par million d'habitants, alors que dans les sous-régions du Mexique, des Andes et d'Amérique cen-

TABLEAU 1  
 LA SCIENCE EN AMÉRIQUE LATINE

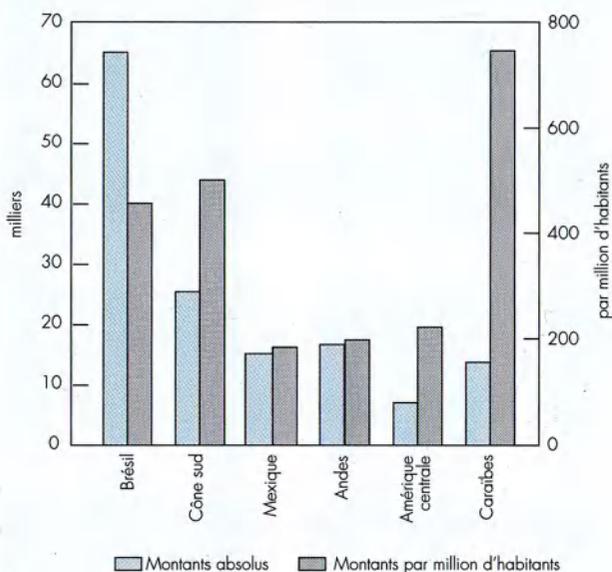
Pays/ Sous-région	Personnel de R-D	Dépenses de R-D (1991)		Publications scientifiques		Publications scientifiques rédigées en collaboration	
		Dollars E.-U. (millions)	% PIB	Total (1991)	par million d'habitants	régionale	internationale
Mexique	14 909 (1984)	961,0	0,35 (1991)	1 608	19,3	63	774
Costa Rica	1 453 (1989)	42,9	0,89 (1989)	108	38,5	10	102
El Salvador	142 (1989)			3	0,6	2	5
Guatemala	2 021 (1990)	12,3	0,10 (1990)	75	8,9	0	38
Honduras	703 (1990)	4,2	0,04 (1990)	18	3,9	2	65
Nicaragua	725 (1987)	10,0	0,37 (1985)	22	6,2	5	12
Panama	850 (1990)	20,7	0,41 (1990)	81	36,8	18	92
<b>Amér. centrale</b>	<b>5 894</b>	<b>90,1</b>		<b>307</b>		<b>37</b>	<b>314</b>
Cuba	12 052 (1989)	171,2	0,85 (1990)	155	15,3	10	95
Rép. dominicaine	500 (1990)			25	3,7	10	29
<b>Caraïbes</b>	<b>12 552</b>	<b>171,2</b>		<b>180</b>		<b>20</b>	<b>124</b>
Bolivie	890 (1986)			33	4,9	9	41
Colombie	4 449 (1990)	68,8	2,20 (1987)	196	6,5	98	201
Équateur	760 (1984)	11,4	0,11 (1989)	61	6,1	7	46
Pérou	4 858 (1981)	106,1	0,23 (1987)	176	8,5	18	156
Venezuela	5 457 (1990)	200,0	0,45 (1990)	494	27,1	61	215
<b>Andes</b>	<b>16 594</b>	<b>386,3</b>		<b>960</b>		<b>193</b>	<b>659</b>
<b>Brésil</b>	<b>65 000 (1990)</b>	<b>3 179,0</b>	<b>0,89 (1990)</b>	<b>3 735</b>	<b>26,4</b>	<b>148</b>	<b>1 424</b>
Argentine	19 000 (1988)	466,0	0,80 (1992)	1 934	62,1	117	644
Chili	4 009 (1987)	90,6	0,46 (1988)	1 151	92,0	90	566
Paraguay	807 (1981)	1,5	0,03 (1990)	38	9,5	1	4
Uruguay	2 093 (1990)	18,0	0,20 (1987)	96	32,0	15	36
<b>Cône sud</b>	<b>25 909</b>	<b>576,1</b>		<b>3 219</b>		<b>223</b>	<b>1 250</b>

Source : Académie des sciences d'Amérique latine (ACAL).

trale, le rapport correspondant est voisin de 200 par million d'habitants. Comme on le voit à la figure 2, il est également possible de répartir les pays en deux groupes : le premier est constitué du Brésil, de l'Argentine, de Cuba, du Costa Rica et de l'Uruguay, le second du Mexique, du Chili, du Venezuela, de la Colombie et du Pérou. Bien que les données aient été fournies à l'ACAL sur la base d'un questionnaire standard, on ne peut complètement exclure que les chiffres aient été influencés par des différences

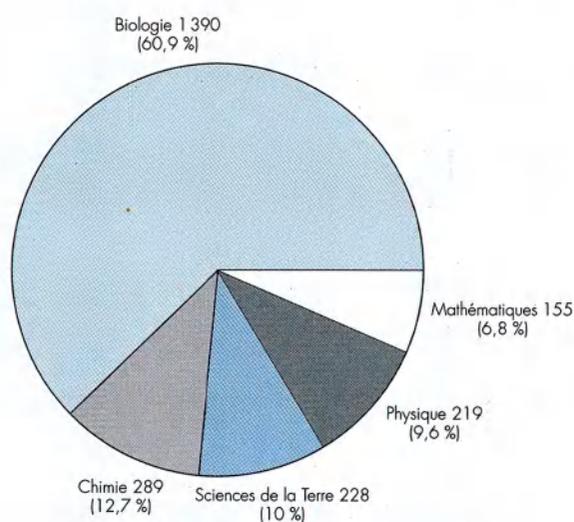
d'interprétation concernant la définition de catégories professionnelles comme celles de chercheur, de professionnel associé ou d'assistant, de technicien ou d'auxiliaire. Nous considérons néanmoins que les résultats révèlent les efforts relativement importants déployés par des pays tels que l'Argentine, Cuba, le Costa Rica et l'Uruguay pour stimuler les activités scientifiques.

FIGURE 1  
PERSONNEL DE R-D PAR SOUS-RÉGION, 1991



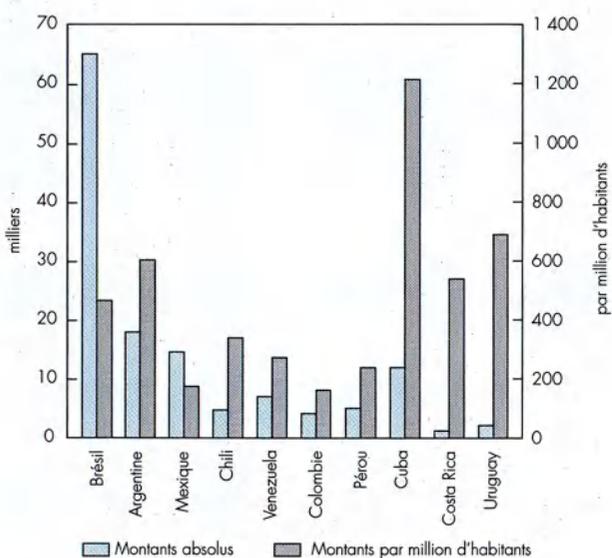
Source : ACAL, 1990-1992.

FIGURE 3  
UNITÉS DE RECHERCHE PAR DISCIPLINE



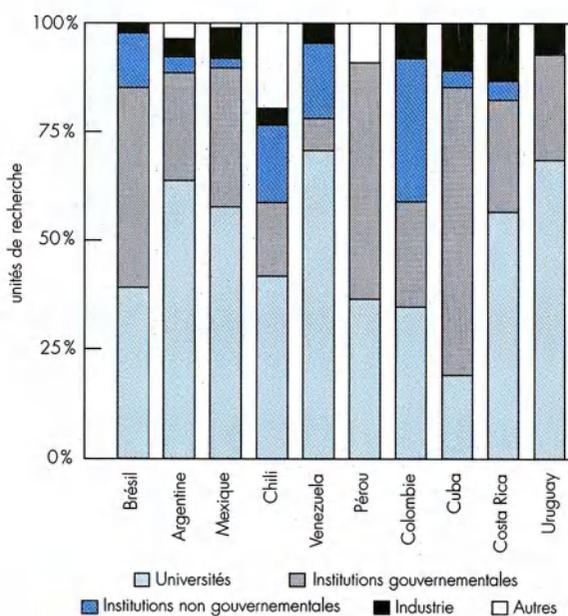
Source : ACAL, 1990-1992.

FIGURE 2  
PERSONNEL DE R-D, 1991



Source : ACAL, 1990-1992.

FIGURE 4  
RÉPARTITION DES UNITÉS DE RECHERCHE



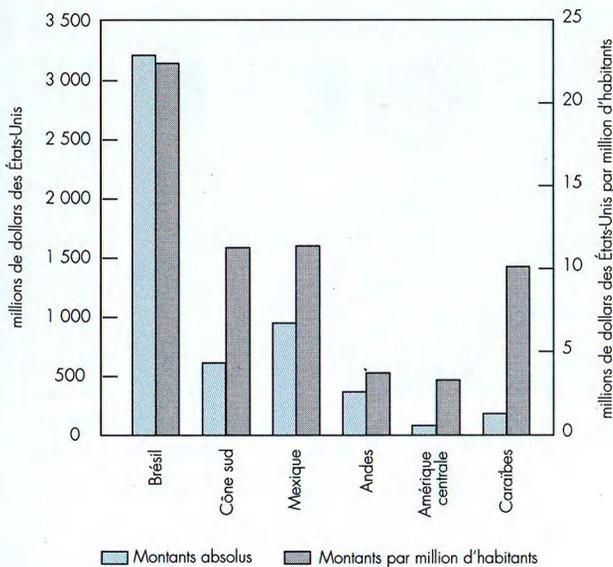
Source : ACAL, 1990-1992.

*Centres de recherche*

La figure 3 indique la répartition par discipline des 2 280 centres ou unités de recherche des dix-neuf pays de langue espagnole et portugaise recensés dans la base de données de l'ACAL. Elle montre ainsi que 60,9 % de ces centres sont spécialisés dans les sciences de la vie, y compris la médecine fondamentale et appliquée, l'agronomie, les sciences de l'environnement et la biotechnologie. Les 39,1 % restants se répartissent à peu près également entre la chimie, les sciences de la Terre, la physique et les mathématiques. Cette prédominance des sciences de la vie en Amérique latine est généralement mise en relation avec l'existence de graves problèmes de santé humaine, de nutrition et de production agricole. Depuis peu, les activités liées à la préservation de l'environnement et à l'exploitation rationnelle des ressources naturelles ont aussi gagné en importance.

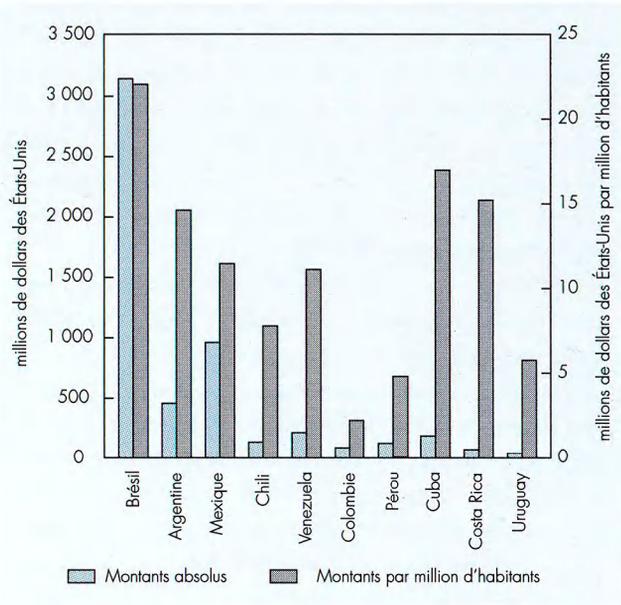
La figure 4 montre la proportion de centres de recherche se rattachant à l'université, à des organisations de recherche gouvernementales et non gouvernementales et à l'industrie dans les dix pays retenus en raison du nombre de leurs publications scientifiques en 1991. On notera qu'en Argen-

FIGURE 5  
DÉPENSES DE R-D PAR SOUS-RÉGION, 1991



Source : ACAL, 1990-1992.

FIGURE 6  
DÉPENSES DE R-D, 1991



Source : ACAL, 1990-1992.

tine, au Mexique, au Venezuela, au Costa Rica et en Uruguay, ce sont les universités qui abritent le plus fort pourcentage d'unités de recherche, alors qu'au Brésil, au Pérou et à Cuba, ce sont les organisations publiques non universitaires qui jouent le premier rôle. Au Chili et en Colombie, les centres de recherche se répartissent également entre les universités, les institutions gouvernementales et les organisations non gouvernementales. Il convient de noter que les liens avec des ONG sont spécialement importants au Brésil, au Chili, au Venezuela et en Colombie; dans ce dernier pays, 29,2 % des centres de recherche sont associés à des organisations de ce type.

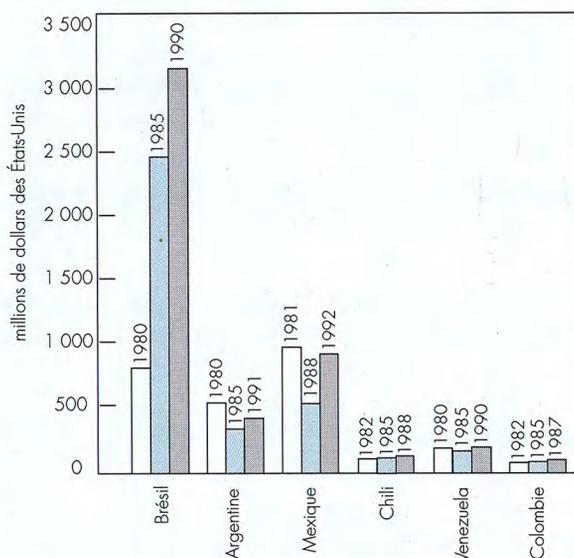
Par ailleurs, il faut souligner les liens relativement faibles entre la recherche et l'industrie. Dans la plupart des dix pays ayant une production scientifique élevée, moins de 10 % des centres de recherche se situent dans le secteur industriel; la Colombie, le Costa Rica et l'Uruguay font exception, le pourcentage le plus élevé (15,8 %) étant enregistré au Costa Rica. L'un des plus grands défis pour la science (au sens large du terme) dans les pays d'Amérique latine est le développement de capacités internes de recherche au sein des entreprises (Saldaña, 1992).

### Dépenses

Selon la Banque interaméricaine de développement (BID), la science, généralement mesurée par les dépenses de R-D, absorbe chaque année de 0,3 à 0,7 % du produit intérieur brut des pays d'Amérique latine (GRADE, 1991). Ces pourcentages sont certainement des indicateurs importants de l'intérêt et des efforts de chaque pays en ce domaine. Il convient cependant de souligner que la façon dont chaque pays classifie ses propres dépenses de recherche influe sur le calcul du pourcentage du PIB affecté à la R-D.

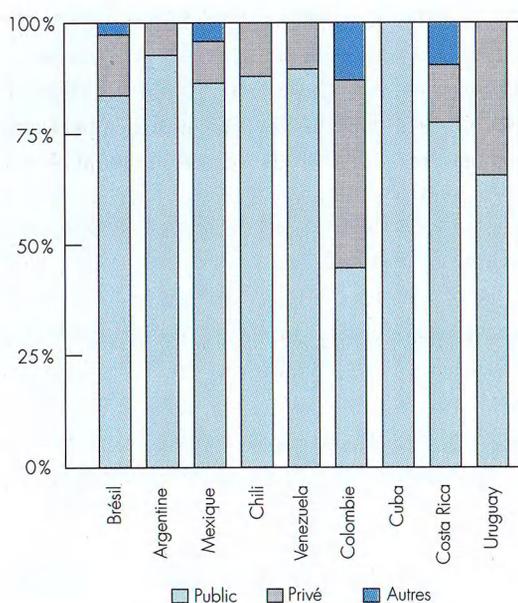
Les dépenses totales de R-D de l'Amérique latine ont été estimées à 5 320 millions de dollars des États-Unis en 1990. Les figures 5 et 6 indiquent les dépenses nettes et les dépenses par million d'habitants pour chaque sous-région et pour les dix pays mentionnés plus haut. Comme le montre la figure 5, les dépenses estimées sont voisines de 10 millions de dollars des États-Unis par million d'habitants pour le Cône sud, le Mexique et les Caraïbes, alors qu'elles atteignent un peu plus du double pour le Brésil et sont sensiblement inférieures à 5 millions de dollars par million d'habitants pour les pays andins et l'Amérique centrale.

FIGURE 8  
ÉVOLUTION DES DÉPENSES DE R-D



Source : ACAL, 1990-1992.

FIGURE 7  
DÉPENSES DE R-D PAR SOURCE, 1991



Source : ACAL, 1990-1992.

La figure 6 révèle que, outre le Brésil, l'Argentine, le Mexique et Cuba, deux pays de la sous-région andine et d'Amérique centrale, à savoir le Venezuela et le Costa Rica, ont des dépenses de R-D supérieures à 10 millions de dollars par million d'habitants, alors que celles-ci se situent entre 5 et 10 millions de dollars dans deux pays du Cône sud, le Chili et l'Uruguay. La Colombie et le Pérou sont les seuls pays dont les dépenses de R-D sont inférieures à 5 millions de dollars par million d'habitants.

Il est en outre intéressant de noter que, d'après les données présentées à la figure 7, plus de 75 % des ressources sont d'origine publique dans huit des dix pays étudiés. Seuls la Colombie et l'Uruguay ont reçu plus de 30 % de leurs ressources du secteur privé.

La figure 8 illustre l'évolution des dépenses sur une dizaine d'années dans les six pays qui, parmi les dix étudiés, ont la plus forte production scientifique. Cette évolution est marquée par les effets de la crise économique qu'a connue la région au début et au milieu des années 80, crise liée au poids de la dette extérieure que ces pays avaient contractée dans l'espoir de financer leur développement. Les banques et institutions financières des pays industrialisés avaient consenti des prêts à des conditions très favorables, avec des

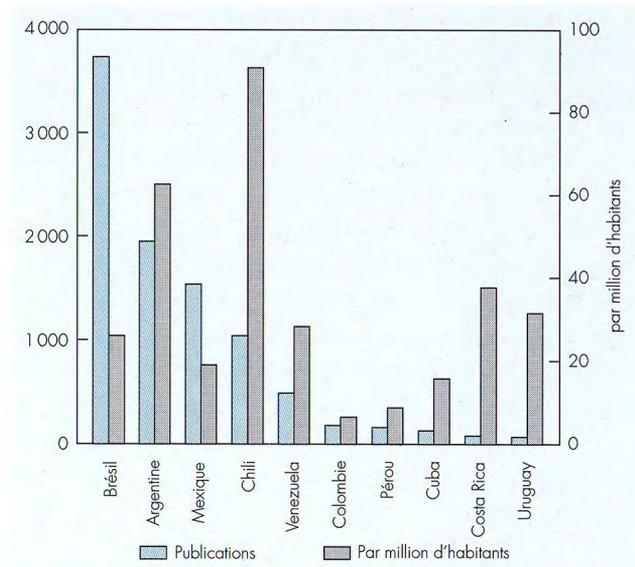
taux d'intérêt initialement très bas. La charge des intérêts a profondément dégradé les économies des pays latino-américains et entraîné une baisse du niveau de vie pour la plus grande partie de la population de la région.

Les données présentées à la figure 8 indiquent, en outre, que le Brésil est le seul pays à avoir sensiblement accru ses dépenses de R-D au cours de la décennie. Pour le Mexique et l'Argentine, on observe un fléchissement dans la première moitié de la décennie, en partie compensé dans la seconde. Le Chili, le Venezuela et la Colombie ont fait des efforts pour maintenir et même légèrement augmenter le niveau de leurs dépenses au cours de la période.

**Production scientifique**

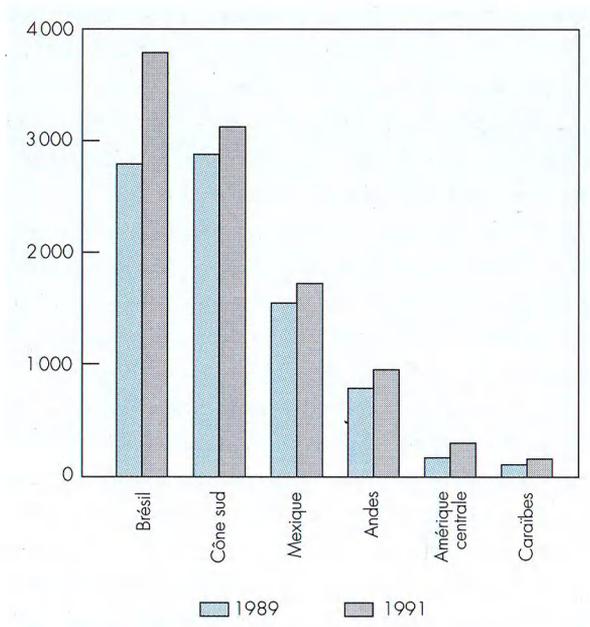
Nous avons retenu comme indicateur de la production scientifique le nombre de rapports ou articles scientifiques publiés dans des périodiques de diffusion internationale soumis à des examens par les pairs (*peer review*) et figurant dans le *Science Citation Index* (ISI, 1980, 1985 et 1989-1991a), qui est considéré comme la meilleure source pour ce type de données. Pour permettre des comparaisons, nous

FIGURE 10  
PUBLICATIONS, 1991



Source : ISI, 1989-1991.

FIGURE 9  
PUBLICATIONS PAR SOUS-RÉGION, 1989 ET 1991



Source : ISI, 1989-1991. (Version CD-ROM.)

avons également calculé la production scientifique par million d'habitants.

La production des diverses régions d'Amérique latine en 1989 et 1991 est représentée à la figure 9. Le nombre total de publications de la région a été de 8 517 en 1989 et de 9 889 en 1991, soit 1 % de l'ensemble des publications scientifiques mondiales. Il est à noter que les publications du Brésil, du Cône sud et du Mexique représentent 87,3 % du total en 1989 et 86,6 % en 1991. Les sous-régions des Andes, d'Amérique centrale et des Caraïbes hispanophones prises ensemble représentent le reste, soit 12,7 % en 1989 et 13,4 % en 1991. Ces chiffres font ressortir la situation critique, du point de vue scientifique, de ces sous-régions.

Il est intéressant d'étudier les dix pays, indépendamment de leur localisation géographique, ont produit le plus grand nombre de publications scientifiques en 1991. Ainsi que l'illustre la figure 10, le classement de ces dix pays, par ordre décroissant de leur production nette en 1991, s'établit comme suit : Brésil, Argentine, Mexique, Chili, Venezuela, Colombie, Pérou, Cuba, Costa Rica et Uruguay. Ces pays ont été à l'origine de 97,6 % de toutes les publications scientifiques de l'Amérique latine en 1991.

D'une manière générale, le volume de la production scientifique de ces pays paraît être en rapport — comme on pouvait s'y attendre — avec le chiffre de leur population. Mais l'influence d'autres facteurs devient perceptible lorsque l'indicateur utilisé est la production scientifique par million d'habitants. La figure 10 montre également les données correspondant à cet indicateur pour les dix mêmes pays. Leur classement est alors le suivant : Chili, Argentine, Costa Rica, Uruguay, Venezuela, Brésil, Mexique, Cuba, Pérou et Colombie. On notera que les pays dont la population est moyenne ou faible ont une production scientifique par million d'habitants plus élevée que les pays les plus peuplés. Des recherches sur les raisons susceptibles d'expliquer ces résultats pourraient fournir certaines indications sur les facteurs favorables au développement scientifique dans les pays latino-américains, comme le niveau d'éducation de base, la situation économique, l'influence culturelle des flux migratoires, la coopération internationale et la qualité de la politique scientifique nationale.

### Coopération scientifique

L'indicateur de coopération que nous avons retenu est le nombre de publications scientifiques rédigées conjointement par des chercheurs de différents pays d'Amérique latine dans le cas de la coopération régionale ou par des scientifiques latino-américains et des chercheurs de pays extérieurs à la région dans le cas de la coopération internationale.

La figure 11 montre les résultats de cette évaluation de la coopération régionale et internationale pour chacun des dix pays retenus en raison de leur production scientifique. La coopération internationale est toujours nettement supérieure à la coopération régionale. Il est à prévoir que la coopération régionale s'intensifiera avec les progrès des programmes régionaux de recherche scientifique et technique, du développement scientifique et des communications.

### LES OBJECTIFS D'UNE NOUVELLE POLITIQUE SCIENTIFIQUE EN AMÉRIQUE LATINE

Les données présentées dans les sections précédentes nous ont révélé que le niveau d'activité scientifique de la plupart des pays d'Amérique latine est resté stationnaire ou, au mieux, a enregistré une faible progression durant les années récentes. La position relative des différents pays est par ailleurs demeurée inchangée. Pour que les pays de la région atteignent à brève échéance un niveau sensiblement supérieur à celui qui est le leur aujourd'hui, leur politique scientifique doit donc être revue et modifiée.

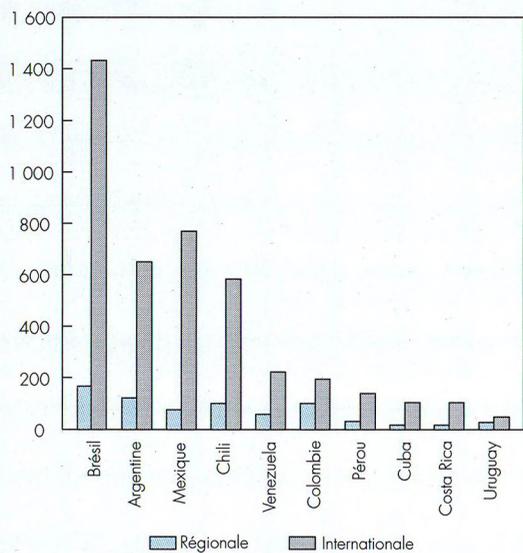
### Obstacles au développement scientifique

Selon nous, le progrès des sciences en Amérique latine est freiné par le manque de ressources humaines et économiques, l'isolement relatif des chercheurs dans certaines disciplines peu développées, et une coopération régionale et internationale insuffisante. Les relations médiocres entre la science et l'industrie ne font qu'ajouter à ces difficultés.

Le manque de ressources humaines est essentiellement dû à trois facteurs — insuffisances du système éducatif, rareté des bourses d'étude, faible rémunération des personnels de R-D — qui découragent les vocations scientifiques et incitent les chercheurs à émigrer.

De surcroît, bien que l'enseignement soit pour l'essentiel gratuit, le coût élevé de la vie interdit l'accès à l'enseignement supérieur aux quatre cinquièmes de la population. A cela s'ajoute l'isolement des chercheurs, mal commun à

FIGURE 11  
COOPÉRATION RÉGIONALE ET INTERNATIONALE, MESURÉE PAR LE NOMBRE DE PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES RÉDIGÉES EN COLLABORATION, 1990



Source : ISI, 1989-1991.

tous les pays en développement, où les personnes travaillant sur un sujet commun sont très peu nombreuses et ont souvent beaucoup de difficulté à se rencontrer.

L'insuffisance de ressources financières, dans l'absolu comme en termes relatifs, est apparemment liée au peu d'intérêt que les dirigeants politiques et chefs d'entreprise portent à la science nationale. Mais les décideurs, même lorsqu'ils reconnaissent un certain rôle à la science, considèrent que les scientifiques, quant à eux, oublient souvent que leur pays est confronté à d'autres problèmes, plus importants et plus urgents, qui eux aussi réclament d'énormes ressources.

Il est clair en effet que le problème le plus urgent en Amérique latine est l'instauration de la justice et de la paix sociales, fondées sur une répartition équitable des richesses. C'est sur ces bases que l'intégration sociale pourra progresser, la qualité de la vie atteindre un niveau acceptable et l'ensemble de la population accéder à l'éducation, à la science et à la culture. De même, il est urgent de trouver les moyens de consolider les processus d'intégration régionale et sous-régionale indispensables à la survie de l'Amérique latine en tant que région. C'est à partir de ces considérations que l'on voit périodiquement surgir des controverses lors des débats sur l'affectation de ressources budgétaires aux activités scientifiques au sein des instances nationales et des organisations régionales et internationales. Ces controverses s'éteignent dès lors que l'on prend conscience que la science et ses applications offrent le moyen le plus efficace de parvenir à une répartition équitable des richesses, à l'intégration et au développement.

### *De nouveaux objectifs pour la science*

Pour susciter en Amérique latine un changement quantitatif et qualitatif de même ampleur que celui qui est intervenu dans les deux premières décennies de l'après-guerre, il est impératif de concevoir et d'appliquer de nouvelles politiques aussi audacieuses que celles qui ont été adoptées alors. Nous proposons dans les paragraphes qui suivent un certain nombre d'idées qui pourraient contribuer à l'élaboration de ces nouvelles politiques scientifiques, dont les objectifs seraient les suivants :

L'incorporation de la science à la culture latino-américaine, afin de la rendre moins marginale qu'elle ne l'est actuellement.

La création d'une communauté scientifique latino-américaine à l'échelle mondiale qui réunirait, physiquement ou par le moyen de réseaux télématiques, des scientifi-

ques natifs d'Amérique latine vivant à l'étranger et menant des programmes de recherche ou d'éducation dans la région.

- La mise en place d'un réseau télématique latino-américain dédié à la science pour lutter contre l'isolement des scientifiques, notamment de ceux qui travaillent à des recherches de pointe.
- La consolidation des programmes d'intégration scientifique et économique.

### *L'incorporation de la science à la culture*

Pour atteindre cet objectif, les actions à mener sont les suivantes :

- Renforcer la recherche en science fondamentale, qui constitue la base même de l'activité scientifique.
  - Intégrer la science à l'enseignement, en particulier au niveau de l'éducation de base, afin de rendre le savoir scientifique accessible à tous; susciter l'intérêt du public pour la science en tant qu'activité humaine et facteur de modernisation culturelle; et promouvoir la réflexion sur la compatibilité de la science avec les valeurs sociales et les croyances religieuses.
- Renforcer les liens entre la science et divers secteurs sociaux, notamment ceux qui possèdent une forte composante scientifique, comme la santé, l'agriculture, les communications, les transports, l'énergie, l'environnement et les ressources naturelles, entre autres, et porter une attention spéciale à la création de relations solides entre la science et l'industrie. Sur ce dernier point, les industriels doivent apprendre à traduire leurs problèmes en termes de recherche, devenir des utilisateurs de la R-D et, enfin, mettre en place leurs propres installations de recherche.
- Encourager la coopération scientifique et faire de la science et de ses applications une composante essentielle du processus d'intégration en cours, appelé à prendre de l'ampleur dans les pays qui, du fait de leur taille ou de leurs ressources humaines et économiques, ont de la difficulté à assurer leur développement.
  - Promouvoir la création de réseaux de laboratoires et de chercheurs dans des domaines de pointe, de façon à atténuer l'isolement de ces chercheurs.
  - Étendre à toute l'Amérique latine les politiques couronnées de succès déjà testées et vérifiées dans plusieurs pays. On peut notamment songer aux actions suivantes :

la création de ministères ou secrétariats de la science et de la technologie, ainsi que de conseils nationaux de la recherche mentionnés plus haut, le programme de promotion des chercheurs, les programmes de rapatriement des scientifiques, les programmes de bourses pour les étudiants de troisième cycle, les stages et cycles de formation à l'étranger pour les titulaires d'un doctorat, les programmes de décentralisation ou de régionalisation, et les grands programmes de financement.

Toutes ces actions nécessitent en outre une coordination efficace entre les secteurs scientifiques et technologiques et ceux de la politique, de l'éducation et de l'économie. Les organisations internationales ont des responsabilités particulières à cet égard, spécialement l'UNESCO, qui a joué un rôle si important dans les changements quantitatifs et qualitatifs intervenus en Amérique latine depuis la seconde guerre mondiale.

#### *Une communauté scientifique latino-américaine à l'échelle mondiale*

Le manque de ressources et l'isolement sont les causes principales de la migration de plus en plus fréquente de scientifiques latino-américains vers les pays industrialisés. C'est un fait indéniable qu'un nombre important et croissant de chercheurs se sont établis hors de la région. La gravité de la situation actuelle est une invitation à élargir la notion de communauté scientifique à l'ensemble des spécialistes qui ont quitté leur pays pour aller travailler ailleurs. Cette nouvelle idée d'une communauté scientifique latino-américaine d'envergure mondiale, débordant les frontières régionales, nous autorise à envisager un ambitieux programme de coopération scientifique internationale, fondée sur la contribution que les « scientifiques nationaux à l'étranger » pourraient apporter au développement des sciences dans leur pays d'origine et dans la région.

Cette idée, proposée par Guillermo Cardoza lors d'une récente réunion du conseil de l'Académie des sciences de l'Amérique latine (ACAL) à Sao Paulo, est propre à faciliter la mise au point d'un nouveau modèle de développement scientifique régional, à la fois autocentré et extraverti, qui optimise les apports des scientifiques émigrés sans perdre de vue les priorités locales, nationales et régionales, pour le plus grand bien de l'Amérique latine. Pour mener à bien les tâches qu'implique ce défi, il est possible de faire appel aux nouvelles techniques de télécommunication; en fait, les réseaux télématiques universitaires fournissent un instrument précieux

pour resserrer les liens avec les scientifiques travaillant à l'étranger. S'appuyant sur ces réseaux, l'ACAL, avec l'appui de l'UNESCO, du COSTED (CIUS) et du Conseil national de la recherche scientifique et technique (CONICIT) du Venezuela, a mis en place des bases de données et des systèmes d'information dont le but est de donner corps à l'idée de communauté scientifique à l'échelle mondiale.

#### *Un réseau télématique latino-américain*

La construction d'un réseau télématique destiné à rompre l'isolement des scientifiques, en particulier de ceux qui travaillent dans les domaines de pointe, est un défi de notre temps. Les nouvelles techniques de communication, notamment les réseaux télématiques, favorisent l'instauration de flux d'information entre collègues travaillant dans les mêmes domaines. Nous commençons à percevoir la transformation rapide de ce qu'il est convenu d'appeler le « collège invisible » en un « collège électronique mondial ». En d'autres termes, des contacts informels et sporadiques sont en train de se muer en un nouveau système de liaisons structurées et continues.

L'abolition des barrières spatio-temporelles et l'abaissement des coûts qu'apportent les réseaux télématiques universitaires devraient contribuer à atténuer l'isolement dans lequel se trouvent les chercheurs des pays en développement. Le peu d'interaction que l'on observe entre les scientifiques latino-américains, essentiellement dû au petit nombre de chercheurs travaillant dans les divers secteurs de pointe, pourrait être en partie corrigé par la constitution de « masses critiques virtuelles » grâce aux contacts que permettent les réseaux.

Récemment, l'Union latine, en collaboration avec l'UNESCO et l'ACAL, a réalisé une étude de faisabilité concernant la création d'un réseau télématique éducatif pour l'Amérique latine et les Caraïbes (REDALC). La compétition demeurera certainement l'une des caractéristiques de la recherche scientifique, mais la solidarité attendue de ce nouveau collège électronique mondial devrait favoriser l'émergence de nouvelles formes de coopération.

#### *La consolidation de l'intégration scientifique et économique*

La reprise récente des mouvements d'intégration, stimulée par la formation de grands blocs économiques, offre un cadre propice à l'élaboration et à la mise en œuvre de programmes multinationaux de coopération scientifique. Les

projets d'intégration des pays andins (Pacte andin), d'Amérique centrale (Marché commun d'Amérique centrale), des Caraïbes (CARICOM), du Cône sud (MERCOSUR), ainsi que le Groupe de Rio, le Groupe des Trois (Colombie, Mexique et Venezuela), l'Initiative pour les Amériques et l'ALENA, devraient tous encourager les scientifiques à participer à la formulation de politiques de coopération à l'échelle de la région et de l'hémisphère.

Les accords régionaux et sous-régionaux dans les domaines de l'éducation, de la science et de la technologie doivent également être renforcés pour en faire bénéficier les peuples d'Amérique latine. Il faudra cependant veiller à ne pas privilégier à l'excès les questions pratiques et les connaissances appliquées au détriment des sciences fondamentales. L'avenir de l'Amérique latine au cours du XXI<sup>e</sup> siècle dépendra en grande partie de la consolidation intelligemment équilibrée des processus d'intégration dans les domaines de l'éducation, de la science et de l'économie.

## CONCLUSIONS

Dans le présent chapitre nous avons rapidement passé en revue l'histoire de l'Amérique latine, évoquant brièvement la période précolombienne, la période coloniale et celle de l'indépendance pour en arriver aux événements de ce siècle. Nous avons pu montrer que le progrès scientifique est intimement lié au développement de la région et des pays qui la composent. Le rapport entre l'avancée des sciences au cours des différentes périodes et la situation politique, économique et sociale se perçoit aisément. Les plus grands progrès ont été accomplis pendant ce siècle, et de grands efforts ont été et sont encore déployés pour prévenir et vaincre les effets de la crise politique, économique et sociale avec laquelle notre région est actuellement aux prises. Nous espérons qu'à son terme, nous bénéficierons d'une base de développement plus solide, d'une meilleure répartition des biens matériels dans l'ensemble de la population, d'une sérieuse avancée de l'intégration régionale, et d'une conscience accrue du rôle dévolu à la science dans la modernisation de l'éducation, de la culture et de l'économie. Il y a de bonnes raisons d'être optimiste. Malgré tout, les progrès de la science en Amérique latine au cours des cinquante dernières années ont été remarquables : la région compte aujourd'hui 142 904 personnes affectées à la R-D (chercheurs et professionnels associés), 2 280 unités de recherche, des investissements annuels de 5 320 millions de dollars des États-Unis, 10 255 publica-

tions scientifiques et 5 229 activités de coopération internationale et régionale en cours de réalisation.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Marisela Azuaje, Ana Teresa Hausteín, Cecilia Castillo et Gloria M. Villegas pour la relecture critique qu'elles ont faite du manuscrit ; nous exprimons également notre reconnaissance à H. R. Croxatto, Carlos Monge C. et Guillermo Whittembury pour les précieuses informations qu'ils nous ont fournies sur l'histoire scientifique de l'Amérique latine.

**RAIMUNDO VILLEGAS** est chancelier de l'Academia de Ciencias de América Latina (ACAL) et professeur à l'Instituto Internacional de Estudios Avanzados de Caracas (Venezuela). Il a obtenu son doctorat en médecine de l'Universidad Central de Venezuela et a travaillé comme attaché de recherche à l'Université Vanderbilt et à l'École de médecine de Harvard, comme professeur invité à l'Université Cornell et comme chercheur invité à l'Institut de cancérologie Dana Farber aux États-Unis d'Amérique. Au Venezuela, le professeur Villegas a dirigé l'Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas et a été par la suite nommé ministre de la science et de la technologie. Il a activement participé aux travaux du Conseil international des unions scientifiques (CIUS), de l'Organisation internationale de biophysique pure et appliquée et du Comité du CIUS pour la S et T au service du développement.

**GUILLERMO CARDOZA** est professeur adjoint d'économie internationale et de développement technologique à l'Universidad Central de Venezuela et secrétaire exécutif de l'ACAL. Il est par ailleurs rédacteur en chef du bulletin *Ciencia en América Latina* et membre du Conseil du Réseau pour l'accès aux publications scientifiques. M. Cardoza a obtenu le diplôme d'ingénieur chimiste de l'Universidad Nacional de Colombia et a travaillé quelques années dans des entreprises nationales, avant d'entreprendre des études de troisième cycle à l'Instituto de Estudios Superiores de Empresa de Barcelone (Espagne) et à l'Université de Paris (France). En 1991, il a été le créateur du Centro de Información y Estudio de la Ciencia de América Latina au sein de l'ACAL, où il effectue des recherches sur la science en Amérique latine.

## BIBLIOGRAPHIE

- ACAL. 1990-1992. *Base de datos : Directorio de instituciones científicas de América Latina y del Caribe*, Caracas, Academia de Ciencias de América Latina.
- Banque mondiale. 1991. *Rapport sur le développement dans le monde*, Washington, D.C., Banque mondiale.
- Behrman, D. 1979. *Science, technique et développement : la démarche de l'UNESCO*, Paris, UNESCO.
- BID. 1988. *Progreso económico y social en América Latina, informe 1988. Tema especial : ciencia y tecnología*, Washington, Banque interaméricaine de développement.
- Cardoza, G. et Azuaje, M. 1992. *Proyecto REDALIC : diagnóstico sintético de la investigación en América Latina y el Caribe*, Caracas, Academia de Ciencias de América Latina.
- Comisión Preparatoria del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Venezuela. 1965. *La Ciencia base de nuestro progreso*, Caracas, Ediciones MIC.
- GRADE. 1991. *Indicadores de ciencia y tecnología 1970-1990*, Lima, Grupo de Análisis para el Desarrollo.
- ISI. 1980 et 1985. *Science citation index*, Philadelphie, Institute for Scientific Information, Inc. (Version imprimée.)
- . 1989-1991a. *Science citation index*, Philadelphie, Institute for Scientific Information, Inc. (Version CD-ROM.)
- . 1989-1991b. *Social science citation index*, Philadelphie, Institute for Scientific Information, Inc. (Version CD-ROM.)
- López-Piñero, J.M. 1969. *La Introducción de la ciencia moderna en España*, Barcelone, Editorial Ariel.
- Oro, L.A. et Sebastián, J. (dir. publ.). 1992. *Los sistemas de ciencia y tecnología en Iberoamérica*, Madrid, Madrid Fundesco. (Coll. Impactos.)
- Roche, M. 1976. *Early history of science in Spanish America*, *Science*, 194, p. 806-810.
- . 1992. *Gestión y desarrollo del CONICIT, Ciencia en Venezuela : pasado, presente y futuro*, Caracas, Editorial Arte, p. 85-92. (Cuadernos Iagoven.)
- Sagasti, F. 1978. *Esbozo histórico de la ciencia y de la tecnología en América Latina*, *Interciencia*, vol. 3, p. 351-359.
- Saldaña, J.-J. 1992. (dir. publ.). *La ciencia y la tecnología para el futuro de América Latina*, symposium de l'UNESCO tenu à Acapulco en 1990, Mexico, Secretaria Ejecutiva del Consejo Consultivo de Ciencias de la Presidencia de la República de México.
- Steger, H.A. 1974. *Las universidades en el desarrollo social en América Latina*, Mexico, Fondo de Cultura Económica.
- UNESCO. 1990. *Annuaire statistique 1990*, Paris, UNESCO.
- Villegas, R. et Cardoza, G. 1987. *Evaluation of scientific development and South-South cooperation in science and technology in Latin America and the Caribbean*, dans A.M. Faruqi et M.H.A. Hassan (dir. publ.), *The future of science in China and the Third World*, Beijing, World Scientific Publishing Co., p. 422-430.
- . 1991. *La investigación en ciencia y tecnología en las universidades, centros de investigación y de estudios avanzados de América Latina : el papel de la integración regional, Retos científicos y tecnológicos. Reunión internacional de reflexión sobre los nuevos roles de la educación superior a nivel mundial : el caso de América Latina y el Caribe. Futuro y escenarios deseables*, Caracas, UNESCO/CRESALC, vol. 3, p. 62-73.
- . (sous presse.) *Latin American and Caribbean diversity in science : regional distribution of research units and publications*, *Proceedings of the 3rd General Conference of the Third World Academy of Sciences*, Caracas.
- Weinberg, G. 1978. *Sobre la historia de la tradición científica latinoamericana*, *Interciencia*, vol. 3, p. 72-77.

## L'EUROPE OCCIDENTALE

Sam J. Lloyd

De toutes les régions du monde, c'est l'Europe occidentale qui a été la première à appliquer la science à l'activité industrielle et économique et à en assurer la diffusion à tous les aspects de l'existence. Cette longue tradition a donné naissance aux techniques de guerre et de paix qui ont permis l'exploration et ultérieurement la colonisation de nombreux points du globe, et favorisé la diffusion des idéaux culturels européens. Dans le même temps, les explorateurs et les colonisateurs ramenaient en Europe une nouvelle connaissance du monde et de ses ressources qui, s'ajoutant aux contacts établis avec d'autres cultures et d'autres façons de penser, ont, au fil des siècles, enrichi et affiné la pensée et la philosophie européennes.

Aujourd'hui, ces semences de la pensée scientifique ont trouvé leur accomplissement dans les technologies de

pointe, présentes dans le monde entier, dont les fruits économiques semblent parfois renier leurs origines européennes. Quel jugement doit-on aujourd'hui porter sur la science et la technologie en Europe occidentale? L'Europe doit-elle être considérée comme un pionnier de la science, qui guide le reste du monde aux frontières les plus lointaines du monde intellectuel, ou donne-t-elle au monde un spectacle d'autosatisfaction et de décadence? Quels sont les efforts déployés par les gouvernements pour qu'elle demeure un centre d'excellence scientifique à notre époque de communications instantanées?

Pour répondre à ces questions, il nous faudra examiner non seulement les ressources en termes de montants financiers, d'établissement des priorités et de disponibilité d'un corps de scientifiques cultivés, bien formés et efficaces, mais encore les

TABLEAU 1  
PERSONNEL DE R-D DANS LA COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE, AUX ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE ET AU JAPON

Pays	Personnel de R-D	Personnel de R-D	Scientifiques et	Scientifiques et
	(équivalent plein temps) (1990)	pour mille actifs (1990)	ingénieurs de R-D (équivalent plein temps) (1989)	ingénieurs de R-D pour mille actifs (1989)
Allemagne <sup>1</sup>	431 100	14,2	176 401	5,9
Belgique	38 773	9,3	17 583	4,2
Danemark	25 070 <sup>2</sup>	8,5 <sup>4</sup>	10 962	3,8
Espagne	64 934	4,2	32 914	2,2
Grèce	9 586 <sup>4</sup>	2,4 <sup>4</sup>	5 461	1,4
France	293 031	12,0	120 430	5,0
Irlande	11 379 <sup>2</sup>	6,6 <sup>3</sup>	6 340	4,9
Italie	144 917	5,9	76 074	3,1
Luxembourg	nd	nd	nd	nd
Pays-Bas	68 170	9,9	26 680	4,0
Portugal	12 043	2,5	5 456 <sup>2</sup>	3,3 <sup>3</sup>
Royaume-Uni	280 215 <sup>2</sup>	9,8 <sup>3</sup>	131 928 <sup>2</sup>	4,6 <sup>3</sup>
Eur. 12 <sup>5</sup>	1 379 218	9,3	610 229	4,2
États-Unis	nd	nd	949 300	7,6
Japon	794 337	12,4	457 522	7,3

1. Allemagne : non compris la République démocratique allemande.

2. Estimation provisoire de la DGXII/A4 sur la base des tendances observées.

3. Chiffres de 1988.

4. Chiffres de 1989.

5. Eur. 12 : total des États membres pour lesquels les chiffres sont disponibles ; le Luxembourg n'est pas pris en compte.

Source : OCDE, DGXII/A4.

découvertes faites aussi bien par des chercheurs isolés que par des scientifiques et techniciens travaillant en équipe et utilisant les vastes installations nécessaires pour faire reculer les frontières de l'astronomie, de la biotechnologie ou de la physique de la matière, sans oublier les nombreuses équipes se consacrant à la recherche fondamentale, dont les travaux appor- tent aux spécialistes des sciences appliquées les moyens de fournir à l'industrie le soutien qu'elle attend d'eux.

### GROUPEMENTS GÉOGRAPHIQUES, ÉCONOMIQUES ET DE RECHERCHE-DÉVELOPPEMENT

L'Europe occidentale est un continent constitué de zones géographiques extrêmement diversifiées et d'alliances économiques en devenir, soutenues par des efforts de rapprochement politique. On y rencontre aussi bien de petits États, comme Monaco, la Cité du Vatican et Saint-Marin, que des États de taille moyenne comme l'Allemagne, la France, le Royaume-Uni et l'Italie.

Si l'on fait abstraction des plus petites nations, l'Europe occidentale se répartit en deux grands groupes économiques : les douze États membres de la Communauté européenne (CE) — Allemagne, Belgique, Danemark, Espagne, France, Grèce, Irlande, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Portugal et Royaume-Uni — et les sept pays de l'Association européenne de libre échange (AELE) — Autriche, Finlande, Islande, Liechtenstein, Norvège, Suède et Suisse. S'y ajoutent trois États traditionnellement non engagés : Chypre, Malte et l'ex-Yougoslavie. La Turquie est associée à la Communauté européenne et Israël a conclu avec celle-ci un accord de libre-échange.

Un autre groupement d'États européens se développe actuellement avec l'association plus étroite de la CE et de l'AELE — à l'exception de la Suisse — au sein de l'Espace économique européen (EEE). Quatre de ces États — l'Autriche, la Finlande, la Norvège et la Suède — ont demandé à être membre à part entière de la Communauté européenne.

### POLITIQUES SCIENTIFIQUES NATIONALES

De puissantes forces politiques, économiques et sociales alimentent une dynamique centripète à l'intérieur de la région. Néanmoins, malgré le grand nombre d'organismes de collaboration et de programmes communs de recherche-développement (R-D), des raisons historiques et culturelles ont conduit les pays à des conceptions relativement dif-

férencées de la politique scientifique et technologique. Avant d'étudier brièvement les quatre plus grands pays d'Europe occidentale, il convient d'énoncer rapidement quelques objectifs majeurs, partagés par tous. Mais on notera que si les thèmes sont communs, les moyens employés pour en assurer la mise en œuvre sont extrêmement diversifiés.

- 1. Premièrement, tous les gouvernements ont progressivement pris conscience de l'importance de la recherche pour le développement et la compétitivité de l'industrie et accordent à celle-ci une priorité élevée dans la définition de leur politique scientifique.
- 2. Deuxièmement, les questions relatives au transfert de technologie vers l'industrie, et notamment vers les petites et moyennes entreprises, tenues pour une source majeure d'innovation, ont suscité d'abondantes réflexions. Parallèlement, les problèmes touchant les droits de propriété intellectuelle se révèlent délicats à traiter si l'on veut que les mesures prises en ce domaine soient réellement efficaces.
- 3. Troisièmement, devant les contraintes imposées par le plafonnement ou au mieux la faible croissance des recettes pendant la phase actuelle de stagnation économique, les autorités budgétaires tant nationales qu'internationales ont réclamé que les programmes, les projets et les organisations fassent l'objet d'une évaluation permanente, dans le but d'en tirer le maximum d'efficacité en termes de coûts/avantages, pour autant que ces notions soient applicables, et d'éliminer tous les éléments improductifs. Ces mesures se sont imposées pour contrer la forte poussée des coûts des activités de S et T.
- 4. Quatrièmement, tous les pays reconnaissent les nombreux avantages que procure la coopération internationale et lui accordent une large place aussi bien dans leur politique scientifique que dans leur action diplomatique.
- 5. Enfin, l'accent mis sur l'éducation et la formation de scientifiques, de techniciens et d'ingénieurs dans les universités, les collèges et les laboratoires ainsi que dans les entreprises est un trait commun à toutes les stratégies nationales.

#### *France*

En France, c'est le Ministère de la recherche et de la technologie qui est le responsable premier de l'action publique en ce domaine. Il a la tutelle directe des établissements de recherche gouvernementaux et des organismes de recherche financés sur le budget civil du développement technologique et de la recherche, comme le Centre national de la

**TABLEAU 2**  
**DÉPENSES DE R-D AU SEIN DE LA COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE, AUX ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE ET AU JAPON**

Pays	DIRD* totale (millions ECU)	DIRD en % du PIB 1991	DIRD par habitant (ECU) 1991	% de la DIRD (1990) exécuté par					
				% de la DIRD (1990) financé par			Secteur de		
				État	Industrie	Autres	l'État	Secteur des entreprises	Enseigt supérieur et autres secteurs
Allemagne <sup>1</sup>	35 519	2,58	445	37,2 <sup>3</sup>	59,9 <sup>3</sup>	2,9 <sup>3</sup>	15,2 <sup>3</sup>	68,4 <sup>3</sup>	16,4 <sup>3</sup>
Belgique	2 722 <sup>2</sup>	1,71	272	27,6	70,4	2,0	6,1	72,6	21,3
Danemark	1 675	1,59	325	45,5 <sup>4</sup>	46,8 <sup>4</sup>	7,7 <sup>4</sup>	19,1 <sup>4</sup>	55,0 <sup>4</sup>	25,9 <sup>4</sup>
Espagne	3 730	0,87	96	45,1	47,4	7,4	21,3	57,8	20,9
France	23 511	2,42	412	48,3	43,5	8,2	24,2	60,4	15,4
Grèce	402 <sup>2</sup>	0,70	39	68,9 <sup>4</sup>	19,4 <sup>4</sup>	11,7 <sup>4</sup>	42,4 <sup>4</sup>	22,3 <sup>4</sup>	35,3 <sup>4</sup>
Irlande	340 <sup>2</sup>	0,97	96	29,0	60,0	11,0	16,2	60,7	23,0
Italie	12 821	1,38	224	51,5	43,7	4,8	20,9	58,3	20,7
Pays-Bas	4 630	2,00	307	45,1	51,1	3,8	18,1	56,2	25,7
Portugal	399 <sup>2</sup>	0,72	41	61,8	27,0	11,1	25,4	26,1	48,4
Royaume-Uni	18 435 <sup>2</sup>	2,26	320	35,8	49,5	14,8	14,0	66,6	19,3
Eur. 12 <sup>5</sup>	104 184	2,02	302	41,2	51,7	7,1	17,4	64,5	18,1
États-Unis	124 559	2,78	493	47,1	50,6	2,3	11,0	69,9	19,1
Japon	77 700	2,86	627	16,1	77,9	6,0	8,0	75,5	16,6

1. Allemagne : y compris la République démocratique allemande.

2. Estimation provisoire de la Communauté européenne sur la base des tendances observées.

3. Chiffres de 1991.

4. Chiffres de 1989.

5. Eur. 12 : total des États membres pour lesquels les chiffres sont disponibles ; le Luxembourg n'est pas pris en compte.

\* DIRD : dépense intérieure brute de R-D

Source : OCDE, EUROSTAT, DGXII/A4.

recherche scientifique (CNRS). Il partage avec d'autres ministères la tutelle de tout un ensemble d'organisations scientifiques et techniques, comme l'Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM) et le Centre national d'études spatiales (CNES).

Le ministre de la recherche et de la technologie assure la présidence du Conseil supérieur de la recherche et de la technologie et exerce une fonction consultative pour ce qui touche aux programmes de recherche des entreprises publiques.

Les autorités françaises s'emploient spécialement à revitaliser la recherche fondamentale, à assurer une gestion plus rigoureuse des grands programmes de développement technologique et à relever le niveau général de la culture technologique.

La recherche industrielle bénéficie de soutiens publics directs et indirects. Des aides directes sont offertes aux entreprises admises à participer à l'un des onze domaines

technologiques sélectionnés dans le cadre de programmes nationaux destinés à promouvoir le savoir-faire industriel et le rapprochement entre les services de recherche des entreprises et les laboratoires publics. Des programmes de développement technologique ont été lancés dans les domaines prioritaires de l'aéronautique civile, de l'espace, des applications civiles de l'énergie nucléaire, des télécommunications et des grands programmes de défense ; tous ces programmes sont entièrement financés par l'État. Les aides indirectes visent à stimuler l'industrie et revêtent la forme d'allègements fiscaux accordés aux entreprises qui se livrent à des activités de R-D. Une synergie plus étroite est recherchée entre les programmes de R-D civils et militaires (qui se partagent respectivement 63 % et 37 % des crédits publics) (voir tableau 3).

L'objectif à long terme est d'accroître la dépense intérieure brute de R-D (DIRD), qui était de 2,4 % du PIB, soit

TABLEAU 3  
FINANCEMENT PUBLIC DE LA R-D DANS LA COMMUNAUTÉ  
EUROPÉENNE, AUX ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE ET AU JAPON,  
1991 (en %)

Pays	Civile	Militaire
Allemagne <sup>1</sup>	89,0	11,0
Belgique	99,8	0,2
Danemark	99,6	0,4
Espagne	83,2	16,8
Grèce	97,6	2,4
France	62,6	37,4
Irlande	100,0	0,0
Italie	92,1	7,9
Pays-Bas	96,5	3,5
Portugal	99,1	0,9
Royaume-Uni	55,7	44,3
Eur. 12 <sup>2</sup>	77,9	22,1
États-Unis	40,3	59,7
Japon	94,3	5,7

1. Allemagne : y compris la République démocratique allemande.
2. Eur. 12 : total des États membres pour lesquels les chiffres sont disponibles ; le Luxembourg n'est pas pris en compte.

Source : OCDE.

23 511 millions d'ECU en 1991, pour la porter dans les meilleurs délais à 3 % du PIB.

### Allemagne

Le système allemand est assez différent du système français. Les compétences en matière de science et de technologie se répartissent entre le gouvernement fédéral pour la recherche non universitaire et la coopération internationale du secteur industriel, les gouvernements des *Länder* pour les universités et les écoles de médecine, et diverses institutions scientifiques indépendantes comme la Société allemande de la recherche (DFG), la Société Max Planck (MPG), la Société Fraunhofer (FhG) et l'Union des grands organismes de recherche pour le reste.

Au niveau fédéral, la responsabilité première est exercée par le Ministère fédéral de la recherche et de la technologie (BMFT), aidé par le Comité de la recherche et de la technologie du Bundestag, qui assure des fonctions de contrôle et de suivi. Pour fixer les orientations de la politique de la

recherche, le gouvernement fédéral consulte les institutions scientifiques indépendantes mentionnées plus haut, dont la dernière, la FhG, est spécialement chargée des rapports entre la science et l'industrie. Outre les responsabilités directes qui viennent d'être signalées, le BMFT est coresponsable des activités de recherche dans les domaines relevant de la compétence d'autres ministères. Par exemple, le programme-cadre en faveur de l'innovation dans les petites et moyennes entreprises est placé sous la supervision conjointe du BMFT et du ministère qui s'occupe de l'industrie.

La réunification des deux Allemagnes à partir de 1989 a donné lieu à un remaniement profond des structures. Après une évaluation complète des activités scientifiques dans l'ex-République démocratique allemande, le système centralisé de cette dernière, dominé par les académies des sciences, de l'agronomie, et du génie civil et de l'architecture, a été aligné sur celui de la République fédérale.

Une large place est accordée au principe de la liberté de la recherche, dont le corollaire est l'importance reconnue à l'initiative individuelle et à la promotion d'une élite scientifique. Des aides publiques directes et indirectes sont offertes pour stimuler la R-D industrielle, notamment dans les petites et moyennes entreprises, dont les charges afférentes au personnel de recherche sont allégées par des subventions. En 1991, les dépenses de R-D de l'Allemagne se sont élevées à 35 519 millions d'ECU, soit 2,6 % du produit intérieur brut. Les activités civiles en ont absorbé 89 % et la R-D militaire 11 %.

### Italie

La structure du système scientifique italien a été profondément modifiée en 1989, avec la création du Ministère des universités et de la recherche scientifique et technologique (MURST), organe unique de décision chargé de coordonner toutes les activités de recherche financées sur fonds publics. Par ailleurs, les universités et autres organismes de recherche bénéficient désormais d'une plus large autonomie dans la détermination de leurs programmes et la gestion de leurs ressources.

Dans sa tâche de planification des politiques, le Ministère est secondé par le Comité interministériel de planification économique et le Comité interministériel de la politique industrielle, et reçoit les avis du Conseil national de la science et de la technologie (CNST), organe composé de membres éminents de la communauté scientifique. Le Conseil national des universités (CUN) est chargé d'assurer la gestion des universités. En dehors du MURST, d'autres ministères, comme

ceux de la défense, de l'industrie et de l'assistance spéciale à l'Italie méridionale, contribuent au financement de la recherche dans leur domaine de compétence.

Le Conseil national de la recherche (CNR), institution assez similaire au CNRS français, est un organisme pluridisciplinaire dont la mission est de gérer des projets entrant dans le cadre de la politique publique de R-D. Ces projets de recherche appliquée portent sur des thèmes d'intérêt national et sont exécutés par diverses organisations gouvernementales, industrielles, régionales et locales dans des domaines tels que l'industrie, l'agriculture, l'énergie, la santé et l'environnement.

L'objectif principal de la politique scientifique italienne est d'amener la recherche à un niveau comparable à celui d'autres pays européens ayant un PIB de même ordre de grandeur, comme la France ou le Royaume-Uni. Dans ce but, la progression des crédits vise à améliorer la qualité du système et à établir un meilleur équilibre entre les types de recherche, entre les secteurs et entre le nord et le sud du pays. Un effort est fait pour renforcer les capacités de participation aux programmes internationaux et européens et la R-D industrielle est encouragée par des allègements fiscaux.

En 1991, la DIRD de l'Italie s'est chiffrée à 12 821 millions d'ECU, soit 1,4 % du PIB, dont 92 % affectés à la R-D civile et 8 % à la R-D militaire.

### Royaume-Uni

Jusqu'en 1992, le système scientifique britannique était structuré autour de onze départements, responsables devant le Cabinet et le Premier Ministre. Cette structure a été profondément remaniée après la nomination d'un Ministre de la science et la publication d'une stratégie scientifique nationale fondée sur un partenariat entre l'industrie, les scientifiques et l'État. Cette stratégie, établie par l'Office de la science et de la technologie (OST), sera approuvée annuellement par le Cabinet et comportera la ventilation des crédits pour l'exercice ainsi qu'une projection sur cinq à dix ans des tendances probables de l'activité scientifique. Les objectifs essentiels de la stratégie nationale sont d'améliorer la qualité de la vie et d'accroître la richesse du pays.

En rupture avec la politique antérieure, dans laquelle toutes les activités voisines du stade de la commercialisation étaient laissées aux entreprises, on voit poindre l'intention de soutenir certains axes de recherche prometteurs délaissés par les entreprises privées. Mais il n'existe pas d'avantages fiscaux pour les entreprises qui financent des activités de R-D.

TABLEAU 4  
BALANCE DES PAIEMENTS TECHNOLOGIQUES DANS LA  
COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE, AUX ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE  
ET AU JAPON, 1990 (millions d'ECU)

Pays	Recettes	Paiements	Balance
Allemagne <sup>1</sup>	4 268	5 196	- 887
Belgique	1 480	1 973	- 493
Danemark	nd	nd	nd
Espagne	315	1 716	- 1 400
Grèce	nd	nd	nd
France	1 493	2 004	- 510
Irlande	nd	nd	nd
Italie	555	965	- 410
Pays-Bas	504	947	- 443
Portugal	nd	nd	nd
Royaume-Uni <sup>2</sup>	1 788	1 865	- 77
Eur. 12 <sup>3</sup>	10 405	14 625	- 4 220
États-Unis	12 936	2 461	10 475
Japon	1 848	2 025	- 177

1. Allemagne : non compris la République démocratique allemande.
2. Données de 1989.
3. Eur. 12 : total des États membres pour lesquels les chiffres sont disponibles (données de 1989 pour le Royaume-Uni).

Source : OCDE, EUROSTAT, DGXII/A4.

Face à l'évolution des besoins, les autorités ont entrepris une enquête sur tous les organismes de recherche bénéficiant de fonds publics pour déterminer ceux qu'il y a lieu de conserver, ceux qui seraient susceptibles d'être privatisés et ceux qui pourraient être supprimés.

Sept conseils de la recherche, ayant chacun compétence dans un domaine déterminé, octroient des subventions aux projets validés à la suite d'un examen par les pairs; les aides aux universités sont distribuées par des organismes distincts, les conseils de financement de l'enseignement supérieur. En 1989, la DIRD totale s'est chiffrée à 18 435 millions d'ECU, soit 2,3 % du PIB, dont 56 % sont allés à la R-D civile et 44 % à la R-D militaire.

Il ressort clairement de ce qui précède qu'une puissante base scientifique et technologique est désormais considérée comme un facteur essentiel de prospérité et de bien-être dans les pays d'Europe occidentale et que les gouverne-

ments nationaux, très sensibilisés à cet aspect des choses, ont fréquemment entrepris de réévaluer ou d'actualiser leurs politiques pour mieux les adapter aux évolutions consécutives aux changements intervenus en Europe.

## PRODUCTION SCIENTIFIQUE

Les activités scientifiques comportent un aspect de communication qui est essentiel pour tous, sauf peut-être pour les chercheurs de l'industrie, dont le travail est dominé par des considérations commerciales. Le meilleur moyen de cerner et d'analyser ce processus de communication est l'étude des travaux publiés dans les périodiques scientifiques de renommée mondiale. Cette méthode ne fournit que des indications qualitatives, car elle ignore la masse d'informations publiées dans la « littérature grise », c'est-à-dire les rapports techniques destinés à un public restreint de chercheurs, et le volume croissant de connaissances stockées dans des bases de données.

De surcroît, le souci des chercheurs de se positionner à la pointe du progrès peut introduire des distorsions, comme lorsque l'effet d'entraînement créé par un communiqué de presse ou une publication préliminaire particulièrement audacieuse provoque une explosion d'activité rédactionnelle aussi bien spéculative qu'objective et factuelle, qui tend à gonfler artificiellement le nombre de publications sur un sujet donné. Les controverses qui se sont développées autour de la « fusion froide » sont à cet égard un exemple qui donne à réfléchir. Néanmoins, le recours à des index de citations offre le moyen de réaliser des comparaisons nuancées sur le poids relatif d'activités similaires dans différentes zones géographiques. On trouvera dans la section qui suit un condensé des données bibliométriques disponibles sur l'Europe occidentale.

Le nombre de scientifiques ayant reçu des prix internationaux, en particulier le prix Nobel, est un autre moyen de mesurer la vitalité scientifique d'une région. Entre 1945 et 1992, 112 prix Nobel ont été attribués à des hommes de science ouest-européens (en physique, chimie, physiologie ou médecine), alors que 143 sont allés à des Nord-Américains et 5 à des Japonais. Pour les sciences économiques, les chiffres correspondants sont respectivement 123, 162 et 5.

### *Publications*

L'ensemble de la région est à l'origine d'un peu plus de 33 % de la production mondiale de publications scientifiques (physique, chimie, sciences biologiques et sciences de l'ingénieur), contre plus de 40 % pour l'Amérique du Nord

(États-Unis et Canada) et 7 % pour le Japon. Les dix pays européens les mieux classés pour le nombre de leurs publications toutes disciplines confondues sont, par ordre décroissant, le Royaume-Uni, l'Allemagne, la France, l'Italie, les Pays-Bas, la Suède, la Suisse, Israël, l'Espagne et la Belgique, qui représentent ensemble 30 % de la production mondiale. Il est intéressant de noter que l'ensemble des 12 pays membres de la Communauté européenne fournissent quelque 28 % de la production mondiale de publications scientifiques.

Si l'on examine la production par grande discipline, les classements varient, comme on peut s'y attendre, selon le domaine considéré.

En physique, le classement est le suivant : Allemagne, Royaume-Uni, France, Italie, Pays-Bas, Suisse, Israël, Espagne, Suède et Belgique. L'ensemble de ces pays assure 28 % de la production mondiale.

L'Allemagne, traditionnellement considérée comme le pays d'origine de la chimie, vient en tête dans cette discipline, suivie du Royaume-Uni, de la France, de l'Italie, de l'Espagne, des Pays-Bas, de la Suisse, de la Suède, de la Belgique et de la Finlande. Ces pays totalisent 30 % des publications mondiales.

En mathématiques, c'est l'Allemagne qui est encore en tête, suivie de la France, du Royaume-Uni, de l'Italie, d'Israël, des Pays-Bas, de l'Espagne, de la Belgique, de la Suisse et de la Suède (30 % de la production mondiale).

Pour les sciences de la vie, le classement est le suivant : Royaume-Uni, Allemagne, France, Italie, Suède, Pays-Bas, Israël, Suisse, Danemark et Belgique. L'ensemble assure 33 % de la production mondiale.

Pour les sciences de l'ingénieur, la hiérarchie s'établit comme suit : Allemagne, Royaume-Uni, France, Italie, Pays-Bas, Suisse, Israël, Suède, Espagne et Belgique. Ces pays représentent 26 % de la production mondiale.

En dehors du classement des pays de la région dans la hiérarchie mondiale, il est également intéressant d'étudier la répartition des disciplines à l'intérieur des totaux nationaux afin d'apprécier le poids relatif des divers domaines d'activité scientifique dans les pays considérés.

Pour l'Europe occidentale dans son ensemble, ce sont les sciences biologiques qui prédominent, représentant en moyenne 57 % du total des publications scientifiques. L'intérêt que les pays scandinaves portent à cette discipline trouve son illustration dans les valeurs supérieures à 70 % enregistrées par le Danemark, la Finlande, la Norvège et la Suède. A

l'autre bout de l'échelle, on trouve la Grèce, le Portugal, l'Espagne et la Turquie, où les sciences de la vie représentent entre 39 et 45 % du total de la production nationale.

Les publications concernant la physique représentent plus de 20 % du total national pour l'ex-Yougoslavie, la Grèce, le Portugal, la France, la Suisse et l'Italie, et 10 % seulement dans le cas de la Suède. Dans tous les pays, la physique se situe au deuxième rang, sauf dans le cas de l'Espagne, qui manifeste une forte préférence pour la chimie, à laquelle 30 % de sa production sont consacrés. Un second groupe constitué de l'ex-Yougoslavie, de l'Allemagne et de l'Italie se situe aux alentours de 20 %, alors que les pays scandinaves apparaissent comme les moins actifs.

Les mathématiques, de par leur nature, sont partout moins bien représentées, mais ont l'avantage de ne pas exiger d'infrastructures ou d'appareillages coûteux. Dans la plupart des pays, elles ne fournissent que 2 à 3 % de la production nationale. Cependant, l'Autriche, l'Italie, la France et la Turquie se situent entre 3 et 4 % et la Grèce, Israël et le Portugal au-dessus de 4 %.

En ce qui concerne enfin les sciences de l'ingénieur, il apparaît que certains des pays les moins favorisés leur accordent une grande importance. En Turquie, en Grèce, au Portugal, dans l'ex-Yougoslavie, en Allemagne et en Autriche, leur part dans la production nationale est de 10 à 20 %.

Ces chiffres révèlent non seulement l'importance que les pays les plus industrialisés attachent à la « science lourde » et l'intérêt que les divers pays portent de longue date à certaines disciplines, mais aussi l'influence des structures sociales, le degré de développement des universités et sans doute la qualité des infrastructures nationales de recherche.

L'Europe, grâce à la grande diversité des traditions scientifiques parmi les nations qui la constituent, peut être considérée comme une véritable « banque de gènes scientifiques ».

#### *Les brevets*

Le rapport du nombre annuel de brevets par 100 000 habitants dans les divers pays est un autre moyen d'apprécier la diversité des activités scientifiques et techniques de la région.

Si l'on se réfère aux chiffres moyens sur la période de

TABLEAU 5  
DÉPÔTS DE BREVETS NATIONAUX DANS LA COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE, AUX ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE ET AU JAPON, 1990

Pays	Dépôts de brevets nationaux			Dépôts extérieurs par les résidents
	Total	Résidents	Non-résidents	
Allemagne <sup>1</sup>	95 164	30 928	64 236	161 006
Belgique	43 544	912	42 632	7 947
Danemark	35 998	1 288	34 710	10 240
Espagne	46 817	2 260	44 557	4 603
Grèce	18 765	389	18 376	536
France	78 919	12 742	66 177	66 632
Irlande	4 735	734	4 001	1 226
Italie	nd	nd	nd	29 969
Luxembourg	32 591	41	32 550	955
Pays-Bas	49 989	2 646	47 343	26 351
Portugal	3 642	101	3 541	86
Royaume-Uni	90 978	19 474	71 504	80 320
Eur. 12 <sup>2</sup>	344 043	71 515	272 528	199 531
États-Unis	175 333	90 643	84 690	295 202
Japon	376 371	332 952	43 419	129 835

1. Allemagne : non compris la République démocratique allemande.

2. Eur. 12 : total des États membres pour lesquels les chiffres sont disponibles ; l'Italie n'est pas prise en compte dans le calcul des dépôts de brevets nationaux.

trois ans allant de 1987 à 1990, c'est la Suisse qui se classe en tête, avec 40,44 brevets pour 100 000 habitants, chiffre qui n'est dépassé que par le Japon (43,44). L'Allemagne et la Suède viennent ensuite, avec 28,14 et 22,91 respectivement, avant les États-Unis (19,12). L'Autriche, la Finlande et la France dépassent le chiffre de 15, et un groupe important formé par le Royaume-Uni, la Norvège, le Danemark, les Pays-Bas, la Belgique, la Grèce et l'Espagne se situe entre 7,7 et 4,4. L'Irlande, l'Italie, le Portugal et la Turquie déposent moins d'un brevet par an pour 100 000 habitants.

L'examen des évolutions sur la période 1985-1990 révèle que les chiffres annuels ont augmenté pour le Danemark, l'Irlande, la Finlande, l'Allemagne, la Norvège, l'Autriche, les Pays-Bas, l'Espagne et la Suède et diminué pour la Suisse, la France, la Turquie, le Royaume-Uni, le Portugal, la Belgique, la Grèce et l'Italie. Les taux de variation vont de 12,7 % pour les pays du sommet de la liste à -11,7 % pour les derniers de la liste.

En général, la corrélation de ce rapport avec d'autres indicateurs n'est pas parfaitement évidente et semble refléter davantage le rapport des habitudes de publication avec le

degré de développement relatif des technologies industrielles que le niveau de la culture scientifique à l'intérieur du pays.

## LA SCIENCE DANS LA COMMUNAUTÉ EUROPÉENNE

Le rapprochement des États européens a donné naissance à toute une série d'actions rattachées à des programmes scientifiques et technologiques menés dans le cadre de la politique communautaire et regroupés dans un programme-cadre pluriannuel dont l'objectif est de renforcer la base scientifique et technologique de l'industrie européenne et de l'encourager à devenir plus compétitive à l'échelle internationale. Lancé initialement au début des années 80 avec l'idée de réaliser au niveau de la Communauté toutes les recherches qu'il serait plus approprié et plus efficace d'exécuter à ce niveau, le programme-cadre s'est constamment modifié et étoffé au cours de ses trois premières versions ; la quatrième était en cours de négociation au milieu de l'année 1993.

Le programme-cadre en cours, qui couvre les années 1991 à 1994 et qui dispose d'un budget d'environ 600 millions d'ECU, contre 396 millions pour le programme précédent, comporte trois grands volets : les technologies habilitantes, couvrant les technologies de l'information, les techniques industrielles et les technologies des matériaux ; la gestion des ressources naturelles, qui comprend l'environnement, les sciences de la vie et l'énergie ; et la gestion des ressources intellectuelles, axée sur le capital humain et la mobilité, dont le but est la création d'une main-d'œuvre et d'un potentiel scientifiques authentiquement européens. Le budget du programme représente moins de 5 % du budget total des Communautés européennes et est d'un ordre de grandeur similaire à celui des dépenses totales de R-D dans les 12 États membres. Pour le quatrième programme-cadre, la Commission propose un budget de 13 100 millions d'ECU afin de réduire la fragmentation des efforts actuels et de favoriser la conversion des résultats obtenus en succès économiques et commerciaux.

Le quatrième programme-cadre prévoit en outre une coopération avec des pays tiers et des organisations internationales dans le domaine de la recherche, du développement et de la démonstration ; la recherche est également incluse dans les accords qui accompagnent le traité instituant l'Espace économique européen (EEE).

L'exécution des activités de recherche prévues dans le programme-cadre revêt trois formes différentes :

TABLEAU 6  
VENTILATION DES BREVETS D'EUROPE OCCIDENTALE  
DÉPOSÉS AUX ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE, 1963-1988 (%)

	1963- 1968	1969- 1973	1974- 1978	1979- 1983	1984- 1988
Allemagne <sup>1</sup>	33,74	35,62	37,16	40,10	40,91
Royaume-Uni	24,80	21,56	18,16	15,91	14,67
France	13,42	13,99	14,45	14,29	14,60
Pays-Bas	4,67	4,36	4,32	4,49	4,62
Italie	4,27	4,77	4,72	5,37	5,83
Danemark	0,92	1,08	1,03	0,93	1,03
Belgique	1,63	1,88	1,84	1,64	1,55
Irlande	0,06	0,14	0,11	0,12	0,20
Espagne	0,42	0,47	0,59	0,40	0,57
Grèce	0,06	0,08	0,07	0,04	0,05
Suisse	8,66	8,41	8,81	8,33	7,31
Suède	5,24	5,08	5,65	5,09	4,89
Autriche	1,33	1,57	1,76	1,85	1,89
Norvège	0,50	0,53	0,62	0,56	0,60
Finlande	0,25	0,42	0,68	0,85	1,27
Total	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

1. Allemagne : non compris la République démocratique allemande.

Source : US Department of Commerce, Patent and Trademark Office.

La première est la recherche *extra-muros* fondée sur le partage des coûts. La Communauté prend en charge une part importante des travaux, le solde étant supporté par l'exécutant (centre de recherche, université ou entreprise industrielle). Cette forme de recherche est la plus importante par son ampleur et est considérée comme un moyen essentiel de renforcer la compétitivité technologique de l'Europe. Elle fournit l'occasion de tirer parti des équipes et laboratoires des États membres et de bénéficier des synergies induites par le rassemblement de différentes équipes sur le même objectif de recherche. Elle constitue de ce fait un puissant moyen de coordination.

La deuxième forme de recherche est celle menée « en interne » dans les quatre sites du Centre commun de recherche (CCR) de la Communauté (Ispra en Italie, Geel en Belgique, Karlsruhe en Allemagne et Petten aux Pays-Bas). Le CCR est particulièrement bien adapté pour les recherches visant à soutenir les activités réglementaires et normatives liées à la politique économique, industrielle et sociale de la Communauté. Il a la vocation naturelle à mener des recherches sur les problèmes qui débordent les frontières nationales, comme l'environnement et l'analyse des risques. Il est également bien placé pour réaliser des travaux qui ont par définition un caractère international, par exemple la mise au point de matériels de référence et de méthodes de mesure normalisés; la gestion d'installations expérimentales de grande envergure, mises à la disposition des scientifiques des États membres de la Communauté, garantissant ainsi un engagement à long terme envers la recherche, considérée comme de nature à servir les intérêts de l'Europe et assurant l'égalité d'accès à tous les États membres.

Enfin, certaines activités de la Communauté (comme le programme de recherche médicale) prennent la forme d'« actions concertées ». Il n'y a pas de transfert de fonds, les divers éléments du programme étant apportés par les États membres, qui financent des projets nationaux dont ils assurent la mise en œuvre. La Commission assume un rôle de coordination en encourageant les échanges d'informations et prend en charge les frais correspondants. Ces actions concertées ouvrent la possibilité de puiser dans la diversité des compétences et des traditions de la Communauté sans encourir de charges financières excessives et en générant d'intéressants effets d'enrichissement réciproque. Le programme-cadre comprend des mesures visant à promouvoir la formation et

la mobilité des jeunes scientifiques et ingénieurs européens. Des aides, essentiellement pour des recherches post-universitaires, sont offertes aux ressortissants de la Communauté. En principe, les recherches doivent être menées dans un État membre autre que celui dont le bénéficiaire est ressortissant.

Dans les propositions relatives au quatrième programme-cadre, la Commission énonce six grands objectifs :

- 1) une plus grande intégration des activités nationales, communautaires et européennes;
- 2) une plus grande sélection en ce qui concerne les activités de recherche, de développement et les activités technologiques communautaires;
- 3) la diffusion et l'optimisation des résultats de recherche et de développement technologiques au niveau communautaire;
- 4) le développement de la synergie recherche/formation;
- 5) le développement des synergies entre la politique de la recherche et la politique de cohésion sociale et économique;
- 6) la flexibilité croissante des activités au niveau communautaire afin de répondre rapidement aux changements de S et T.

Tous les projets de coopération scientifique internationale sont compris dans le programme-cadre, et une intégration plus poussée de la recherche européenne est encouragée par la mise en place de mécanismes de coordination entre les programmes nationaux, les programmes communautaires et EUREKA (voir p.55), ainsi qu'avec d'autres instances européennes de coopération scientifique. Le Centre commun de recherche, qui opère sous la tutelle directe de la Communauté, pourrait jouer un rôle fédérateur au sein de ce réseau.

#### AUTRES ORGANISATIONS INTERGOUVERNEMENTALES

À la fin de la seconde guerre mondiale, la collaboration scientifique internationale a pris de l'ampleur avec la création de l'Organisation des Nations Unies pour la science, l'éducation et la culture (UNESCO), ainsi que d'autres institutions spécialisées comme l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), l'Organisation mondiale de la Santé (OMS), l'Organisation météorologique mondiale (OMM), qui, toutes, par un biais ou un autre, s'intéressent à la recherche scientifique. Les organisa-

tions de la famille des Nations Unies ont eu une influence particulière sur les relations de l'Europe avec le reste du monde dans le domaine scientifique.

Une autre organisation qui a exercé une influence non négligeable sur la vie scientifique européenne dans le secteur du nucléaire est l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et son Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) qui, entre autres activités entreprises vers la fin des années 60, a construit des réacteurs expérimentaux à Halden (Norvège) et à Winfrith Heath (Royaume-Uni) ainsi qu'une usine de retraitement de combustible nucléaire hautement enrichi à Dessel (Belgique). La première de ces installations est toujours en activité en tant que centre de recherche.

L'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord (OTAN), qui a son siège à Bruxelles (Belgique), regroupe la plupart des pays européens ainsi que les États-Unis d'Amérique et le Canada autour d'objectifs de défense collective. En 1957, l'OTAN a créé son Programme scientifique, visant à encourager le progrès des sciences en général et la participation des pays de l'OTAN aux activités de recherche. Depuis, plus d'un million de scientifiques des pays de l'Alliance et d'autres pays ont participé dans ce cadre à des programmes d'échanges, centrés sur les personnes plutôt que sur les collaborations institutionnelles.

On doit encore mentionner l'Organisation internationale de normalisation (ISO), qui regroupe les organismes nationaux de normalisation et qui opère par la recherche du consensus dans toute une série de groupes de travail et de comités d'experts. En Europe, les organismes nationaux compétents ont créé le Comité européen de normalisation (CEN) et le Comité européen de normalisation électrotechnique (CENELEC). Avec le rapprochement des pays d'Europe occidentale, le degré de raffinement scientifique nécessaire pour établir des normes qui soient opérationnelles et demeurent raisonnables a considérablement augmenté.

La première des organisations intergouvernementales (OIG) proprement européennes est le Centre européen pour la recherche nucléaire (CERN), fondé lors d'une réunion organisée par l'UNESCO en 1951 et établi en 1953 à Genève (Suisse). Depuis lors, le CERN est allé de succès en succès et a acquis une solide réputation dans toute l'Europe. On peut certainement le considérer comme le plus influent des centres de collaboration européens. En dehors des résultats scientifiques remarquables qu'il a à son actif et de la maîtrise technique qu'il a démontrée dans le domaine

extrêmement ardu de la conception et de l'exploitation d'installations expérimentales de grande envergure en physique des hautes énergies, il a servi de modèle à nombre d'autres organisations de recherche scientifique.

L'une d'entre elles est l'Organisation européenne pour les recherches astronomiques dans l'hémisphère austral, créée à Garching (Allemagne) en 1962. Sa principale mission est de fournir aux astronomes européens des télescopes qui leur permettent d'explorer l'hémisphère austral à partir d'un certain nombre d'observatoires. L'Organisation a un rôle de pointe dans le développement d'instruments d'observation avec son « télescope à technologie nouvelle », le premier à utiliser une « optique active » pilotée par ordinateur pour améliorer la définition de l'image. Ce système sera repris dans le très grand télescope qui sera construit dans les dernières années du siècle.

L'autre rejeton important du CERN est le Laboratoire européen de biologie moléculaire (EMBL), créé en 1974 sous les auspices de l'Organisation européenne de biologie moléculaire, elle-même fondée en 1964. Le laboratoire s'est ouvert à Heidelberg (Allemagne) en 1977; il s'est rapidement acquis une réputation pour la valeur de ses travaux scientifiques et techniques et est devenu fameux, comme le CERN, pour la qualité de la formation dispensée aux jeunes chercheurs. Récemment, un nouveau laboratoire extérieur, l'Institut européen de bio-informatique de Cambridge (Royaume-Uni), est venu s'ajouter aux deux autres existants, le Deutsches Elektronen Synchrotron (DESY) de Hambourg (Allemagne) et l'Institut Laue-Langevin de Grenoble (France). Une autre installation extérieure est en construction, également à Grenoble, l'Installation européenne de rayonnement synchrotron (ESRF).

Comme autre organisation scientifique européenne, on peut nommer l'Agence spatiale européenne (ASE), qui connaît également de grands succès. Lancée à Paris en 1973 à l'issue de la fusion de l'Organisation européenne de recherche spatiale (ESRO) et du chancelant Centre européen de construction de lanceurs d'engins spatiaux (CECLES) qui avaient été créés en 1962, l'ASE administre un programme scientifique très fructueux, dont Giotto, satellite de recherche sur les comètes, est une notable manifestation. Le programme repose sur quatre « piliers » : la physique solaire terrestre, les missions planétaires, la spectroscopie par rayons X et la radiospectroscopie à ondes millimétriques. L'ASE a également des activités commerciales, assurant le lancement de quelque 50 % des satellites commerciaux de

télécommunication, d'observation de la Terre et de météorologie, en utilisant la fusée Ariane. Ces activités ont des retombées considérables en Europe, dans les domaines des statistiques agricoles et des prévisions de récolte, des prévisions météorologiques et des études océanographiques et environnementales s'appuyant sur des techniques de pointe.

L'exemple le plus récent de collaboration à l'échelle européenne est le programme EUREKA, lancé en 1985 à l'initiative du Gouvernement français. Ce programme vise essentiellement la recherche précommerciale et se fonde sur des projets paneuropéens définis d'un commun accord, pour lesquels les participants recherchent des financements auprès de leur propre gouvernement. Ce programme est beaucoup moins centralisé que ceux de la Communauté européenne et repose davantage sur une approche empirique. On compte actuellement environ 675 projets en cours, répartis entre neuf secteurs de haute technologie.

On voit donc qu'en dépit du poids croissant de la Communauté européenne et de son programme-cadre, un certain nombre d'organisations et d'agences financées par les gouvernements continuent d'exister et, dans bien des cas, de prospérer. Alors que les programmes communautaires visent à améliorer la situation sociale dans la Communauté et à renforcer la compétitivité internationale de l'industrie, les programmes des autres OIG se situent à l'intérieur de domaines scientifiques déterminés, exigeant des équipements lourds et coûteux ou des échanges intensifs. EUREKA est un cas spécial, qui évite la bureaucratie centralisatrice et l'éloignement du terrain trop souvent reprochés aux entreprises de ce type. Il est encore trop tôt pour juger réellement de son succès face aux défis industriels, mais il a montré qu'une collaboration transfrontière entre les vingt pays participants était réalisable. En ce qui concerne les projets de science lourde, on discerne une tendance à développer des collaborations à l'échelle mondiale, en particulier avec l'Amérique du Nord, et souvent le désir de rechercher de nouveaux partenaires hors des sphères d'influence initiales. On en trouve un exemple dans le projet JET (Joint European Torus) réalisé sur le site de Culham (Royaume-Uni) dans le cadre du Programme « fusion » de la Communauté, actuellement en voie d'achèvement. La prochaine expérimentation d'envergure dans le domaine de la fusion devrait être organisée à l'échelle mondiale, les ressources financières requises excédant celles que l'on pourrait réunir dans le cadre d'un financement européen. Le projet actuellement le plus prometteur semble être celui du Réacteur expérimental thermonucléaire international (ITER).

En résumé, on peut dire que les OIG s'intéressent essentiellement à la recherche fondamentale, les programmes de la Communauté à la recherche préconcurrentielle, tandis que les activités d'EUREKA concernent la recherche précommerciale.

## ORGANISATIONS NON GOUVERNEMENTALES

La seconde moitié de ce siècle a vu se multiplier les organisations non gouvernementales (ONG) internationales ayant pour but d'exploiter les avantages de la collaboration dans tous les secteurs de l'activité scientifique. Leur nombre est considérable et nous nous bornerons ici à évoquer un échantillon représentatif des différents types d'organisations, allant des organisations internationales au service de la science mondiale en général, comme le Conseil international des unions scientifiques (CIUS), à des associations de chercheurs siégeant à titre personnel, comme la toute récente *Academia Europeae*, société d'hommes de science éminents, ou la très ancienne Société européenne de physique, en passant par les organisations strictement européennes s'intéressant à une seule discipline, comme la Fédération des sociétés européennes de biochimie (FEBS), qui regroupe des sociétés nationales. Toutes ces organisations apportent aux scientifiques des voies de communication ouvertes ou plus ou moins exclusives dans les cas où les structures des OIG se révèlent trop lourdes ou inadéquates. Leur approche est souvent plus « démocratique » que celle des organisations régies par les prescriptions des politiques scientifiques élaborées par les gouvernements ou les instances de la Communauté européenne.

La plus influente des ONG européennes est sans doute la Fondation européenne de la science (FES), créée à Strasbourg en 1974. Elle regroupe 59 institutions nationales et internationales (centres de recherche et organisations fournissant des aides publiques) de 21 pays d'Europe occidentale. En sont membres des conseils nationaux de la recherche, la Communauté européenne et des organisations scientifiques de haut niveau, comme la Société Max Planck (Allemagne), le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) (France) et la Royal Society britannique.

La FES s'est révélée particulièrement efficace dans le lancement de grands projets de collaboration, comme l'Installation européenne de rayonnement synchrotron (ESRF), d'une puissance de 6 GeV, construite à Grenoble (France). Les travaux ont démarré en 1989 et il est prévu

qu'un petit nombre de lignes de lumière seront mis en service dès 1994. La série complète de 30 lignes devrait être opérationnelle en 1998. Les maîtres d'œuvre du projet sont la France, l'Allemagne, l'Italie et le Royaume-Uni, auxquels l'Espagne, la Suisse, les pays nordiques et la Belgique se sont associés. Lorsqu'elle entrera en service, cette installation sera la source de synchrotron la plus puissante du monde, en attendant celle encore plus puissante (7 GeV) qui est en construction aux États-Unis d'Amérique.

Dans un tout autre domaine, le Projet européen de géotraverse réunit des instituts de plusieurs pays européens qui ont constitué un réseau de recherche pour une étude approfondie de la croûte terrestre du nord du continent jusqu'à sa frontière méridionale avec l'Afrique. Cette initiative de la FES est l'illustration de l'une des idées maîtresses de la Fondation, qui consiste à créer un réseau entre chercheurs de différents instituts et pays européens pour réaliser des projets conjoints ou mettre en commun leurs connaissances. Cette idée a été reprise par beaucoup d'organisations nationales et européennes et inspire nombre d'actions communautaires dans des domaines aussi divers que la recherche médicale et la R-D sur les nouveaux matériaux. Il existe à l'heure actuelle 27 réseaux au sein de la FES couvrant des sujets qui vont de la communication et du transport aux fluides et solides quantiques, avec une place de choix pour les sciences de la vie.

Grenoble accueille aussi l'Institut Laue-Langevin, qui exploite le réacteur à haut flux le plus puissant du monde pour l'exploration des rayonnements neutroniques. Les installations sont gérées en partenariat par la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni. Ici encore, c'est le principe du réseau qui est appliqué pour l'exploitation de la machine, beaucoup trop coûteuse pour être utilisée par une seule équipe.

Récemment créée sous le patronage de la Communauté européenne, l'Association internationale pour la promotion de la coopération avec les scientifiques des États indépendants de l'ex-Union soviétique a un rôle particulièrement important à jouer en établissant des liens entre chercheurs pour éviter un effondrement total de l'activité scientifique dans le climat économique très difficile et incertain que ces pays risquent de connaître au cours des prochaines années. L'Association est constituée des 12 pays de la Communauté et de 12 États de l'ex-Union soviétique. L'Autriche s'est jointe depuis peu à l'Association.

Étant donné la volonté de mettre la science et la technologie au service de la compétitivité industrielle qui prévaut en Europe occidentale, il n'est guère surprenant de rencon-

trer, à côté des actions menées par les gouvernements et les instances communautaires, des initiatives émanant de l'industrie et des investisseurs. La Table ronde européenne est une ONG constituée de financiers et de dirigeants de grandes entreprises européennes spécialisées dans les produits de haute technologie. En faisant connaître ses avis aux gouvernements et à la Communauté, ce groupe injecte dans le débat une certaine approche commerciale, qui vient contrebalancer l'approche technologique que les conseillers purement scientifiques ont tendance à privilégier.

## L'ÉVOLUTION DE LA RECHERCHE ET L'OPINION PUBLIQUE

L'examen de la politique scientifique suivie par les grands pays européens au cours des trente ou quarante dernières années fait globalement apparaître une certaine évolution : les grands centres de recherche financés sur fonds publics, après une phase de plein essor, subissent dans bien des cas une éclipse.

Vers le milieu des années 30, deux facteurs — la nécessité de faire appel à des équipements de plus en plus sophistiqués pour réaliser des expériences toujours plus complexes et délicates, et l'apparition d'outils nés du progrès technique qui ouvraient la possibilité de renouveler les méthodes ou d'accroître la précision des résultats — ont rejeté dans l'ombre l'image du chercheur solitaire travaillant dans son propre laboratoire, qui prédominait dans les sciences physiques (et aussi dans de nombreuses branches des sciences de la vie).

Le gros établissement de recherche, généralement détenu et exploité par l'État ou une société multinationale, était souvent fondé sur l'expérience née des activités de R-D lancées pendant la seconde guerre mondiale pour répondre à des impératifs militaires et, ultérieurement, à l'expansion rapide de la R-D nucléaire civile en vue d'améliorer la sécurité et la fiabilité des sources d'énergie nucléaire.

Les centres de recherche multidisciplinaires sont devenus, dans de nombreux pays, le lieu privilégié pour traiter les problèmes les plus divers, allant des techniques agricoles à la R-D industrielle. La gestion des activités scientifiques est devenue un métier en soi : subdiviser les grands projets en différentes composantes se rattachant chacune à une discipline particulière, et dont l'exécution est à confier à une équipe de spécialistes.

Cependant, une fois que les projets avaient atteint leurs objectifs, les besoins en personnel scientifique engagé dans

des projets de R-D particuliers se réduisaient. La R-D orientée sur des projets a souvent été remplacée par des programmes de nature plus générale, et les gouvernements, sous la pression de changements de priorités et de contraintes économiques, ont été amenés à s'interroger sur ce qui justifiait le maintien de telles équipes scientifiques.

Les premières tentatives faites pour appliquer à la recherche l'analyse coûts-avantages, utilisée pour l'évaluation des grands projets industriels, n'ont en général donné que des résultats qualitatifs; en effet, il est très difficile de définir des paramètres significatifs de ressources (*input*), et de production (*output*), la scientométrie n'appréhendant essentiellement que les résultats accessibles par le biais de publications et de l'analyse des citations. Même dans le cas de la recherche industrielle, les effets financiers éventuels ne peuvent être complètement analysés que lorsque sont connus les coûts de production, de commercialisation, etc.

Les systèmes d'examen par les pairs sont donc devenus les outils privilégiés d'évaluation des programmes, les principaux critères d'appréciation étant la nécessité, la qualité et l'efficacité de la gestion du projet. A la suite d'examens rigoureux, nombre de grands établissements ont été ramenés à une taille plus modeste ou divisés en petites unités, plus faciles à gérer et mieux adaptées aux tâches envisagées; dans certains cas, ces efforts ont conduit à la privatisation d'établissements placés jusqu'alors sous la tutelle de l'État.

Ces évolutions ont eu pour résultat d'amener les scientifiques et techniciens, désormais moins isolés du monde extérieur, à adopter une attitude plus souple à l'égard des travaux qui leur étaient proposés, et une certaine dose de recherche sur contrat est devenue la norme pour nombre d'équipes se consacrant à la recherche fondamentale. Dans certains cas, cela a conduit à un enrichissement, mais dans d'autres, des scientifiques ont abandonné leur poste pour prendre d'autres fonctions, notamment commerciales.

Les tensions s'exerçant sur le marché de l'emploi favorisent par ailleurs la mobilité des chercheurs, qui commencent à accepter des contrats de durée déterminée au lieu de « l'emploi à vie » qui était presque de règle en Europe au temps des recherches directement financées sur fonds publics. Dans le même temps, la difficulté de trouver un emploi provoque un « exode des cerveaux » chez les jeunes diplômés du troisième cycle, situation qui était d'ailleurs courante en Grèce et en Irlande où l'offre de diplômés de haut niveau excède traditionnellement la demande. A cet égard, certains centres internationaux d'excellence scientifique,

comme le CERN, ont contribué à contenir ce phénomène en constituant des « parcs de compétences » pour certains jeunes chercheurs particulièrement doués.

La pression en faveur d'un renouvellement des structures est par ailleurs alimentée par l'exigence d'une plus grande transparence dans les activités de l'État, exprimée par une opinion publique dont l'attitude envers la science et les scientifiques a elle aussi considérablement évolué.

Les Européens de naguère, assez peu cultivés sur le plan scientifique et imprégnés d'une mentalité essentiellement traditionaliste, avaient de l'homme de science soit l'image un peu ridicule du « professeur fou », soit celle du magicien occupé à déployer devant un public admiratif des merveilles nouvelles mais sans utilité particulière. C'est la seconde guerre mondiale qui, en un sens, a modifié cette image en apportant la démonstration que la technologie était capable de produire les engins offensifs et défensifs dont les populations civiles ont fait la douloureuse expérience.

La domestication de l'énergie nucléaire a ouvert une période d'euphorie au cours de laquelle l'homme de science était jugé capable d'apporter à la société une source d'énergie intarissable et pratiquement gratuite. Mais il était aussi considéré comme celui qui avait ouvert la porte aux armes de destruction massive, et donc comme un être dangereux et incontrôlable. Certaines personnalités scientifiques éminentes de l'époque étaient vivement conscientes de cette « innocence perdue » et ont ouvert le débat, toujours actif aujourd'hui, sur les conséquences de l'activité scientifique pour le bien-être moral et social.

Des évolutions similaires peuvent être observées à propos d'autres produits de l'activité scientifique, comme les insecticides, les solvants, les réfrigérants, etc., dont l'utilisation sans mesure a conduit à des effets indésirables et à un mouvement de rejet collectif. Depuis lors, les citoyens, globalement beaucoup plus cultivés, estiment avoir le droit de savoir, de discuter, de comprendre et, dans la mesure du possible, de participer aux décisions relatives aux orientations de la R-D et aux moyens d'en contrôler les résultats au nom de l'intérêt général.

Le public est désormais sensible aux considérations éthiques dans le débat sur des problèmes tels que les manipulations génétiques, la recherche sur les embryons, la thérapie génique et les recherches sur le génome humain, ou encore l'utilisation d'animaux de laboratoire pour la recherche médicale, voire le débat sur l'opportunité d'adopter des règles plus rigoureuses pour certains groupes d'animaux comme les animaux domestiques et les primates.

Aujourd'hui, ces questions à forte charge émotionnelle sont non seulement étudiées attentivement par les scientifiques, les décideurs et la presse spécialisée, mais fournissent aussi la matière d'articles ou d'émissions à sensation et souvent inexacts dans les médias populaires. Cela ne contribue pas toujours à l'information d'un public désireux de comprendre et de se faire une opinion sur des sujets qui touchent directement à sa vie quotidienne.

## CONCLUSIONS

L'instantanéité des communications et la facilité des déplacements font que le monde d'aujourd'hui est devenu plus petit et plus interdépendant, et nombre des phénomènes évoqués ci-dessus sont sans doute présents dans bien d'autres pays développés. L'homme de science est souvent l'ambassadeur des rapprochements politiques, et les scientifiques européens ont contribué à apporter aide et éducation aux pays en développement.

La poursuite de l'activité scientifique est par essence dynamique, et l'Europe occidentale ne fait pas exception à cet égard. L'ensemble de la région évolue dans le sens d'une plus grande unité, mais dans le respect des traditions individuelles, en ce qui concerne aussi bien la conception des poli-

tiques scientifiques que la vie proprement culturelle. Cela doit être considéré comme une occasion précieuse de développer plus avant les moyens de renforcer les liens scientifiques en même temps que de libérer les talents cachés dans les régions défavorisées et d'accroître la capacité de ces dernières à participer aux avancées de la science européenne.

## LECTURES COMPLÉMENTAIRES

- BMFT. 1993. *Bundesbericht Forschung 1993*, Bonn, Bundesministerium für Forschung und Technologie.
- Commission des Communautés européennes. 1992. *Les programmes communautaires de recherche : un guide pour les participants*, 3<sup>e</sup> édition, Luxembourg, Office des publications officielles.
- . 1993. *Proposition de décision du Conseil relative au quatrième programme-cadre de la Communauté économique européenne pour des actions communautaires de recherche, de développement technologique et de démonstration (1994-1998)*, Luxembourg, Office des publications officielles.
- ENFA. 1993. *Energia e innovazione*, vol. 39, n° 5-6, Rome, Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente.
- Gouvernement français. Ministère des finances. 1992. *Projet de loi de finances 1993 : état de la recherche et du développement technologique : activités 1991 et 1992 et perspectives 1993*, Paris, Imprimerie Nationale. (2 063049 b 25.)
- OCDE. 1992. *Principaux indicateurs de la science et de la technologie 1992*, Paris, Organisation pour la coopération et le développement économiques.
- Patel, P. et Pavitt, K. 1992. Europe's technological performance, dans A. F. J. van Raan (dir. publ.), *Science and technology in a political context. Proceedings of Conference on science and technology indicators*, octobre 1991, Leyde (Pays-Bas), Université de Leyde.
- Schubert, A.; Glänzel, W. et Braun, T. 1989. *Scientific datafiles, Scientometrics*, vol. 16, p. 1-6.
- Science in Europe, *Science*, vol. 237, n° 4819, 1987, p. 1093, 1101-1114.
- Science in Europe, *Nature*, vol. 338, n° 6218, 1989, p. 717-736.
- Science in Europe '93, *Science*, vol. 260, n° 5115, 1993, p. 1703-1758.
- United Kingdom Government. 1993. *Realizing our potential : a strategy for science, engineering and technology*, Londres, HMSO. (UK Government White Paper CM2250.)
- World Economic Forum and IMD. 1992. *The World Competitiveness Report 1992*, Genève/Lausanne.

**SAM J. LLOYD** est consultant en gestion des réacteurs de recherche auprès de la Commission européenne et a été chargé de procéder à l'évaluation des huit instituts du Centre commun de recherche (CCR) d'EURATOM en s'appuyant sur les avis de groupes de scientifiques et de gestionnaires éminents. Il travaille également comme consultant auprès d'un certain nombre d'autres organisations.

M. Lloyd a commencé sa carrière dans les British Royal Signals, puis est entré au centre AERE de Harwell en qualité d'ingénieur d'expérimentation à la Division métallurgie. Il a ensuite été affecté à Moll (Belgique) pour y diriger une équipe chargée de conduire des expérimentations sur les dommages subis par les matériaux irradiés dans les réacteurs refroidis au gaz. M. Lloyd a servi quatre ans à la tête du Département irradiation du CCR d'EURATOM, puis a animé une cellule de réflexion chargée de mettre au point de nouveaux programmes pour l'installation du CCR de Petten. Il a ensuite dirigé les laboratoires de recherche sur les matériaux et conseillé le secrétariat scientifique et technique du CCR en matière de publications.

M. Lloyd a été appelé au Siège du CCR à Bruxelles en 1982, et nommé assistant personnel du Directeur de la DGXII en 1984. De 1988 jusqu'à sa retraite quatre ans plus tard, il a dirigé le secrétariat du Conseil d'administration du CCR.

## L'EUROPE CENTRALE ET ORIENTALE

*Blagovest Sendov*

Avant d'examiner la situation actuelle de la science en Europe centrale et orientale et de tenter d'en évaluer les perspectives futures, il convient de mesurer et de comprendre la signification historique des changements qui se produisent dans ces pays depuis la chute des régimes totalitaires. Les anciens pays socialistes de la région avaient chacun leurs caractéristiques propres, mais n'en étaient pas moins confrontés à nombre de problèmes similaires, étant contraints depuis de nombreuses années de suivre le même modèle de développement. L'organisation et le développement de l'activité scientifique étaient deux aspects de ce modèle.

Dans ce qu'il était convenu d'appeler le « camp socialiste », la vie politique, économique et culturelle était tout entière dominée par l'idéologie communiste, une idéologie qui se voulait la première dans l'histoire à bâtir une société sur la base d'une théorie scientifique. La science jouissait donc sous les régimes communistes d'un prestige particulier.

Il est courant aujourd'hui de dénigrer et de rejeter tout ce qui a été fait par ces régimes, mais on ne peut se contenter de cette attitude si l'on veut réussir le passage du totalitarisme à la démocratie. Il serait déraisonnable de nier un certain nombre de résultats dans le domaine scientifique et social. Le tableau 1 montre que l'effectif du personnel employé à des travaux de recherche et développement (R-D) a augmenté régulièrement jusqu'en 1989 dans tous

les pays sauf la Hongrie et la Pologne, où il a commencé à décroître après 1980. Cela s'explique peut-être par la liberté relativement plus grande qui était offerte dans ces pays aux scientifiques désireux d'aller travailler à l'étranger, ainsi que par la situation économique et politique qui y régna durant les années 80.

Au moment où les premiers changements commençaient à se produire en Europe orientale et centrale, la prestigieuse revue scientifique *Nature* publia sous le titre « Réformer les académies de Staline » une série d'articles dans laquelle on pouvait notamment lire ceci : « L'un des vestiges les plus frappants du stalinisme est la survivance en Europe de l'Est d'académies des sciences qui n'ont jamais rempli leur fonction. Le temps est venu de les transformer. » Transformer les académies de ces pays est en effet un enjeu majeur en raison de leur potentiel scientifique et de l'importance de la science et des scientifiques pour l'avenir de l'économie de marché et de la démocratie.

Les changements survenus en Europe centrale et orientale se sont déclenchés et enchaînés en cascade en un laps de temps très court, entraînant la chute des régimes communistes, mais ils ne se sont nullement arrêtés là. De plus, il est tout à fait possible qu'un nouveau régime totalitaire apparaisse sur les ruines de l'ancien si le processus de démocratisation ne s'accompagne pas d'une amélioration sur le plan économique. Dans le rapport de septembre 1992

TABLEAU 1  
PERSONNEL EMPLOYÉ A DES TRAVAUX DE R-D

Pays	1970	1975	1980	1985	1987	1989
Bulgarie	46 633	60 939	72 335	90 308	96 471	—
Hongrie	50 749	60 604	62 866	48 745	—	42 276
Pologne	196 200	299 000	240 000	181 000	—	—
ex-République démocratique allemande	—	158 573	191 429	191 262	—	195 073
Roumanie	46 382	62 918	—	—	167 049	169 964
ex-Tchécoslovaquie	137 667	149 011	171 789	180 439	—	185 492
ex-Yougoslavie	36 467	42 524	53 699	68 591	—	78 704

Source : *Annuaire statistique 1992*, Paris, UNESCO, 1992.

de la Direction des programmes relatifs à la science et aux politiques de l'American Association for the Advancement of Science, on peut lire : « Bon nombre des scientifiques que nous avons rencontrés en Europe de l'Est redoutent de voir, à brève échéance, se succéder des gouvernements instables et, à plus long terme, émerger un nouveau régime autoritaire porté par le mécontentement social. Entre-temps, font-ils valoir, la situation politique actuelle, caractérisée par une multiplicité de partis faisant assaut de promesses à bon marché, est de mauvais augure pour la science, car la population, dans sa majorité, n'accorde pas un rang de priorité élevé à la recherche. » (Cave et Frankel, 1992, p. 22.)

Le passage du totalitarisme à une société civile et démocratique demandera du temps. Les forces politiques engagées dans ce processus concentrent en général leurs efforts sur la mise en place d'un nouveau système juridique et l'abandon de l'économie centralisée au profit d'une économie de marché fondée sur la propriété privée. Ces deux réformes sont certes indispensables, mais il ne peut y avoir de véritable démocratie sans qu'il y ait d'institutions capables d'analyser et d'interpréter les faits de façon à promouvoir une participation plus effective et plus responsable des citoyens à la vie politique. Les académies des sciences et les universités font partie de ces institutions.

## LES STRUCTURES DE LA SCIENCE

Les pays socialistes avaient tous adopté le système soviétique distinguant trois types d'organismes scientifiques. Les académies des sciences s'occupaient de la recherche fonda-

mentale par l'intermédiaire de leurs instituts, les universités consacraient l'essentiel de leur activité à l'enseignement tout en faisant un peu de recherche fondamentale, et les instituts de recherche de l'industrie et de l'agriculture (rattachés aux ministères compétents) prenaient en charge la recherche appliquée.

### Les académies des sciences

Durant la période socialiste, toutes les académies des sciences d'Europe centrale et orientale étaient organisées sur le modèle de l'Académie des sciences de l'Union soviétique, avec laquelle elles partageaient de nombreux traits communs, dont voici les principaux :

- ❑ L'académie était dans chaque pays l'instance scientifique suprême. Cette suprématie lui conférait une autorité considérable et lui valait une aide financière très importante du gouvernement, au détriment, à certains égards, de la recherche menée dans les universités.
- ❑ Elle remplissait certaines fonctions gouvernementales proches de celles d'un ministère de la science, tout en représentant la communauté scientifique de son pays au sein des organisations non gouvernementales internationales. C'est ainsi que les pays d'Europe centrale et orientale étaient (et sont toujours) représentés par leur académie des sciences au sein du CIUS (Conseil international des unions scientifiques), la plus prestigieuse de ces organisations (CIUS, 1993).
- ❑ Chaque académie des sciences se composait en fait de deux éléments : un élément associatif — cénacle réunissant des scientifiques triés sur le volet à l'instar des académies occidentales — et un élément institutionnel — vaste ensemble d'unités de recherche financées par l'État.

En termes quantitatifs, ces académies représentaient en général entre 8 et 12 % du potentiel national de recherche. Mais leur contribution en termes qualitatifs était bien supérieure. En Bulgarie, par exemple, 52 % des articles scientifiques d'origine bulgare publiés en 1988 dans des revues internationales étrangères avaient pour auteur un membre du personnel de l'Académie des sciences, laquelle n'employait pourtant que 12 % des scientifiques et chercheurs du pays.

L'impact des académies d'Europe orientale et centrale dans la production scientifique de leurs pays respectifs durant la période du changement est illustré par la proportion, dans chaque pays, de publications ayant pour auteur des scientifiques employés par elles (tableau 2).

TABLEAU 2  
POURCENTAGE DES TRAVAUX PUBLIÉS AYANT POUR  
AUTEURS DES MEMBRES DU PERSONNEL DE L'ACADÉMIE

	1988	1989	1990	1991
Bulgarie	64,2	65,1	60,9	59,4
Hongrie	29,0	33,1	31,1	31,5
Pologne	22,1	21,2	23,4	23,5
ex-Tchécoslovaquie	41,4	39,1	40,0	39,8

Source : Science Citation Index, Institute for Scientific Information (ISI). Reproduit avec l'aimable autorisation de David A. Pendlebury.

Le fonctionnement des académies n'était pas non plus exempt de contradictions internes. Les activités des instituts de recherche masquaient et, en définitive, minimisaient l'apport des membres de l'Académie en tant que groupe indépendant de scientifiques et de personnalités hautement compétents.

### *Les universités*

Il ne faut pas oublier qu'avant la seconde guerre mondiale, les pays d'Europe centrale et orientale se rattachaient à la même tradition de recherche universitaire que ceux d'Europe occidentale. Avant l'organisation des académies sur le modèle socialiste, les équipes de chercheurs les plus brillantes et le plus gros potentiel de recherche étaient concentrés au sein des universités. En Pologne comme en Hongrie, les vieilles universités demeurèrent d'importants centres scientifiques, même sous le régime totalitaire. Évoquant le rôle de l'Académie polonaise des sciences dans la vie scientifique nationale, son président, l'académicien Aleksander Gierysstor écrivait : « Comme dans d'autres pays d'Europe, parmi les institutions qui s'occupent de la science dans mon pays, les universités sont plus anciennes que les sociétés savantes et les académies, qui sont elles-mêmes plus anciennes que les centres de recherche spécialisés, et ces derniers ont précédé le Comité d'État pour la recherche scientifique. » (Gierysstor, 1991.)

L'enseignement supérieur était une autre priorité des régimes socialistes et obtint des résultats remarquables sur le plan quantitatif. Néanmoins, on ne jugeait pas les universités capables de jouer un rôle important dans le domaine de la recherche fondamentale. Cette dissociation arbitraire de l'enseignement et de la recherche fut préjudiciable à la fois à la science et à l'éducation.

L'un des graves défauts des académies de type socialiste était qu'elles se trouvaient *de facto* coupées des universités et de la formation scientifique dispensée aux jeunes. Pour y remédier, la Bulgarie lança en 1972 une expérience visant à intégrer l'Académie bulgare des sciences et l'Université de Sofia. Il s'agissait essentiellement de faire tomber les cloisons entre la recherche et l'enseignement universitaire en offrant — en théorie — à tous les scientifiques de l'Université la possibilité d'utiliser les laboratoires et autres moyens de recherche de l'Académie et à tous les scientifiques de l'Académie celle d'enseigner à l'Université.

En octobre 1986, un groupe de treize scientifiques, ingénieurs, directeurs de recherche et économistes améri-

cains effectua une visite en Bulgarie et participa, aux côtés de collègues bulgares, à un atelier organisé par l'Académie bulgare des sciences et la National Academy of Sciences des États-Unis d'Amérique. L'intégration de l'Académie et de l'Université suscita les commentaires suivants : « L'intégration organique des instituts de l'Académie bulgare des sciences et des facultés correspondantes de l'Université de Sofia est sans équivalent en Europe de l'Est. Même si les activités de recherche des deux institutions sont encore sensiblement différentes, les échanges de scientifiques, d'étudiants et d'idées se sont considérablement améliorés pour le plus grand bénéfice des deux institutions. » (Schweitzer, 1987.)

Malgré la bénédiction officielle du Parti communiste, cette initiative n'a pas soulevé l'enthousiasme, parce que son esprit heurtait certains principes fondamentaux chers au régime. Durant la période socialiste, les universités n'étaient pas seulement considérées comme d'importants centres de formation professionnelle et intellectuelle, mais aussi comme des instruments d'endoctrinement idéologique des futurs spécialistes. Il est arrivé que l'on déplace promptement des universitaires de talent ayant enfreint les instructions du Parti en les nommant à l'Académie à seule fin de les éloigner des étudiants. La séparation de l'Académie et de l'Université n'était donc pas une erreur d'organisation, mais bien une condition nécessaire à la bonne marche du système. Si l'intégration de l'Académie bulgare des sciences et de l'Université de Sofia a échoué, c'est parce qu'elle était contraire à certains postulats politiques du socialisme.

### *La recherche appliquée*

Le lien entre la théorie scientifique et la pratique posa au socialisme un problème insoluble. Malgré les pressions exercées et les sommes investies, aucun mécanisme efficace ne put être créé. Des instituts de recherche gigantesques rattachés à divers ministères furent nombreux à voir le jour, mais leurs découvertes trouvèrent rarement des applications. La principale leçon qu'il faut tirer de cet échec est que, en matière de recherche appliquée, les plans et les pressions administratives, quelles qu'en soient la vigueur et l'ampleur, ne peuvent compenser l'absence de motivation personnelle et d'initiative privée.

Aujourd'hui, durant la phase de transition de la planification centralisée à l'économie de marché, ce sont les instituts spécialisés dans la recherche appliquée qui souffrent le plus. Rien ne justifie qu'ils soient financés par l'État, et

pourtant seuls un petit nombre d'entre eux sont transformés en laboratoires de recherche privés.

## LA SCIENCE ET L'IDÉOLOGIE

L'une des règles instaurées par le régime totalitaire était la distinction obligatoire entre science véritable (c'est-à-dire socialiste) et pseudo-science (science bourgeoise). Cette distinction était naturelle et très visible dans le domaine de la philosophie et des sciences sociales, où l'idéologie servait à la fois de critère et de méthodologie. Chacun à l'université devait passer des examens dans les disciplines idéologiques fondées sur la doctrine marxiste-léniniste. Des chaires d'idéologie avaient donc été créées dans tous les établissements d'enseignement supérieur et des milliers de maîtres assistants et de professeurs étaient chargés d'enseigner la philosophie marxiste, l'économie politique et autres matières à contenu idéologique. Même les scientifiques confirmés d'un certain âge furent contraints de suivre des cours d'idéologie marxiste au lendemain de la révolution socialiste.

Lorsqu'on parle de la science sous les régimes communistes totalitaires, il faut distinguer entre les sciences exactes et naturelles (mathématiques, physique, chimie, etc.) et les sciences sociales et humaines. Il est de fait que ces régimes se sont servis des unes et des autres en les employant à des fins différentes.

Les sciences sociales étaient utilisées pour asseoir le régime sur des bases scientifiques, en démontrer la nécessité historique et lui promettre un brillant avenir. « La science avait pour rôle, dans le passé, de justifier *a posteriori* les décisions politiques » (Cave et Frankel, 1992, p. 35.) Au cours de cette période, on forma des milliers de « scientifiques » dont la seule tâche était de démontrer « scientifiquement » le bien-fondé de la politique économique et sociale de ces régimes.

Les sciences exactes et naturelles jouissaient d'une plus grande indépendance, mais ce n'était pas toujours la règle. Certaines théories scientifiques furent combattues pour des raisons idéologiques, ce qui eut pour effet de freiner considérablement le développement de ces disciplines dans les pays socialistes. La théorie de l'hérédité et la cybernétique furent taxées de pseudo-sciences — c'est l'exemple le plus flagrant d'ingérence de l'idéologie. Le combat contre la théorie de l'hérédité fut si brutal qu'il coûta la vie à plusieurs biologistes éminents dans les pays communistes. La cybernétique et l'informatique furent également la cible de

campagnes vigoureuses qui retardèrent gravement le développement de la technologie des ordinateurs.

Les scientifiques étaient soumis à un contrôle idéologique très sévère. Toute promotion au cours d'une carrière scientifique devait être approuvée à tel ou tel échelon du Parti. Tous les scientifiques appartenaient à ce que l'on appelle la *nomenklatura*. Les scientifiques qui n'étaient pas membres du Parti n'étaient pas à proprement parler des proscrits, mais posséder la carte du Parti simplifiait beaucoup la vie. En Bulgarie, par exemple, alors que 10 % seulement de l'ensemble des citoyens étaient inscrits au Parti, près de 80 % des membres à part entière de l'Académie avaient leur carte.

Il est intéressant de noter que si les Académies offraient l'exemple même d'organisations scientifiques totalitaires, leurs membres étaient des libres penseurs ouverts à la démocratie, comme l'a expliqué le Président de l'Académie polonaise des sciences : « Même à l'époque où le Parti communiste était tout-puissant dans la vie sociale, les considérations politiques intervenaient relativement moins dans la nomination des académiciens que dans celle du personnel de certaines écoles supérieures. A quelques exceptions près, surtout aux premiers temps de son existence, l'Académie demeura une assemblée représentative d'experts nommés par des experts. A présent que la situation politique a changé, notre Académie, comme l'Académie hongroise, n'a pas besoin de modifier sa composition. » (Gieysztor, 1991.)

Par réaction contre l'emprise de l'idéologie sur la science sous les précédents régimes, on voit se développer aujourd'hui un mouvement d'épuration frappant les communistes. En octobre 1991, l'Assemblée fédérale de la Tchécoslovaquie a adopté une loi disposant que quiconque a exercé certaines responsabilités au sein du Parti communiste entre 1949 et 1989 ne pourra pendant cinq ans occuper un poste dans l'administration. En Hongrie, toutes les universités ont constitué des comités chargés d'examiner les antécédents politiques des directeurs de leurs différentes sections. Le parlement polonais a également voté un certain nombre de lois dans le même sens. Mais le texte le plus radical est une loi de « décommunisation de la science en Bulgarie » qui a été adoptée par le Parlement bulgare en décembre 1992. Aux termes de cette loi, tous les scientifiques ayant exercé des fonctions d'administration au sein d'une institution scientifique avec l'approbation de la haute hiérarchie du Parti (recteurs, présidents et vice-présidents de l'Académie, etc.) se sont vu exclus pour cinq ans de l'accès

à tout poste de cette nature, fût-ce la direction du service le plus modeste, ainsi que du droit de siéger dans les conseils validant les diplômes de science. Cette loi est d'application automatique et ne prévoit pas l'examen au cas par cas de la culpabilité personnelle des scientifiques concernés (environ 4 000).

Les adversaires de telles lois et les défenseurs des droits de l'homme reconnaissent certes que ceux qui sont vraiment coupables doivent être punis. Mais en condamnant des individus pour leur affiliation plutôt que pour leurs actes, ces lois créent un dangereux précédent. Ceux qui estiment avoir été accusés à tort ne disposent pas de voies de recours appropriées et la porte est ouverte à tous les abus. Tout cela accroît les tensions et ajoute aux difficultés déjà nombreuses dans les anciens pays socialistes.

## L'EXODE DES COMPÉTENCES

Dans la préface d'un rapport sur le problème de l'exode des compétences en Europe publié par le Bureau régional de science et de technologie de l'UNESCO pour l'Europe, on peut lire : « Les migrations intellectuelles et culturelles qui se produisent aujourd'hui dans les pays d'Europe centrale et orientale engagés dans la transition vers l'économie de marché pourraient gravement amenuiser le potentiel de ces pays, et de l'Europe tout entière. Il convient de noter que l'« exode des compétences » est un phénomène à multiples facettes qui affecte même les pays occidentaux et constitue parfois une source de graves problèmes pour la recherche scientifique, ainsi que pour le développement culturel. » (Angell et Kouzminov, 1991.)

En Europe centrale et orientale, l'exode des compétences se produit à un double niveau : le départ de scientifiques qui s'expatrient et la désaffection de jeunes scientifiques pleins de promesses qui se tournent vers d'autres carrières. Dans les deux cas, les principales causes sont les salaires trop bas, l'insuffisance des crédits de recherche et la dégradation des infrastructures scientifiques.

Il est impossible — et du reste sans doute inutile — de chercher à s'opposer à l'exode des compétences que connaissent les anciens pays socialistes. De nombreux scientifiques de talent, jeunes ou moins jeunes, trouvent ainsi la possibilité de poursuivre leurs recherches dans de bonnes conditions. La tâche principale est à présent d'imaginer des mécanismes propres à réduire ce phénomène. La collaboration scientifique avec des partenaires occidentaux et l'octroi

d'une aide financière à des projets conjoints susceptibles d'être menés à bien sans que les chercheurs aient besoin de faire des séjours prolongés à l'étranger sont un important moyen d'y parvenir.

## LES PERSPECTIVES FUTURES

La situation difficile que connaissent la science et les scientifiques dans les jeunes démocraties d'Europe centrale et orientale ne correspond pas seulement à une période de crise, mais aussi — et c'est plus important — à une période riche de possibilités. Le CIUS a justifié en ces termes l'organisation d'une conférence spécialement consacrée à cette question : « La science, qu'il s'agisse de ressources humaines ou d'infrastructures, est indispensable pour reconstruire une Europe de l'Est démocratique, car il est impossible sans elle de rénover l'industrie, l'agriculture, l'éducation et la culture, de mettre en œuvre de nouvelles technologies écologiquement rationnelles, d'éliminer et de prévenir les problèmes environnementaux, de participer à des programmes scientifiques internationaux, notamment dans le cadre de la coopération Nord-Sud pour le développement, et de créer les conditions nécessaires à l'innovation économique en général. »

Les parlements et les gouvernements de la région doivent être conscients des potentialités de la science pour l'économie et l'avenir de leur pays. De leur côté, les scientifiques doivent apprécier la situation et aider à évaluer les organisations scientifiques et à mener à bien leur nécessaire restructuration. La communauté scientifique internationale s'est déjà montrée prête à apporter son concours.

### *La restructuration*

A l'évidence, la démocratisation et le passage à l'économie de marché rendent inévitable la réorganisation des académies des sciences des pays concernés. Certaines d'entre elles pourraient sans plus attendre s'inspirer du modèle occidental et séparer leur élément associatif et leur élément institutionnel. Les instituts pourront devenir autonomes ou être rattachés à une université. C'est une solution qui conviendrait aux académies dont l'élément associatif est le plus dis-crédi-té et le plus affaibli.

Pour les académies possédant une longue tradition et des structures associatives solides, il s'agira de s'ajuster à la nouvelle situation économique et politique sans changer de modèle dans l'immédiat. Il faut absolument adopter une politi-

que visant à préserver le potentiel scientifique existant, qui sera nécessaire demain pour bâtir une industrie compétitive.

### *Le financement*

Face aux difficultés économiques, la tendance générale des gouvernements d'Europe centrale et orientale a été de réduire les crédits qu'ils allouaient à la recherche. En Bulgarie, par exemple, les dépenses consacrées à la science, exprimées en pourcentage du PNB, ont évolué de la façon suivante : 1,09 % en 1989, 0,78 % en 1990 et 0,47 % en 1991.

Le système occidental consistant à financer les projets de recherche fondamentale sur la base d'une évaluation par les pairs a été adopté dans plusieurs pays de la région quelques années avant la chute des régimes totalitaires. Il convient à présent de créer des organismes gouvernementaux à l'image de la National Science Foundation des États-Unis d'Amérique afin de financer les projets scientifiques sur une base fortement concurrentielle. On favorisera ainsi le retour de la recherche fondamentale dans les universités.

Afin d'exploiter le potentiel croissant des sociétés privées, il est urgent de faire adopter une législation spéciale offrant des avantages fiscaux aux entreprises finançant des activités scientifiques.

Académicien, **BLAGOVEST SENDOV** a été président de l'Académie bulgare des sciences et directeur de son Centre d'informatique et de technologie des ordinateurs. Ancien recteur de l'Université de Sofia, il a exercé de 1986 à 1990 les fonctions de vice-président du Programme intergouvernemental d'informatique de l'UNESCO. Il est l'auteur de plusieurs publications sur la théorie des approximations, la modélisation mathématique en biologie et l'informatique.

### RÉFÉRENCES

- Angell, I. O. et Kouzminov, V. A. (dir. publ.). 1991. *Report of the working party on brain-drain issues in Europe*, Venise, UNESCO-ROSTE. (Technical Report, n° 3.)
- Cave, J. et Frankel, M. S. 1992. *Breaking from the past*, Washington, American Association for the Advancement of Science. (Publication n° 92-34 S.)
- CIUS. 1993. *1993 Year Book*, Paris, Conseil international des unions scientifiques.
- Gieysztor, A. 1991. The independence of academic institutions and government : the Polish Academy of Sciences, dans A. Kuklinski (dir. publ.), *Transformation of science in Poland*, p. 199-205, Varsovie, Rewasz.
- Reforming Stalin's academies, *Nature*, n° 343, 11 janvier 1990, p. 101.
- Schweitzer, G. 1987, Introducing research results into practice : the Bulgarian experience, *Technology in Society*, n° 9, p. 141-155.
- UNESCO. 1992. *Annuaire statistique 1992*, Paris, UNESCO.

## LA RUSSIE

Sergei Kapitza

Les changements considérables qui se sont produits ces dernières années et se poursuivent encore en Europe de l'Est et sur le territoire de l'ex-Union soviétique auront à coup sûr des répercussions durables sur la situation politique, économique et sociale d'une grande partie du monde. Alors que les frontières mêmes de ces pays sont encore incertaines, on ne peut guère s'attendre à ce qu'on y accorde toute l'attention voulue à l'état présent et au devenir de la science. Si l'on replace ces événements dans une perspective plus lointaine, en les considérant peut-être d'un œil plus détaché, on s'aperçoit toutefois que l'avenir de la science leur est indissociablement lié. L'évolution à court terme de la société détermine l'état et la situation actuels de la science et de la technologie, mais à plus long terme, la science jouera elle-même un rôle décisif dans la société libérale et démocratique de demain.

Ce qui frappe dans la situation actuelle de la science en Russie, c'est le fait que l'aide de l'État s'est en grande partie tarie. Et ce non pas seulement à cause de la grave crise économique qui secoue le pays, mais aussi parce que la Russie remet profondément en question la place qu'elle entend réserver à la science. Sous le précédent régime, les sciences exactes étaient mises dans une large mesure au service de l'effort militaire, effort qui, en quelques décennies, a aidé à constituer un armement redoutable. Depuis les armes nucléaires jusqu'aux fusées et missiles autoguidés en passant par les navires et les avions, les canons et les chars, les forces armées devaient le haut niveau et le modernisme de leur équipement à la science.

Il faut reconnaître que les responsables des grands programmes à visée militaire ont généreusement soutenu la recherche fondamentale. Il existait une réelle conscience de l'importance globale d'une culture scientifique et de connaissances de base pour maintenir le niveau de développement d'une puissance d'envergure mondiale. Or, depuis vingt ans, l'aide à ce que l'on appelle la « mégascience » ou la science lourde (*big science*) est systématiquement réduite. C'est ainsi qu'aucun grand accélérateur ou réacteur expérimental n'a été commandé en dépit de l'aide promise. Le programme spatial autrefois ambitieux s'est lui aussi considérablement ralenti. La vaste flotte russe de navires de recherche océanographique reste aujourd'hui à quai faute d'argent. L'effondrement de l'État soviétique, le rejet du

communisme tel qu'il était pratiqué et la chute marquée de la production industrielle due à une profonde crise économique ont tout simplement privé les sciences exactes de la plupart de leurs repères et de leurs appuis.

Cela dit, les sciences sociales sont dans un désarroi plus grand encore, car tout le système idéologique qu'elles servaient s'est écroulé. Aujourd'hui, c'est littéralement par dizaines de milliers que les professeurs de philosophie marxiste, d'histoire du Parti communiste et d'économie politique ont perdu leur emploi, et dans bien des cas leur raison de vivre, puisque la substance même de leur savoir n'a plus la moindre valeur, ce qui donne la mesure de la crise idéologique. En d'autres termes, la Russie doit débarrasser les sciences exactes de leur orientation militaire et les sciences sociales de leur orientation idéologique.

Dans l'ex-Union soviétique, l'Académie des sciences était le principal organisme dont dépendait, dans une très large mesure, la politique scientifique et le prestige de la science. Elle comptait dans ses rangs nombre de scientifiques éminents. Malheureusement, la rigueur a souvent été sacrifiée aux nécessités de la politique durant les années de déclin. La fusion de la nouvelle Académie de la Fédération de Russie avec l'Académie des sciences de l'ex-URSS s'est traduite par un net relâchement. Le fait est que ce bastion de la science soviétique officielle a eu tendance à se ranger du côté de ceux qui s'opposaient au changement, qu'il s'agisse de la *perestroïka* de Gorbatchev ou des réformes d'Eltsine. Ses positions conservatrices ont provoqué au sein de la communauté scientifique une profonde déchirure qui a abouti à la création de sociétés savantes dissidentes, de nouvelles académies, voire d'universités. Il y a lieu de mentionner en particulier l'Académie des sciences exactes et naturelles, qui s'est efforcée de regrouper des scientifiques appartenant à un large éventail d'institutions, et notamment à des universités.

Aujourd'hui, les crédits alloués à la science sont réduits. Selon certaines sources, les subventions accordées à l'Académie russe des sciences, qui se trouve à la tête d'un vaste réseau d'instituts, de bibliothèques, d'observatoires et de maisons d'édition, ont été divisées par un facteur de trois à cinq. Cette diminution brutale des ressources financières et l'apparition de nouveaux débouchés dans le monde des affaires incitent aujourd'hui de nombreux scientifiques à se

tourner vers d'autres activités. C'est le cas surtout au sein de la jeune génération, plus dynamique. On peut donc s'attendre à voir un quart de l'ensemble des scientifiques désertir la profession, un autre quart s'expatrier, et la moitié de l'effectif restant prendre sa retraite. Au bout du compte, il pourrait fort bien se faire que le pays ne conserve que 20 à 25 % de l'ensemble de ses chercheurs actuellement en activité. Les choses n'en sont pas encore à ce point, mais il faudra surveiller cette tendance à l'avenir.

Ces changements ne sont pas seulement imminents, ils sont aussi nécessaires, si douloureux et radicaux puissent-ils paraître. L'effectif scientifique de l'URSS était pléthorique, surtout au sommet. Durant des années, la science soviétique s'est développée comme une entité autonome, en grande partie coupée de la communauté scientifique internationale — raison supplémentaire de la réformer à présent que les barrières sont tombées. C'est sur la base de ce constat qu'il faut tenter d'élaborer la politique scientifique nationale de la Russie et d'en définir les nouvelles priorités.

## IMPORTANCE DE LA RECHERCHE FONDAMENTALE

Pour mieux comprendre les exigences et les défis de notre temps, il convient d'examiner les rapports complexes que la science et la société modernes entretiennent avec l'économie. Intéressons-nous d'abord à la recherche fondamentale, cette branche de l'activité scientifique dont le seul but est la connaissance. La recherche fondamentale répond au profond besoin de comprendre et d'interpréter le monde environnant et le milieu humain lui-même. La recherche appliquée poursuit quant à elle des objectifs utilitaires. Chacun reconnaît aujourd'hui les liens profonds entre la recherche fondamentale et la culture, encore que ces liens fragiles soient menacés par la montée des forces antiscientifiques et anti-intellectuelles. Indissociablement liées à l'industrie, les sciences appliquées exercent une influence directe sur le progrès technologique et le développement économique.

Du point de vue des investissements qui leur sont consacrés, le rapport entre la recherche fondamentale, la recherche-développement appliquée (R-D) et l'industrie peut être représenté par le ratio 1/10/100. Pourtant, si l'on considère le temps qui est nécessaire pour élaborer d'abord un ensemble de concepts théoriques, en étudier ensuite telle ou telle application et, enfin, exploiter les résultats de cette recherche dans l'industrie, le rapport s'inverse (100/10/1);

en effet, il faut parfois des décennies, voire un siècle, pour fonder une tradition en recherche fondamentale ou bâtir une université, et une dizaine d'années pour faire avancer la recherche appliquée dans un domaine particulier, alors qu'une entreprise industrielle peut mettre au point un nouveau produit ou modèle en l'espace d'un an. C'est ainsi que les découvertes fondamentales de la mécanique quantique ont conduit en l'espace d'une ou deux générations à l'invention du transistor, puis du laser. Un siècle auparavant, la théorie électromagnétique avait jeté les bases du développement de l'industrie électrique et préparé l'avènement de la radio, de la télévision, du radar et des moyens de communication modernes. Aujourd'hui, nous assistons, sur une échelle de temps sans doute plus courte, aux remarquables retombées des découvertes de la génétique et de la biologie moléculaire modernes en médecine et en agronomie et aux progrès accomplis, grâce à ces découvertes, dans la connaissance de l'évolution et de l'écologie. Les technologies nouvelles, et en particulier la technologie de l'espace développée par l'industrie aérospatiale, sont à l'origine de nouvelles découvertes en astronomie et en cosmologie. Ces méthodes et ces outils inédits sont utilisés pour observer la Terre et nous ont amenés à considérer les phénomènes planétaires d'un œil pratiquement neuf. On voit par conséquent que la recherche fondamentale, étroitement associée à la technologie moderne, exerce en permanence une influence très profonde sur notre compréhension du monde, notre bien-être et notre civilisation.

Nous l'avons dit, la recherche fondamentale repose sur la durée. L'influence des facteurs à long terme sur ses progrès est illustrée par le fait que c'est réellement aujourd'hui, quelque cinquante ans après être sortie vaincue de la seconde guerre mondiale, que l'Allemagne a retrouvé sa place dans le domaine de la science en renouant avec une tradition en grande partie détruite durant les années de régime nazi.

De nos jours, l'impact des nouveaux pays industrialisés d'Asie et du Pacifique sur l'industrie, ou même sur la recherche appliquée, est beaucoup plus important que leur contribution à la recherche fondamentale. La difficulté de se doter d'une tradition régionale ou nationale dans le domaine des sciences fondamentales a même conduit à penser qu'un tel effort était inutile compte tenu de la dimension internationale de cette entreprise intellectuelle. Pour autant que ce soit vrai, cela ne signifie pas qu'une communauté scientifique avancée doive se désintéresser de la recherche fondamentale, car celle-ci fait partie intégrante

de notre culture moderne et, quand elle est menée au niveau national, représente une contribution directe à l'enseignement supérieur. C'est pourquoi toute interruption ou tout arrêt important dans le développement de l'activité scientifique en Russie pourrait avoir des conséquences à long terme et devrait être une cause d'alarme immédiate pour la communauté scientifique et le pays tout entier.

Les réformes économiques qui sont entreprises en Russie ont un impact majeur sur l'industrie ainsi que d'importantes répercussions sur la recherche appliquée. La loi de l'offre et de la demande peut et doit déterminer les nouveaux modes de développement, et il faut s'attendre à cet égard à de rapides et profonds changements qui affecteront également l'énorme complexe militaro-industriel de l'ex-Union soviétique. Dans une large mesure, le passage à l'économie de marché est une rupture avec l'économie dirigée à orientation militaire que nous avons connue dans le passé récent. Ainsi, c'est notre défaite militaire dans la guerre froide, guerre jamais véritablement déclarée mais dont les conséquences économiques se font aujourd'hui sentir, qui dicte les réformes.

Au milieu de ces bouleversements, la recherche fondamentale a perdu ses repères. Pour commencer, elle ne peut ni ne doit être directement soumise aux forces du marché. Aussi claire que soit la mission de la science, et quelle que soit la diligence avec laquelle les scientifiques s'acquittent de leur tâche, aucune comptabilité à court terme, aucun contrôle monétaire direct ne permettront jamais d'estimer la valeur immédiate du produit de la recherche fondamentale. Son rendement ne peut se calculer qu'à long terme, sur une durée mesurée au moins en décennies. Chacun sait que le bilan de la science est fortement positif, non parce que l'on a privilégié cette activité, mais parce que le savoir a un énorme coefficient multiplicateur. Il suffit de voir les gains parfois considérables qu'apporte une invention issue de la recherche appliquée (R-D) pour comprendre que les découvertes de la recherche fondamentale ouvrent de nouveaux champs à l'entreprise humaine. C'est pourquoi l'État et la société se doivent de soutenir les sciences fondamentales; et l'opinion publique doit être pleinement consciente de cette nécessité. C'est à la communauté scientifique, au premier chef, et à la société tout entière d'apprécier le niveau et les résultats de la recherche fondamentale, qu'il convient de considérer comme un aspect essentiel de la culture moderne.

Pour que la recherche fondamentale puisse avoir ainsi un profond impact sur notre civilisation, il importe avant

tout que la génération montante soit exposée aux nouvelles idées et aux nouveaux concepts scientifiques. Cela constitue la priorité absolue pour la science au service de la société. Là réside également l'élément le plus important du nouveau contrat à long terme entre la science et la société qu'il s'agit à présent de négocier et d'honorer face à la nouvelle situation sociale créée dans les pays issus de l'ex-Union soviétique et de ses républiques. La science, qui servait hier la grandeur du pays, concrétisée par de vastes projets de prestige ou la seule puissance militaire, doit redéfinir sa mission dans la Russie d'aujourd'hui.

Que faut-il donc faire? Avant tout, faire à la science une place beaucoup plus importante dans les universités et dans la formation de la future génération de chercheurs et d'ingénieurs, de médecins et de juristes, d'enseignants et de responsables politiques, car c'est elle qui sera le véritable instrument de la réforme et qui représente notre principal espoir pour l'avenir. Il importe par-dessus tout, pour la science et pour le pays, d'assurer la continuité de l'enseignement et de la formation auprès de cette génération.

## DE NOUVEAUX DÉPARTS

De nouvelles institutions éducatives voient souvent le jour pendant les périodes de transformation radicale de la société, lorsque le système en place se trouve contesté. C'est pendant la Révolution française que sont nées les « grandes écoles ». En Russie, le réseau actuel d'instituts techniques a été mis en place après la Révolution et sous la pression de l'industrialisation des années 30, institutionnalisant dans une large mesure la séparation entre l'enseignement et la recherche. Au lendemain de la seconde guerre mondiale, les besoins de technologies de pointe et d'armements ont amené à fonder l'Institut de physique et de technologie de Moscou, aujourd'hui prestigieux. Créé à la suggestion d'éminents scientifiques russes et avec le plein appui du Parti et du gouvernement, il allait offrir l'exemple accompli, quoique isolé, d'un établissement combinant l'enseignement et la recherche et s'efforçant tout spécialement de donner aux futurs scientifiques et ingénieurs une formation approfondie en physique et en mathématiques, dispensée par les meilleurs professeurs.

Ce modèle peut et doit aujourd'hui inspirer de nouveaux départs dans l'enseignement supérieur. La création, dans un certain nombre de centres scientifiques de la région de Moscou, de sections d'enseignement qui renforceront la

capacité de formation postuniversitaire de ces instituts spécialisés est un important progrès dans ce sens. Plus que jamais, la Russie doit maintenir et développer sa tradition de haute culture scientifique. Hormis le pétrole et le gaz, notre matière grise est sans doute notre meilleur atout. Parmi les aspects positifs du système soviétique figurent assurément une longue tradition pédagogique, le respect du savoir et la place accordée à la science. La Russie doit apprendre à présent à tirer parti de ces atouts majeurs. C'est là que l'on peut espérer voir des liens se nouer entre la nouvelle classe d'entrepreneurs et la science et la technologie. Le régime communiste n'a pas vraiment su développer et utiliser convenablement le potentiel intellectuel du pays, potentiel qui est le principal facteur de dynamisme et de progrès dans le monde moderne. Au lieu de quoi, l'idée de la suprématie de la classe ouvrière a été érigée en dogme pour servir les intérêts politiques du parti au pouvoir, contribuant ainsi à l'effondrement de l'Union soviétique. C'est sans doute dans le domaine de l'informatique et de la technologie de l'information que cette erreur est la plus flagrante.

Malheureusement, les attitudes positives à l'égard de la science et de la technologie sont fortement découragées. Un profiteur peut devenir millionnaire en un jour, puis dilapider sa fortune en une nuit. Les revenus d'un chauffeur de taxi sont dix fois supérieurs à ceux d'un médecin ou d'un professeur d'université. Un administrateur gagne mieux sa vie qu'un scientifique, même à l'Académie des sciences. La science en tant que phénomène culturel, et l'actualité scientifique et technique ont disparu de la presse et de la télévision et n'intéressent plus le public. Les tendances antiscientifiques l'emportent, les astrologues et les guérisseurs prospèrent. Ce sont là, pour une bonne part, des symptômes de la crise profonde que traverse le pays (voir *Scientific American*, août 1991), mais il faut y voir aussi, à n'en pas douter, les signes d'une hostilité nouvelle et profonde à l'égard de la science. Les propagateurs du marxisme n'ont-ils pas maintes fois présenté leur doctrine comme le seul système de pensée véritablement scientifique sur lequel on allait bâtir un monde nouveau ? Les scientifiques, et en particulier les physiciens, n'ont-ils pas laissé espérer des merveilles de l'énergie nucléaire, avec le résultat que l'on connaît à Tchernobyl ? Des projets moins prestigieux n'ont-ils pas déçu les espoirs que l'on plaçait en eux, qu'il s'agisse de la production d'énergie par fusion, annoncée comme imminente, ou de la technologie des supraconducteurs à haute température, dont on nous promettait

l'avènement ? De quels succès peut-on créditer aujourd'hui l'exploration de l'espace, passés les premiers résultats spectaculaires ? Et que faire face au saccage de l'environnement ?

Il convient de dire à cet égard que Tchernobyl est à imputer davantage à une industrie et à un pays socialement et psychologiquement mal préparés à entrer dans l'ère de l'atome qu'à une technologie défaillante, et que la promesse prématurée de l'énergie thermonucléaire et des supraconducteurs à température ambiante a été faite, ou plutôt suggérée, par la communauté scientifique internationale. Il nous faut admettre que ces questions sont posées aux savants du monde entier et non pas aux seuls scientifiques soviétiques ou russes, et que problèmes et promesses devront tôt ou tard être tirés au clair. Car, d'une certaine façon, la crise de la science en Russie, et même dans l'ex-Union soviétique en général, ne fait que refléter, en les amplifiant, quelques-uns des grands problèmes de la planète tout entière. On ne tient pas assez compte de cette vérité et on tente encore moins de l'approfondir ; il conviendrait de la prendre plus au sérieux.

## L'INTÉGRATION A L'ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE INTERNATIONALE

La politique russe de la science devrait avoir pour deuxième priorité d'intégrer les efforts nationaux aux efforts internationaux. Dans le domaine de la recherche appliquée, cela se fera avec le temps, après que notre industrie se sera progressivement intégrée à l'économie mondiale. Il faut espérer que, dans le même temps, la Russie cessera d'exporter des produits de base et des armes et parviendra à développer ses industries de haute technicité fondées sur le progrès des connaissances pour les mettre au service d'objectifs plus pacifiques.

L'intégration de la recherche fondamentale demandera plus de temps, car l'habitude de faire cavalier seul, cultivée durant des décennies, est profondément enracinée. Là encore, la priorité absolue doit être d'offrir à la jeune génération des possibilités de s'ouvrir le plus tôt possible à ce qui se fait dans le reste du monde. Au début de l'ère Gorbatchev, vers 1985, les États-Unis accueillaien au moins 25 000 étudiants de la République populaire de Chine. Évoquant cette question au cours d'un dîner à Washington, je citai ce chiffre à notre ambassadeur et lui demandai combien d'étudiants et de scientifiques soviétiques séjournaient alors aux États-Unis. Moins d'une centaine,

me répondit-il. L'information fut transmise à Gorbatchev, qui réagit immédiatement, mais malgré ses efforts rien, ou presque, ne changea. On dénombre à présent aux États-Unis 40 000 étudiants chinois, alors que les étudiants russes ne sont encore que quelques milliers.

On parle beaucoup de nos jours de l'exode des compétences. Malgré tout le bruit qui est fait autour de cette question, les chiffres ne sont pas encore alarmants. Le départ des scientifiques à l'étranger doit être interprété en partie comme une façon de normaliser les contacts et les liens avec la communauté scientifique internationale : il faut bien rattraper les décennies d'isolement volontaire. Les statistiques relatives aux échanges avec l'étranger dans ce domaine traduisent les tendances de l'évolution de la science russe (tableau 1). Il faut espérer que, la situation politique se stabilisant, les priorités seront redéfinies et les scientifiques reviendront au pays.

TABLEAU 1  
ÉCHANGES ET VOYAGES DE SCIENTIFIQUES MEMBRES DE L'ACADÉMIE RUSSE DES SCIENCES

Objet du voyage	1991	1992
Participation à des congrès	6 956	5 058
Collaboration dans le cadre d'échanges	1 506	628
Réponse à des invitations	8 451	7 357
Expéditions scientifiques	329	112
Contrats (séjours prolongés)	467	881
Accompagnement de personnalités	1 262	1 597
Total	18 971	15 630

Les chiffres du tableau 1 ont été communiqués par le département des relations internationales de l'Académie. Ils reflètent avec éloquence le déclin des activités de recherche dans le pays, en particulier dans le domaine des sciences fondamentales. Un scientifique sur dix est membre de l'Académie.

Ce qui est vraiment préoccupant, c'est que des personnalités de premier plan de la communauté scientifique s'expatrient, que l'on cesse de publier des ouvrages scientifiques et que la continuité de l'enseignement et de la recherche n'est plus assurée. C'est ainsi que la publication par l'Académie des sciences des volumes de l'édition révisée du manuel mondialement réputé de Landau et Lifshitz, *Physique théo-*

*rique*, est en souffrance depuis plus de deux ans faute d'argent. De nombreux représentants éminents de cette remarquable école de physique sont partis eux aussi, ce qui risque de briser une tradition reconnue dans le monde entier.

Il n'y a certes rien à redire au brassage international des scientifiques. L'étonnant est que, lorsqu'une vedette du football est cédée à un autre club, ce dernier doit verser des millions, preuve aux yeux de tous de la valeur et du prix réels de ce sportif, tandis que, lorsqu'une université étrangère invite un grand professeur à la rejoindre, nul ne songe jamais, hélas, à dédommager l'établissement qui, pendant des années, a formé et nourri ce scientifique distingué. Peut-on espérer dans de telles conditions que le public ait une image positive de la science et que l'on soutienne les institutions dont sont issus des talents aussi exceptionnels ?

Il importe aujourd'hui de promouvoir et de renforcer beaucoup plus vigoureusement que jamais l'image de la science et le statut des scientifiques. La dure leçon infligée à la Russie doit être retenue par de nombreux pays, puisque d'aucuns voient dans le déclin de la science un phénomène mondial imminent. Je ne partage pas ces généralisations pessimistes, même si, malheureusement, les scientifiques sont souvent les premiers à prédire l'apocalypse. Dans la plupart des cas, cette attitude assez primaire relève d'une sorte d'eschatologie pseudo-scientifique moderne. S'ils donnent à réfléchir, de tels messages engendrent souvent le désespoir plutôt que l'espoir, et démoralisent au lieu d'aider à affronter les vrais problèmes de notre temps et de notre civilisation.

Depuis l'Age de la Raison, la science a beaucoup promis. Il semble à présent que l'heure des comptes ait sonné et il est probablement grand temps que la communauté scientifique internationale évalue et arrête ses priorités avec moins de complaisance et plus de courage. Au moment où la science russe se trouve remise en question par les événements, cette tâche doit être menée avec beaucoup plus de sérieux que par le passé. Les nouvelles priorités peuvent-elles être définies par la vieille garde conservatrice, ou vait-on voir apparaître de nouveaux chefs de file ? Jusqu'à quel point peut-on laisser aux scientifiques le soin de gérer la science ? Peut-on paraphraser la vieille maxime qui veut que la guerre soit une chose trop sérieuse pour être abandonnée aux généraux ? Que l'on ne croie surtout pas que je suis partisan de soumettre la science à un contrôle administratif (nous avons en Russie une abondante et désastreuse expé-

rience en la matière), mais il est de fait que la situation critique que nous connaissons aujourd'hui commande d'imaginer de nouvelles façons de résoudre les problèmes complexes qui se posent à la communauté scientifique. La question de savoir dans quelle mesure il faudrait prendre conseil à l'étranger avant d'arrêter des décisions est très importante. Il est probable qu'une autorité extérieure aiderait à dépasser les intérêts défendus par le « club » d'anciens condisciples qui jusqu'à présent a dirigé, non sans quelque succès, la science soviétique, désormais russe.

Beaucoup remettent en question la manière autoritaire qui a caractérisé cette gestion de la science soviétique (et pas seulement de la science) et voudraient que l'on étende à la science les nouvelles règles démocratiques d'administration. Ce n'est pas chose facile, mais il faudra s'attaquer à cette question et la résoudre d'une façon ou d'une autre. Il conviendrait sans doute d'envisager un nouveau mécanisme gouvernemental de gestion des fonds calqué sur la National Science Foundation (NSF) américaine ou la Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) allemande, en séparant les fonctions consultatives et la prise de décision. Un tel organisme devrait accorder la plus grande importance à la mise en œuvre d'une nouvelle politique de la science qui soit formulée conjointement par la communauté scientifique et, on l'espère, le Parlement. Cela ne deviendrait possible qu'après l'ouverture de la nouvelle législature.

## L'AIDE ÉTRANGÈRE

Il convient de dire quelques mots de l'aide fournie à la Russie par la communauté scientifique internationale. De gros efforts ont été faits pour assurer la continuité de la diffusion des publications scientifiques, la plupart des crédits qui étaient alloués aux bibliothèques de Russie et des autres républiques de l'ex-URSS ayant été supprimés. L'initiative consistant à publier et distribuer *Nature Monthly* à un prix réduit, et à ouvrir ainsi un important canal de communication avec la recherche internationale, est extrêmement appréciée. Les subventions accordées à différentes équipes de scientifiques sont d'un grand secours, de même que l'appui fourni à des centres d'excellence qui en ont fort besoin. Les allocations de voyage sont une aide précieuse, en particulier pour les jeunes scientifiques. Parmi les fondations qui soutiennent les chercheurs russes, il y a lieu de mentionner tout particulièrement la Fondation Soros aux États-Unis.

Ces contributions sont utiles en cette période de changement et de découragement où l'édifice fragile de la science pourrait si facilement s'effondrer. Mais on ne peut construire une politique de la science à long terme sur de telles bases; certains vont jusqu'à dire que cette aide risque de saper l'édifice, ou plutôt ce qu'il en reste. Lorsque l'on aide des scientifiques et des projets, il faut veiller à ne pas rompre l'équilibre crucial entre une équipe particulière et l'institution d'accueil qui met à sa disposition une grande partie de l'infrastructure et la tradition intellectuelle d'un bon centre de recherche. De tous les foyers d'étude, les universités sont les plus permanents. On voit aujourd'hui les difficultés qu'ont des centres de recherche créés pour remplir une mission particulière, et que l'on pouvait même considérer hier comme des centres d'excellence, mais qui ont perdu désormais leur raison d'être, à trouver des appuis et des moyens d'existence socialement acceptables. Les laboratoires de recherche militaire en offrent le meilleur exemple. Enfin, il ne faut pas oublier que c'est au pays lui-même et à lui seul de définir ses priorités et de gérer l'activité scientifique. La visite que le nouveau Premier Ministre a effectuée à l'Académie russe des sciences peu de temps après sa nomination est un signe encourageant.

Dans l'avenir prévisible, c'est la recherche expérimentale qui risque de souffrir le plus, car elle coûte plus cher que la recherche purement théorique, qui a toujours occupé une place de choix dans l'ex-Union soviétique. Nous avons déjà évoqué le long et grave retard pris dans le domaine de la mégascience. L'État doit-il continuer de subventionner ces énormes laboratoires qui, de toute façon, ont perdu du temps, du personnel, et une bonne part de ce qu'ils avaient à offrir? Cela étant, les projets de grande envergure doivent être sélectionnés en fonction de leur contribution à la réalisation des objectifs nationaux et de ceux de la communauté scientifique internationale. Là encore, il faudra redéfinir les priorités. Malheureusement, les engagements antérieurs, les droits acquis que défendent certains groupes importants et souvent encore puissants et le poids de la tradition accroissent encore la difficulté de prendre les bonnes décisions et de les faire appliquer.

Le manque de devises fortes empêche pour l'instant la Russie d'honorer les obligations contractées par l'Union soviétique envers des institutions, des sociétés savantes et des projets internationaux. L'aide financière de la communauté internationale lui serait d'un grand secours pour faire face à ces paiements et à ces remboursements. Les fonds

actuellement offerts au titre de l'assistance technique pourraient être mis à la disposition d'institutions internationales afin que celles-ci financent la participation de scientifiques de Russie ou d'autres pays qui n'en ont pas pour l'instant les moyens au niveau national.

## GARDER LE MORAL

En période de difficultés et de dissensions, les facteurs d'ordre moral jouent un rôle important. Parmi toutes les raisons de la démobilisation et de la démoralisation des scientifiques, la principale est sans doute le peu de cas que l'on fait de leur travail et même de leur rôle dans la société. Les changements de valeurs auxquels on assiste aujourd'hui dans le pays ont une influence considérable sur les attitudes de la jeune génération. Les tendances anti-intellectuelles dont font montre des médias affranchis de la censure et de toute responsabilité sociale, alliées aux manifestations d'un nationalisme et d'un antisémitisme omniprésents, alimentent la frustration et le désespoir, en particulier chez des jeunes pleins de promesses titulaires d'un diplôme universitaire ou d'un doctorat, qui n'ont d'autre choix que d'abandonner la science ou de quitter le pays. On ne s'inquiète généralement pas de ces problèmes, ni de l'attitude de la société à l'égard de la science, et pourtant ils sont lourds de conséquences. Récemment, un jury international réuni à l'initiative de l'Academia Europaea en vue d'aider des membres de la nouvelle génération à un moment décisif de leur carrière a décerné vingt prix à de jeunes scientifiques de l'ex-Union soviétique. L'une des grandes responsabilités incombant aux générations plus âgées et à la communauté scientifique internationale est de reconnaître le découragement des jeunes, car si l'on peut réparer le corps en y mettant le prix, l'esprit est beaucoup plus difficile à apaiser, et pourtant le succès et l'avenir de la science en dépendent.

Les laboratoires qui mettent au point les armes nucléaires doivent faire l'objet d'une attention particulière. Peut-être sont-ils la meilleure illustration de la difficulté radicale de reconvertir les centres de recherche du complexe militaire-industriel. Dès leur création, ces centres ont formé des entités à part — tant sur le plan des moyens financiers et des ressources que sur celui des contacts non seulement avec la communauté scientifique internationale, mais encore avec la plupart de leurs homologues dans le pays. A présent qu'ils sont sortis de leur isolement, ils doivent redéfinir leurs priorités et imaginer de nouvelles façons d'utiliser

les talents très particuliers de leurs chercheurs et de leurs ingénieurs et les vastes ressources dont ils disposent. Ce ne sera pas chose aisée étant donné l'extrême cloisonnement de ces établissements chargés d'une mission spécifique. Il faut également tenir compte de la moyenne d'âge très élevée de leur personnel qui rend les changements encore plus difficiles. Il faut espérer que ce défi et les réformes auxquelles il donnera lieu n'auront pas pour effet de favoriser la prolifération des armes nucléaires. Les scientifiques et ingénieurs de ces centres exceptionnels à qui a été inculqué le sens de leurs responsabilités ont à présent le devoir de protéger la planète, et non plus leur seul pays, des conséquences de cette prolifération.

## LA SCIENCE DANS LES NOUVEAUX ÉTATS INDÉPENDANTS

L'éclatement de l'Union soviétique en une multitude de républiques indépendantes et les nouvelles politiques adoptées par les États de l'Europe de l'Est ont modifié les bases du développement de la science. Si, dans l'euphorie de l'indépendance, les scientifiques des républiques émancipées ont souvent été les plus ardents avocats des libertés nouvelles, beaucoup doivent à présent faire face aux dures réalités. C'est ainsi que les chefs d'État de deux anciennes républiques de l'Union soviétique — S. Chouchkevitch, Président du Bélarus, et A. Akaev, Président du Kirghizistan — sont des professeurs de physique. Si la science n'est guère soutenue en Russie, la situation est souvent pire encore dans beaucoup de ces pays nouvellement indépendants, où bien des choses devront être repensées et réorganisées. Les contacts professionnels avec la Russie, qui avaient été coupés dans un premier temps, sont progressivement rétablis, et beaucoup d'efforts devront être faits pour redéfinir la coopération à l'intérieur de la zone russophone en ce qui concerne la formation des étudiants, la délivrance des diplômes, la publication de livres et de revues, l'organisation de conférences conjointes, bref tout ce qui constitue l'infrastructure de la science. La science peut et doit devenir un facteur d'intégration de ces États, et sur ce point les organisations professionnelles internationales ont un rôle particulier à jouer. Ainsi, l'ancienne Union des sociétés de scientifiques et d'ingénieurs s'est reconstituée sous la forme d'une association regroupant les sociétés des nouvelles républiques issues de l'Union soviétique. De même, la Société de physique de l'Union soviétique s'est récemment

transformée en Société euro-asiatique de physique sur le modèle de la Société européenne de physique. Reste à savoir dans quelle mesure ces nouvelles organisations internationales réussiront à rassembler les scientifiques de ces régions du monde déchirées par le nationalisme.

Même si chacun de ces pays est confronté à des problèmes propres à sa situation particulière, beaucoup s'inspirent de la manière dont les choses étaient organisées en URSS et copiées par ses anciens alliés. La crise des académies est probablement un trait commun à tous ces pays. En Allemagne, par exemple, l'ancienne Académie des sciences de la République démocratique allemande a été démantelée, tandis que dans d'autres pays de profonds changements sont jugés nécessaires. Les fondations qui allouent des ressources à des projets ou à des chercheurs particuliers plutôt qu'à des établissements jouent un plus grand rôle dans le financement de la recherche. En pareil cas, les conseils d'experts internationaux peuvent être d'une grande utilité pour évaluer les projets de recherche. Le recours à des experts extérieurs, plus indépendants et objectifs, pourrait conduire à adopter des normes d'excellence communes, conformes à celles qui sont appliquées dans le reste du monde, favoriser l'établissement de liens entre individus et entre institutions et aider à identifier les priorités d'une nouvelle politique de la science.

Si variée que soit la situation de ces pays, le cas de la Russie a valeur de modèle. C'est dans ce pays que la

réforme est le plus difficile, non seulement parce qu'il faut rompre avec des politiques poursuivies pendant soixante-dix ans, donc plus longtemps qu'ailleurs, mais aussi en raison de l'immensité et de la complexité mêmes de la société aujourd'hui en proie à ces fortes turbulences. Aussi douloureux, voire traumatisants, qu'apparaissent ces changements, il faut les replacer dans le cadre d'une profonde transformation sociale, dont seuls les historiens de demain prendront la véritable mesure.

Le professeur **SERGEI KAPITZA** est né à Cambridge (Royaume-Uni) en 1928 et travaille actuellement à l'Institut des problèmes de physique de l'Académie russe des sciences à Moscou. Il enseigne également à l'Institut de physique et de technologie de Moscou. Après des études à l'Institut d'aéronautique de Moscou, il s'est spécialisé dans l'hydrodynamique, le magnétisme, l'électrodynamique appliquée, la conception d'accélérateurs et la physique nucléaire. Durant vingt ans, le professeur Kapitza a présenté la principale émission de la télévision russe consacrée à la science et a reçu en 1979 le prix Kalinga de l'UNESCO en récompense de sa contribution à la vulgarisation scientifique. Il est également l'auteur de cinq ouvrages et de nombreux articles sur la science et des questions d'intérêt public.

## LES ÉTATS ARABES

Fakhruddin Al-Daghestani

L'éveil politique de la région arabe après la seconde guerre mondiale s'est accompagné de la volonté d'édifier des États modernes qui s'appuieraient sur la science et la technologie (S et T) et coopéreraient pour accéder à un niveau élevé d'autosuffisance collective et d'intégration économique. Si l'on juge la gestion des affaires à ses résultats, on peut considérer aujourd'hui que la région a connu un échec économique dû à la fragmentation de l'économie, à un commerce interrégional médiocre, à la place excessive donnée à la technologie importée et à la faiblesse de la capacité endogène de S et T. Les indicateurs montrent que, en 1990, le taux moyen d'alphabétisme des adultes dans les États arabes était de 42 %. Les taux d'inscription dans l'enseignement du second et du troisième degrés étaient respectivement de 52 % et de 13 %, et les effectifs des écoles techniques ne représentaient que 12 % de ceux de l'enseignement secondaire. D'autre part, 68 % environ des étudiants préparant une licence à l'université étaient inscrits en sciences sociales et dans les disciplines littéraires, les filières scientifiques n'accueillant que les 32 % restants. Les activités de recherche et développement (R-D) sont encore limitées; en effet, la proportion des chercheurs, en équivalent plein temps (EPT), se situe aux alentours de 318 pour 1 million d'habitants, tandis que l'investissement dans la R-D est de l'ordre de 0,75 % du produit national brut (PNB). La science est un puissant instrument d'accélération du développement, mais, si elle est nécessaire pour opérer des transformations dans la société arabe, il faut que celle-ci introduise en elle-même les changements nécessaires pour créer un environnement où la science puisse se développer.

## LA SCIENCE DANS LA CULTURE ARABE

Avant l'islam, les Arabes qui vivaient dans des territoires bordant la Méditerranée et dans certaines parties de l'Afrique du Nord partageaient le savoir scientifique et technologique des Byzantins, mais ceux qui vivaient ailleurs n'avaient guère accès à ce savoir. Toutefois, la situation changea avec l'adoption de l'islam au milieu du VII<sup>e</sup> siècle après J.-C. L'islam, en tant que religion, encourageait l'acquisition et la production de connaissances sur l'espèce humaine et les phénomènes naturels par l'investigation scientifique comme un acte de foi et en vue d'améliorer les

conditions de vie. L'islam introduisit une éthique pour définir les relations humaines et le concept de nation islamique (*Oummah*) unifiant tous les musulmans. De plus, l'islam favorisait le commerce, la libre entreprise, l'habileté manuelle et le développement économique. Ces facteurs donnèrent naissance à une situation qui combinait en un système unique les éléments suivants :

- ☐ le goût de l'investigation scientifique faisant appel aux facultés mentales d'induction et de déduction (savoir pourquoi);
- ☐ l'acquisition et la transmission du savoir par l'apprentissage et l'enseignement (éducation);
- ☐ l'utilisation efficace du savoir au bénéfice de l'humanité (savoir-faire);
- ☐ le libre-échange, l'esprit d'entreprise et la sécurité sociale;
- ☐ un vaste marché économique commun s'étendant à tout le domaine de l'*Oummah* islamique.

Avec ce système et sous la conduite d'esprits éclairés qui voyaient grand, les musulmans purent fonder une civilisation dynamique et variée qui porta l'étendard de la science et de la technologie et constitua une économie puissante qui devait durer six siècles.

La science commença à perdre du terrain dans la société arabe lorsque le concept d'*Oummah* s'affaiblit et que l'unité du savoir dans l'islam en pâtit, créant une scission entre les valeurs culturelles correspondant respectivement à la connaissance révélée et à la connaissance acquise par la raison. Dans l'islam, les sources fondant le jugement en matière sociale et religieuse sont le Coran, la *Sunna* (les dits du Prophète), l'*Ijtihad* (jugement indépendant fondé sur la raison), l'*Ijmaa* (consensus), et le *Qryas* (analogie, inférence). Lorsque, dans la société, les lettrés en vinrent à s'associer à un pouvoir despotique, la liberté d'expression disparut et le rôle de l'*Ijtihad* fut réduit. En conséquence, le raisonnement inductif prit une place marginale dans la culture et les motivations de l'investigation scientifique s'étiolèrent.

Telle était donc la situation lorsque les États arabes devinrent indépendants après la seconde guerre mondiale. C'est alors que des fractions plus importantes de la société arabe commencèrent à exiger plus d'éducation. Dans de nombreux cas, le pouvoir politique réagit favorablement à cette exigence. En général, les systèmes éducatifs des États

arabes insistent plus sur l'apprentissage des faits et sur l'accumulation de l'information que sur le développement des facultés d'observation et d'analyse; la capacité d'absorber la « méthode scientifique » et de l'utiliser pour engendrer des connaissances scientifiques nouvelles n'a donc pas été favorisée. Autrement dit, on n'a pas suffisamment encouragé l'usage du raisonnement inductif. Étant donné que la culture arabe contemporaine est étroitement liée à l'islam tel qu'il est pratiqué aujourd'hui, la science ne saurait occuper une position éminente dans la culture sans une véritable régénération qui ouvre en grand les portes de l'*Ijtihad*, c'est-à-dire à un jugement indépendant fondé sur la raison en ce qui concerne la religion et les affaires profanes.

En bref, la situation de la science dans la culture arabe contemporaine peut se résumer comme suit :

- L'apprentissage et l'enseignement sont en train d'acquiescer rapidement une importance sociale ;
- la valeur de la « pensée scientifique », ou raisonnement inductif, en vient progressivement à être reconnue dans des secteurs plus larges de la société qui associent la science au progrès ;
- de petits secteurs de la société associent la science à la domination étrangère et la considèrent comme une invasion culturelle ;
- de nombreux aspects de la science et de la technologie impliquent un travail manuel, mais ce travail n'est toujours pas socialement acceptable dans plusieurs couches de la société arabe.

Si cette situation ne se transforme pas rapidement, il faudra peut-être attendre deux générations pour que la science acquière une position solide dans la société arabe.

## LES FACTEURS DE LA CROISSANCE ÉCONOMIQUE

La croissance économique résulte de l'apport de deux principaux types de facteurs : des facteurs *quantitatifs*, comme la main-d'œuvre, le capital et la terre, et des facteurs *qualitatifs*, fournis par les éléments matériels et immatériels de la science et de la technologie que constituent les compétences des hommes et des institutions. On estime que la majeure partie (60-70 %) de la croissance économique réalisée par les économies de marché industrielles est imputable à la création et à l'application de connaissances scientifiques et technologiques dans la production de biens et services. Dans les États arabes, en revanche, la croissance économi-

que s'est nourrie davantage d'apports quantitatifs que de S et T. Il y a eu croissance économique dans la plupart des États arabes depuis une quarantaine d'années, mais cette croissance a été due à des revenus provenant de l'exportation de ressources naturelles ou empruntés à des sources extérieures. Les pays riches en pétrole ont certes un niveau de vie élevé, mais les autres font d'ores et déjà face à la dépression économique, au chômage, à l'agitation sociale et aux contraintes du service de la dette extérieure. Dans tous les cas, les États arabes ont fait massivement appel à une technologie importée, négligeant dans une large mesure les véritables transferts de technologie consistant à développer un savoir-faire scientifique et technologique endogène compatible avec les exigences d'un développement durable.

La responsabilité de ces carences n'est pas exclusivement imputable aux décideurs, car c'est la société tout entière qui échappe encore à l'aiguillon d'une « culture scientifique », sans laquelle elle ne peut avoir la motivation nécessaire pour faire convenablement les choses qu'il faut faire, même quand la décision vient des pouvoirs publics. Ces considérations générales permettent peut-être de comprendre les raisons pour lesquelles l'économie et la science arabes se trouvent dans la triste situation qu'attestent les indicateurs fournis dans le présent chapitre.

## La terre et la population

Les États arabes occupent une position stratégique sur un espace de 13,67 millions de km<sup>2</sup> (145 % de la superficie des États-Unis d'Amérique), dont 72,7 % en Afrique et 27,3 % au Moyen-Orient, où les États arabes du Golfe représentent 18 % de la superficie totale. La dimension des territoires varie considérablement, du plus petit, Bahreïn, qui couvre 680 km<sup>2</sup>, au plus grand, le Soudan et ses 2,5 millions de km<sup>2</sup>. L'Algérie, l'Arabie saoudite, la Jamahiriya arabe libyenne, la Mauritanie et l'Égypte ont chacune une superficie dépassant 1 million de km<sup>2</sup>. Quelque 96 % des terres de la région sont arides ou semi-arides; il n'y a que 4 % de terres arables et cultivées et 0,8 % seulement de terres irriguées. Les sols arides et semi-arides représentent 95,6 % de la superficie totale pour l'ensemble des États arabes d'Afrique, 99,5 % pour les États membres du Conseil de coopération du Golfe (CCG) et 89,3 % pour les autres pays du Moyen-Orient. Le pourcentage des terres arables et cultivées varie entre 20 et 30 % au Liban, au Maroc, en République arabe syrienne, en Tunisie et en Palestine (Rive occidentale et bande de Gaza), mais, sauf en Iraq (12,5 %),

la proportion est inférieure à 5 % dans tous les autres États, dont la superficie représente en tout 90,9 % de l'étendue totale des États arabes. Le pourcentage des terres irriguées est inférieur à 0,2 % en Algérie, au Koweït, en Jamahiriya arabe libyenne, en Mauritanie, en Oman, en Arabie saoudite, en Somalie et dans les Émirats arabes unis; il est de l'ordre de 0,6 % en Jordanie et au Yémen. La proportion est plus élevée au Liban (8,4 %), en Iraq (5,8 %), en République arabe syrienne (3,2 %) et en Égypte (2,6 %). Les États arabes doivent donc faire un effort spécial pour développer leur capacité de S et T en vue d'exploiter, grâce à des technologies appropriées, des surfaces de plus en plus grandes de leurs 13,12 millions de km<sup>2</sup> de sols arides et semi-arides afin de produire assez de nourriture pour combler leur déficit alimentaire; de même, ils doivent mettre au point des techniques efficaces de gestion de l'eau de manière à optimiser l'utilisation de l'eau et à poursuivre l'exploration des ressources en eaux souterraines.

Plusieurs États arabes sont riches en ressources minérales, dont certaines sont déjà exploitées. Les réserves reconnues et exploitables de pétrole et de gaz dans les États arabes sont respectivement de 600 milliards de barils et de 24 900 milliards de m<sup>3</sup>, soit 60,6 % des réserves mondiales pour le pétrole et 22 % pour le gaz. Ces pourcentages sont très élevés si on les compare aux réserves de l'OCDE, qui s'élèvent à 5,9 % pour le pétrole et à 13,8 % pour le gaz. C'est pourquoi il y aurait lieu de développer les capacités de S et T pour tirer le maximum de revenus des ressources en pétrole et en gaz en acquérant des compétences dans le domaine de la pétrochimie et des industries manufacturières connexes, pour accroître la participation des pays à l'exploration et à la gestion des ressources en pétrole et en gaz et pour poursuivre la recherche de ressources minérales qui n'ont pas encore été découvertes.

En 1990, la population totale des États arabes atteignait 221,8 millions d'habitants, après avoir connu dans les années 80 un accroissement annuel moyen de 3,1 %. Cet accroissement est élevé par rapport à celui des pays industrialisés (0,6 %) et à celui de la population mondiale (1,7 %). Il s'agit d'une population assez jeune : 62,5 % dans le groupe d'âge de 0 à 24 ans et 43,5 % dans le groupe de 0 à 14 ans. Ces chiffres sont élevés par rapport à ceux des pays industrialisés, qui sont respectivement pour les deux groupes de 36,8 % et de 21,8 %. L'Égypte, l'Algérie, le Maroc et le Soudan avaient chacun en 1990 une population de plus de 25 millions d'habitants. Les pays du CCG sont

peu peuplés et l'insuffisance de la main-d'œuvre y est compensée par l'emploi de travailleurs immigrés, qui constituent environ 25 % de la population de l'Arabie saoudite et environ 70 % de celle du Koweït, des Émirats arabes unis et du Qatar. La forte proportion de jeunes dans la population des États arabes implique qu'il faut dépenser beaucoup pour faire face à la demande croissante d'éducation à tous les niveaux et que les effectifs entrant chaque année sur le marché du travail ne cessent d'augmenter et de dépasser la capacité d'absorption des activités économiques.

### *Revenu, industrie et agriculture*

Il y a de grandes différences entre les États arabes pour ce qui est du PNB par habitant, qui variait en 1990 de 120 dollars des États-Unis pour la Somalie à 19 860 dollars pour les Émirats arabes unis. Cinq États, à savoir Djibouti, l'Égypte, la Mauritanie, la Somalie et le Soudan, rassemblant 39,4 % de la population totale, avaient un revenu par habitant inférieur au seuil de pauvreté (630 dollars des États-Unis). À l'inverse, le Koweït, le Qatar et les Émirats arabes unis, qui représentent à eux trois 1,9 % de la population totale, sont au nombre des économies à haut revenu, avec un revenu par habitant qui dépasse 15 800 dollars des États-Unis. Les autres États arabes se situent entre ces deux extrêmes. En 1990, le produit intérieur brut (PIB) total des États arabes atteignait 382 milliards de dollars, dont 39,5 % pour les pays du CCG. Ce PIB total équivaut à 77 % de celui de l'Espagne (492 milliards de dollars) et à 35 % de celui de l'Italie (1 091 milliards de dollars).

Une croissance économique principalement tributaire de l'apport des facteurs quantitatifs ne fait pas la richesse d'un pays; cela apparaît avec évidence si l'on considère que le PIB des six pays du CCG était de 151 milliards de dollars, soit moins que celui de pays relativement petits comme l'Autriche (157 milliards de dollars) ou la Suède (228 milliards de dollars). Alors que les six pays du CCG fondent leur croissance économique sur des ressources naturelles, l'Autriche et la Suède misent sur la S et T. Les 14 pays arabes les plus pauvres ploient sous le fardeau de leur dette extérieure. En 1990, celle-ci atteignait 150 milliards de dollars, soit l'équivalent de 93 % de leur PIB total. Le service de leur dette représentait 39,6 % du total de leurs exportations, leur laissant très peu de devises fortes pour accroître leur développement économique. La situation dans laquelle se trouvent actuellement les États arabes est due au fait que leur croissance économique a été constamment tributaire

d'apports quantitatifs et à la faiblesse de leur capacité scientifique et technologique.

En 1990, la part moyenne de l'industrie dans le PIB total des États arabes était de 41,5 %, mais la part moyenne de la production manufacturière n'était que de 11,8 %. Autrement dit, la part de l'industrie manufacturière dans la production industrielle n'était que de 28 %, le reste étant essentiellement imputable à l'exploitation de ressources telles que le pétrole et le gaz. Ainsi, la part de l'industrie dans le PIB des huit pays exportateurs de pétrole était de plus de 42 %, alors que celle de la production manufacturière ne dépassait pas 10 %. La valeur totale de cette dernière pour l'ensemble des États arabes atteignait 44,5 milliards de dollars, mais cette production est inférieure à celle de nos deux exemples européens : l'Autriche (45,5 milliards de dollars) et la Suède (54,7 milliards de dollars). La faiblesse de ce secteur dans les États arabes s'explique aussi par les déficiences de leur capacité endogène de S et T. C'est ce que prouve aussi le fait que 81,5 % de toutes les exportations arabes sont des matières premières et autres produits primaires (pétrole et minéraux 72,7 %), tandis que 73 % de toutes les importations sont des articles manufacturés.

La valeur totale de la production agricole des États arabes, employant 38 % de la main-d'œuvre, s'élevait, en 1990, à 45 milliards de dollars, soit 11,8 % du PIB. Ce montant de la production agricole est inférieur à celui de la France (48 milliards de dollars), qui n'emploie que 4 % de sa main-d'œuvre dans l'agriculture. Tous les États arabes sont des importateurs nets de denrées alimentaires ; leur taux moyen de dépendance dans ce domaine est passé de 35,3 % en 1981 à 38,1 % en 1989, les importations de céréales passant d'environ 35 millions de tonnes en 1986 à environ 40 millions de tonnes en 1989.

## L'ANALPHABÉTISME ET L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE

### *L'analphabétisme*

Le taux d'analphabétisme des adultes dans les États arabes considérés dans leur ensemble a été ramené de 66 % en 1970 à 47 % en 1985 et 42 % en 1990, soit un taux moyen annuel de réduction de 2,3 %. Cela signifie qu'il y avait en 1990 à peu près 60 millions d'adultes analphabètes, dont 39 millions (soit 65 % du total) en Égypte, au Soudan, au Maroc et en Algérie. Si les taux de réduction récents se

maintiennent après 1990, il faudra encore soixante ans pour atteindre l'objectif souhaitable d'un taux d'analphabétisme de 10 % dans la population arabe. Comme le taux d'analphabétisme est deux fois plus élevé chez les femmes que chez les hommes et qu'il est également plus élevé dans les zones rurales, il faudra faire un effort spécial pour réduire l'analphabétisme dans ces secteurs de la société.

Le taux d'analphabétisme ne descend au-dessous de 23 % qu'en Jordanie, en Palestine, au Liban et à Bahreïn ; à l'autre extrême, il dépasse 60 % à Djibouti, en Somalie, au Soudan et au Yémen. En Algérie, en Égypte et au Maroc, le taux est supérieur à la moyenne régionale de 42 % ; pour les autres pays, sa valeur se situe entre 27 % et 38 %. Les pays qui ont réussi à réduire sensiblement l'analphabétisme entre 1970 et 1990 sont la Jordanie et la Palestine, l'Arabie saoudite et Bahreïn (voir tableau 1). L'objectif des 10 % d'analphabètes devrait pouvoir être atteint par la Jordanie, la Palestine et Bahreïn en l'an 2004 et peut-être quelques années plus tard par le Koweït et l'Arabie saoudite.

La réduction de l'analphabétisme, surtout chez les femmes, doit figurer en tête des priorités dans l'effort de développement. Les pays comptant une forte proportion d'analphabètes ne sauraient espérer tirer profit des fruits du savoir scientifique et technologique.

### *Les taux de scolarisation et la science dans l'enseignement du second degré*

L'une des raisons pour lesquelles la réduction de l'analphabétisme s'opère lentement est le niveau relativement bas de la scolarisation dans l'enseignement primaire. Ce taux est certes passé dans les États arabes de 62,5 % en 1970 à 84,2 % en 1989, soit une augmentation annuelle moyenne de 1,6 %, mais il faudra encore quelques années pour que le taux souhaitable de 95 % puisse être atteint.

Entre 1980 et 1989, dans les États arabes, le taux de scolarisation par groupe d'âge dans l'enseignement secondaire a augmenté au rythme moyen de 2,26 % par an, passant de 38 % à 51,5 %. Si ce rythme est maintenu, le taux de scolarisation devrait ainsi atteindre 90 % en l'an 2014. Les pays ayant des taux très faibles (20 % ou moins) sont Djibouti, la Mauritanie, la Somalie, le Soudan et le Yémen (voir tableau 1). Ceux qui se situent au-dessus de la moyenne de 51,5 % sont l'Algérie, Bahreïn, l'Égypte, la Jordanie, le Koweït, le Liban, le Qatar, la République arabe syrienne et les Émirats arabes unis.

La scolarisation dans les établissements techniques du

**TABLEAU 1**  
**POPULATION, ANALPHABÉTISME, SCOLARISATION ET DÉPENSES PUBLIQUES D'ÉDUCATION DANS LES ÉTATS ARABES**

Pays/territoire	Population 1990 (millions)	Analphabétisme adulte		Taux de scolarisation 1989 <sup>1</sup>				Dépenses publiques d'éducation <sup>2</sup> (% du PNB)
		1990 (%)	Réduction annuelle 1970-1990 (%)	Deuxième degré		Troisième degré		
				%	% tech.	%	% science	
Algérie	25,0	43	2,82	61	4,9	11	14	10,0
Arabie saoudite	14,1	38	4,46	46	1,9	12	34	8,6
Bahreïn	0,5	23	4,26	84	18,0	15	nd	5,6
Djibouti	0,4	80	0,97	16	nd	nd	nd	3,0
Égypte	52,4	52	1,12	81	21,8	20	38	6,8
Émirats arabes unis	1,6	nd	nd	64	0,8	9	46	2,5
Iraq	18,9	40	2,54	47	13,7	14	33	5,0
Jamahiriya arabe libyenne	4,5	36	2,84	nd	nd	10	nd	11,0
Jordanie	4,0	20	4,99	70	8,0	35	47	6,2
Koweït	2,0	27	2,70	90	0,3	18	35	5,1
Liban	2,7	20	2,22	67	nd	28	45	nd
Maroc	25,1	50	2,25	36	1,4	11	59	8,5
Mauritanie	2,0	nd	nd	16	3,1	3	12	6,0
Oman	1,5	nd	nd	48	5,1	4	34	5,5
Palestine	1,6	20	4,99	70	8,0	30	47	nd
Qatar	0,4	nd	nd	85	3,5	24	10	6,0
République arabe syrienne	12,5	35	2,73	54	6,9	20	31	4,5
Somalie	7,5	76	1,23	10	nd	3	18	1,5
Soudan	25,1	73	0,64	20	nd	3	27	5,5
Tunisie	8,2	35	3,54	44	13,3	8	31	7,0
Yémen	11,7	61	2,08	21	nd	2	12	6,1
<b>Total</b>	<b>221,8</b>	<b>42</b>	<b>2,29</b>	<b>52</b>	<b>12,0</b>	<b>13</b>	<b>35</b>	<b>7,0</b>

1. Le taux de scolarisation s'obtient en exprimant le nombre total des élèves inscrits en pourcentage de l'effectif du groupe d'âge qui, en vertu de la législation nationale, devrait être inscrit à ce niveau.

2. Estimation.

Source : PNUD (1990, 1991 et 1992), UNESCO (1992), Banque mondiale (1992). Certaines données sont aussi des estimations.

second degré revêt une importance particulière pour la science et pour le développement économique. Les élèves des écoles techniques ne représentent, dans les pays arabes, qu'une petite proportion des effectifs du second degré. En 1989, elle était seulement de l'ordre de 12 %, en augmentation par rapport aux 10,7 % de 1980, mais bien faible par rapport aux 37 % des pays industrialisés. Si le taux d'accroissement se maintient à 1,28 % au-delà de 1989, le taux de scolarisation moyen par groupe d'âge n'atteindrait 37 % qu'en 2075.

On appréciera mieux l'insuffisance de la scolarisation

dans l'enseignement technique du second degré si l'on sait qu'en 1989 le taux moyen par groupe d'âge de cette scolarisation n'était que de 6,2 % dans les États arabes, contre 34,1 % dans les pays industrialisés.

Le pourcentage d'élèves inscrits dans les branches techniques du secondaire ne dépasse la moyenne susmentionnée qu'en Égypte (21,8 %), à Bahreïn (18 %), en Iraq (13,7 %) en Tunisie (13,3 %) et peut-être au Liban, mais les chiffres sont très faibles dans les Émirats arabes unis (0,8 %), en Arabie saoudite (1,9 %), au Qatar (3,5 %), en Oman (5,1 %), au Maroc (1,4 %), en Algérie (4,9 %) ainsi que

dans le reste des États arabes. La faiblesse de ces taux pourrait s'expliquer par le manque d'écoles techniques, mais elle tient plus probablement au fait que le travail manuel demeure socialement inacceptable dans plusieurs secteurs de la société. Il y a aussi une attitude culturelle négative à l'égard des activités de S et T qui demandent un travail manuel. Le petit nombre des techniciens formés au niveau secondaire est peut-être une des raisons de la faible productivité des secteurs manufacturier et agricole.

Dans les États arabes, l'enseignement général du second degré se divise en deux filières accueillant chacune environ 50 % des élèves. Ce sont, d'une part, la filière littéraire, où l'on étudie essentiellement les lettres et les sciences sociales et très peu de matières scientifiques; d'autre part, la filière scientifique, qui fait une très large place aux mathématiques et aux sciences exactes et naturelles. Ce système à deux filières prive ainsi la moitié environ des élèves de ce niveau d'un contact suffisant avec les sciences exactes et naturelles.

## LES SCIENCES DANS L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR

### Taux d'inscription

Le taux d'inscription moyen par groupe d'âge dans l'enseignement du troisième degré, qui comprend l'université ainsi que les échelons intermédiaires au-delà du secondaire, a augmenté dans les États arabes, passant de 4,1 % en 1970 à 9,5 % en 1980, puis à 10,8 % en 1985 et à 13 % en 1989, soit un accroissement annuel moyen de 8,77 % entre 1970 et 1980, de 3,55 % entre 1980 et 1985 et de 4,74 % entre 1985 et 1989. Le taux de 13 % est encore très modeste par rapport aux 37 % des pays industrialisés. Les taux les plus élevés sont ceux de la Jordanie (35 %), du Liban (28 %), du Qatar (24 %), de l'Égypte (20 %), de la République arabe syrienne (20 %) et du Koweït (18 %). Les pays ayant des taux très faibles, à savoir moins de 10 %, sont Djibouti, la Mauritanie, Oman, la Somalie, le Soudan et le Yémen.

Avant 1950, l'enseignement universitaire dans le monde arabe était très limité et extrêmement sélectif puisqu'il n'y avait avant cette date que neuf universités. En accédant à l'indépendance, les États arabes fondèrent de nouvelles universités. 24 furent ainsi créées entre 1950 et 1969, 31 entre 1970 et 1979 et 29 entre 1980 et 1990, soit un total de 93 pour la région en 1990. A l'exception de quelques

États arabes qui ont un taux d'inscription très faible pour le troisième degré, tous les autres ont mis en place des ministères ou des conseils de l'enseignement supérieur chargés de formuler une politique et de planifier l'enseignement supérieur.

### Les étudiants de licence dans les grandes disciplines scientifiques

Il ressort des données disponibles que le nombre d'étudiants des États arabes qui préparent une licence dans la région et en dehors de celle-ci est passé de 0,99 million en 1980 à 1,47 million en 1985, soit une augmentation moyenne de 8,2 % par an (Qasem, 1989). A supposer que ce rythme se soit maintenu pendant la période 1985-1990, le nombre devrait avoir atteint 2,18 millions en 1990. Le taux d'accroissement annuel au cours des années 80 a varié selon les pays. Plusieurs des États du CCG, à savoir l'Arabie saoudite, le Qatar, les Émirats arabes unis et Oman, arrivaient en tête avec des taux supérieurs à 13 %. Les taux d'accroissement ont été élevés également en Algérie (12,3 %) et au Maroc (11,8 %). Dans les autres pays, ils se sont situés au voisinage ou en dessous de la moyenne générale.

TABLEAU 2  
NOMBRE ET RÉPARTITION PAR GRANDES DISCIPLINES DES  
ÉTUDIANTS ARABES PRÉPARANT UNE LICENCE  
(A L'INTÉRIEUR ET EN DEHORS DE LA RÉGION)

Discipline	Accroissement annuel moyen 1980-1985 (%)	Étudiants de licence (milliers)		% du total	
		1985	1990 <sup>1</sup>	1985	1990 <sup>1</sup>
Sciences exactes et naturelles	10,4	135,6	222,0	9,2	10,1
Sciences médicales	5,6	134,8	176,9	9,2	8,1
Sciences de l'ingénieur	4,4	172,9	214,8	11,8	9,9
Sciences agronomiques	1,7	81,2	88,4	5,5	4,1
Sciences sociales et lettres	9,4	945,6	1478,5	64,3	67,8
<b>Total</b>	<b>8,2</b>	<b>1 470,1</b>	<b>2 180,6</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

1. Estimé d'après l'accroissement annuel moyen entre 1980 et 1985.

Source : Qasem, 1989.

rale. La plupart des étudiants préparant une licence sont concentrés dans un petit nombre d'États arabes ; c'est ainsi que 44,2 % du total sont en Égypte, 11,8 % au Maroc, 8,6 % en Algérie et 7,3 % en République arabe syrienne, soit au total 71,9 % dans ces quatre États. La part des 17 autres pays est relativement faible ; elle est par exemple de 7,3 % seulement pour les six États du CCG.

Il convient ici d'observer que la population arabe totale dans le groupe d'âge de 20 à 24 ans était de 14,9 millions en 1980, de 17 millions en 1985 et de 19,6 millions en 1990. En rapprochant ces chiffres du nombre des étudiants préparant une licence, on peut calculer les taux d'inscription dans ce groupe d'âge, à savoir 6,7 % en 1980, 8,6 % en 1985 et 11,1 % en 1990. Ces chiffres sont vraiment très faibles.

Le tableau 2 indique la répartition des étudiants préparant une licence par grandes disciplines. La part des sciences sociales et des études littéraires est prépondérante ; elle s'élevait à 67,8 % en 1990, ne laissant que 32,2 % pour toutes les autres disciplines. La part des sciences exactes et naturelles a légèrement augmenté, passant de 9,2 % en 1985 à 10,1 % en 1990, mais celle des sciences médicales a diminué, tombant de 9,2 % à 8,1 % ; il en a été de même pour les sciences de l'ingénieur, passées de 9,2 % à 8,1 %, et pour les sciences agronomiques, passées de 5,5 % à 4,1 %.

Ces tendances ne sont pas saines car, au stade actuel de leur développement, les États arabes ont besoin de plus de médecins, de pharmaciens, d'infirmières, d'ingénieurs, d'agronomes et d'autres spécialistes pour faire face aux besoins critiques du développement. Les besoins du secteur agricole, par exemple, dépassent de beaucoup le nombre des agronomes que forment les universités. Cela apparaît avec évidence si l'on considère que les étudiants en agronomie ne représentent que 4,1 % du nombre total des étudiants. Si un quart des 88 499 étudiants inscrits dans cette discipline en 1990 avaient obtenu leur diplôme en 1991, il y aurait eu 22 000 diplômés, mais ce nombre paraît bien faible étant donné que la proportion dans laquelle les États arabes sont tributaires de leurs importations de denrées alimentaires est passablement élevée (38 %) et qu'elle continue à augmenter. En matière de santé, le taux moyen de mortalité des moins de cinq ans dans les États arabes est de l'ordre de 100 pour 1 000 naissances vivantes, soit 5,6 fois plus que dans les pays industrialisés. En outre, quelque 56 millions d'habitants des pays arabes n'ont pas encore

accès à des services de santé. Par ailleurs, la productivité très faible de l'industrie manufacturière dans les États arabes, déjà mentionnée, montre bien que le besoin d'ingénieurs en plus grand nombre se fait sentir dans tous les domaines. Or même en Jordanie, qui se distingue pourtant par la relative abondance de ses ressources humaines, les spécialistes en ingénierie ne représentent que 5 % du total de la main-d'œuvre employée dans l'industrie.

Les disparités dans la répartition des étudiants entre les disciplines scientifiques sont peut-être dues à l'insuffisance des moyens de formation en sciences exactes et naturelles, en médecine, en ingénierie et en agronomie, mais la raison principale est certainement le cloisonnement des filières littéraires et scientifiques dans l'enseignement secondaire général. Les élèves ayant suivi la filière littéraire ne peuvent s'inscrire à l'université qu'en sciences sociales et humaines et en lettres, et seuls ceux qui ont obtenu les meilleures notes dans la filière scientifique sont admis dans les facultés de sciences exactes et naturelles, d'ingénierie, de médecine et d'agronomie. Cela empêche automatiquement les deux tiers des bacheliers de l'enseignement général d'accéder à ces disciplines.

#### *Les étudiants de troisième cycle dans les grandes disciplines scientifiques*

Le nombre total des étudiants préparant une maîtrise ou un doctorat dans la région arabe ou en dehors de celle-ci est passé de 51 400 en 1980 à 78 700 en 1985, soit un accroissement annuel moyen de 8,9 % (Qasem, 1987). En supposant que ce taux se soit maintenu pendant la période 1985-1990, le nombre aurait atteint 120 400 en 1990. Dans les années 80, les taux d'accroissement ont été élevés dans les pays du CCG (13 % et plus), en Algérie (12,2 %), en Jordanie (12,4 %), au Maroc (11 %) et en République arabe syrienne (12 %). C'est l'Égypte qui possède le plus grand nombre d'étudiants de troisième cycle ; ils constituaient 45,9 % du total pour la région en 1990. Viennent ensuite l'Algérie, avec 15,8 % du total, le Maroc (12,8 %), l'Arabie saoudite (8,2 %), l'Iraq (4,8 %) et la Jordanie (3,6 %). A eux six, ces pays comptent 91,1 % de tous les étudiants licenciés des États arabes.

Le tableau 3 indique la répartition des étudiants de troisième cycle par grandes disciplines scientifiques. Par rapport au niveau de préparation à la licence, la situation est toute différente en ce qui concerne la proportion des étudiants en sciences sociales et en lettres. Dans ces disciplines,

**TABEAU 3**  
**NOMBRE ET RÉPARTITION DES ÉTUDIANTS ARABES DE TROISIÈME CYCLE<sup>1</sup> A L'INTÉRIEUR ET A L'EXTÉRIEUR DE LA RÉGION PAR GRANDES DISCIPLINES SCIENTIFIQUES**

Discipline	Accroissement annuel moyen 1980-1985 (%)	Étudiants de troisième cycle (milliers)			% du total	
		1985	1990 <sup>2</sup>	% doct.	1985	1990 <sup>2</sup>
Sciences exactes et naturelles	7,35	11,0	15,7	27	14,0	13,1
Sciences de l'ingénieur	8,41	9,5	14,3	31	12,1	11,9
Sciences agronomiques	8,18	8,0	11,9	43	10,2	9,9
Sciences sociales et lettres	7,39	32,1	45,8	23	40,8	38,0
<b>Total</b>	<b>8,88</b>	<b>78,6</b>	<b>120,4</b>	<b>28</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

1. Comprennent les étudiants en maîtrise et en doctorat.
2. Estimé d'après l'accroissement annuel moyen entre 1980 et 1985.

Source : Qasem, 1987.

le pourcentage des étudiants a été en effet ramené de 40,8 % en 1985 à 38 % en 1990. De plus, la répartition des étudiants dans les autres disciplines était tout à fait acceptable puisque, en 1990, on trouvait environ 13 % d'entre eux dans les sciences exactes et naturelles, 27,1 % dans les sciences médicales et 11,9 % dans les sciences de l'ingénieur. La proportion de 9,9 % en agronomie doit toutefois être considérée comme relativement faible.

Cette répartition assez équilibrée, qui correspond aux besoins du développement, est une condition nécessaire mais non suffisante, parce que le nombre total des étudiants préparant une maîtrise ou un doctorat est incontestablement faible. La proportion de ces étudiants par rapport à ceux qui préparent une licence est à cet égard révélatrice. Elle était de 5,2 % en 1980, de 5,4 % en 1985 et de 5,5 % en 1990 ; autrement dit, elle n'a pratiquement pas varié au cours des années 80. Il faudrait qu'elle atteigne à peu près 10 % pour que la demande de titulaires d'une maîtrise ou d'un doctorat puisse être satisfaite. L'insuffisance du nombre des étudiants de troisième cycle aura notamment pour conséquence que le rapport entre le nombre des enseignants

et celui des étudiants continuera à augmenter dans les universités et que les organismes de R-D seront condamnés à voir se prolonger leur pénurie de personnel.

En 1990, 28 % environ de tous les étudiants de troisième cycle préparaient un doctorat, soit un total d'environ 22 000. C'est un chiffre relativement peu élevé si l'on considère que les universités ont besoin d'augmenter la proportion des docteurs dans leur corps enseignant, proportion qui est actuellement de 57 %. Comme le montre le tableau 3, le pourcentage des étudiants en doctorat est passablement élevé en agronomie (43 %). Dans les autres disciplines, les pourcentages sont relativement faibles par rapport aux besoins actuels.

La capacité de la plupart des universités arabes à absorber les étudiants préparant une maîtrise va croissant, puisque 15 % seulement de ces étudiants sont obligés de poursuivre leurs études dans un établissement autre que celui où ils avaient obtenu leur licence. Toutefois, les programmes de doctorat sont encore en nombre limité. En Égypte, 25 % environ des étudiants préparant un doctorat étudient à l'étranger ; la proportion dépasse 80 % pour les autres États arabes. Il faut dire cependant qu'une forte augmentation de la capacité des universités relativement nouvelles à absorber des étudiants en doctorat n'est pas nécessairement une bonne chose car, à ce niveau, une bonne formation obtenue dans un pays industrialisé est préférable pour répondre aux besoins de développement à long terme. Il est donc souhaitable que, au stade actuel, la plupart des universités arabes s'attachent surtout à développer et améliorer leurs programmes de maîtrise.

#### *L'investissement public dans l'enseignement supérieur*

Exprimé en pourcentage du PNB, l'investissement public total à tous les niveaux de l'éducation dans les États arabes est passé de 4,4 % en 1980 à 6,2 % en 1985 et à 7 % (estimation) en 1990. Cela a représenté un investissement total de l'ordre de 24 milliards de dollars des États-Unis en 1985 et de 30 milliards de dollars en 1990, soit une dépense moyenne par habitant d'environ 126 dollars en 1985 et de 135 dollars en 1990. L'investissement dans l'éducation en pourcentage du PNB variait parmi les États arabes de plus de 8 % en Algérie, en Jamahiriya arabe libyenne, au Maroc et en Arabie saoudite, à moins de 3 % à Djibouti, en Somalie et dans les Émirats arabes unis (voir tableau 1).

L'investissement public dans l'enseignement supérieur en

pourcentage de l'investissement à tous les niveaux de l'éducation n'est connu que pour quelques États arabes. Selon les données disponibles, cette proportion est légèrement supérieure à 20 % en Égypte, en Iraq, en Jordanie et en République arabe syrienne, et inférieure à ce chiffre dans tous les autres États (PNUD, 1990, 1991 et 1992). Si l'on estime que la moyenne est de 25 %, l'investissement à tous les niveaux de l'enseignement supérieur aurait été de l'ordre de 7,5 milliards de dollars en 1990, soit 1,74 % du PNB. Ce taux équivaut à 14 % des dépenses militaires pour la même année. On peut dire sans risque d'erreur que la limite supérieure de la dépense consacrée aux universités a été 20 % du total pour tous les niveaux de l'enseignement, soit 6 milliards de dollars des États-Unis en 1990.

et de la recherche scientifique ou conseils pour la science et la technologie, chargés de formuler des politiques et d'établir une planification en matière de S et T. Nous nous efforcerons dans cette section de présenter des éléments d'information sur l'état de la recherche dans les universités et dans les centres de R-D.

#### La R-D dans les universités

Les activités de recherche et développement dans les universités sont conduites essentiellement à titre individuel par des membres du corps enseignant aidés par des assistants de recherche, ainsi que dans des centres universitaires spécialisés en R-D fonctionnant avec un personnel restreint qui fait appel aux services de membres du corps enseignant pour la recherche. Ces centres ont été créés principalement pour répondre à des besoins économiques dans des domaines où la R-D devait être conduite sur une base multidisciplinaire. Il existe environ 45 de ces centres rattachés à des universités et travaillant à des recherches dans les domaines de l'agriculture, de la médecine, des sciences hydrologiques et marines, de l'environnement, de l'informatique, de la télédétection, de l'économie et autres sciences appliquées.

Le nombre des scientifiques (membres du corps enseignant) pour toutes les grandes disciplines scientifiques dans les universités arabes est passé de 35 800 en 1980 à 51 300

## RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT

On ne dispose pas de données récentes sur les ressources de la R-D dans la plupart, sinon dans la totalité, des États arabes. Nous nous servons cependant des données pour 1985 que le professeur S. Qasem a établies en 1987 et nous les extrapolons pour obtenir, sur la base d'hypothèses raisonnables, des données pour 1990 (Qasem, 1987). La plupart des États arabes ont d'ores et déjà mis en place des organismes tels que ministères de l'enseignement supérieur

TABLEAU 4  
NOMBRE DES SCIENTIFIQUES TITULAIRES D'UNE MAÎTRISE OU D'UN DOCTORAT (MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT),  
CHERCHEURS ET ASSISTANTS (EPT) DANS LES UNIVERSITÉS DES PAYS ARABES, PAR GRANDES DISCIPLINES SCIENTIFIQUES

Discipline	Accroissement annuel moyen (%) 1980-1985	Scientifiques titulaires d'une maîtrise ou d'un doctorat (milliers)		Personnel de R-D (EPT) 1990 (milliers)			% du total	Part des dépenses de R-D (%)
		1985	1990 <sup>1</sup>	Scientifiques <sup>2</sup>	Assistants	Total		
Sciences exactes et naturelles	8,2	9,9	14,6	3,6	3,6	7,2	19,6	23
Sciences médicales	7,6	10,7	15,4	3,9	3,9	7,8	21,2	25
Sciences de l'ingénieur	8,0	7,0	10,3	2,6	2,6	5,2	14,1	16
Sciences agronomiques	5,9	6,0	8,0	2,0	2,0	4,0	10,9	13
Sciences sociales et lettres	7,3	17,7	25,2	6,3	6,3	12,6	34,2	23
<b>Total</b>	<b>7,5</b>	<b>51,3</b>	<b>73,5</b>	<b>18,4</b>	<b>18,4</b>	<b>36,8</b>	<b>100,0</b>	<b>100</b>

1. Estimé d'après l'accroissement annuel moyen entre 1980 et 1985.

2. On obtient ces chiffres en supposant que les intéressés consacrent 25 % de leur temps à la R-D.

Source : Qasem, 1987.

en 1985, soit un accroissement moyen de 7,5 % par an. En appliquant ce taux à la période 1985-1990, on voit que le total devait atteindre 73 500 scientifiques en 1990. La même année, le nombre de titulaires d'un doctorat devait atteindre 40 600, soit 55,2 % de tous les titulaires d'un diplôme du troisième cycle, et les détenteurs d'une maîtrise devaient être au nombre de 32 900 (44,8 %). L'Égypte possède environ 45 % de tous les scientifiques travaillant dans les universités des États arabes, l'Algérie 13 % et le Maroc 9 % ; l'Arabie saoudite et l'Iraq en comptent chacun 8 %. Ces cinq pays rassemblent à eux seuls 83 % de tous les scientifiques qui travaillent dans les universités de la région.

Le tableau 4 indique le nombre des scientifiques et leur répartition par grandes disciplines. On a calculé le nombre des scientifiques employés à la R-D en équivalent plein temps (EPT) à partir du total en supposant que le corps enseignant consacre en moyenne de 20 % à 25 % de son temps à des activités de R-D. On ajoute, pour obtenir le chiffre total, un nombre EPT équivalent d'assistants de recherche. Le nombre total en EPT des chercheurs et assistants aurait ainsi atteint au minimum 24 900 et au maximum 36 800 en 1990, chiffres correspondant, respectivement, à une proportion de 132 et 166 scientifiques EPT pour 1 million d'habitants. La répartition des chercheurs entre les diverses disciplines, telle qu'elle ressort du tableau 4, est acceptable, sauf pour les sciences agronomiques, qui n'ont pas la part voulue de personnel de recherche.

L'investissement dans la recherche universitaire comprend les traitements, les avantages, les équipements et les services, en plus des dons et des fonds provenant de contrats de recherche de diverses sources. Les universités du Koweït, de l'Arabie saoudite et des autres pays du CCG accordent des dotations généreuses à la recherche ; en revanche, dans les autres pays arabes, ces dotations sont limitées. On estime que 20 % de l'investissement à tous les niveaux du système éducatif sont consacrés à l'enseignement universitaire, ce qui porte l'investissement total dans les universités à 6 milliards de dollars des États-Unis pour 1990. Étant donné que les scientifiques des universités consacrent en moyenne entre 20 % et 25 % de leur temps à la R-D, les dépenses de R-D dans les universités se situeraient entre 1,2 et 1,5 milliard de dollars ; en évaluant à 10 % le financement extérieur, on obtient pour les dépenses totales de R-D dans les universités un chiffre qui serait compris entre 1,32 et 1,65 milliard de dollars, montants correspondant respectivement à 0,31 % et 0,38 % du PNB de 1990. La propor-

tion de 20 % retenue pour le temps que le personnel enseignant des universités consacre à la R-D est raisonnable, puisqu'une enquête globale sur le potentiel de R-D en Jordanie a fait apparaître un taux de 18 % (Daghestani et Shahateet, 1988).

La répartition des dépenses de R-D dans les universités ne correspond pas aux effectifs respectifs du personnel scientifique dans les diverses disciplines mentionnées au tableau 4 parce que le coût estimatif de la recherche en sciences sociales et en lettres dans les États arabes s'établit en moyenne à 60 % environ du montant relatif aux autres disciplines scientifiques. On estime par conséquent que la répartition des dépenses de R-D entre les disciplines est la suivante : 23 % pour les sciences exactes et naturelles, 25 % pour les sciences médicales, 16 % pour les sciences de l'ingénieur, 13 % pour les sciences agronomiques et 23 % pour les sciences sociales et humaines.

#### *Les institutions de R-D*

Les États arabes ont commencé à créer des centres de R-D afin de compléter l'effort de recherche que les universités déploient pour pratiquer la recherche scientifique appliquée, pour intensifier leur action en matière de développement expérimental, pour adopter une approche multidisciplinaire de la résolution des problèmes et pour établir des liens plus étroits avec les secteurs de la production. Les organismes de recherche ont des appellations variées (départements, directions, instituts et centres), mais, aux fins du présent chapitre, nous utiliserons le mot centre pour désigner toutes ces institutions. On estime que le nombre des centres de R-D dans la région atteignait 265 en 1990. Quelque 65 centres ont été créés entre 1950 et 1969, 170 entre 1970 et 1979 et 30 entre 1980 et 1990 (Qasem, 1987). Le nombre de personnes qui travaillaient dans chacun d'entre eux (chercheurs et assistants) variait considérablement — de plus de 3 000 à guère plus d'une cinquantaine. En 1985, le nombre total de scientifiques employés à la R-D titulaires d'une maîtrise ou d'un doctorat était de l'ordre de 8 800. L'effectif total du personnel des centres représente plus de quatre fois ce chiffre, mais le nombre des assistants de recherche est à peu près le double de celui des chercheurs, de sorte que le nombre total des personnes travaillant à la R-D était en 1985 de 26 400, soit 138 pour 1 million d'habitants. En utilisant la même formule et en prenant pour hypothèse un taux d'accroissement annuel de 5 %, on estimait que le nombre EPT des personnes travaillant

à la R-D atteignait 33 700; soit 152 pour 1 million d'habitants, en 1990.

Le tableau 5 indique la répartition de cet effectif estimatif en 1990 dans neuf domaines scientifiques. Il est à noter que la part de l'agriculture et de l'alimentation était de 44 %; viennent ensuite le secteur du pétrole, de la pétrochimie et de la chimie avec 13,9 % du total, puis l'énergie, les mines (8,6 %) et les sciences exactes et naturelles (6,2 %). On voit en fait que les neuf domaines figurant dans ce tableau peuvent être ramenés aux cinq dont il a été fait état précédemment puisque l'agriculture, l'eau et l'irrigation et les terres arides peuvent être considérées comme relevant des sciences agronomiques et que l'énergie, l'industrie pétrochimique et les mines entrent dans la catégorie des sciences de l'ingénieur.

Si on a fait figurer neuf domaines dans le tableau 5, c'est pour montrer combien est faible le nombre de chercheurs EPT dans le domaine de l'eau et de l'irrigation, des terres arides, et des industries pétrolière, pétrochimique et chimique. Comme on l'a vu dans une section précédente, les questions relatives à l'eau et aux terres arides revêtent une importance décisive dans la plupart des États arabes, mais le nombre des chercheurs qui s'y consacrent est faible par rapport à l'ampleur des problèmes. De surcroît, le nombre de chercheurs EPT (4 700) s'occupant des industries pétrolière, pétrochimique et chimique est insuffisant vu la nécessité de développer un savoir-faire permettant d'utiliser les énormes ressources du monde arabe en pétrole et en gaz dans les industries manufacturières. Par ailleurs, le nombre de chercheurs EPT en ingénierie est de 10 600, ce qui est peu quand on sait que les États arabes ont investi plus de 120 milliards de dollars des États-Unis dans l'industrie au cours des quinze dernières années.

La majeure partie des ressources humaines dont disposent les centres de R-D est concentrée en Égypte; la part de ce pays était en effet de 56 % en 1990, tandis que 11 % environ se trouvaient en Iraq et 12 % en Arabie saoudite, le reste se répartissant entre les 18 autres États arabes.

Il n'y a pas de données fiables sur les dépenses des centres de R-D dans les États arabes, mais on peut en faire une estimation raisonnable en prenant le montant des dépenses de R-D des universités arabes et en l'ajustant pour tenir compte des nombres relatifs de chercheurs EPT dans les centres de R-D et les universités. En procédant ainsi, on obtient le chiffre de 1,51 milliard de dollars des États-Unis, soit 0,35 % du PNB total de la région.

TABLEAU 5  
EFFECTIF ESTIMATIF DU PERSONNEL DE R-D DANS LES CENTRES DE R-D DES ÉTATS ARABES, PAR DOMAINE SCIENTIFIQUE, EN 1990 (EPT)

Domaine	Nombre de centres	Personnel de R-D (EPT) (milliers)	% du total
Sciences agronomiques	87	16,7	49,7
Agriculture et alimentation	61	14,8	44,0
Eau et irrigation	16	1,0	3,0
Terres arides et télédétection	10	0,9	2,7
Sciences exactes et naturelles	41	2,1	6,2
Sciences médicales	32	1,6	4,7
Sciences de l'ingénieur	92	10,6	31,4
Énergie (nucléaire, électrique, solaire, etc.)	29	3,0	8,9
Pétrole, pétrochimie et chimie	22	4,7	13,9
Mines, matières premières, électronique, etc.	41	2,9	8,6
Sciences sociales (économie)	13	2,7	8,0
Total	265	33,7	100,0

Source : Qasem, 1987.

#### *Personnel et dépenses de R-D : récapitulation*

Les données présentées jusqu'ici indiquent que l'effectif esimatif total du personnel de R-D des universités et des centres de R-D est passé de 52 100 en 1985 à 70 500 en 1990, ce qui représente un accroissement annuel moyen de 6,2 %. Le dernier total correspond à 318 scientifiques (EPT) travaillant pour 1 million d'habitants, chiffre encore très inférieur à la moyenne de quelque 3 600 dans les pays développés (UNESCO, 1991). Le tableau 6 indique la répartition de ces scientifiques entre les grandes disciplines dans la région.

L'investissement total consacré à la R-D dans les universités et les centres de R-D est passé de 2,3 milliards de dollars environ en 1985 à 3,2 milliards de dollars en 1990, ce

dernier chiffre représentant 0,75 % du PNB, valeur très faible par rapport à une moyenne de 2,92 % du PNB dans les pays développés (UNESCO, 1991). Le tableau 7 indique la

répartition estimative de l'investissement total en R-D entre les grands domaines scientifiques.

**TABEAU 6**  
NOMBRE ESTIMATIF DE CHERCHEURS DANS LES UNIVERSITÉS ET LES CENTRES DE R-D DES ÉTATS ARABES, 1990 (EPT)

Domaine	Équivalent plein temps (EPT) (milliers)				EPT pour 1 million d'habitants
	Universités	Centres de R-D	Total	% du total	
Sciences exactes et naturelles	7,2	2,1	9,3	13,2	42
Sciences médicales	7,8	1,6	9,4	13,3	42
Sciences de l'ingénieur	5,2	10,6	15,8	22,4	71
Sciences agronomiques	4,0	16,7	20,7	29,4	93
Sciences sociales et lettres	12,6	2,7	15,3	21,7	69
<b>Total</b>	<b>36,8</b>	<b>33,7</b>	<b>70,5</b>	<b>100,0</b>	<b>318</b>

Source : chiffres calculés à partir des données des tableaux 4 et 5.

**TABEAU 7**  
DÉPENSES ESTIMATIVES TOTALES DE R-D DANS LES UNIVERSITÉS ET LES CENTRES DE R-D DES ÉTATS ARABES, 1990

Domaine	Milliards de dollars		
	des États-Unis	% du total	% du PNB
Sciences exactes et naturelles	0,46	14,4	0,11
Sciences médicales	0,46	14,4	0,11
Sciences de l'ingénieur	0,78	24,4	0,18
Sciences agronomiques	1,04	32,5	0,24
Sciences sociales et lettres	0,46	14,4	0,11
<b>Total</b>	<b>3,20</b>	<b>100,0</b>	<b>0,75</b>

Source : chiffres calculés à partir des données du texte et du tableau 4.

### Problèmes et tendances

Les travaux de R-D dans les universités n'ont pas seulement pour but d'acquérir des connaissances nouvelles, objectif noble en soi; ils visent aussi à améliorer les capacités du personnel dispensant un enseignement, surtout pour les étudiants qui poursuivent des études universitaires supérieures, et de répondre aux besoins sociaux et économiques du pays. D'autre part, des centres de R-D ont été spécialement créés pour produire un savoir nouveau et utiliser ce savoir au service du pays. Dans les deux cas, s'il y a bien eu recherche appliquée (R), le travail de développement (D) a été minime. En général, les activités de R-D dans les États arabes n'ont pas eu d'impact visible sur les divers secteurs de l'économie, parce que le système socio-économique court-circuite souvent la communauté scientifique en faisant une place excessive à l'importation de technologie, aux projets clés en main et aux accords de licence avec des firmes étrangères. L'insuffisance de la demande de R-D endogène est par conséquent à l'origine de la faiblesse de l'offre en termes de matière grise et de fonds investis dans la R-D.

Malgré tout cela, il ne faudrait pas que la communauté scientifique soit déchargée de ses responsabilités qui sont de faire une R-D correspondant à des besoins réels et de poursuivre le travail de développement nécessaire à l'application des résultats obtenus. Après tout, c'est la communauté scientifique elle-même qui établit les principes et les règles présidant à la publication des résultats de la R-D, mais elle manque de motivation lorsqu'il s'agit de poursuivre l'effort au-delà de la publication. Toutefois, plusieurs institutions de R-D des États arabes ont commencé à promouvoir des recherches sous contrat avec le secteur de la production dans les années 80. C'est ainsi que l'Institut koweïtien pour la recherche scientifique (KISR) a financé environ 50 % de ses dépenses annuelles par des contrats de recherche. De même, la Société scientifique royale de Jordanie, qui fait de la recherche industrielle et fournit des services de S et T, a pu couvrir la totalité de ses dépenses par cette méthode en 1992. Pour avancer dans cette direction, les institutions de R-D des États arabes devront trouver de nouveaux moyens d'opérer qui justifient les investissements publics, si modiques soient-ils, dont elles ont bénéficié.

Il convient d'ajouter que très peu d'organismes du secteur privé ont leur propre centre de R-D et que, lorsqu'ils en ont

un, ils se cantonnent d'ordinaire dans des services de S et T, par exemple des études ou des contrôles de qualité. Les unités de recherche industrielle sont plus répandues dans les industries exportatrices qui affrontent la concurrence sur le marché mondial, mais celles-ci sont relativement peu nombreuses. D'autres industries dont la production est destinée à se substituer aux importations sont souvent très protégées par des barrières douanières élevées qui ont pour effet de créer des marchés locaux captifs; dans ces conditions, la demande de R-D est nécessairement faible.

FAKHRUDDIN AL-DAGHESTANI dirige le Centre d'études internationales de la Société scientifique royale de Jordanie et fut auparavant président de cette Société. M. Daghestani est docteur en génie mécanique de l'Université du Missouri (États-Unis d'Amérique). Il a été décoré en 1985 de la grand-croix du Mérite avec étoile par le président de la République fédérale d'Allemagne. Il est membre fondateur de l'Académie islamique des sciences et fait partie de son conseil depuis 1986.

## RÉFÉRENCES

- Daghestani F. et Shahateet, M. 1988. *Scientific and technological potential and services in Jordan, 1987*, Amman, Royal Scientific Society.
- Qasem, S. 1987. *La situation de la science et de la technologie et son milieu dans le monde arabe*, Amman, rapport non publié (en arabe).
- . 1989. *Higher education in the Arab world*, Amman, Arab Thought Forum.
- PNUD. 1990, 1991 et 1992. *Rapports mondiaux sur le développement*, Paris, Economica.
- UNESCO. 1991. *Estimation des ressources mondiales consacrées à la recherche et au développement expérimental*, Paris, UNESCO. (Document CSRS-25.)
- . 1992. *Annuaire statistique 1992*, Paris, UNESCO.
- Banque mondiale. 1992. *Rapport sur le développement dans le monde*, Washington, D.C., Banque mondiale.

## L'AFRIQUE

Thomas R. Odhiambo

Dans son numéro de janvier 1993, le magazine mensuel *The Tatler*, faisant la distinction entre l'héroïsme et la célébrité, caractérisait les héros comme « des hommes et des femmes qui s'élèvent très au-dessus de l'ordinaire par leur bravoure, leur charisme et leur ascendant ». Il est vrai que les héros sont « des êtres qui ont fait preuve de courage en adhérant à des échelles de valeurs qui se situent hors de la norme ».

Ce ne sont pas des demi-dieux ou des dieux grecs et, comme nous le rappelle l'article, les Grecs, qui furent les vrais inventeurs des héros, ne les ont jamais voulus réels. Les héros étaient des dieux ou des fils de dieux; ils n'étaient jamais censés être des gens ordinaires avec des femmes et des familles ordinaires, astreints au travail quotidien, ayant mal aux reins et des pellicules. Les Grecs avaient un mot pour qualifier ceux qui voulaient imiter les dieux et les héros : *hybris* — la prétention arrogante et téméraire de se conduire comme des surhommes, qui aboutissait toujours à la *nemesis*, le châtement des dieux ».

L'Afrique n'a pas besoin de demi-dieux, mais elle a sûrement besoin de héros modernes qui luttent contre la sagesse conventionnelle, les préjugés profondément ancrés et l'injustice invétérée. L'Afrique a besoin de héros capables d'innover et d'arracher le continent à sa léthargie actuelle qui l'empêche de se développer et au syndrome de la dépendance.

La science et son inséparable partenaire jumelle, la technologie, portent en elles la promesse de permettre à ceux qui les pratiquent de rompre avec la routine et de faire entrer en jeu une nouvelle façon d'envisager les défis de l'existence, de vivre et de gagner sa vie. C'est bien dans ce contexte que l'Afrique a besoin de ses héros; ceux de la science et de l'éducation, de l'entreprise et de l'industrie, de la gestion et du développement économiques, pour l'œuvre de longue haleine de son redéveloppement. Le continent a pratiquement perdu le sens de l'héroïsme pendant et depuis les cinq cents ans de la diaspora qui a pris fin il y a trois décennies lorsque les pays obtinrent de nouveau l'indépendance politique. L'effort héroïque qui s'impose exige un mouvement continu à travers les frontières d'hommes et de connaissances, d'idées et de technologies.

L'un des facteurs qui rendirent possibles les réalisations de la civilisation pharaonique pendant les trois millénaires — d'environ 3700 à 750 avant notre ère — où elle régna en Égypte fut l'étendue des communications entre l'Égypte et le

Proche-Orient, ainsi qu'entre l'Égypte et le reste de l'Afrique, en particulier le Soudan nilotique et les centres de population voisins de l'Afrique subsaharienne. La preuve apportée par l'archéologie qu'il était fait couramment usage de l'encens et de l'obsidienne, l'un et l'autre étrangers à la vallée du Nil, atteste l'importance des communications et des liens commerciaux qui reliaient l'Égypte au reste de l'Afrique (Mokhtar, 1981). Ce sens des liaisons transfrontières et des échanges intellectuels, notamment en matière de science et de technologie (S et T), est redevenu un impératif pour le progrès futur de l'Afrique dans l'ère postcoloniale naissante.

COOPÉRATION INTERAFRICAIN EN  
MATIÈRE DE S ET T : CADRE CONCEPTUEL

Pendant la première moitié de ce siècle, les pays d'Afrique ont coopéré de la façon la plus étroite avec les institutions scientifiques et technologiques des puissances métropolitaines. La coopération interafricaine était négligeable, sauf dans les limites de la zone relevant d'une même puissance coloniale, comme la zone d'influence géopolitique de la Belgique (qui allait devenir dans l'ère postcoloniale le Rwanda, le Burundi et le Zaïre) ou celle de la France (la zone d'Afrique centrale englobant les territoires qui devaient porter plus tard les noms de Congo, Gabon, République centrafricaine, Cameroun et Tchad). La première tentative importante de coopération interafricaine en matière de S et T a commencé au début des années 50 lorsque les aspirations à l'indépendance politique se firent sentir dans presque toute l'Afrique.

Dans son livre *Science in the development of Africa* paru en 1958, et qui demeure une référence, E. B. Worthington, spécialiste britannique de la biologie des eaux douces et analyste des politiques de S et T, qui travailla en Afrique pendant la plus grande partie de sa vie, plaidait avec beaucoup d'éloquence pour une coopération interafricaine en matière de S et T : « Dans le monde du xx<sup>e</sup> siècle en proie à la concurrence, un petit pays, quel qu'il soit, à moins d'être exceptionnellement bien doté en ressources naturelles et humaines, peut difficilement être indépendant de ses voisins et fournir en même temps à sa population le nécessaire de la civilisation moderne. Ce principe s'applique tout spécialement en Afrique où les conditions locales ont amené

une spécialisation économique non seulement dans de grands secteurs comme l'agriculture ou l'exploitation minière, mais dans des branches particulières de ceux-ci, comme la culture du coton ou du cacao ou l'extraction du cuivre. Toutes les mesures visant à mettre en commun les ressources de pays voisins ayant des spécialités différentes présentent l'avantage général de réduire les risques économiques. Ce qui vaut pour l'économie vaut aussi pour la science : une spécialisation considérable s'est opérée dans différents territoires, si bien qu'une collaboration ou même un échange complet d'informations pourrait être très profitable. » (Worthington, 1958.)

Ce sont des considérations de cet ordre à l'échelon des gouvernements métropolitains qui ont abouti en 1950 à la création de la Commission de coopération technique en Afrique au sud du Sahara (CCTA) par les six gouvernements coloniaux qui étaient alors présents en Afrique (Belgique, Royaume-Uni, France, Portugal, Fédération de Rhodésie et du Nyassaland et Union sud-africaine). La même année, une initiative analogue des scientifiques de ces six pays entraîna la création du Conseil scientifique pour l'Afrique au sud du Sahara (CSA). Les deux organismes avaient donc des origines bien distinctes : la CCTA visait à une assistance mutuelle des puissances métropolitaines pour des raisons administratives et politiques ; le CSA à une coopération et une consultation en matière de S et T répondant aux vœux exprimés par des scientifiques citoyens de ces pays. Dans la pratique, les deux organismes en vinrent à collaborer étroitement et à pratiquer la concertation.

Le CSA (dont le siège était à Bukavu, au Zaïre) faisait office de principal conseiller scientifique et technique de ce système d'assistance mutuelle et s'occupait principalement de l'élaboration et de l'application d'une politique scientifique, tandis que la CCTA (dont le siège était à Londres, au Royaume-Uni) devenait l'organe exécutif et financier et s'occupait surtout de la politique de gestion et de l'allocation des ressources.

Pour faire en sorte que les institutions de S et T existant en Afrique se rassemblent sous la houlette du CSA, la CCTA introduisit dans son accord constitutif, signé à Londres en janvier 1954, une disposition visant à placer sous l'égide du CSA les organisations interafricaines suivantes : le Bureau interafricain des épizooties, le Bureau permanent interafricain pour la tsé-tsé et la trypanosomiase, le Bureau interafricain des sols et de l'économie rurale, l'Institut interafricain du travail, le Service pédologique interafricain. Ultérieurement, d'autres organismes analogues de coopération scientifique en Afrique au sud du Sahara s'ajoutèrent à ce groupe.

L'emprise géographique de la CCTA changea en février 1962 lorsque, à sa dix-septième session, tenue à Abidjan (Côte d'Ivoire), il fut décidé de supprimer les mots « au sud du Sahara » dans la désignation de la Commission, et que le Secrétaire général fut prié de susciter l'intérêt des gouvernements de l'Éthiopie, du Soudan, du Togo et de la région d'Afrique du Nord pour les activités de la Commission.

C'était une initiative hardie, contre laquelle les États industrialisés devaient prendre position dans l'ère postcoloniale. Des mesures analogues furent prises par le CSA à sa treizième réunion, tenue en septembre de la même année à Mugaba (Kenya). Les deux organismes étendaient donc leur domaine de compétence à l'ensemble du continent africain, tout en prenant les dispositions nécessaires pour « cesser toute relation avec l'Afrique du Sud et le Portugal » (Publication n°92 de la CCTA, Lagos, 1964). En 1961, le Nigéria proposa d'accueillir le siège de la CCTA à Lagos (loin de ses quartiers londoniens originels) ; en déplaçant cet important organe de coopération technique, les responsables de la CCTA explicitèrent l'esprit dans lequel ils entendaient travailler : « La CCTA, instrument de la solidarité africaine, est pareille à un pont jeté entre la science de l'Europe et les besoins de l'Afrique. Il existe d'autres ponts plus larges qui peuvent sans doute livrer passage à une circulation plus importante, mais celui que la Commission est chargée de construire et d'entretenir restera ouvert quelles que soient les fluctuations politiques que réserve l'avenir. » (CCTA/CSA/FAMA : Coopération interafricaine, 1962.)

La CCTA devint en partie un organe intergouvernemental efficace de coopération technique en Afrique, parce qu'elle s'appuyait largement sur la capacité en matière de politique de S et T de son partenaire, le CSA. Ce dernier préservait farouchement son indépendance. C'est ainsi que ses membres étaient censés « servir dans un esprit d'impartialité et d'objectivité complètes, indépendamment de toute considération politique et sans en référer à leurs gouvernements nationaux ». Trois libertés ont joué, semble-t-il, un rôle essentiel dans l'efficacité avérée du CSA :

- 1. la liberté de choisir ses membres quelle que soit leur nationalité (il était seulement tenu d'informer la CCTA de ces nominations) ;
- 2. la liberté de tenir ses réunions dans n'importe lequel des pays membres de la CCTA ;
- 3. la liberté de travailler en liaison avec d'autres organismes de S et T et d'autres pays, tout en restant étroitement lié à la CCTA.

Telles sont les raisons pour lesquelles le CSA s'était affirmé comme un pilier d'une solidité exceptionnelle pour la CCTA lorsque celle-ci fut absorbée en 1964 par l'institution continentale créée depuis peu qu'était l'Organisation de l'unité africaine (OUA).

### *Les nouvelles orientations*

La Commission de recherches scientifiques et techniques de l'Organisation de l'unité africaine (CRST) succéda à la CCTA. De fait, une des questions qui furent abordées à la première session ordinaire du Conseil des ministres de l'OUA, tenue à Dakar en août 1963, fut celle de l'avenir de la CCTA. Cette initiative doit être replacée dans le contexte de la Charte de l'OUA qui, au paragraphe 2 de son article II consacré aux objectifs de l'Organisation, dispose que : « à ces fins, les États membres coordonneront et harmoniseront leurs politiques générales » dans six domaines, dont « la santé, l'hygiène et la nutrition » et « la science et la technique » de manière à « coordonner et intensifier leur coopération et leurs efforts pour offrir de meilleures conditions d'existence aux peuples d'Afrique ».

De même, le Conseil scientifique d'Afrique succéda à l'ancien CSA. Les autres organismes qui fonctionnaient sous l'autorité de la CCTA se transformèrent pour la plupart en ce qui allait devenir les Bureaux sous-régionaux de la CRST, à savoir le Bureau interafricain des ressources animales (IBAR), basé à Nairobi (Kenya), le Conseil phytosanitaire interafricain (IAPSC), basé à Yaoundé (Cameroun), et le Bureau interafricain des sols (BIS), basé à Bangui (République centrafricaine), qui a depuis cessé d'opérer. La CRST a cependant ajouté au fil du temps d'autres activités à son domaine de compétence, notamment les bureaux de coordination de la Recherche et développement des cultures vivrières dans les zones semi-arides (SAFRAD), dont le siège principal est à Ouagadougou (Burkina Faso), le Centre africain de développement des engrais, basé à Harare (Zimbabwe) et le Programme de formation à la gestion agricole pour l'Afrique (AMTA).

Il est incontestable que les économies africaines doivent aller délibérément vers une intégration qui, loin d'être un rêve fumeux, est une nécessité urgente, rigoureusement pragmatique (Odhiambo, 1991). Le cadre de référence d'une telle coopération a été formulé avec éloquence dans la déclaration de politique générale faite en 1991 par la Commission économique des Nations Unies pour l'Afrique : « La balkanisation politique du continent en États-nations

arbitraires rend compréhensible la volonté de l'Afrique de restructurer une région fragmentée et d'en faire une entité économique et politique plus cohérente et plus forte. Le sens africain de l'unité et de la solidarité entraîne également la volonté naturelle d'une coopération socio-économique accrue. Sur le plan économique, les nombreux obstacles que les pays africains rencontrent sur la voie du développement authentique du fait d'un espace économique limité et fragmenté ont été à la base de la détermination de l'Afrique à poursuivre et à atteindre l'objectif d'une autonomie collective. D'une manière générale, l'autonomie représente pour l'Afrique aussi bien la fin que les moyens par lesquels elle finira par trouver son identité véritable, sa dignité et sa force historique. C'est aussi la fin et les moyens par lesquels la région trouvera la capacité de maîtriser ses ressources, son développement et son avenir. » (CENUA, 1989.)

Dans le même esprit, l'OUA a défini avec force les objectifs qu'elle se donne à l'échelle du continent pour parvenir à un développement socio-économique intégré dans des conditions d'autosuffisance et de durabilité ; ainsi peut-on lire comme un acte de foi des chefs d'État et de gouvernement africains réunis à Lagos (Nigéria) en avril 1980 le Plan d'action de Lagos pour le développement économique de l'Afrique, 1980-2000 :

- 1. Le Plan d'action de Lagos a clairement exposé l'idée maîtresse selon laquelle « l'atout majeur de l'Afrique étant constitué par ses ressources humaines, la mobilisation pleine et entière et l'utilisation efficace de la main-d'œuvre devraient être un instrument de premier ordre au service du développement national et du progrès social » (par. 91).
- 2. « Afin de réaliser les objectifs du développement industriel [...] les États membres décident de tout mettre en œuvre aux niveaux national, sous-régional et régional, dans les domaines des ressources humaines, des ressources naturelles, des financements et des institutions de promotion, pour assurer les conditions nécessaires à la mobilisation optimale de l'ensemble des énergies au service de l'action gigantesque ainsi entreprise » (par. 53).
- 3. Les États membres devraient harmoniser les « politiques nationales de mise en valeur des ressources naturelles en vue de créer un environnement favorable aux efforts de coopération déployés [...] dans le domaine de la mise en valeur de leurs ressources naturelles de façon à couvrir les besoins socio-économiques de leurs populations » (par. 77e).

Il faut transformer profondément la politique scientifique pour que la science contribue au développement du continent. « Cela peut se manifester par l'octroi de ressources financières en vue de créer une base en science et technique pour le développement socio-économique dont l'urgence et l'importance se manifestent dans la conjoncture de l'histoire. Pour toutes ces raisons, les pays africains estiment qu'il est capital et extrêmement urgent, à ce tournant décisif de l'histoire, que les planificateurs et les responsables africains fassent preuve de la volonté politique et du courage requis pour modifier en profondeur et à long terme la situation actuelle concernant l'utilisation de la science et de la technique en tant que base du développement socio-économique » (par. 119) (OUA, 1981).

Les actions à l'ordre du jour de l'OUA pendant les trois premières décennies de son existence ont été presque exclusivement d'ordre politique; il s'agissait de la décolonisation, de l'abolition de l'*apartheid*, de la réinstallation des réfugiés, de la résolution de conflits entre États, etc. Cet état de choses est compréhensible dans la mesure où il est imputable à l'histoire. Sur les 925 résolutions votées par le Conseil des ministres de l'OUA au cours des vingt ans qui se sont écoulés entre 1963 et 1982, 3 % seulement traitaient de questions strictement scientifiques et techniques (on obtiendrait probablement une proportion de 16,5 % en comptant les résolutions ayant certains aspects scientifiques et technologiques). Étant donné le manque flagrant de développement à base scientifique en Afrique alors que le monde est actuellement dominé par la technologie, il est important que l'OUA, ses organes et autres entités régionales et nationales de développement accordent une attention égale à la recherche-développement en tant que moteur du développement économique.

Ce changement radical exige la transformation de la faible CRST actuelle en un mécanisme puissant et efficace, le développement de liens forts entre les responsables du Secrétariat général de l'OUA et la direction de la CRST et l'adéquation du programme de la CRST aux besoins du continent africain qu'elle représente et de ses homologues aux niveaux national et sous-régional.

#### LES RÉSULTATS OBTENUS PAR LA STRUCTURE DE S ET T DE L'OUA

L'image de la CRST qui se dégage à mesure que s'approche la fin du siècle n'est pas celle d'un bras efficace de l'OUA

pour la S et T. La CRST n'est pas connue en dehors d'un cercle restreint de spécialistes et de planificateurs dévoués à leur tâche en Afrique. Le CSA est encore moins en évidence; il est même à peu près inconnu. Une comparaison entre la CCTA et le CSA d'hier et la CRST et le CSA d'aujourd'hui n'est pas flatteuse pour ces derniers.

La CCTA se réunissait régulièrement (au moins une fois par an) et publiait des rapports annuels complets qui étaient une source de conseils scientifiques et d'indications technologiques pour l'avenir. Elle était un centre d'activité pour la formulation d'une politique et la mobilisation des ressources, et les gouvernements membres tenaient compte de ses recommandations. En revanche, la CRST, telle qu'elle fonctionne actuellement, manque de présence et de crédibilité, et ses conseils n'attirent que rarement l'attention, les quelques exemples concernant le domaine de la médecine traditionnelle et la campagne contre la peste bovine.

Le CSA est moribond et ne s'est réuni que deux fois depuis le début de 1990. On ne peut pas dire qu'il se concentre sur certains programmes importants ou sur une politique de la science et de la technologie; on ne peut pas le considérer non plus comme un organisme consultatif capable de donner des conseils cohérents à un organisme important en Afrique, pour ne rien dire de la CRST.

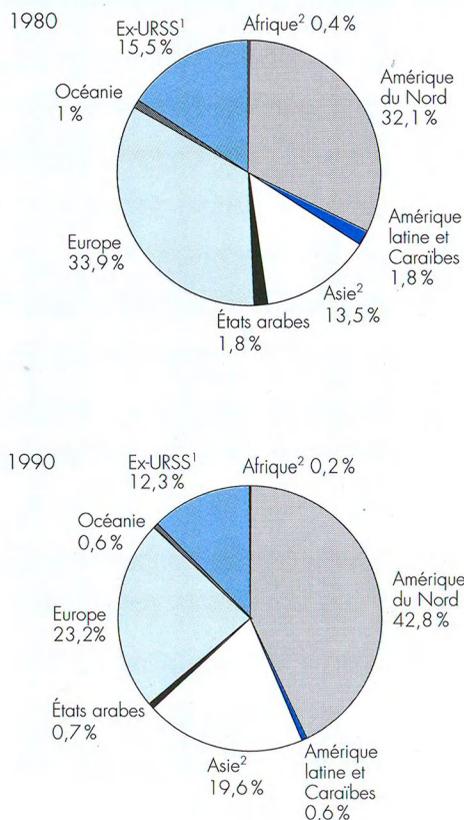
En ce qui concerne les bureaux sous-régionaux existants (IBAR, IAPSC), ni leurs plans stratégiques ni leur bilan scientifique n'ont fait l'objet d'un examen sérieux. Ils n'ont donc pas eu d'occasions de trouver une perspective nouvelle pour répondre à l'évolution des besoins du continent et ils n'ont pas su porter de temps à autre un regard neuf sur la façon dont ils s'étaient acquittés de leurs mandats respectifs. L'IBAR a cependant institué il y a quelques années un système consistant à organiser des réunions des directeurs des services vétérinaires et des ministres chargés du développement de l'élevage; deux de ces réunions ont eu lieu jusqu'à présent et elles ont été très utiles pour l'établissement des priorités du programme. Ce type de réunions, s'il venait à être institutionnalisé, pourrait constituer à l'avenir un bon moyen de fixer des priorités en matière de R-D.

Des programmes nouveaux (comme l'AMTA, le projet de développement intégré des hautes terres du Fouta-Djalon en Guinée et le projet sur l'érosion du littoral) ont été approuvés pour exécution sans qu'il ait été procédé à un examen contextuel complet des avantages comparatifs que leur mise en œuvre présente pour le CRST — quelle que

**TABEAU 1**  
**CRST ET ORGANISMES AFFILIÉS ; OUVERTURES DE CRÉDITS**  
**ET DÉPENSES, 1983/1984 - 1987/1988**  
**(EN MILLIONS DE DOLLARS DES ÉTATS-UNIS)**

	Allocations de crédits	Dépenses effectives	Fonds utilisés (%)
Dépenses administratives et autres	5,18	3,88	74,9
Dépenses opérationnelles	2,48	1,11	44,8
<b>Total</b>	<b>7,66</b>	<b>4,99</b>	<b>65,1</b>

**FIGURE 1**  
**DÉPENSES DE R-D PAR GROUPES DE PAYS :**  
**ESTIMATIONS POUR 1980 ET 1990**



1. Données relatives aux « dépenses concernant la science ».  
 2. Non compris les États arabes.

Source : *Annuaire statistique 1992*, Paris, UNESCO, 1992.

soit la valeur intrinsèque que ces programmes peuvent avoir.

Le moral du personnel scientifique et des cadres est au plus bas en raison d'un mode de sélection évitant l'appréciation par les pairs, d'un manque de stimulants destinés à maintenir l'excellence, et de l'absence d'un système d'évaluation périodique des résultats portant sur les réalisations scientifiques et sur la réussite dans l'exécution des projets. En outre, le soutien financier accordé à la CRST et à ses organismes affiliés a été à la fois incertain et inférieur aux besoins. Par exemple, au cours des cinq années de la période 1983/1984 - 1987/1988, la CRST et les institutions affiliées n'ont pu disposer pour leurs opérations que de 65,1 % du budget qui leur avait été alloué (tableau 1).

L'OUA n'est pas seule à se montrer parcimonieuse pour soutenir la R-D en Afrique. La proportion du produit national brut (PNB) consacrée aux dépenses de R-D pour l'ensemble de l'Afrique était tout juste de 0,28 % en 1980, alors qu'elle était de 1,40 % pour l'Asie et qu'elle n'atteignait pas moins de 2,23 % pour l'Amérique du Nord. En 1990, cette proportion avait encore baissé en Afrique (tomant à 0,25 %), tandis qu'elle avait augmenté en Asie et en Amérique du Nord (passant respectivement à 2,05 % et 3,16 %) (UNESCO, 1992). Ce soutien financier apparaît encore plus dérisoire si l'on considère qu'en 1990 la part de l'Afrique dans les dépenses mondiales de R-D ne représentait que 0,2 % du total (voir figure 1).

Nous n'en pensons pas moins que l'OUA a offert à l'élite géopolitique de l'Afrique une possibilité unique de collaborer étroitement et dans un souci de complémentarité avec l'élite scientifique représentée en l'occurrence par l'axe CRST-CSA. Il nous faut maintenant élargir cette possibilité en commençant à comprendre que l'Afrique est la dernière frontière de l'humanité sur la Terre.

### L'AFRIQUE, DERNIÈRE FRONTIÈRE DE LA TERRE

Selon les paroles prophétiques de Gerald Piel, rédacteur en chef du magazine mensuel *Scientific American*, « la frontière africaine attend depuis trop longtemps une action — grâce à l'initiative endogène et à l'assistance extérieure — pour le développement ». (Piel, 1992.)

Si l'Afrique doit donner corps à cette vision et à son pouvoir d'attraction, il faut qu'elle commence à vouloir son propre avenir et à créer l'environnement nécessaire pour

que l'avenir ainsi voulu puisse se réaliser et se maintenir.

Dans les domaines où se joue l'avenir de sa société — recherche scientifique et développement technologique, secteur industriel et entreprise commerciale, champ géopolitique et géo-économique et sphères de l'éthique et de la culture —, l'élite africaine est brisée et sans point d'ancrage. L'Afrique fait face à la perspective d'une image d'elle-même brisée, d'une société brisée et d'un avenir brisé.

Le temps présent est un moment funeste dans l'histoire des peuples d'Afrique. D'autres régions, d'autres peuples ont affronté par le passé des moments cataclysmiques de ce genre que l'histoire a retenus : l'exode des Juifs abandonnant l'Égypte, la dévastation et la défaite totales du Japon lors de la seconde guerre mondiale, l'Amérique du Nord au lendemain de la crise économique de 1929. Le continent africain a atteint le point le plus bas ; il a maintenant besoin de rêver une vision nouvelle et de concevoir un avenir nouveau, fruit de sa volonté. Cet avenir ne pourra pas continuer à ployer sous le fardeau de la pauvreté matérielle et de l'analphabétisme scientifique qui accablent les programmes de développement actuels de l'Afrique. Il y a en Afrique quelque 1,116 milliard de personnes qui vivent bien au-dessous du seuil de pauvreté de 370 dollars par an, dont 60 % de femmes, et les pauvres représentent 47 % du total de la population africaine (Repnik, 1991). La pauvreté dans le domaine de la science est plus dramatique encore que la pauvreté matérielle immédiate, parce que la science peut bel et bien déterminer l'avenir.

On sait que les nations qui sont à l'avant-garde du développement moderne à l'heure où nous approchons de la fin du xx<sup>e</sup> siècle sont celles qui ont investi des ressources énormes pendant très longtemps dans trois domaines de première importance : tout d'abord, la création et le maintien d'un système stable et bien étayé de S et T ; ensuite, la promotion d'une recherche dûment orientée dans les sciences fondamentales, associée à une stratégie de développement technologique à long terme ; enfin, l'institution de programmes bien articulés pour « la formation d'une main-d'œuvre nombreuse et technologiquement éduquée » (Brown et Sarewitz, 1991). La République de Corée fournit un exemple spectaculaire de la façon dont la vision d'un développement conduit par la science peut se traduire avec cohérence dans les faits. En l'espace d'une seule génération, de 1962 à 1988, le PNB du pays est passé de 2,3 milliards à 169 milliards de dollars des États-Unis, croissance accompagnée d'un investissement national dans la R-D qui est passé de

0,24 % du PNB en 1962 au chiffre très élevé de 2,1 % en 1988. Taiwan et la Thaïlande suivent actuellement le même chemin (Brown et Sarewitz, 1991).

Le bond qui a permis de passer en trois décennies d'une économie de subsistance routinière et agraire à une économie dynamique alliant l'agro-industrie et l'industrie manufacturière n'a été rendu possible que moyennant l'instauration d'une mystique nationale obstinée de l'éducation et de la formation à tous les niveaux du système éducatif — pour la R-D, pour les réalisations de l'ingénierie et le soutien technologique et pour la gestion de l'entreprise commerciale et économique. Les énergies nationales mobilisées ont conservé une vision claire de l'objectif à long terme et n'ont pas été détournées de leur but par les perspectives d'une assistance extérieure qui aurait pris la relève de l'élan national.

Cette révélation devrait être une illumination pour l'Afrique, dont le développement, tel un navire à la dérive, est encore en calminé dans les eaux de la stagnation économique une génération après son affranchissement du régime colonial. Le moteur qui donnera au navire l'impulsion qui l'éloignera des miasmes débilitants, dégradants et nauséabonds des eaux dormantes pour l'entraîner vers une destination nouvelle, lumineuse, pleine de confiance et d'espoir n'est autre que l'engagement délibéré des Africains eux-mêmes à forger l'avenir qu'ils se seront choisi. Les amis de l'Afrique ne peuvent apporter leur aide au développement du continent que dans une mesure limitée.

En outre, les Africains doivent commencer à regarder la bride des chevaux qui leurs sont donnés, en particulier lorsqu'il s'agit d'aide à la création et à l'entretien d'une capacité africaine de S et T, facteur capital de modernisation et d'accélération d'un développement social et économique auto-entretenu du continent.

Voyons d'abord quelle est la contribution d'un des principaux donateurs qui soutiennent les efforts de développement dans les régions en développement du monde, à savoir les États-Unis d'Amérique. Bien que ceux-ci aient conclu officiellement de nombreux accords en matière de S et T avec des pays en développement, les montants fournis par l'État américain pour en financer l'application sont relativement modiques (Brown et Sarewitz, 1991). En 1989, 165 accords de coopération bilatéraux étaient en vigueur dans le domaine de la S et T entre les États-Unis et 38 pays en développement. Cette année-là, le montant total alloué pour l'application de ces accords dépassait à peine 31 millions de dollars. Sur cette somme, 26 millions de dollars ont

servi à financer des accords de coopération dans quatre pays seulement (Chine, Égypte, Inde et Pakistan), ne laissant que 5 millions de dollars pour financer les accords de S et T dans les 34 pays en développement restants, ce qui donne à penser que les pays qui bénéficient le plus de ce financement des États-Unis sont ceux qui ont déjà des infrastructures de S et T assez importantes.

George Brown Jr., membre du Congrès, observait récemment que l'exemple de la République de Corée et des autres pays nouvellement industrialisés d'Asie n'avait pas encore persuadé les États-Unis de conclure des accords de coopération qui permettraient vraiment aux pays en développement de se doter d'économies robustes appuyées sur la science et auto-entretenues.

« Malgré ces exemples (ceux de la Corée du Sud, de Taiwan et de la Thaïlande), les efforts des États-Unis pour promouvoir le développement économique à l'étranger n'ont jamais comporté une approche globale de la science et de la technologie. Bien que l'"assistance technique" fasse partie intégrante de l'aide au développement fournie par les États-Unis depuis la fin des années 40, elle n'a pas servi à engendrer une capacité scientifique et technologique indépendante dans les pays en développement. En outre, le budget S et T de l'AID (Agency for International Development) est presque entièrement consacré aux recherches menées par des scientifiques américains sur des problèmes de développement spécifiques et souvent urgents, et non à la mise en place d'institutions. Sur les 300 millions de dollars du budget de fonctionnement destiné à l'office de S et T de l'AID en 1991, le montant affecté à des recherches conjointes avec des scientifiques des pays insuffisamment développés se limitait à 15 000 dollars. » (Brown et Sarewitz, 1991.)

Ainsi, certains pays continuent à avoir pour principe de fournir essentiellement aux pays en développement de la technologie et des experts, plutôt que de les aider à établir et développer une capacité endogène de S et T durable et auto-entretenue.

D'autres pays favorisent une assistance technique pour la création d'une capacité de S et T et une coopération binationale, ligne de conduite suivie notamment par l'Agence suédoise de coopération scientifique avec les pays en développement (SAREC).

La SAREC pratique deux types de coopération bilatérale avec certains pays d'Afrique et d'autres régions en développement : une *coopération insistant sur la capacité*, qui se concentre sur la constitution et le renforcement d'une capa-

acité de recherche, en particulier dans des pays ayant une faible infrastructure de S et T (ce qui est le cas de la plupart des pays africains qui ont conclu des accords de coopération avec la SAREC), et une *coopération insistant sur les résultats*, qui se concentre sur la résolution de certains problèmes de recherche qui ont un rapport incontestable avec le programme de développement de la région ; cette coopération se fait avec des pays ayant une capacité appréciable de S et T (comme l'Argentine en Amérique latine ou l'Inde en Asie du Sud) (Bhagavan, 1992). L'idée qui préside à ces stratégies de coopération pour le développement de la S et T est de jeter dans ces pays les bases saines et viables d'un développement animé par la science, idée que Bhagavan, expliquant la politique de la SAREC, a récemment formulée en ces termes : « Pour pouvoir finalement se perpétuer par ses propres moyens, le processus de constitution d'une capacité doit être solidement enraciné dans les institutions mêmes du pays en développement, lesquelles doivent disposer de ressources suffisantes et avoir l'assurance que leurs liens avec des institutions scientifiques de pointe à l'étranger seront suivis et durables pour garantir la consolidation et la continuité du processus d'apprentissage. » (Bhagavan, 1992.)

Les formules qui consistent soit à recruter des scientifiques et des techniciens étrangers pour doter en personnel les institutions de S et T d'un pays en développement (processus qui s'est intensifié dans la plupart des pays africains au cours des trois décennies qui ont suivi l'indépendance), soit à envoyer des étudiants poursuivre de longues études à l'étranger pendant les années les plus formatrices du point de vue scientifique, ne permettent pas à elles seules d'atteindre les objectifs de la « constitution d'une capacité durable » (Bhagavan, 1992). Le processus de constitution d'une capacité doit être ancré de façon sûre et permanente au sein même des pays en développement et être lié à l'utilisation effective de cette capacité.

Cela ne signifie pas, tant s'en faut, que l'Afrique doive fermer ses frontières aux influences internationales et à la coopération internationale. Tout en centrant et en dynamisant la constitution et l'utilisation d'une capacité de S et T en Afrique, le continent doit faire en sorte que sa communauté scientifique et technologique naissante, consciente de l'impératif du développement, soit totalement acquise à trois modalités nouvelles et novatrices au moins :

1. Premièrement, internationaliser l'expérience en matière de S et T des Africains titulaires d'un doctorat qui ont

fait la totalité de leurs études supérieures en Afrique, en les plaçant pendant un an ou deux dans des laboratoires de pointe de premier ordre de pays étrangers, industrialisés ou en développement, qui se consacrent à une R-D pertinente. Cette tactique a pour but d'élargir encore le cadre conceptuel de leur réflexion tout en leur donnant plus d'assurance professionnelle. Comme les scientifiques qui voyagent ainsi ont déjà des bases solides, ils sauront sans doute exactement ce qu'ils veulent apprendre au cours de leur séjour à l'étranger et pourront vraisemblablement s'y faire des relations scientifiques durables.

Deuxièmement, intensifier les stages de recherche hautement spécialisée dans les centres d'excellence africains pour des étudiants africains en S et T qui ont suivi des études au niveau de la licence et des cours préparatoires au troisième cycle dans des pays industrialisés. C'est pour les stagiaires préparant un doctorat que ces stages sont le plus fructueux. L'African Dissertation Internship Award Programme (ADIAP), qui est patronné par l'Académie africaine des sciences et financé par la Fondation Rockefeller, appartient à cette catégorie. Le programme permet à des étudiants africains de troisième cycle qui poursuivent des études de doctorat aux États-Unis d'Amérique dans les domaines des sciences sociales, de la santé ou de l'agriculture de poursuivre leurs recherches sur le terrain en Afrique sous la supervision interactive de leurs directeurs de thèse américains et africains. L'Académie a une fonction de contrôle et de suivi et réunit périodiquement les bénéficiaires du programme pour des conférences de recherche au cours desquelles des experts hautement expérimentés travaillant en Afrique organisent des séminaires dans leur spécialité. Depuis sa création en 1987, 168 stagiaires ont déjà bénéficié de l'ADIAP. Il faudrait maintenant élargir ce système aux étudiants de doctorat qui étudient dans les deux Amériques, en Europe, en Asie et Extrême-Orient.

Troisièmement, lancer un programme associatif pour jeunes professionnels à l'intention de jeunes praticiens de S et T, qui compléteront leur formation dans les centres d'excellence qui commencent à apparaître en Afrique. Il est certain qu'à l'allure où va la science aujourd'hui, les jeunes professionnels frais émoulus de l'université ont tendance à manquer d'assurance. Ils peuvent certes avoir déjà acquis au cours de leurs études scientifiques ou de leur formation professionnelle les outils nécessaires que sont les méthodologies intellectuelles, scientifiques et

technologiques. Mais ce dont ils ont désespérément besoin, c'est d'entrer dans la phase d'utilisation de ces outils, sous l'autorité d'un maître utilisateur d'outils et fabricant d'outils, en travaillant dans un environnement porteur où la fabrication et l'utilisation des outils deviennent une expérience passionnante et enrichissante. Si nous pouvions placer avec soin nos jeunes et brillants diplômés des deux sexes, nantis de leur doctorat et de leur désir d'apprendre, dans de tels environnements sur le continent africain à raison de stages de trois à six mois par an pendant une période de trois à cinq ans, nous aurions alors toutes les chances de voir lever une moisson de cadres, de scientifiques et de chercheurs productifs, dynamiques et confiants en leurs moyens, qui seront solidement ancrés dans le milieu de la S et T africaine et qui créeront de nouveaux foyers de croissance dans les domaines de la R-D, du progrès de l'éducation et de l'entreprise industrielle et commerciale.

Pour que ce nouveau paradigme d'un développement guidé par la science puisse porter ses fruits en Afrique, il faut préalablement que les peuples africains réintègrent la science dans leur culture. La diaspora africaine n'a pas seulement fait éclater le tissu social et économique de la société africaine. Elle a gelé l'évolution naturelle de la culture des peuples, la figeant en une entité élémentaire pour la seule survie de la société. Pendant plus d'un demi-millénaire, ce gel est resté immuable et il ne fait que se déplacer avec la quasi-immobilité de la glace sous l'action de l'actuel paradigme du développement, qui est dominé par des images étrangères sans racines dans la mentalité africaine.

Nous devons commencer par le commencement. Il faut que nos enfants apprennent à considérer comme évident que la science fait partie de leurs jeux, de leurs chansons, de leur existence de tous les jours. Les femmes africaines doivent commencer à faire de la science un élément indissociable du loisir et du labeur. Et les différents groupes sociaux, que ce soit au niveau de la communauté ou à celui de l'État-nation, doivent apprendre à intégrer pleinement la science dans leurs entreprises et dans leurs rôles géopolitiques.

Pour ce commencement, il pourrait être utile de nous souvenir d'une observation perspicace que l'humaniste scientifique Enrico Cantore avait faite il y a seize ans dans la préface de son livre *Scientific man* : « La thèse de ce livre est que la science constitue un facteur essentiel du développement historique de l'homme en tant qu'être culturel [...]. J'ai commencé à percevoir que la science est humaine non

seulement parce qu'elle est produite par l'homme, mais encore parce qu'elle est en soi un agent qui façonne l'homme d'une manière culturellement nouvelle.» (Cantore, 1977.)

Ainsi, l'Africain moderne devrait être conscient du rôle de la science, avoir une connaissance de la science et être un utilisateur de la science. Guidé dès lors par la science, notre monde africain du XXI<sup>e</sup> siècle sera conceptuellement holiste et culturellement sain, dans un contexte d'excellence. Les centres d'excellence ont un rôle capital à jouer pour que ce but puisse être atteint.

## LES CENTRES D'EXCELLENCE

Beaucoup d'Africains qui exercent de hautes responsabilités — dans l'administration, dans les institutions de formation et dans les professions libérales — semblent avoir peur de projeter et de créer des centres d'excellence, même s'ils en parlent beaucoup. Ils envisageraient plutôt des « centres de spécialisation », des « centres régionaux » ou un type d'institution autre que celui, hardi et fortement sélectif, des « centres d'excellence ». L'Afrique aura besoin d'adopter et d'utiliser systématiquement et agressivement l'idée des centres d'excellence afin de créer des noyaux autochtones de capacités de résolution de problèmes qui, une fois mis en phase avec les grandes institutions nationales et régionales, constitueraient un moteur de l'innovation au service d'un développement national et régional durable.

Toute initiative résolue dans cette direction nécessitera un degré d'engagement national et régional peu commun. En effet, pour reprendre les conclusions d'un groupe d'agronomes éminents qui ont tenu une réunion prospective à Douala (Cameroun) il y a deux ans : « La volonté politique inclut la capacité de décider courageusement, fondamentalement et catégoriquement du type d'agriculture que nous voulons ou du type de société que nous voulons en Afrique, maintenant et dans l'avenir... Il faut davantage de volonté et d'engagement politiques pour créer un environnement propice à la liberté, à la réflexion et à la créativité des chercheurs. » (AAS, 1991.)

En 1980, il y avait largement plus de 400 institutions de recherche en Afrique. Mais elles n'avaient pas conservé l'élan qu'on pouvait observer dans les années 50 et 60 ; elles n'avaient pas non plus dispensé l'enseignement de haute qualité ni effectué les recherches dont on avait désespérément besoin pour éliminer les principaux obstacles au développement économique et social. A vrai dire, l'idée d'une

« université du développement » n'a pas fait du tout son chemin en Afrique. Les tentatives faites par la communauté universitaire africaine pour « jouer un rôle interventionniste direct à court terme dans le développement national » en ne se bornant pas à dispenser un enseignement et une formation professionnelle de haut niveau « pour justifier son budget et son statut spécial dans la société » ont largement échoué (ICIPE, 1991). Au lieu du partenariat souhaité entre gouvernement et université, ceux-ci sont entrés en conflit à propos de « notions idéalistes de redistribution des revenus et de partage du pouvoir politique » (ICIPE, 1991).

Pourtant, la demande publique d'éducation et de formation, y compris au niveau universitaire, continue à être extrêmement forte en Afrique. On est en présence d'un cercle vicieux : alors que le continent devrait s'appuyer sur les talents de ses hommes pour jeter les bases d'une relative prospérité économique et d'un progrès social à longue échéance, l'infrastructure éducative croule sous le nombre et a été rendue exsangue par une pénurie aiguë de ressources financières au cours des vingt dernières années, si bien que les « systèmes éducatifs sont à présent dans l'impossibilité de promouvoir l'excellence ou de récompenser l'innovation et la réussite » (ICIPE, 1991).

Le déroulement sans répit de ce scénario a conduit les États-nations d'Afrique à devenir peu à peu tributaires de solutions externes, contrairement à ce qui se passe en Asie et en Amérique latine. A l'heure actuelle, il y a plus de scientifiques, de chercheurs et de consultants étrangers en Afrique qu'il n'y en eut jamais aux beaux jours de l'indépendance politique, il y a une trentaine d'années, ce qui a pour effet de renvoyer chaque année quelque 2 à 3 milliards de dollars d'aide au développement vers le Nord. Des îlots de recherche de haut niveau ont émergé sur le continent depuis la fin des années 60, ou ont subsisté depuis l'époque coloniale, financés en grande partie par l'aide internationale au développement et destinés à trouver des solutions immédiates à des problèmes particuliers en matière de production agricole, de santé, etc. Ce que ces îlots n'ont pu faire, parallèlement à leurs efforts pour résoudre des problèmes, ou dans le cadre de ces efforts, a été de développer et d'entretenir une capacité nationale de résolution des problèmes. Les dirigeants du continent n'ont pas de tâche plus importante à accomplir aujourd'hui que l'œuvre de longue haleine qui consiste à s'engager résolument à constituer rapidement et à maintenir la capacité pour l'Afrique de se développer sous la conduite de la science.

Après des études scientifiques au Collège universitaire de Makerere et à l'Université de Cambridge, **THOMAS R. ODHIAMBO** a occupé des postes d'enseignement au Collège universitaire de Nairobi avant d'être nommé premier professeur d'entomologie à l'Université de Nairobi en 1970. Devenu premier directeur de l'International Centre of Insect Physiology and Ecology (ICIPE), à Nairobi, il occupe ce poste depuis 1978.

Le professeur Odhiambo est président de l'Académie africaine des sciences et vice-président de l'Académie des sciences du Tiers Monde ; il est également membre de plusieurs académies nationales et internationales. Ses pôles d'intérêt professionnels sont, entre autres, la politique scientifique et technologique et les problèmes du développement.

## RÉFÉRENCES

- AAS. 1991. *Enhancement of agricultural research in Francophone Africa*. Actes de la Conférence panafricaine sur la recherche agricole en Afrique, tenue à Douala (Cameroun) du 6 au 8 novembre 1990, Nairobi, Academy Science Publishers.
- The idol rich, *Tatler*, 288 (1), 1993, p. 82-87.
- Bhagavan, M. R. 1992. *The SAREC model : institutional cooperation, and the strengthening of national research capacity in developing countries*, Stockholm, Agence suédoise de coopération scientifique avec les pays en développement.
- Brown Jr., G.E. et Sarewitz, D.R. 1991. Fiscal alchemy : transforming debt into research, *Issues in Science and Technology*, p. 70-76.
- Cantare, E. 1977. *Scientific man : the humanistic significance of science*, New York, ISH Publications.
- CENUA. 1989. *Cadre africain de référence pour les programmes d'ajustement structurel en vue du redressement et de la transformation économiques (CARPAS)*, Addis-Abéba, Commission économique des Nations Unies pour l'Afrique.
- ICIPE Foundation, Académie africaine des sciences et U.S. National Academy of Sciences. 1991. *The new challenge of science and technology for development in Africa*, Actes d'un symposium sur la constitution d'institutions scientifiques en Afrique, tenu au Centre de conférences de la Fondation Rockefeller, Bellagio (Italie), 14-18 mars 1988, Nairobi, ICIPE Science Press.
- Mokhtar, G. (dir. publ.). 1981. Introduction, dans : *Histoire générale de l'Afrique*, vol. II, édition abrégée, p. 1-26, Paris, Présence africaine/Edicef/UNESCO, 1987.
- OUA. 1981. *Plan d'action de Lagos pour le développement économique de l'Afrique, 1980-2000*, Addis-Abéba, Organisation de l'unité africaine.
- Odhiambo, T.R. 1991. Designing a science-led future for Africa : a suggested science and technology policy framework p. 80-89 dans W.T. Golden (dir. publ.), *Worldwide science and technology advice to the highest levels of governments*, New York/Londres, Pergamon Press.
- Piel, G. 1992. *Only one world : our own to make and keep*, New York, W. H. Freeman and Company.
- Repnik, H. P. 1991. Change the framework conditions to combat poverty, *Development Cooperation*, 4, p. 4-6.
- UNESCO 1992. *Annuaire statistique 1992*, Paris, UNESCO.
- Worthington, E. B. 1958. *Science in the development of Africa*, Londres, Commission for Technical Cooperation in Africa South of the Sahara/Scientific Council for Africa South of the Sahara.

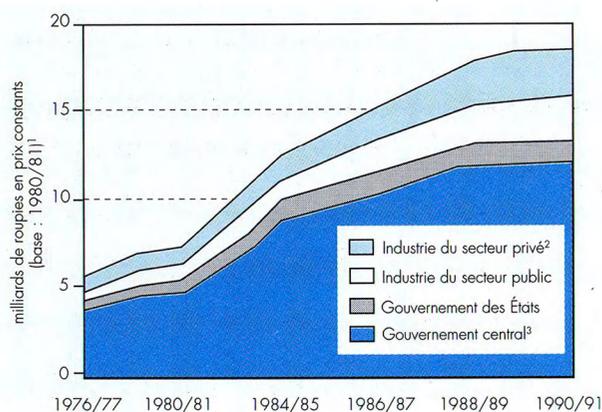
## L'ASIE DU SUD

Prabhakar J. Lavakare et Kishore Singh

L'histoire de la science et de la technologie en Asie du Sud a ses origines dans la civilisation de la vallée de l'Indus vers 2500 av. J.-C., et l'utilisation de connaissances scientifiques est attestée à partir de cette période dans les domaines de l'urbanisme, de la métallurgie, de la médecine et de la chirurgie, ainsi que dans des disciplines relevant de la science pure telles que l'astronomie et les mathématiques. A des époques plus récentes, les États-nations qui se sont partagé la région ont créé leurs propres infrastructures scientifiques, que l'on pourrait peut-être décrire comme procédant à la fois du savoir traditionnel, des influences de l'ère coloniale et de la nécessité de relever les défis très concrets que représentent les difficultés économiques d'aujourd'hui. Relativement riche en ressources, l'Inde contemporaine a pris la tête de l'Asie du Sud dans le domaine scientifique, bien qu'elle se heurte à beaucoup des problèmes qui affectent la science et la technologie (S et T) dans le reste de la région. Il paraît donc utile d'examiner dans quelle mesure elle a réussi en matière de S et T et d'apprécier sur cette base la nécessité d'un vaste effort de développement scientifique dans les autres pays de la région.

La longue tradition scientifique du pays inspirait la planification nationale de l'Inde au lendemain de son indépendance politique en 1947, lorsque le Premier ministre, le pandit Jawaharlal Nehru, fonda sa tâche d'édification d'une nation sur une philosophie consistant à recourir à la science (et à la technologie) pour la planification du développement. En 1958, Nehru fit adopter par le Parlement la Résolution de politique scientifique (SPR), document considéré aujourd'hui encore comme le texte de référence officiel pour toutes les mesures destinées à encourager, promouvoir et soutenir l'activité scientifique dans le pays. De fait, la Constitution de l'Inde comporte une disposition tendant à promouvoir un « état d'esprit scientifique » dans la population. Le Gouvernement indien actuel continue de mettre l'accent sur la science et la technologie. Un projet de texte relatif à une nouvelle politique de la technologie insistant sur des questions telles que les avantages pour la société, la promotion de technologies moins polluantes pour l'environnement, le développement des compétences techniques, l'établissement de liens avec le développement industriel, etc., est en cours d'examen. La science occupe donc une place importante dans les tâches que l'Inde s'assigne pour son développement national.

FIGURE 1  
DÉPENSES NATIONALES DE R-D PAR SECTEUR



1. PNB au coût des facteurs. Pour établir les prix constants, on a adopté les coefficients déflateurs des prix du PNB utilisés dans l'*Economic Survey 1991/92*.
2. Le nombre d'unités varie d'année en année dans le secteur privé.
3. A l'exclusion des industries du secteur public.

Source : Department of science and technology, Gouvernement de l'Inde.

### LES RESSOURCES DE LA S ET T EN INDE

#### Les ressources financières

Fidèle à sa philosophie d'encouragement et de promotion de la science, le gouvernement prend à sa charge la majeure partie du soutien aux activités de S et T dans le pays. Au fil des ans, les dépenses nationales de recherche-développement (R-D) en pourcentage du produit national brut (PNB) ont augmenté régulièrement, passant de 0,18 % en 1958/59 à 1 % environ en 1986/87. Le projet de nouvelle politique de la technologie (1993) envisage d'accroître ces investissements de R-D pour qu'ils atteignent 2 % du PNB d'ici à l'an 2000. Le gouvernement compte sur une augmentation substantielle de la contribution du secteur privé et se propose de prendre à cette fin des mesures d'incitation pour l'industrie.

La figure 1 fait apparaître la contribution prédominante du gouvernement central aux efforts nationaux de R-D. Pour l'année 1990/91, sa contribution a été de 68,9 %, contre

23,2 % pour le total des industries du secteur privé et du secteur public. Ces pourcentages contrastent fortement avec ceux que l'on relève dans des pays développés et technologiquement avancés comme les États-Unis d'Amérique et le Japon, où l'industrie finance une part beaucoup plus importante de la R-D.

### Les ressources humaines

Le professeur P. C. Mahalanobis, maître d'œuvre de la planification en Inde, a clairement affirmé que « l'existence d'un corps de scientifiques et de techniciens est un facteur important du développement économique et de la "grandeur" d'une nation, quelle que soit la manière dont on les mesure... ».

La SPR attribue également de l'importance à la formation de personnel scientifique pour le développement socio-économique du pays. Des enquêtes nationales sur les ressources humaines en matière de S et T sont faites tous les dix ans, et la commission de planification du Gouvernement indien procède périodiquement à une évaluation de l'effectif du personnel de S et T, comme le montre le tableau 1.

En 1990, l'université a formé environ 200 000 scientifiques et ingénieurs, mais comme les débouchés sont limités

dans le pays, le personnel de S et T n'occupe pas en totalité des emplois rémunérés. Sur un effectif total de près de 4 millions relevé en 1990, le nombre des personnes employées dans des services de R-D n'était que de 300 000 environ, dont seulement 7,3 % de femmes.

L'Inde compte approximativement 4,5 scientifiques, ingénieurs ou techniciens pour 1 000 habitants, contre 184,8 au Canada, 111,1 au Japon et 77,8 en Allemagne. Pour que, dans un pays aussi vaste que l'Inde, le personnel de S et T joue un rôle important dans le processus de développement, il ne suffit pas d'en augmenter le nombre, il faut aussi qu'il soit mieux utilisé. Plusieurs études sont faites actuellement pour déterminer l'ampleur de l'exode des compétences et les mesures qui permettraient d'inverser la tendance.

### L'ORGANISATION DE LA SCIENCE EN INDE

La science étant principalement soutenue en Inde par des sources gouvernementales, les structures organisationnelles reflètent clairement le rôle prédominant que jouent les ministères et les laboratoires financés par l'État dans l'orientation du développement scientifique.

#### Les structures du secteur public

Entre 1948 et 1985, il a été créé plusieurs ministères à part entière chargés de l'énergie atomique, de l'espace, des recherches en matière de défense, de l'électronique, des biotechnologies, de l'exploitation des mers, de la recherche industrielle, des nouvelles sources d'énergie et de l'environnement, ainsi que des conseils autonomes de la recherche agronomique et de la recherche médicale. La plupart ont eu l'avantage d'être dirigés par des scientifiques. Afin d'assurer la coordination des politiques relatives aux diverses activités de S et T, un ministère de la science et de la technologie distinct fut créé en 1971. Le gouvernement a également créé de temps à autre des comités consultatifs scientifiques auprès du cabinet et du Premier ministre. Le Comité national de la science et de la technologie, créé en 1971, a fait sa contribution la plus importante en élaborant en 1973 un Plan pour la science et la technologie (1974-1979) dans lequel était formulée pour la première fois une stratégie visant à intégrer la S et T au développement socio-économique du pays. Le plan proposait une approche très rationnelle du développement, mais son application se heurte encore aujourd'hui à des problèmes d'organisation et de gestion. Le secteur de la S et T continue à fonctionner

TABLEAU 1  
PERSONNEL SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE EN INDE (milliers)

Catégorie	1985	1990	taux de croissance (%)
Titulaires d'un grade universitaire d'ingénieur	372,6	454,4	4,0
Titulaires d'un diplôme d'ingénieur	564,2	734,8	5,5
Médecins diplômés <sup>1</sup>	268,2	314,4	3,2
Agronomes diplômés	133,3	162,8	4,1
Vétérinaires diplômés	28,3	33,4	3,4
Titulaires d'un grade universitaire en sciences <sup>2</sup>	1 419,0	1 684,2	3,5
Titulaires d'un diplôme supérieur en sciences	350,3	419,7	3,7
Infirmiers diplômés	3,7	5,5	8,3
Total	3 139,6	3 809,2	

1. Y compris les chirurgiens-dentistes.

2. Y compris les enseignants en sciences.

Source : Planning Commission, Gouvernement de l'Inde.

en grande partie dans l'isolement, sauf dans des domaines comme l'agriculture et la recherche spatiale, qui ont fourni d'excellents exemples d'application de la S et T au développement socio-économique général du pays, exemples dont d'autres organismes scientifiques devraient peut-être s'inspirer.

### La R-D industrielle

Les activités de R-D industrielle représentaient, on l'a vu, approximativement 23 % de l'investissement national total dans la R-D en 1990/91.

Au 1<sup>er</sup> avril 1990, on dénombrait dans l'industrie (secteur privé et secteur public confondus) 1 138 unités de R-D employant plus de 60 000 personnes. Le tableau 2 indique la dépense moyenne de R-D par unité dans les différentes branches de l'industrie.

Aux termes de la politique récemment proposée par le

TABLEAU 2  
DÉPENSES DE R-D INDUSTRIELLE PAR UNITÉ<sup>1</sup> EN INDE,  
CLASSÉES PAR BRANCHES, 1990/91  
(centaines de milliers de roupies)

Branche industrielle	Secteur public	Secteur privé	Ensemble de l'industrie
Industries de défense	1 621,3	-	1 621,3
Carburants	707,8	22,7	365,3
Engrais	274,8	125,0	194,1
Transports	58,7	163,5	152,6
Dérivés du caoutchouc	28,9	120,6	115,8
Métallurgie	274,0	34,0	101,8
Télécommunications	295,0	17,3	96,7
Électronique et matériel électrique	244,3	44,6	72,4
Produits pharmaceutiques	82,7	70,2	71,1
Industries alimentaires	8,0	68,5	66,7
Outillage industriel	14,2	49,4	45,9
Produits chimiques (autres que les engrais)	140,3	34,9	40,1
Autres branches	107,9	46,1	52,8
<b>Total</b>	<b>286,5</b>	<b>52,2</b>	<b>84,1</b>

1. Le mot unité désigne un service ou organisme faisant de la R-D. Au 1<sup>er</sup> avril 1990, on en dénombrait 1 138 dans l'industrie.

Source : Department of Science and Technology, Gouvernement de l'Inde.

gouvernement, le secteur industrie de la R-D sera incité à contribuer davantage à l'effort national en matière de R-D. Du fait de la libéralisation de l'économie entreprise depuis peu, le secteur industriel va devoir affronter une concurrence beaucoup plus rude que dans le passé, et il est à prévoir que les forces du marché vont l'obliger à s'appuyer davantage sur les efforts endogènes de R-D. En revanche, il est probable que l'ouverture de l'économie facilitera l'importation de technologies, qui, avec l'entrée sur le marché local de sociétés multinationales ayant conclu des accords de collaboration, risque de décourager les efforts nationaux de R-D.

### Le secteur de l'éducation

Les activités de R-D ne sont guère planifiées dans ce secteur et elles demeurent très marginales, encore que d'excellentes équipes de chercheurs se soient constituées dans un petit nombre d'institutions. Dans celles-ci, la recherche est financée essentiellement par des subventions de recherche de durée limitée attribuées à un nombre relativement faible de chercheurs productifs. On recensait 180 universités en 1990/91, contre seulement 27 en 1950/51. La qualité de la recherche demeure assez médiocre dans plusieurs universités, peut-être parce que beaucoup de celles-ci ne sont pas convenablement équipées. Depuis cinq à dix ans, toutefois, plusieurs programmes et projets de recherche lancés par l'État ont permis d'améliorer sélectivement les infrastructures et, partant, la qualité de la recherche, dans quelques universités.

### Les institutions au niveau des États

Depuis une dizaine d'années, un gros effort est fait pour créer les infrastructures de planification de la S et T adéquates dans les 25 États du pays. Des conseils de la S et T au niveau des États devront utiliser les résultats de la R-D nationale pour faire bénéficier la population d'avantages socio-économiques grâce à une application effective de la science et de la technologie aux problèmes du développement. Il y aura lieu de renforcer encore davantage cette approche.

Peut-être les structures organisationnelles de la S et T sont-elles devenues trop importantes non pas pour ce qui est des investissements, mais pour ce qui concerne la coordination et la gestion. La machine administrative devra faire l'objet d'une rationalisation poussée et être en mesure de réagir plus rapidement. Les impératifs de qualité et de

sélectivité devront être très strictement appliqués si l'Inde veut se donner comme objectif immédiat d'atteindre à l'excellence dans le domaine scientifique.

## LES RÉSULTATS

La volonté du gouvernement d'appuyer le développement national sur la science et la technologie a porté ses fruits dans plusieurs domaines, comme l'agriculture, la santé, l'inventaire et l'évaluation des ressources, les communications, l'éducation, la défense et la production d'énergie.

Malgré l'accroissement de la population, le pays est autosuffisant sur le plan alimentaire — grâce aux acquis de la recherche agronomique. Son vaste territoire est à présent complètement desservi par un réseau national de télécommunications par satellite. La technologie spatiale est également mise à contribution pour le relevé des ressources nationales et la prévision météorologique, domaines très importants pour un pays à prédominance agricole. Les services de santé, bien que laissant encore à désirer, se sont améliorés, réduisant le taux de mortalité de 27,4 pour 1 000 en 1950 à 11,9 pour 1 000 en 1985, et l'espérance de vie à la naissance est passée en conséquence de 32 à 56 ans. L'augmentation de la production d'électricité et l'électrification des villages sont également d'importantes retombées de l'application de la S et T. Le recours aux techniques modernes de communication de masse et les efforts des équipes travaillant sur le terrain ont permis de porter le taux d'alphabétisation à plus de 50 %, et on espère atteindre l'objectif de 100 % pour le groupe d'âge 15-35 ans en misant sur la technologie. En dépit de ces résultats positifs, les potentialités de la science n'ont pas encore été pleinement exploitées. Il conviendra de renforcer encore l'activité scientifique et de la gérer de manière novatrice et efficace si l'on veut parvenir à un développement socio-économique intégralement fondé sur la S et T, en resserrant les liens entre les producteurs de la science, ses utilisateurs et ceux qui, en dernière analyse, doivent en être les véritables bénéficiaires, à savoir les habitants de l'Inde.

## L'ORGANISATION DE LA S ET T EN ASIE DU SUD

Par comparaison avec la situation en Inde, le développement de la S et T se heurte dans le reste de l'Asie du Sud à des problèmes plus complexes. Avec des revenus par habitant et des taux d'alphabétisation très bas (en moyenne environ 290 dollars des États-Unis et 40 % respectivement, à l'exception de Sri Lanka, où le revenu par habitant et le taux d'alphabétisation sont très au-dessus de la moyenne régionale), la région est distancée par la plupart des autres pays en développement. Certains pays, comme le Bhoutan et les Maldives, n'ont même pas de système d'enseignement supérieur.

Les politiques de ces pays (comme celles d'autres pays en développement) font toutes une place à la S et T dans la planification du développement, comme en témoignent le Sixième Plan (1983-1988) du Pakistan, le Septième Plan (1985-1990) du Népal, le Sixième Plan (1983-1987) de Sri Lanka, le Troisième Plan (1986-1990) du Bangladesh et le Sixième Plan (1986-1991) du Bhoutan. La priorité élevée accordée à la S et T apparaît dans le fait que la direction et la coordination du développement sont confiées à des organismes gouvernementaux de très haut niveau spécialement créés à cet effet. Au Bangladesh, le Comité national pour la science et la technologie est l'élément moteur de toutes les décisions concernant la S et T, et le Conseil national de la science et de la technologie oriente et supervise l'ensemble de la politique scientifique; l'Académie royale népalaise des sciences et de la technologie encourage le développement de la S et T sous le haut patronage du souverain; à Sri Lanka, l'Office des ressources naturelles, de l'énergie et de la science conseille le Président sur les politiques, plans et programmes de développement de la S et T; de même, au Pakistan, le Conseil de la science et de la technologie coordonne les plans et programmes en matière de S et T.

## L'INFRASTRUCTURE INSTITUTIONNELLE DE LA S ET T

Les efforts nationaux de développement de la S et T ont porté en premier lieu sur la création d'infrastructures institutionnelles; des organismes de R-D dont les compétences s'étendent à tout un éventail de disciplines ont été créés, le plus souvent sous la tutelle de conseils de la recherche scientifique et industrielle. Au Pakistan, le Conseil (PCSIR)

a neuf laboratoires, dont trois sont polyvalents, tandis qu'au Bangladesh et à Sri Lanka, les Conseils correspondants (le BCSIR et le CISIR) ont respectivement trois et plusieurs laboratoires; le Népal a le Centre de recherche pour la science appliquée et la technologie (RECAST), qui fait partie de l'Université Tribhuvan, et quatre autres instituts autonomes. Il existe aussi dans la région un certain nombre d'autres institutions pour la recherche en agronomie et dans les sciences médicales, ainsi que dans d'autres domaines intéressant le développement socio-économique.

Parallèlement, les établissements d'enseignement supérieur qui forment du personnel de S et T constituent un autre élément de l'infrastructure institutionnelle.

- Outre ses 53 organismes de recherche, le Pakistan possède 23 universités, dont quatre forment des ingénieurs et trois des agronomes, 170 instituts universitaires de technologie et de formation professionnelle et 101 écoles professionnelles.
- En plus de ses 20 grands centres de recherche, Sri Lanka a neuf universités, 24 instituts de technologie dépendant du Ministère de l'enseignement supérieur, dont huit sont polyvalents, douze lycées techniques, trois écoles d'agronomie et un certain nombre d'instituts de formation spécialisée créés par des organismes gouvernementaux.
- Outre ses 18 instituts de recherche, le Bangladesh compte quatre écoles d'ingénieurs, neuf instituts universitaires de technologie et 54 instituts de formation professionnelle. Une université de science et de technologie est également en cours de création.
- Le Népal finance, en plus du RECAST, quatre autres centres de recherche à l'Université Tribhuvan (chargée de tout l'enseignement supérieur dans le pays) et quatre instituts autonomes d'enseignement et de recherche techniques.

Bien que n'étant pas encore doté d'un système d'enseignement supérieur, le Bhoutan a créé quelques instituts polytechniques et techniques tels que l'Institut national d'exploitation forestière, le Centre intégré de formation et de recherche en agronomie et l'Institut national de médecine vétérinaire. Les Maldives, elles aussi dépourvues d'établissements d'enseignement supérieur, ont néanmoins deux écoles secondaires techniques.

## LES RESSOURCES DE S ET T

Quand on parcourt les déclarations de politique générale sur la S et T dans les pays de l'Asie du Sud, on constate que la majorité des problèmes socio-économiques et des tâches de développement dans un nombre imposant de domaines prioritaires relèvent désormais du secteur de la S et T. Les politiques de S et T dans les pays de la région mettent en général l'accent sur les impératifs suivants :

- développer les capacités techniques, y compris, dans certains cas, pour les nouvelles technologies de pointe, en les intégrant pleinement à la stratégie nationale de croissance autosuffisante;
- former du personnel ayant les compétences spécialisées requises;
- acquérir des technologies, les adapter et les développer;
- appliquer plus efficacement les technologies locales;
- promouvoir et diffuser la S et T et l'appliquer largement au service du développement socio-économique.

Si ambitieux que soient ces objectifs, il serait possible de les atteindre si les ressources susceptibles d'être affectées à la S et T n'étaient aussi sévèrement limitées. Les dépenses nationales de R-D dans les pays de la région — y compris l'aide étrangère au titre de la coopération pour le développement et les dépenses consacrées aux sciences sociales — représentent moins de 0,5 % du PNB. Et même, vers le milieu des années 80, la proportion atteignait le chiffre extraordinairement bas de 0,3 % au Bangladesh, au Népal et au Pakistan. Les ressources allouées à l'ensemble de la S et T sont malheureusement à peine supérieures aux dépenses nationales de R-D.

Malgré les déclarations de politique générale selon lesquelles il est nécessaire d'orienter la S et T vers la résolution des problèmes de développement, la recherche fondamentale prend généralement le pas sur la recherche appliquée, et le plus gros des dépenses de R-D sert à financer des tâches administratives de routine. De plus, la tendance à lancer un trop grand nombre de projets à la fois aboutit à une dispersion des efforts de R-D.

Dans le secteur privé, la R-D industrielle est pratiquement inexistante dans les pays de la région. En 1985, sa contribution à l'effort national de R-D à Sri Lanka n'était que de 7 %, et la situation est encore pire dans le reste de la région.

Le développement de la S et T est freiné dans tous ces pays par une pénurie générale de personnel qualifié, mais

particulièrement aiguë dans le domaine de la R-D, qui tient au fait que seule une fraction très faible de la population a accès à l'enseignement supérieur. Le Pakistan comptait environ 6 000 personnes dans la R-D en 1988/89, et les effectifs globaux de la S et T ne progressaient qu'avec lenteur. A Sri Lanka, moins de 3 000 scientifiques et ingénieurs faisaient de la R-D vers le milieu des années 80. Au Népal, le personnel de S et T travaillant dans la R-D compte actuellement 334 scientifiques et ingénieurs et seulement 75 techniciens. Avec seulement 17 ingénieurs en 1987, le Bhoutan était tributaire du personnel étranger et d'une aide consistant à former du personnel technique à l'étranger.

La pénurie de personnel technique — il y a généralement plus d'ingénieurs que de techniciens — s'explique par le nombre extrêmement faible des inscriptions dans l'enseignement technique du second degré, qui ne représentent qu'environ 1,6 % du total des inscriptions dans le secondaire. L'orientation prise par le système d'enseignement supérieur a été de former davantage de scientifiques et d'ingénieurs pour les établissements de S et T et le secteur industriel structuré (essentiellement public) au lieu des techniciens dont ont besoin la petite industrie et le secteur non structuré, qui représentent le plus gros des activités économiques dans les pays de la région.

## L'INDUSTRIALISATION DE LA RECHERCHE

Les indicateurs mesurant les performances de la recherche scientifique en termes d'innovation font donc apparaître un tableau assez sombre : seulement 15 procédés brevetés et 15 dessins ou modèles industriels au Népal entre l'entrée en vigueur d'une législation sur les brevets en 1965 et 1982/83 ; moins de 200 demandes de brevets en moyenne sont présentées chaque année au Bangladesh et à Sri Lanka. Au Pakistan, on compte en moyenne chaque année 400 à 500 demandes de brevets, mais la majorité de ceux-ci appartiennent à des étrangers. L'industrialisation de la recherche demeure extrêmement limitée : rares sont les procédés mis au point par les organismes de R-D qui atteignent le stade de la production.

Un petit nombre seulement des procédés déposés par le PCSIR ont été commercialisés — moins de 100 en 1985. A Sri Lanka, deux seulement des 19 projets de R-D du CISIR et trois seulement des 36 projets du Centre national de recherche et développement en ingénierie ont abouti à une production commerciale entre 1982 et 1987. Au Bangla-

desh, depuis la création du BCSIR jusqu'en 1985, seuls 180 procédés brevetés environ avaient été mis au point, dont 106 avaient été cédés sous licence et une vingtaine à peine étaient parvenus jusqu'au stade de la production.

Les services de S et T de la région se heurtent aux principaux obstacles suivants :

- ❑ le manque de viabilité des projets entrepris ;
- ❑ la faiblesse des liens entre les organismes de R-D et l'industrie, défaut dont témoigne l'absence de commandes ou de contrats de recherche et qui empêche d'éventuelles contributions du secteur de la S et T ;
- ❑ l'absence de services spécialisés de liaison avec l'industrie et d'assistance technique, et la faiblesse des capacités en matière d'ingénierie dans les organismes de R-D ;
- ❑ le manque de capital-risque pour couvrir les risques inhérents à l'innovation technologique ;
- ❑ la mauvaise gestion des organismes de R-D, souvent dirigés comme des services administratifs plus que comme des entreprises.

L'une des difficultés majeures pour la S et T est que, les politiques privilégiant la R-D en tant qu'activité productive, l'innovation technologique ne bénéficie que de moyens et d'efforts marginaux. Rares sont les projets de R-D qui dépassent le stade de la production de technologie ou, dans le meilleur des cas, de l'invention, alors que le besoin d'investissements dans la mise au point des produits est près de dix fois plus grand, comme le montre bien l'expérience du Pakistan ainsi que de l'Inde. En fait, plus on se rapproche de la commercialisation, plus la R-D est négligée.

## L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES ET LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

L'enseignement technique supérieur est encore plus coupé du secteur productif que les organismes de R-D. La recherche effectuée dans les universités est souvent trop théorique, elle manque de moyens financiers suffisants et, parfois, de qualité et de pertinence. Le système d'enseignement supérieur n'entretient pas de relations étroites avec les secteurs de l'industrie et du commerce, qui auraient pourtant grand besoin des apports de la science et de la technologie.

- ❑ Au Pakistan, on attribue l'insuffisance du personnel de R-D à une relative détérioration des normes de l'enseignement et de la recherche dans les universités, ainsi qu'à une certaine désaffection pour la recherche. Selon une enquête de la Commission pakistanaise pour la

science et la technologie, moins de 25 % des scientifiques travaillant dans les universités font de la recherche.

- A Sri Lanka, une fraction négligeable — moins de 0,25 % en moyenne — des crédits alloués à l'enseignement vont à la recherche.
- Les dépenses de fonctionnement pour la recherche et les publications de l'Université Tribhuvan (Népal) ne représentaient en 1988/89 que 1,3 % de son budget.
- Le développement anarchique de l'enseignement supérieur, sans rapport ou presque avec la demande du marché, comme c'est le cas au Bangladesh, a abouti à un décalage entre la production des diplômés aux différents niveaux de l'enseignement technique et les besoins du marché de l'emploi.

L'un des devoirs fondamentaux de l'enseignement technique supérieur est de tenir compte davantage du monde du travail au lieu de continuer à produire des diplômés coulés dans le moule classique. Cela nécessite des mesures mûrement réfléchies d'amélioration des programmes d'études en vue de mieux répondre aux besoins socio-économiques dans des domaines clés tels que l'alimentation et l'agriculture, l'irrigation et les ressources en eau, l'énergie, les soins de santé, les services, les rapports entre la technologie et l'environnement, etc., et de moderniser l'enseignement des disciplines scientifiques classiques dans les établissements d'enseignement supérieur pour tenir compte des progrès rapides de la S et T. L'enseignement professionnel a été l'un des laissés-pour-compte du développement ; il souffre manifestement dans toute la région d'une grave pénurie d'enseignants qualifiés et d'équipements de qualité, et de l'inadéquation criante des installations de travaux pratiques. La revalorisation des savoir-faire traditionnels n'y occupe pas une place assez importante et rien n'est fait pour accroître sa pertinence et son utilité pour les petits projets et les programmes de développement rural.

## QUELQUES GRANDES TENDANCES

### *Économie de marché et acquisition de technologies*

La tendance à l'économie de marché et à la privatisation gagne toute l'Asie du Sud, plaçant la recherche scientifique devant une situation tout à fait nouvelle. Elle oblige les organismes de R-D à se montrer plus compétitifs et productifs et à s'orienter vers une approche commandée par la

demande. Les politiques de S et T tiennent d'ores et déjà plus grand compte de la nécessité de créer un environnement favorable et d'instituer des mécanismes permettant d'attirer la technologie et les investissements étrangers.

### *Les mécanismes institutionnels pour le transfert de technologies*

De nouveaux mécanismes institutionnels sont mis en place pour mieux faire face aux problèmes que pose le transfert de technologies. Ainsi, le Pakistan a récemment créé un centre national pour le transfert de technologies qui servira de pivot pour le transfert et le développement des technologies. Le Bangladesh et le Népal envisagent de se doter de centres similaires.

Le Pakistan a créé en outre un nouvel organisme, la Scientific & Technological Development Corporation, rattaché au PCSIR, afin de promouvoir l'innovation et d'accroître l'efficacité du développement et du transfert des procédés mis au point dans le pays.

### *La liaison recherche-industrie*

L'orientation vers une économie de marché influe directement sur les rapports entre la recherche et l'industrie. Le Pakistan s'efforce de promouvoir la création de centres de R-D dans les entreprises industrielles du secteur privé. Celui-ci est de plus en plus reconnu comme devant être le principal agent du développement. Le Népal encourage la participation de l'industrie au développement technologique par la R-D dans les entreprises et par des recherches en collaboration. De fait, l'Institute of Engineering tire 10 à 20 % de ses ressources des services consultatifs qu'il fournit. La politique industrielle de Sri Lanka formulée en 1987 souligne la nécessité de créer des conditions propres à stimuler la demande de technologie et d'inciter les organismes de R-D à faciliter l'accès aux technologies correspondant à la demande.

### *Les privatisations et leurs répercussions sur l'enseignement technique supérieur*

Comme le montre l'expérience de Sri Lanka, la libéralisation de l'économie risque de ne présenter que peu d'avantages durables pour l'amélioration des compétences humaines et des capacités technologiques si des politiques délibérées ne sont pas adoptées pour optimiser ces avantages. Au Bangladesh, par exemple, les programmes de privatisation achoppent sur le manque de ressources tech-

niques, financières et humaines. La privatisation exerce ainsi son impact sur la S et T en sollicitant l'enseignement supérieur technique, jusqu'alors domaine réservé du secteur public.

### *Les besoins nationaux en formation scientifique et technique*

Les progrès rapides de la S et T obligent tous les pays en développement à renforcer l'enseignement des sciences fondamentales dans les universités en formant et en recyclant les enseignants. Le Pakistan et le Bangladesh reconnaissent la nécessité d'avoir des programmes solides de sciences et de mathématiques, et le premier attache une importance particulière à la formation des ingénieurs. Au Bangladesh, comme au Népal, les autorités se préoccupent de plus en plus de la formation de spécialistes dans les sciences fondamentales. Le Bangladesh a récemment créé un enseignement de biochimie et se propose de créer un centre de recherche national sur les biotechnologies.

Dans les écoles des pays les moins avancés, l'enseignement scientifique est médiocre, son principal objectif étant de « développer la formation scientifique et technique des enfants d'âge scolaire ». Dans cet esprit, l'UNESCO apporte son soutien à une cellule de réflexion chargée par le Centre de formation professionnelle de Malé (Maldives) de promouvoir des programmes de formation des techniciens. Accordant un rang de priorité élevé au développement industriel, le Bhoutan donne lui aussi une dimension nouvelle à l'enseignement des sciences et à la formation de personnel technique; la politique nationale d'éducation est actuellement révisée pour faire une plus grande place à l'enseignement scientifique et technique.

### *Les programmes relatifs aux nouvelles technologies de pointe*

Les progrès de la S et T transforment spectaculairement les rapports entre science, technologie et développement économique, et la région de l'Asie du Sud fait actuellement un effort pour participer à ces activités génératrices de croissance.

Des instituts de R-D ont été créés au Pakistan dans le domaine de l'électronique, de l'océanographie et de la technologie du silicium, et des établissements spécialisés dans des domaines tels que les biotechnologies et le génie génétique sont en voie de constitution. Les énergies renouvelables, les nouveaux matériaux, les lasers, les fibres optiques, etc., deviennent également des domaines prioritaires. Le

Pakistan a par ailleurs lancé un programme de formation spécialisée à l'étranger dont ont déjà bénéficié 100 scientifiques. De même, la politique de Sri Lanka visant à renforcer ses capacités dans les technologies de pointe semble axée dans une certaine mesure sur des centres d'excellence tels que l'Institut d'études fondamentales, le Conseil de l'informatique et de la technologie de l'information et le Centre sri-lankais des technologies modernes. La promotion des technologies nouvelles comme les biotechnologies, le génie génétique, la micro-électronique, les énergies nouvelles et renouvelables, etc., est considérée comme essentielle dans la politique nationale de S et T du Bangladesh formulée en 1980. La politique de S et T arrêtée par le Népal à la fin des années 80 dispose que les programmes de R-D du pays devraient viser à développer la capacité d'utiliser des sciences modernes comme la biotechnologie dans toute la mesure du possible. Le Bhoutan, qui considère que les technologies à base scientifique sont nécessaires à l'amélioration des conditions de vie de la population, met également l'accent sur l'adoption des technologies nouvelles, comme la micro-électronique, les énergies renouvelables et les biotechnologies, qui ont un rapport direct avec la situation socio-économique du pays, et sur la nécessité de les combiner judicieusement avec les techniques traditionnelles.

La tendance actuelle à privilégier l'économie de marché et à encourager la collaboration entre recherche et industrie va peut-être transformer les perspectives de la S et T dans la région et rééquilibrer les rapports entre culture administrative et culture scientifique au profit de la seconde. La volonté de développer les nouvelles technologies de pointe suppose par ailleurs des politiques accordant plus d'attention à l'innovation technique. Les activités actuellement déployées pour inculquer et promouvoir la science et son application généralisée au développement socio-économique en mobilisant les énergies créatrices de la région auront peut-être aussi pour effet de conférer une dimension nouvelle aux rapports entre la science et la société, amenant la S et T moderne à pénétrer plus profondément dans les cultures de la région.

**P. J. LAVAKARE** est Directeur exécutif de l'United States Educational Foundation en Inde et membre honoraire du Conseil de la recherche scientifique et industrielle de New Delhi.

Physicien de formation, M. Lavakare a travaillé de nombreuses années comme chercheur à l'Institut Tata de recherche fondamentale à Bombay et à l'Université du New Hampshire. Il a ensuite été nommé administrateur chargé de la science à la Commission de l'électronique, puis au Ministère de la science et de la technologie à New Delhi. Au cours de cette période, il a également rempli les fonctions de secrétaire du Comité consultatif pour la science auprès du Premier ministre de l'Inde et a été conseiller honoraire pour la science et la technologie auprès de la Commission de la planification du gouvernement de l'Inde.

**KISHORE SINGH**, auteur des sections du présent chapitre consacrées aux autres pays de l'Asie du Sud, est membre du Conseil international des études de politique scientifique et a travaillé pendant plus de dix ans pour des organismes des Nations Unies en qualité de consultant dans le domaine des politiques de développement de la S et T et du transfert de technologies.

M. Singh a suivi ses études de troisième cycle à l'Université de Paris-I et a donné des cours de préparation au doctorat sur le transfert de technologies à l'Université de Paris-V. Il a été récemment professeur invité à l'Université de Roskilde (Danemark).

## REMERCIEMENTS

P.J. Lavakare remercie le Ministère indien de la science et de la technologie d'avoir bien voulu lui communiquer les données statistiques les plus récentes sur la recherche et le développement dans le pays.

## LECTURES COMPLÉMENTAIRES

UNESCO. 1991. *Funding for higher education in Asia and the Pacific*, Bangkok, UNESCO (PROAP).

Singh, K. 1991a. Challenges for science policy in some least developed countries of Asia, *Higher Education Policy*, vol. 4, n° 3, p. 14-19.

—. 1991b. L'enseignement des sciences et le développement scientifique et technologique, *Impact*, n° 164, p. 393-406.

## LA CHINE

*Shen Chenru et Zhang Shaozong*

La réforme est aujourd'hui le maître mot en Chine. Elle concerne toutes les sphères d'activité, mais c'est l'économie nationale qui fait l'objet des mesures les plus radicales. Chacun s'accordant à reconnaître les potentialités de la science et de la technologie (S et T) en tant que force productive, le programme de réforme met de plus en plus l'accent sur ce secteur, même si, d'une manière générale, la recherche fondamentale, perçue comme dénuée de liens avec la production, ne retient encore l'attention que de la seule communauté scientifique. Le grand public n'a pas encore compris la valeur potentielle de la recherche : à ses yeux, les chercheurs sont des gens tournés vers la spéculation intellectuelle et relativement dépourvus de compétences pratiques. Les techniciens bénéficient en revanche d'une bien meilleure image au sein de la population.

Le présent chapitre dresse un rapide bilan de la recherche fondamentale en Chine, présente l'Académie des sciences de Chine, principal centre de recherche fondamentale de la nation, et montre comment la culture chinoise traditionnelle influe sur la science et la technologie dans ce pays.

## L'ÉTAT DE LA RECHERCHE FONDAMENTALE

La notion de recherche fondamentale est diversement interprétée selon les pays. En Chine, on distingue généralement trois formes de science et de technologie. La première correspond aux projets de recherche-développement (R-D) qui appuieront directement l'effort visant à doubler le produit national brut d'ici à la fin du siècle : elle représente donc l'essentiel de l'activité en matière de S et T. La deuxième est celle de la R-D relative aux techniques nouvelles et de pointe, qui a pour but de créer et de mettre sur pied des industries de haute technicité. La recherche fondamentale constitue la troisième forme de science et de technologie : sa mission est de parvenir à une explication systématique et rationnelle des phénomènes naturels en forgeant des concepts, des théories et des méthodes inédits. La recherche fondamentale se décompose à son tour en trois catégories : premièrement, la recherche finalisée, débouchant sur des applications ; deuxièmement, la recherche cumulative, qui vise à collecter des données et du matériel originaux ; enfin, la recherche fondamentale pure. Traditionnellement, on entend par recherche fondamentale pure les travaux théori-

ques menés en mathématiques, en physique et en chimie, tandis que l'astronomie, les sciences de la Terre et la biologie appartiennent à la deuxième catégorie.

## LE CADRE INSTITUTIONNEL

Les institutions chinoises de la science et de la technologie comprennent l'Académie des sciences de Chine (ASC), les universités, et les instituts rattachés aux différents ministères et commissions nationales. La Commission d'État pour les sciences et les techniques (CEST) est chargée de coordonner ce système, conçu à l'origine en fonction d'un plan économique en vertu duquel les projets de S et T étaient assignés et financés pour la plupart par le gouvernement central. Les unités de recherche chargées de ces projets n'étaient responsables que devant l'État. La faiblesse de ce système, en particulier en ce qui concerne la recherche fondamentale, réside de toute évidence dans l'insuffisance de ses liens avec les secteurs productifs. L'introduction, depuis une dizaine d'années, de certains mécanismes de marché en a modifié de nombreux aspects, mais n'a rien changé à sa nature profonde. Il est clair qu'une transformation radicale de l'appareil de recherche exige la mise en place d'une véritable économie de marché. Or la Chine commence tout juste à prendre des mesures législatives dans le sens de la libéralisation.

Dans le passé, la part des dépenses annuelles de l'État consacrée à la science et à la technologie était modeste, de l'ordre d'environ 1 % du PNB en moyenne, 4,8 % seulement de ces sommes étant destinées à la recherche fondamentale. L'un et l'autre pourcentages étaient inférieurs à la moyenne mondiale.

La Fondation nationale des sciences exactes et naturelles (FNSSEN), créée en 1986, a été la première à prendre des mesures en vue de réformer le système chinois de S et T en diversifiant les sources de financement. Depuis, un certain nombre de ministères d'État et de secteurs productifs ont réussi à se doter de leur propre appareil de R-D, de sorte que les deux premières formes de S et T ont bénéficié d'appuis sans précédent. Par comparaison, la FNSSEN semble avoir oublié la recherche fondamentale pure, dont le niveau de financement est révélateur de la place qu'elle occupe dans la politique de la Chine en matière de science et de technologie.

A la suite des efforts de libéralisation de l'économie, un secteur de S et T indépendant des autorités nationales a fait son apparition dans le sud-est de la Chine, et en particulier dans les zones économiques de Shenzhen, Zhuhai, Xiamen, Wenzhou et Ningbo. Ce secteur, axé sur le marché et directement lié à la production, est beaucoup plus flexible et actif que les institutions d'État. Les salaires nettement plus élevés qui y sont proposés attirent un nombre croissant de spécialistes du secteur public, notamment en provenance d'universités et d'instituts de recherche prestigieux. L'avenir de ce secteur privé dépendra de la poursuite du programme de réforme.

## LA SITUATION PRÉSENTE

Bien que la science et la technologie soient gérées selon la classification mentionnée plus haut, il n'existe pas de statistiques correspondant à ce découpage, et il est donc difficile de donner une image précise de la recherche fondamentale en Chine. On trouve néanmoins des informations dans un rapport intitulé « Enquête sur la recherche fondamentale dans les différentes branches des sciences exactes et naturelles en Chine (INBRDNS) », commandé par l'Académie des sciences de Chine à la requête de la CEST. Ce rapport, auquel ont contribué plus d'une centaine de spécialistes de l'Académie et d'autres institutions, a été rédigé à l'issue d'une enquête conduite de juillet à décembre 1987 et regroupe des études consacrées à quinze disciplines, dont les mathématiques, la physique, la chimie, l'astronomie, les sciences de la Terre, la biologie, la recherche fondamentale en agronomie, la recherche médicale, l'étude des sources d'énergie, la photo-électronique, et les sciences de l'ingénieur. Bien que pauvre en données statistiques, ce rapport est la première enquête sur la recherche fondamentale en Chine qui fasse autorité.

On y lit que la Chine s'est dotée d'une vaste infrastructure de recherche couvrant de nombreuses disciplines au niveau le plus fondamental, et que celle-ci a notablement contribué au développement économique du pays, à sa défense et à ses réalisations scientifiques, et qu'elle a donné au peuple chinois des raisons d'être fier et d'avoir confiance en lui-même. La bombe A, la bombe H et les satellites que la Chine a elle-même mis au point sont les exemples les plus remarquables de la vigueur de ses institutions de recherche. Le rapport donne la liste des scientifiques dont les efforts personnels ou la contribution à des travaux collectifs sont

reconnus dans le monde entier et note que les études et recherches menées par la Chine dans le domaine de la géologie, de la géographie, de la sismologie, de la pédologie, de la météorologie, de l'écologie, de la zoologie et de la botanique ont aidé l'humanité à mieux connaître sa planète.

Néanmoins, l'infrastructure en matière de recherche fondamentale est qualifiée de faible et peu efficace. En mathématiques pures, par exemple, le rapport signale que le niveau général de la Chine demeure très en deçà de celui des pays développés, et accuse un retard sur l'Inde et le Brésil dans plusieurs domaines importants. Sur les 20 000 membres environ que compte la Société chinoise de mathématiques, quelques milliers à peine travaillent à la recherche fondamentale. Selon les statistiques de cette société, pour 1985, seulement 400 mathématiciens chinois avaient rédigé plus de deux communications traduites et publiées dans des revues de mathématiques internationales. Par comparaison, sur les 14 000 membres de l'American Mathematical Society, plus de 4 000 — soit dix fois plus qu'en Chine — avaient publié deux articles ou plus.

La chimie fait l'objet d'un diagnostic similaire. Des statistiques provenant d'une enquête effectuée auprès de 15 établissements, dont l'ASC, et de 11 grandes universités sous la tutelle de la Commission d'État pour l'éducation font état de 10 000 chimistes engagés dans des travaux de recherche en 1983 et 1984, dont 6 500 à l'ASC et 3 000 dans les universités. Parmi ces derniers, 700 étaient des étudiants de troisième cycle. Selon les estimations, 60 % des 10 000 chimistes professionnels s'occupaient de recherche fondamentale. Des données parues dans *Chemical Abstracts* recensaient plus de 380 000 articles et 4 700 livres sur la chimie publiés en 1985 et 73 000 brevets se rapportant à la chimie délivrés la même année, soit une production mondiale totale de 460 000 documents. Les États-Unis d'Amérique arrivaient en tête avec une contribution de 27 %, suivis par l'ex-URSS (14,9 %) et le Japon (11,3 %). Venaient ensuite la République fédérale d'Allemagne, le Royaume-Uni, la France, l'Inde et le Canada. La Chine se plaçait au neuvième rang, avec 2,6 % de la production mondiale. Les chimistes chinois ont publié 11 906 articles en 1985, dont 10 532 en chinois. Le rapport souligne le large écart entre la Chine et les trois pays en tête dans le domaine de la chimie.

S'agissant du niveau de la recherche en biologie, le rapport indique clairement que, dans le domaine de la biologie moléculaire, la Chine ne peut, d'une manière générale, sou-

tenir la comparaison avec un État de taille moyenne des États-Unis sur le plan du nombre de chercheurs ou de la quantité et de la qualité des travaux publiés chaque année, qu'elle accuse un retard de cinq à dix ans sur les pays développés et qu'elle est distancée par quelques pays en développement tels que l'Inde ou certains pays d'Amérique du Sud. Dans le domaine de la taxinomie, branche de la biologie relevant de la deuxième catégorie de la recherche fondamentale, les progrès ont été modestes. La Chine abrite un nombre beaucoup plus grand de variétés d'insectes indigènes que les États-Unis et l'ex-URSS, mais alors que ces deux pays ont identifié respectivement plus de 85 000 et 50 000 variétés, la Chine n'en a identifié que 15 000. D'autre part, *Flora Sinica* [La flore chinoise], compilation qui doit compter 80 volumes, paraît régulièrement depuis 1959; le 65<sup>e</sup> volume date de 1992. Mais sa publication vient presque un siècle après celle de *The Flora of British India* (1872-1897). La Société chinoise d'ornithologie compte 360 adhérents, dont 83 sont des ornithologues qualifiés, alors que la Société d'ornithologie du Japon en dénombre 1 000. De même, on recense en Chine 400 chercheurs travaillant à la classification des insectes, contre 2 000 aux États-Unis.

L'achèvement en 1988 du Collisionneur électrons-positrons de Beijing représente une brillante réussite dans le domaine de la physique des hautes énergies, mais le rapport rappelle la faiblesse relative d'autres disciplines, comme la physique de la matière condensée, la physique optique et la physique atomique et moléculaire. Se fondant sur les statistiques de la FNSEN, il attire l'attention sur la diminution ces dernières années du nombre d'équipes de chercheurs produisant des résultats de premier plan.

Le manque de créativité et de capacité d'innovation de la recherche fondamentale chinoise est préoccupant : les étudiants s'inspirent pour la plupart des travaux de pionniers réalisés à l'étranger. Certaines ne sont entreprises que pour combler une lacune dans le programme de recherche fondamentale et ne témoignent d'aucune vitalité réelle. De plus, il existe une grande déperdition d'énergie par manque de coordination. Ainsi, on ne compte pas moins de 50 instituts de géologie dépendant des ministères d'État, de l'ASC ou des provinces, dont les domaines de recherche se chevauchent fréquemment. Vers la fin des années 70 et le début des années 80, un fort accroissement du nombre d'unités de recherche a porté le chiffre des instituts rattachés à l'ASC de 64 à 119. Les universités et le secteur industriel ont eux

aussi ouvert leurs propres centres de recherche, créant ainsi une certaine situation de concurrence.

Le rapport met en lumière l'insuffisance des crédits de recherche. Selon une enquête sur le financement de la recherche en biologie en 1986, le montant moyen des crédits alloués par programme de recherche s'élevait cette année-là à 28 800 yuan (le dollar des États-Unis s'échangeait alors approximativement contre 3,45 yuan) pour les centres de l'ASC, à 16 000 yuan pour les autres établissements d'enseignement supérieur et à 7 600 yuan pour les instituts locaux. A titre de comparaison, le dernier de ces chiffres représentait à l'époque le prix de deux téléviseurs. Dans les années 80, le montant total des crédits accordés chaque année aux universités pour financer la recherche fondamentale s'élevait en moyenne à 10 millions de yuan. Mais les sommes attribuées à chaque programme étaient tombées de 43 000 yuan en 1983 à 29 300 yuan en 1987. Le budget des mathématiques était inférieur à la moyenne (8 000 yuan par programme).

Un autre grave problème auquel est confrontée la communauté scientifique chinoise est le vieillissement relatif des chercheurs. La pénurie de jeunes scientifiques, dont les conséquences se font sentir de plus en plus, s'explique par les troubles politiques qui, de 1966 à 1976, ont privé toute une génération de formation scientifique.

## LES CHOIX

De toute évidence, la recherche fondamentale chinoise ne peut faire face aux besoins du développement social, politique, économique et culturel de la nation. Une réforme est indispensable sur deux points : un effort de concentration et un renforcement des moyens.

Les analystes chinois soulignent pour la plupart l'inadaptation de l'appareil de recherche à l'économie nationale. Certes, les récriminations concernant l'insuffisance des crédits sont quasi systématiques, même parmi les chercheurs des pays développés, pourtant généreusement financés par le secteur privé et des particuliers fortunés. N'oublions pas non plus que la recherche scientifique a toujours été menée par des individus plus animés par la curiosité intellectuelle que par la soif de célébrité et d'argent. Même si le budget chinois de la science et de la technologie était porté de 1 % à 1,5 ou 1,8 % du PNB, et la part de ce budget allouée à la recherche fondamentale de 4,8 % à 10 ou 15 %, comme l'ont proposé certains scientifiques, des voix s'élèveraient

encore pour réclamer davantage de moyens, car, comme l'éducation, la science est avant tout un besoin culturel. Il convient donc de maintenir un lien entre la recherche scientifique et la culture : même si les crédits de l'État sont indispensables, il serait bon que la communauté scientifique ne dépende pas exclusivement du gouvernement central, mais qu'elle cherche des appuis dans l'ensemble de la société, en particulier le secteur privé.

## LES EFFORTS

Ces dernières années, la CEST a pris des mesures significatives pour réformer l'appareil scientifique et technologique de la Chine. Elle a conçu à cet effet le Programme étincelle, le Programme flambeau et le Programme 863, tous lancés dans le cadre du septième plan quinquennal. Le premier visait à combler le retard des régions pauvres et reculées du pays au moyen de la S et T, le deuxième à créer des industries de haute technicité au niveau local, et le troisième à développer les technologies de pointe. Ces programmes ont bénéficié d'un soutien financier considérable et ont permis à la science et à la technologie chinoises de trouver leur place au sein de la communauté scientifique international.

Désireux de consolider la recherche fondamentale, le gouvernement central n'épargne aucun effort pour accroître les moyens qui lui sont alloués ; en 1993, le montant total de ses investissements sera supérieur à 300 millions de yuan. De plus, ces investissements augmenteront de 70 millions de yuan par an en 1994 et 1995.

En 1992, la CEST a lancé le Programme ascension, effort national visant à améliorer la recherche fondamentale chinoise. Ce programme comporte trente projets sélectionnés par d'éminents spécialistes de la Commission dans des domaines dans lesquels les capacités actuelles de la Chine devraient lui permettre de réaliser des percées significatives et de s'assurer une place de choix dans un proche avenir. Les crédits annuels alloués à chacun de ces projets durant le huitième plan quinquennal s'élèvent à 1 million de yuan, soit beaucoup plus qu'il n'est accordé à un projet classique. En outre, 77 laboratoires clés ont été créés au cours du précédent plan quinquennal, et il est envisagé de doubler ce chiffre. On estime à 1 million de yuan environ le montant global des sommes investies dans ces laboratoires. En dépit de ces efforts, la recherche fondamentale chinoise manque encore de vitalité et de nombreux chercheurs hésitent encore à quitter leur poste et à se tourner vers ces nouveaux projets.

## L'ACADÉMIE DES SCIENCES DE CHINE

### *Bref historique*

L'Académie des sciences de Chine (ASC) est le centre de recherche le plus important et le plus complet du pays dans le domaine des sciences exactes et naturelles. Sa mission est d'élaborer de nouveaux concepts, de nouvelles théories et de nouvelles méthodes dans le domaine qui est le sien, de résoudre les principaux problèmes faisant obstacle au développement économique et social, et de former des scientifiques et des techniciens. Depuis plus de quarante ans, l'ASC apporte d'importantes contributions à la croissance économique et au développement scientifique du pays. Selon des statistiques préliminaires pour 1989, plus de 900 projets de recherche de l'Académie ont été récompensés cette année-là par des prix décernés par l'État.

L'Académie des sciences de Chine est née le 1<sup>er</sup> novembre 1949 de la fusion de deux établissements : l'Académie centrale des sciences et l'Académie des sciences de Peiping. Au début de son existence, l'ASC ne regroupait que 21 instituts et quelque 300 spécialistes. A la fin de 1989, elle comptait 121 instituts et près de 90 000 employés, dont environ 56 000 chercheurs et techniciens (tableaux 1, 2 et 3). Les instituts sont répartis dans vingt et une provinces, municipalités et régions autonomes. L'Académie a ouvert des centres annexes dans douze grandes villes. Elle comprend six divisions académiques : quatre en sciences fondamentales — mathématiques et physique, chimie, sciences de la Terre, biologie — et deux en sciences techniques. Les membres de ces divisions sont d'éminents spécialistes des sciences et de la technologie choisis parmi le personnel de l'ASC et d'autres institutions, à qui les plus grands honneurs sont réservés dans le pays. Les membres des divisions académiques étaient auparavant au nombre de 400, mais 200 nouveaux membres ont été désignés en 1992 lors de la sixième session de l'Assemblée générale des divisions académiques, qui est considérée comme la plus haute instance consultative en Chine en matière de science et de technologie.

### *La réforme : les grandes étapes*

L'ASC souffre des mêmes déficiences que l'ensemble du système chinois de science et de technologie. De plus, la multiplication des instituts de recherche rattachés aux universités et au secteur industriel entame le prestige élevé dont l'Académie jouissait autrefois. Les universités disposent de

**TABLEAU 1**  
**INSTITUTIONS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES DE CHINE, 1985**

Catégorie	Nombre
Instituts de recherche	121
Instituts des politiques et de la gestion	1
Instituts d'histoire et de science	1
Universités chinoises de science et de technologie (y compris instituts de hautes études)	1
École des cadres de gestion de Beijing	1
Usines	9
Livres et publications	7
Autres	29
<b>Total</b>	<b>170</b>

**TABLEAU 2**  
**PERSONNEL PERMANENT DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES DE CHINE, PAR FONCTIONS, 1985**

Fonction	%
Recherche fondamentale, R-D et enseignement	45,2
Techniciens dans d'autres domaines	11,9
Personnel auxiliaire	1,8
Employés des instituts	11,2
Employés des usines et des laboratoires	19,9
Cadres administratifs	10,0

**TABLEAU 3**  
**PERSONNEL PERMANENT DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES DE CHINE, PAR DÉPARTEMENT, 1985**

Département	%
Instituts de recherche	82,6
Éducation et formation	4,6
Service de S et T	8,1
Siège de l'ASC, centres régionaux et établissements affiliés	4,7

meilleurs moyens d'enseignement et le secteur industriel est directement stimulé par les forces économiques. Il est donc devenu impératif de réformer l'ASC si l'on veut qu'elle conserve sa première place. Dans le même temps, le gouvernement central lui a demandé de recentrer ses efforts sur les principaux domaines de l'activité scientifique et technique. En d'autres termes, l'Académie doit réduire ses activités de

recherche fondamentale. Ses dirigeants ont donc adopté une politique de réforme visant à renforcer la R-D et à créer une structure de recherche fondamentale finalisée qui soit ouverte tant sur l'ensemble du pays que sur le reste du monde.

En 1981, un nouveau mode de répartition des crédits a été mis en place. Le montant moyen des crédits alloués aux départements a été réduit, le soutien accordé à des projets de recherche sélectionnés par les pairs renforcé, et l'émulation encouragée. Ainsi on a mis sur pied un système de gestion des projets de recherche par catégorie, en réservant à la R-D, à la S et T d'intérêt général et à la recherche fondamentale respectivement un quart, un tiers et un tiers du budget total. La même année, l'ASC créait la Fondation de la science, dont la vocation est nationale. En 1986, l'Académie a distribué 35 millions de yuan pour subventionner 655 projets de recherche fondamentale dûment sélectionnés, tandis que la Fondation versait 172 millions de yuan pour soutenir 4 424 projets de recherche dans tout le pays. La FNSSEN a été instituée cette même année comme un organe destiné à fonctionner indépendamment de l'ASC au même titre que la Fondation de la science.

En 1984, il a été proposé d'en finir avec la politique autarcique des institutions scientifiques et de créer des laboratoires de recherche plus favorables à la coopération, à la mobilité des scientifiques et aux échanges internationaux. Cette proposition a débouché sur l'annonce, en 1985, de la création officielle des premiers établissements scientifiques « ouverts », à savoir 2 instituts et 17 laboratoires. En 1990, 63 laboratoires, 2 instituts et 8 stations d'essais sur le terrain sont venus augmenter cette liste.

Toujours en 1984, l'ASC a décidé de s'efforcer de mettre au point des produits de haute technicité répondant aux objectifs économiques de la nation ; cinq ans plus tard, plus de 7 000 scientifiques et techniciens avaient quitté leurs laboratoires de recherche pour rejoindre ces entreprises « *high-tech* ».

En 1987, le Président de l'ASC proposa une politique de réforme qui visait à mobiliser les forces vives de l'Académie pour les mettre directement au service de l'économie nationale, tout en conservant une équipe hautement sélectionnée qui continuerait à se consacrer à la recherche fondamentale et à des projets de haute technicité. En mars de la même année, le Président proposa le principe « une Académie, deux systèmes », en vertu duquel deux systèmes distincts devraient coexister au sein de l'ASC : un système de recher-

che scientifique et un système de développement des technologies de pointe. Ce principe a reçu un franc soutien et incité un certain nombre d'éminents scientifiques à proposer la création d'une Académie chinoise de la technologie.

Au début de 1993, le Président de l'Académie a précisé la politique de restructuration de l'ASC lancée en 1987 en présentant un projet d'organisation à deux niveaux. L'Académie se composerait d'un noyau formé par un nombre restreint de centres scientifiques et de centres technologiques qui seraient autant d'instituts de recherche de niveau international, et d'un certain nombre d'entreprises satellites de haute technicité, sociétés indépendantes efficaces et rentables créées par l'ASC et ses instituts auxquels elles demeureraient étroitement liées. Il conviendrait d'améliorer la recherche fondamentale et de la concentrer sur un petit nombre de domaines. Le travail accompli dans ces domaines ne devrait pas seulement se placer à la pointe de la recherche scientifique internationale, mais encore présenter une utilité stratégique pour le développement économique à long terme de la nation.

Selon des informations récentes, le projet d'établissement de l'Académie chinoise de la technologie verra prochainement le jour. Si son personnel scientifique et technologique était détaché à la fois de l'ASC et des ministères et commissions d'État, le principe « une Académie, deux systèmes » serait poussé plus loin, et le débat présent sur les avantages comparés d'une grande académie comme l'actuelle ASC et d'une institution de taille plus modeste concentrant ses efforts sur la recherche fondamentale serait clos.

La réforme de l'ASC, avec ses 90 000 employés répartis dans 170 unités, est une tâche extrêmement difficile, ne serait-ce que parce que les scientifiques et les techniciens qui y travaillent ont peine à se défaire des habitudes acquises dans une économie planifiée. Mais le marché commence peu à peu à faire sentir ses effets, les chercheurs de l'ASC sont confrontés à des difficultés économiques et, comme le Programme ascension ne pourra jamais leur garantir du travail à tous, la plupart devront s'orienter vers d'autres débouchés.

## LA SCIENCE ET LA CULTURE CHINOISE TRADITIONNELLE

La culture chinoise traditionnelle fait bon ménage avec la science moderne : aucune barrière culturelle n'empêche donc les Chinois de s'intéresser à la science. En Chine, le culte des ancêtres tient lieu de religion, et les grandes figures de la culture telles que Confucius ou Lao Zi n'ont jamais rejeté la science, mais ont tenté au contraire de l'intégrer à leur réflexion. De fait, un récent sondage effectué par la Société chinoise de science et de technologie a révélé que plus de 70 % des Chinois avaient une opinion positive de la science.

Pour bien comprendre la culture chinoise, il faut savoir que la pensée chinoise est dominée par deux attitudes fondamentales. La première est le sinocentrisme : le mot qui désigne la Chine en chinois signifie « pays ou nation du milieu ». Cela est révélateur de l'idée que les Chinois se font de leur pays. Le sinocentrisme est un trait de la culture chinoise depuis le XI<sup>e</sup> siècle avant l'ère chrétienne, et ce n'est qu'à partir du XVII<sup>e</sup> siècle que cette attitude a été ébranlée par la culture occidentale, dont la science moderne est issue. Depuis, la nation chinoise est sur la défensive et ressent sa glorieuse culture comme un pesant fardeau. Le sinocentrisme transcende l'idéologie et les institutions politiques et s'étend à tous les domaines. C'est cette attitude culturelle qui explique le souci excessif de la Chine d'obtenir des résultats rapides dans la poursuite du développement. En matière de science et de technologie, elle se manifeste dans l'ampleur de l'effort de recherche fondamentale et la masse de personnel recruté pour tenter d'atteindre les objectifs évoqués plus haut.

Le second trait caractéristique de la culture chinoise est sa vision globale de l'univers. La nature est conçue comme un tout et chaque entité, que ce soit un individu, une population ou l'espèce humaine tout entière, comme faisant partie intégrante de son environnement. Cette prédisposition culturelle a empêché la science de se développer dans la Chine ancienne, car la réflexion scientifique exige un certain détachement dans l'observation. C'est ainsi que, si la logique et la géométrie sont apparues en Chine à l'époque de Confucius, elles n'ont pas atteint un développement comparable à la logique d'Aristote ou à la géométrie d'Euclide. L'ingéniosité du peuple chinois s'est manifestée avant tout dans le domaine technique et artistique. A l'époque moderne, les chercheurs chinois se sont montrés aptes à résoudre les

problèmes, mais peu habiles à les identifier. Cette absence de créativité et d'idées nouvelles en recherche fondamentale peut être attribuée à la perception globale de la nature inculquée par la culture. Cela étant, nombre de problèmes qui se posent à l'ensemble du globe, comme la pollution de l'environnement, le réchauffement de la planète ou la raréfaction de l'ozone stratosphérique exigent une approche intégrée. Au demeurant, les progrès de l'informatique rendent aujourd'hui de telles approches possibles.

Le rapide essor économique de pays comme le Japon, Singapour, la République de Corée, la Thaïlande et la Malaisie, sur lesquels la culture chinoise a exercé pendant longtemps une profonde influence, devrait favoriser une nouvelle perception de la culture chinoise dans le monde. Nous croyons quant à nous que les cultures chinoise et occidentale sont complémentaires et que, ensemble, elles détiennent la clef de solutions rationnelles aux problèmes mondiaux d'aujourd'hui et de demain.

**SHEN CHENRU** est membre de l'Académie des sciences de Chine. Il est rédacteur en chef de l'édition en langue chinoise du périodique de l'UNESCO *Impact : science et société* et de l'édition bilingue de *World Science and Technology*. Après avoir été de nombreuses années doyen dans un institut de langues étrangères, le professeur Shen se consacre à présent à la vulgarisation scientifique.

**ZHANG SHAOZONG** est membre de l'Institut de géologie de l'Académie des sciences de Chine ; il est actuellement chef de la rédaction de l'édition en langue anglaise de *Scientia Geologica Sinica*. Zhang Shaozong est titulaire d'une maîtrise de l'École des hautes études de l'Université chinoise de science et de technologie et s'intéresse à tout ce qui touche à la science, à la culture et à la société.

## LECTURES COMPLÉMENTAIRES

INBRDINS. 1989. Enquête sur la recherche fondamentale dans les différentes branches des sciences exactes et naturelles en Chine. État actuel, tendances et perspectives, et propositions pour une stratégie de développement, extraits du *Bulletin de l'ASC* (Beijing, Presses scientifiques), 3, p. 64-252.

Zhang Yungang et Yang Anxian. 1990. Examen rétrospectif de dix années de réforme à l'Académie des sciences de Chine, extraits du *Bulletin de l'ASC* (Beijing, Presses scientifiques), 4(2), p. 141-151.

Zhou Guangzhao. 1989. Accélérer les réformes et créer un nouveau modèle institutionnel sur le principe « une académie, deux systèmes », extraits du *Bulletin de l'ASC* (Beijing, Presses scientifiques), 3, p. 3-11.

## LE JAPON ET LES NOUVEAUX PAYS INDUSTRIALISÉS

*Sogo Okamura et Reg Henry*

Depuis 1868, la science a joué un rôle fondamental dans le développement du Japon en transformant la base productive de son économie et en influençant son évolution sociale et culturelle. Devenu, malgré de nombreux handicaps naturels, un des pays industrialisés à la pointe des efforts mondiaux en matière de recherche scientifique et d'innovation technologique, le Japon demeure convaincu que sa prospérité future dépend fortement de la science et de la technologie (S et T). De même, on n'insistera jamais assez sur le rôle de la S et T dans la spectaculaire croissance économique des « nouveaux pays industrialisés » (NPI) d'Asie depuis les années 60. Ne possédant ni la tradition scientifique ni le degré d'industrialisation dont bénéficiait alors le Japon, ces pays lancèrent de vigoureux programmes d'acquisition de capacités scientifiques et techniques en vue d'appuyer leurs industries naissantes financées par des capitaux étrangers. Nous nous proposons d'examiner brièvement comment le Japon et les NPI ont fondé leur développement industriel et leur prospérité économique sur la science et la technologie.

### ÉTAT DE LA SCIENCE ET INSTITUTIONS SCIENTIFIQUES AU JAPON

Les progrès rapides du Japon en science et en technologie s'expliquent par deux facteurs décisifs : les efforts de l'État en faveur de la S et T et la capacité exceptionnelle du secteur privé d'adopter, de promouvoir et d'utiliser les acquis de la recherche et de la technique.

L'État japonais a joué un rôle important dans la promotion, la planification, la gestion et le financement de la S et T, et il se trouve aujourd'hui à la tête d'un vaste réseau d'organismes qui formulent et mettent en œuvre la politique scientifique et technologique du pays. Ce réseau comprend les services ministériels qui planifient et stimulent la recherche scientifique et technique dans les différents secteurs productifs, des organismes opérationnels tels que l'Agence des sciences et des techniques ou le Ministère de l'éducation, de la science et de la culture (MESC), et des organes consultatifs tels que le Conseil de la science et de la technologie ou le Conseil scientifique du MESC. En avril 1992, le gouvernement a adopté une résolution intitulée « Directive générale pour une politique de la science et de la technologie » recommandant d'élaborer dans ce domaine

une politique positive et détaillée répondant à un triple objectif : « la coexistence harmonieuse des êtres humains avec l'environnement terrestre, le développement des ressources intellectuelles et l'édification d'une société accueillante où l'on peut vivre l'esprit en paix ». La Directive générale énumérait un certain nombre de mesures prioritaires en vue d'atteindre ces objectifs : adapter la science et la technologie à l'être humain et à la société, promouvoir le développement des ressources humaines en matière de S et T, investir davantage dans la recherche-développement (R-D) et en améliorer l'infrastructure, stimuler la flexibilité et la créativité de la recherche, donner aux activités scientifiques et techniques japonaises une dimension internationale, et promouvoir la S et T au niveau local dans le pays.

L'État finance et dirige en outre lui-même des activités de recherche-développement. La Directive générale l'engage à soutenir les activités énumérées au tableau 1.

TABLEAU 1  
DOMAINES DE R-D FINANCÉS PAR L'ÉTAT JAPONAIS  
AUX TERMES DE LA DIRECTIVE GÉNÉRALE

#### Disciplines fondamentales et domaines de pointe

Sciences et technologies des matériaux  
Sciences et technologies de l'information et de l'électronique  
Sciences de la vie et biotechnologies  
Sciences et techniques sociales  
Sciences et techniques fondamentales avancées  
Sciences et technologies de l'espace  
Sciences et technologies des océans  
Sciences et technologies de la Terre

#### Sciences et technologies de l'environnement

Préservation de l'environnement naturel, y compris à l'échelle planétaire  
Mise en valeur et utilisation des sources d'énergie  
Mise en valeur et recyclage des ressources  
Production alimentaire écologiquement rationnelle

#### Sciences et technologies au service de la vie et de la société

Protection et amélioration de la santé  
Amélioration du milieu vivant  
Amélioration des bases socio-économiques  
Renforcement de la prévention des catastrophes et des mesures de sécurité

**TABEAU 2**  
PARTICIPATION DE L'ÉTAT AU FINANCEMENT  
ET A LA MISE EN ŒUVRE DE LA R-D AU JAPON  
(en milliards de yen)

	1980		1990	
	Total	Part du Total	Total	Part du Total
R-D financée et mise en œuvre par l'État	1 090	23,4 %	1 780	14,7 %
R-D financée par l'État	1 210	25,8 %	1 990	16,5 %

Dans le domaine des sciences exactes et naturelles, le montant des investissements consacrés à la R-D par le Japon représentait 2,76 % de son PNB en 1991, soit le pourcentage le plus élevé dans le monde, et s'élevait au total à 12 720 milliards de yen (94,4 milliards de dollars des États-Unis), somme qui n'est dépassée qu'aux États-Unis d'Amérique. En 1990, l'État a apporté 16,5 % de ces capitaux (1 990 milliards de yen) et a conduit des activités de R-D d'une valeur de 1 780 milliards de yen (voir tableau 2).

Aussi important que paraisse le montant total des sommes investies par le Japon dans la R-D dans le domaine des sciences exactes et naturelles, la part de l'État est, exprimée en pourcentage du PNB, deux fois moindre que dans les principaux pays développés et, au lieu de s'accroître en proportion des dépenses du secteur privé, elle a diminué d'année en année. En fait, les dépenses de R-D de nombreuses entreprises japonaises sont aujourd'hui supérieures à leurs investissements productifs. Les dépenses globales de R-D du secteur public sont néanmoins substantielles, puisque 32,8 % de ce montant sert à financer la recherche fondamentale, contre seulement 9,2 % des dépenses de R-D du secteur privé. De plus, la Directive générale de 1992 prévoit une augmentation du financement public de la recherche fondamentale. Enfin, l'État demeure la principale source de financement de la R-D universitaire, même si l'industrie fournit aujourd'hui 35 % des crédits, contre 11,2 % en 1980, et si la part des universités et de l'État dans les

dépenses globales de recherche fondamentale est tombée de 65 % en 1980 à 55 % en 1990.

Les dépenses de R-D du secteur privé (tableau 3) ont presque triplé au cours de la dernière décennie dans la plupart des branches de l'industrie, et représentaient 80,6 % de l'effort national total en 1990, alors que la part des universités était de 11,6 % et celle des instituts publics de 7,8 %. Il en résulte un certain déséquilibre dans l'infrastructure de recherche japonaise, l'industrie privée disposant d'installations et de matériel de bien meilleure qualité que les deux autres secteurs. Les dépenses de R-D du secteur privé sont elles aussi mal équilibrées, puisque plus de 71,8 % de l'investissement global sert à financer des études de développement, contre 21,8 % pour la recherche appliquée, et seulement 6,4 % pour la recherche fondamentale. Cette dernière souffre donc de trois handicaps. Premièrement, la faible part de ses dépenses de R-D que le secteur privé lui consacre, même s'il finance 45 % des activités de recherche fondamentale conduites dans le pays, oblige l'État à prendre encore en charge le financement de la recherche dans de nombreux domaines. Deuxièmement, la recherche fondamentale obéit dans le secteur privé à d'autres motivations que dans le secteur public ou dans les universités. Enfin, globalement, le Japon apparaît encore en retard sur les États-Unis d'Amérique et l'Europe en matière de recherche fondamentale, sauf dans certains domaines particuliers comme les communications et l'électronique.

La production scientifique est elle aussi déséquilibrée

**TABEAU 3**  
DÉPENSES DE R-D DU SECTEUR PRIVÉ AU JAPON  
PAR BRANCHE INDUSTRIELLE (en milliards de yen)

	1981	1990
Outils électrique	1 010	3 150
Matériel de transport	630	1 500
Produits chimiques	620	1 420
Machines	240	650
Instruments de précision	120	340
Fer et acier	120	300
Céramiques	80	220
Autres produits finis	500	1 090
Industries non manufacturières	260	610
<b>Total</b>	<b>3 580</b>	<b>9 280</b>

TABLEAU 4  
EFFECTIFS DE LA R-D AU JAPON DANS LE DOMAINE  
DES SCIENCES EXACTES ET NATURELLES

	1981		1991	
	Effectifs	Part	Effectifs	Part
Sociétés privés	184 889	58,2 %	330 996	65,5 %
Centres de recherche	30 006	9,5 %	37 084	7,4 %
Universités	102 592	32,3 %	136 815	27,1 %
Total	317 487	100,0 %	504 895	100,0 %

parce que les entreprises sont peu disposées à publier les résultats de leurs travaux de recherche fondamentale. Cette faible production de publications savantes contraste fortement avec le nombre de brevets déposés par le Japon — 20 % du chiffre total aux États-Unis et 15 % en Europe en 1988.

L'enseignement supérieur pâtit beaucoup de la forte demande de scientifiques, de techniciens et de chercheurs dans le secteur privé. Cette demande n'a cessé de croître dans tous les secteurs, mais le renforcement des effectifs de R-D est particulièrement frappant dans le privé. Au cours des dix dernières années, le pourcentage de ces effectifs employé dans des entreprises privées a progressé de 7 %, tandis qu'il diminuait de 2 % et 5 % respectivement dans les centres de recherche et les universités (tableau 4). Une enquête conduite par le Conseil scientifique du MESC montre que la plupart des laboratoires de recherche des entreprises privées prévoient de renforcer leur personnel de R-D en proportion de la croissance du produit national brut (PNB). Les centres de recherche et les universités auront beaucoup de difficultés à faire de même si l'État n'augmente pas substantiellement ses subventions.

Le Japon compte aujourd'hui 9,2 chercheurs pour 1 000 employés et devance les États-Unis sur ce plan depuis 1986. Comme dans le reste du monde, les jeunes ont tendance à se détourner des carrières scientifiques et techniques, d'où une raréfaction de l'offre de scientifiques et d'ingénieurs.

À la suite de la Directive générale pour une politique de la science et de la technologie, ainsi que d'autres rapports publiés par de nombreux conseils et comités au sein de divers ministères et organismes et soulignant l'importance de la recherche fondamentale, le gouvernement s'est efforcé d'accroître son soutien financier à la R-D.

Le deuxième grand facteur qui a permis au Japon de tirer profit de la science et de la technologie a été la capacité de ses entreprises de les promouvoir et de les exploiter. Le secteur privé a adopté une double attitude qui a déterminé, dans une certaine mesure, le développement scientifique et technique du pays. D'une part, il a axé sa stratégie dans ce domaine sur les besoins du marché et les exigences de ce dernier en matière de produits. Cette politique, qui dans un premier temps a freiné l'essor de la S et T au Japon, l'a en fin de compte servi. D'autre part, il a compris que l'innovation technologique était un processus mettant en jeu, outre les nouvelles techniques elles-mêmes, de nombreux facteurs créatifs. La recherche fondamentale a bénéficié de cette conception avancée de l'innovation, car les entreprises ont diversifié leurs investissements dans la R-D et se sont intéressées à des applications plus variées.

Cette double attitude est à l'origine d'autres particularités de la recherche-développement au Japon. C'est ainsi que le personnel de R-D et les ingénieurs sont étroitement associés au processus d'innovation à toutes ses étapes; des études de R-D sont menées à chaque étape, l'industrie maintenant un lien étroit entre recherche et production; les sociétés diversifient leurs lignes de produits en se transformant en « complexes technologiques » plutôt qu'en effectuant des fusions de capitaux; les entreprises s'appuient plus sur leurs nouvelles technologies clés que sur leurs domaines d'activité initiaux; la complémentarité de certaines technologies nouvelles crée une interdépendance technique entre les entreprises japonaises, d'où, on commence à le constater, une moindre concurrence sur le plan des efforts de recherche-développement. On observe en outre depuis 1985 une interdépendance analogue au niveau international, les sociétés japonaises ayant étendu leurs activités de R-D à l'étranger tandis que les firmes étrangères augmentaient leurs investissements de R-D au Japon, en particulier dans les secteurs de l'automobile et des semi-conducteurs.

Toutes ces caractéristiques et ces tendances du secteur public et du secteur privé ont déterminé sous tous ses aspects l'état actuel de la science au Japon. Le Gouvernement japonais s'est récemment efforcé de créer des consortiums de recherche tels que le Centre international de technologie des supraconducteurs, le programme ERATO, l'Institut des technologies de nouvelle génération, etc. Ces organisations se sont révélées très utiles pour renforcer la coopération entre les universités, l'État et l'industrie, de même que la collaboration avec l'étranger.

## LES NOUVELLES TENDANCES

Deux tendances récentes — la mondialisation et les préoccupations écologiques — auront une influence décisive sur l'avenir de la science au Japon. Peut-être obligeront-elles le Japon à abandonner son approche concurrentielle et nationaliste de l'activité scientifique et à renforcer la recherche fondamentale conduite et financée par l'État. L'autre grande tendance a consisté, face aux problèmes environnementaux d'envergure planétaire, à faire appel aux chercheurs pour identifier les causes du réchauffement du climat mondial, des pluies acides ou de la destruction de la couche d'ozone stratosphérique et y proposer des remèdes.

## LA SCIENCE ET LE MODÈLE DES NOUVEAUX PAYS INDUSTRIALISÉS

Malgré sa réussite économique spectaculaire depuis la fin de la seconde guerre mondiale, le Japon s'est vu disputer au début des années 80 son statut de modèle pour les pays en développement par les nouveaux pays industrialisés (NPI) d'Asie. Trois républiques de l'Asie de l'Est — la République de Corée, Singapour et Taiwan — et, dans une moindre mesure, le territoire de Hong Kong ont en effet connu un essor socio-économique rapide. L'une des clefs de ce succès a été le recours à la science pour dynamiser la croissance économique. Aujourd'hui les NPI d'Asie proposent un modèle de développement fondé sur la science qui demeure une source d'espoir pour les pays moins avancés qu'eux.

La science est un élément vital pour les NPI depuis qu'ils ont explicitement adopté, après la guerre, une stratégie de développement reposant sur l'utilisation de la S et T. Cette stratégie implique que les gouvernements mettent en œuvre des politiques visant à la fois à se doter de capacités endogènes en matière de S et T et à mettre ces capacités au service de la production industrielle. La plupart des pays ayant récemment accédé à l'indépendance ont certes opté pour de telles politiques depuis les années 60, mais aucun n'a égalé le succès des NPI d'Asie. Hong Kong constitue toutefois un cas à part, car l'entreprise privée y est demeurée le seul moteur du développement jusqu'en 1980.

Le succès des NPI tient à la manière novatrice dont ils ont mis en œuvre cette stratégie. Par-dessus tout, ces pays ont fondé leurs politiques scientifique et technologique sur des facteurs tels que la demande des marchés internationaux et les techniques et les investissements étrangers. En

d'autres termes, ils n'ont pas cherché à renforcer sans discernement leurs capacités endogènes en matière de S et T en pensant que cela favoriserait automatiquement la croissance économique. Ils ont étroitement combiné ces efforts à des politiques pragmatiques visant à corriger des problèmes nationaux tels que le déficit de la balance commerciale, l'endettement ou le chômage. C'est ainsi que, pour remédier à ses handicaps relatifs dans le domaine des industries de transformation, la République de Corée a demandé en 1980 à ses entreprises privées de se doter de laboratoires ou de créer des consortiums en vue de se lancer dans la recherche-développement. De même, Singapour a révisé sa politique de dépendance à l'égard des sociétés étrangères en matière de technologie industrielle après les changements intervenus dans la conjoncture internationale à la fin des années 70 et a commencé à encourager également la R-D locale. Cette intégration pragmatique de la politique scientifique et technologique et de la politique de développement demeure la principale originalité des NPI.

## LA SCIENCE ET LA PLANIFICATION DU DÉVELOPPEMENT

Dans un premier temps, les décisions et les initiatives gouvernementales furent à l'origine de ces politiques novatrices, pragmatiques et intégrées. Les agences de développement qui géraient les économies nationales étaient prêtes à mettre leurs compétences de pointe au service de ces politiques, car la science et la technologie leur apparaissaient depuis toujours comme des éléments essentiels des modèles de développement capitalistes qu'elles avaient choisis. Ces agences qui dirigeaient et planifiaient l'économie exerçaient un contrôle bureaucratique sur la vie sociale ou géraient des entreprises industrielles d'État et des organes officiels tels que le Conseil de la planification économique (EPB) en République de Corée, le Conseil de la planification et du développement économiques (CEPD) à Taiwan ou le Conseil du développement économique (EDB) à Singapour, qui s'employaient à la fois à promouvoir la science et à stimuler l'acquisition de technologie.

Les gouvernements des NPI créèrent également des organismes chargés spécifiquement de promouvoir, gérer et financer la science et la technologie. Citons le Ministère de la science et de la technologie (MOST) et le Conseil national de la science et de la technologie (NCST) en République de Corée, le Conseil national de la science (NSC) à Taiwan et le

Bureau national de la science et de la technologie (NSTB) ou le Conseil de la science à Singapour. Ces organismes ont réussi à créer des capacités scientifiques et techniques endogènes en favorisant la recherche et l'enseignement universitaires, en créant des instituts nationaux de recherche-développement comme l'Institut supérieur de science et de technologie de la République de Corée (KAIST) ou les laboratoires de recherche du NSC à Taiwan, et en mettant sur pied une infrastructure scientifique moderne. Les gouvernements ont également encouragé la R-D locale en planifiant et stimulant l'activité scientifique, en protégeant et subventionnant les échanges commerciaux, en offrant des avantages fiscaux et des abattements au titre de la R-D, en revalorisant l'enseignement et en planifiant le développement des ressources humaines, en attirant les capitaux et la technologie de l'étranger et en adoptant des législations spéciales.

Ces politiques visant à associer le secteur privé à la promotion de la science et de la technologie ont donné des résultats notables. Sous leur impulsion, le secteur privé a entrepris des efforts dans deux directions distinctes. D'une part, il s'est lancé dans la R-D industrielle. De l'autre, il a amélioré ses propres compétences scientifiques afin de pouvoir exploiter plus facilement la science et la technologie étrangères.

Si les gouvernements des NPI ont réussi à un point exceptionnel à stimuler le secteur privé sur ces deux fronts, c'est parce qu'ils ont su gérer intelligemment tous les aspects du développement et adapter avec flexibilité leurs politiques de promotion de la S et T aux besoins de ce secteur. C'est ainsi, en particulier, que les entreprises privées de ces pays ont pu avoir accès à la technologie étrangère grâce à une gestion des investissements centralisée par des organismes gouvernementaux tels que le Comité de délibération sur les mesures d'incitation de l'investissement étranger (FCIDC) en République de Corée ou le Centre de développement et d'investissement industriels (IDIC) à Taiwan. C'est ainsi également que des arrangements de collaboration novateurs tels que zones franches pour l'industrie d'exportation et zones de libre-échange ont permis d'attirer de nouvelles technologies pour le bénéfice des fabricants locaux.

Au fil du temps, les trois républiques récemment industrialisées ont intégré les composantes publiques et privées de leurs politiques scientifiques et technologiques. L'infrastructure publique de S et T et les industries privées basées sur la science et la technologie ont conjugué leurs efforts, le renforcement de la première permettant aux secondes

d'acquérir la technologie étrangère à de nouvelles conditions, en étant plus étroitement associées au partage des technologies et à leur meilleure diffusion. Ce renforcement des capacités scientifiques et techniques du secteur privé a facilité les efforts des gouvernements pour doter leur pays d'industries à plus grande valeur ajoutée. Les capacités endogènes des NPI leur permettent aujourd'hui d'innover, et Taiwan et Singapour viennent de se lancer dans la « course aux découvertes » déjà engagée par la République de Corée dans le domaine de l'électronique et de la technologie des microprocesseurs.

Rétrospectivement, le succès des NPI dans le domaine de la science peut s'expliquer par plusieurs facteurs. Avant tout, les gouvernements de ces pays ont réussi, par le biais de leurs politiques de développement, à lier leurs industries aux économies des pays occidentaux, à contrôler les investissements étrangers et à faciliter la collaboration avec les sociétés transnationales, grâce à quoi le secteur privé a pu maîtriser les technologies importées pour les mettre au service du développement industriel. Aidées par les politiques gouvernementales et des organismes judicieusement gérés, les entreprises privées ont pu également réaliser leur intégration verticale et renforcer leurs propres capacités techniques jusqu'au point où elles ont été capables d'innover.

C'est là ce qui fait l'originalité profonde de la stratégie de développement fondée sur la S et T des nouveaux pays industrialisés. Jusqu'à présent, les autres pays en développement n'ont pas su combiner leurs efforts pour promouvoir la science et la technologie locales et leur gestion de la science et de la technologie importées de façon à se doter des capacités endogènes qui leur permettraient de reproduire l'industrialisation tardive des NPI. Ils demeurent de ce fait mal préparés pour un développement fondé à l'avenir sur la science. Pendant ce temps, la République de Corée, qui fut le premier NPI d'Asie à reconnaître explicitement l'importance de la science et de la technologie endogènes, a réduit son écart avec le Japon, Singapour s'efforce d'améliorer ses propres capacités dans ce domaine, de même que Taiwan avec son Plan décennal de développement de la science et de la technologie (1986-1995); Hong Kong cherche également à corriger ses déficiences en matière de S et T.

**TABLEAU 5**  
**DÉPENSES DE R-D DES NPI EXPRIMÉES EN TERMES RÉELS ET EN POURCENTAGE DU PNB**

	1981		1985		1990	
	Valeur	% PNB	Valeur	% PNB	Valeur	% PNB
République de Corée <sup>1</sup>	418	0,64	12 980,0	1,48	4 481	1,91
Taiwan <sup>2</sup>	16 414	0,93	28 702,0	0,98	71 500	1,65
Singapour <sup>3</sup>	81	0,3	241,3	0,6	572	1,10

1. En millions de dollars des États-Unis. 2. En millions de dollars de Taiwan. 3. En millions de dollars singapouriens.

## LES TENDANCES ACTUELLES DE LA SCIENCE

La préoccupation actuelle des NPI est de poursuivre sur leur lancée. Aussi la promotion de la science et de la technologie occupe-t-elle une place importante dans leurs politiques de l'éducation, de la recherche et du développement industriel. En témoignent le niveau élevé des dépenses nationales de R-D dans les trois républiques et leur accroissement continu en termes réels et en pourcentage du PNB, lui aussi en expansion (tableau 5).

A l'heure actuelle, la part de l'État dans les dépenses de R-D varie considérablement d'un pays à l'autre. Elle est de toute évidence beaucoup plus élevée à Taiwan et à Singapour qu'en République de Corée, où elle est tombée à 16 %, comme au Japon (tableau 6). Toutefois, elle a récemment diminué aussi à Taiwan et à Singapour, alors que la part du secteur privé augmente rapidement.

Des raisons historiques expliquent le niveau plus élevé des dépenses publiques de R-D à Taiwan et à Singapour, où les politiques adoptées vers le milieu des années 80 visaient à intensifier les efforts de l'État dans le domaine de la science et de la technologie plutôt que de s'en remettre aux entreprises privées. C'est ainsi que le premier Programme

de développement scientifique et technique de Taiwan (1979) définissait huit grands projets de S et T conçus pour accélérer le développement économique, accroître le bien-être social, consolider la défense nationale et promouvoir la modernisation. En 1980, le gouvernement de Singapour a adopté une nouvelle stratégie consistant à appuyer les activités de R-D dans les centres de recherche, les universités et les industries, et a incité les petites et moyennes entreprises à mettre au point des produits à plus forte valeur ajoutée.

L'exemple coréen donne à penser que les dépenses publiques de R-D vont continuer de décliner à Taiwan et à Singapour. La recherche-développement est à présent entre les mains du secteur privé dans les quatre NPI, qu'elle ait été auparavant financée par l'État ou laissée à la libre entreprise. Les différences historiques entre Taiwan et la République de Corée d'une part et Singapour et Hong Kong de l'autre se trouvent donc atténuées.

Cette tendance à la privatisation de la recherche est le résultat de politiques et de facteurs gouvernementaux qui ont permis de promouvoir la R-D dans les grandes, moyennes et petites entreprises, d'attirer la S et T de l'étranger en créant des parcs de la science et de développer la R-D locale. Elle s'explique aussi par l'aide jamais démentie de l'État à la recherche-développement. C'est ainsi qu'à Taiwan l'État subventionne la mise au point de composants et de produits clés et contribue à promouvoir les cinq industries prioritaires — électronique grand public, informatique, communications, automatisation et matériaux de pointe. L'assouplissement des dispositions réglementaires touchant les investisseurs étrangers et des règles régissant les prises de participations étrangères, les mesures destinées à faciliter l'importation de technologie et, plus encore, les changements apportés aux méthodes de l'administration ont favorisé cette évolution. On cherche désormais à atteindre les

**TABLEAU 6**  
**PART DE L'ÉTAT DANS LES DÉPENSES DE R-D**  
**DES NOUVEAUX PAYS INDUSTRIALISÉS (%)**

	1981	1985	1990
République de Corée	44	19	16
Taiwan	53	60	46
Singapour	45	50	46

objectifs de la planification par des mesures d'incitation plutôt que par un contrôle direct, et ceux de la recherche par des arrangements de collaboration avec le secteur privé, lequel est encouragé à accroître ses dépenses de R-D afin de conquérir des créneaux de haute technicité. L'État se contente de superviser et de faciliter l'amélioration des industries de transformation.

Les récents programmes spéciaux de recherche fondamentale et les prix récompensant les chercheurs dans les nouveaux pays industriels, dont plusieurs encouragent la collaboration dans le domaine des technologies de pointe, témoignent de cette nouvelle conception du rôle de l'État. Le Plan sexennal à moyen terme (1991-1996) de Taiwan prévoyait en 1992 des projets de R-D visant à accélérer le progrès scientifique et technique sous tous ses aspects en coopération avec le secteur privé. A Singapour, le Bureau national de la science et de la technologie a financé en 1991 douze projets de R-D menés conjointement par l'État et des entreprises privées, d'un coût de 11 millions de dollars singapouriens, soit le double du montant de l'année précédente, et un Centre de technologie magnétique a été créé en 1992 en association avec le secteur privé en vue de renforcer la recherche-développement sur les nouveaux matériaux. Dans ce pays comme à Taiwan et en République de Corée, ces activités menées en collaboration ont pour cadre des parcs de la science et de la technologie financés par des organismes publics. De telles mesures ont permis aux NPI d'Asie d'arriver en tête des pays en développement en ce qui concerne la coopération entre l'État, les universités et le secteur privé en matière de recherche.

Les gouvernements de ces pays continuent de prendre une part essentielle au financement et à la conduite de la R-D, en particulier aux stades initiaux de l'acquisition de technologies de pointe et dans les disciplines fondamentales. C'est ainsi que Singapour finance aujourd'hui huit instituts de recherche, ainsi que les départements de R-D d'organismes publics. L'État joue également un rôle de premier plan en matière de gestion. Cela tient en partie à l'inertie des vieilles institutions qui tardent à mettre la S et T au service du développement, et en partie au fait que les entreprises d'État qui, en République de Corée, à Taiwan et à Singapour, ont été les premiers clients de l'enseignement scientifique et technique et les premiers demandeurs d'équipements de R-D ou de chercheurs qualifiés, nouent à présent des liens de collaboration en aval avec le secteur privé en vue d'innover. Les premiers succès enregistrés sur cette

voie par la République de Corée ont incité les deux autres républiques à suivre son exemple. Singapour a créé des sociétés et des instituts de recherche publics qui ont permis depuis 1988 de promouvoir la R-D dans le domaine de l'automatisation et des biotechnologies, et de former en 1991 des chercheurs du secteur privé dans le cadre d'un programme d'échange.

La production scientifique des NPI s'est trouvée déséquilibrée du fait que l'on a d'abord privilégié les applications au service du développement. On constate ainsi une très grande disparité entre le nombre de brevets déposés et celui des publications scientifiques. D'une part, l'augmentation du nombre de brevets témoigne de l'importance encore accordée à la recherche appliquée. La République de Corée a délivré 1 808 brevets en 1981 et 3 972 en 1989. Taiwan en a délivré 6 265 en 1981 et 10 123 en 1991, et Hong Kong un millier environ chaque année depuis 1985, quoique en grande partie à des étrangers. Si les inventions sont surtout brevetées par des étrangers à Taiwan, les dessins et modèles d'utilité sont à présent déposés en majorité par des autochtones. Le succès des NPI dans le domaine des sciences et des techniques appliquées se mesure également au nombre de brevets déposés aux États-Unis d'Amérique par des ressortissants taiwanais et coréens, dont les pays se sont classés respectivement au 11<sup>e</sup> et au 16<sup>e</sup> rang en 1990 avec 807 et 236 dépôts de brevets. Mais, d'autre part, le *Science Citation Index* place les NPI loin derrière d'autres pays en développement en ce qui concerne le nombre de publications scientifiques et techniques (tableau 7).

Ce déséquilibre historique est toutefois en passe d'être corrigé. C'est ainsi que Taiwan s'est hissé du 37<sup>e</sup> au 28<sup>e</sup> rang entre 1985 et 1990 pour le nombre de publications scientifiques. Le pays s'est également assuré une place de premier plan dans le domaine de la recherche indus-

TABLEAU 7  
NOMBRE DE PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES  
DANS LES NOUVEAUX PAYS INDUSTRIALISÉS

	1988	1989	1990	Rang dans le monde 1990
Taiwan	2 001	2 302	2 861	28
Rép. de Corée	1 227	1 567	1 780	33
Hong Kong	904	1 081	1 150	40
Singapour	653	739	843	44

trielle, où il s'est classé au 13<sup>e</sup> rang mondial en 1990, en même temps qu'il arrivait troisième, après les États-Unis et le Japon, dans le domaine de l'électronique, des techniques de l'information et des télécommunications.

Les effectifs de la R-D ont augmenté très rapidement. A Singapour, la proportion de chercheurs dans la population active est passée de 8 à 27 pour 10 000 entre 1978 et 1988 et a atteint 32 pour 10 000 en 1991. La République de Corée a porté cette proportion de 1 à 16,4 pour 10 000 de 1965 à 1990, date à laquelle elle était encore devancée par Taiwan (22,6 pour 10 000). Les chiffres les plus récents suggèrent une accélération de cette tendance (tableau 8).

La demande croissante de chercheurs s'est traduite par une augmentation spectaculaire du nombre des inscriptions dans l'enseignement supérieur, et en particulier dans les instituts universitaires de recherche. En République de Corée, ce nombre a été multiplié par dix depuis 1970. Cet accroissement s'est accompagné d'une rapide augmentation des dépenses de R-D des établissements d'enseignement supérieur. A Singapour, les dépenses de R-D des deux universités sont passées en termes réels de 24,3 millions de dollars singapouriens en 1981 à 180,42 millions en 1992, bien que la part de ces établissements dans l'effort national de recherche-développement ait diminué durant la même période. Hong Kong a connu une croissance analogue et possède à présent sept établissements d'enseignement supérieur dont les activités de recherche sont financées par le Comité des subventions aux universités et instituts universitaires de technologie. Le dernier-né de ces établissements, l'Université de science et de technologie de Hong Kong, a été expressément créé pour faire avancer la recherche dans le domaine des sciences, de la technologie et des disciplines de l'ingénieur, le Territoire entendant fonder son économie sur les techniques de pointe malgré l'absence de grands laboratoires de R-D publics ou privés.

### LES TENDANCES RÉGIONALES

Les nouveaux pays industrialisés d'Asie sont donc aujourd'hui un modèle à tous égards sur le plan scientifique, parce qu'ils ont fait de la S et T la base première de leur développement, parce que les politiques et les méthodes de gestion de leurs gouvernements sont remarquables par leur flexibilité, mais aussi et surtout parce qu'ils sont la preuve que la science et la technologie sont la clef de l'avenir pour tous les pays en développement.

TABLEAU 8  
NOMBRE DE CHERCHEURS (SCIENTIFIQUES ET INGÉNIEURS)  
DANS LES NOUVEAUX PAYS INDUSTRIALISÉS

	1981	1990	1991
République de Corée	20 718	70 503	nd
Taiwan	19 604	46 060	nd
Singapour	2 741	4 329	5 019

Les NPI continuent de renforcer leurs capacités scientifiques et techniques tout en acquérant à l'étranger les nouvelles technologies nécessaires à leur développement industriel. Après avoir usé de toute la gamme des mesures réglementaires pour associer toujours plus le secteur privé à la promotion de la S et T, leurs gouvernements sont à présent dans une phase de désengagement. Leurs capacités endogènes permettent aujourd'hui aux NPI d'accomplir un saut technologique dans le futur en adaptant leurs activités de R-D à leurs nouveaux objectifs nationaux, comme l'a fait la République de Corée lorsque son industrie de l'électronique a délaissé la fabrication de puces pour se tourner vers des produits à plus forte valeur ajoutée. De plus, des problèmes environnementaux commençant à surgir, ces capacités sont mises au service de nouvelles priorités.

Les NPI d'Asie restent néanmoins confrontés à un certain nombre de difficultés dans le domaine de la science. Ils ont conscience de la nécessité de relever leur niveau scientifique et technique général, encore inférieur à celui des États-Unis d'Amérique et de l'Europe, en particulier sur le plan de l'innovation technologique. Même la République de Corée et Taiwan, les deux plus prospères d'entre eux, n'échappent pas à ces problèmes. En dépit de progrès rapides, leurs capacités technologiques, rapportées à celles des États-Unis et du Japon, accusent un retard considérable (6,0 et 9,2, selon un indice de 1987, contre 100 pour les États-Unis et 99,5 pour le Japon). De plus, bien que la République de Corée et Taiwan aient réussi à augmenter leurs exportations de produits de forte technicité, leurs achats de technologie ont progressé à un rythme plus rapide, d'où un déséquilibre de leur balance des paiements dans ce domaine, de sorte que rien n'est encore joué en ce qui concerne la science dans tous ces pays.

**SOGO OKAMURA** est Président de l'Université Denki de Tokyo, Conseiller principal auprès du recteur de l'Université des Nations Unies et professeur honoraire à l'Université de Tokyo.

Outre ses responsabilités universitaires, le professeur Okamura a été vice-président du Comité de la politique scientifique et technologique de l'OCDE, président de la Division des sciences de la Commission nationale japonaise pour l'UNESCO, président de la Division des sciences de l'ingénieur du Conseil des sciences du Japon, président du Conseil de régulation de la Radio japonaise et directeur général de la Société du Japon pour la promotion de la science. M. Okamura exerce des fonctions au sein de plusieurs associations professionnelles et a reçu de nombreux prix dans son pays en récompense de ses services.

**REG HENRY** est maître de conférences en politiques de l'environnement et de la science à l'Université Griffith de Brisbane (Australie). Après des études de droit et de science politique à l'Université de Melbourne et l'Université de la Trobe, M. Henry a enseigné en qualité de professeur principal en Inde et à l'Université Griffith. Il a travaillé à plusieurs occasions comme consultant auprès de l'UNESCO, notamment dans le cadre de la conférence ministérielle régionale sur la science et la technologie, CASTASIA II.

#### LECTURES COMPLÉMENTAIRES

- Amsden, A.H. 1989. *Asia's next giant : South Korea and late industrialization*, New York, Oxford University Press.
- Arnold, W. 1989. Science and technology development in Taiwan and South Korea, *Asian Survey*, XXVIII(4), avril 1989, p. 437-450.
- Berger, P.L. et Hsiao, H.H.M. (dir. publ.). 1988. *In search of an East Asian developmental model*, New Brunswick/Oxford, Transaction Books.
- Chine, République de. 1989. *National science and technology development*, Taipei (Taiwan), Science and Technology Advisory Group (Yuan exécutif).
- 1990. *NSC Review 1989-90*, Taipei (Taiwan), National Science Council.

- 1991. *Indicators of science and technology*, Taipei (Taiwan), National Science Council.
- Corée, République de. 1991. *Report on the survey of research and development in science and technology*, Séoul, Ministère de la science et de la technologie.
- Japon, gouvernement du. 1992. *Directive générale pour une politique de la science et de la technologie*.
- Johnson, C. 1987. Political institutions and economic performance : the government-business relationship in Japan, South Korea and Taiwan, dans Deyo, F. C. (dir. publ.), *The political economy of the new Asian industrialism*, Ithaca/Londres, Cornell University Press.
- King, C.M.L.L.; Nga, T.B. et Tyabji, A. 1986. *Technology and skills in Singapore : effective mechanisms for the enhancement of technology and skills in Singapore*, Singapour, Institute of Southeast Asian Studies.
- Kodama, F. 1991. *Analyzing Japanese high technologies : the techno-paradigm shift*, Londres, Pinter.
- Korea Industrial Research Institutes. 1989. *Major indicators of industrial technology 1989*, Séoul, KIRI.
- Kuo, N.H. 1992. *Accelerating the development of practical science and technology in ROC*, Taipei (Taiwan), Science and Technology Advisory Group (Yuan exécutif).
- Rushing, F.W. et Granz Brown, C. (dir. publ.). 1986. *National policies for developing high technology industries. International comparisons*, Boulder/Londres, Westview Press.
- Science and Technology Agency. 1992. *White paper on science and technology 1991, globalization of scientific and technological activities and issues Japan is facing*, Tokyo, Japan Information Centre of Science and Technology.
- Science Council of Singapore. 1990. *Annual report 1988-89*.
- Singapour, République de. 1992. *Synergy*, 3, Singapour, National Science and Technology Board.
- Steering Committee Taiwan 2000 Study. 1989. *Taiwan 2000*, Taipei (Taiwan).
- UNESCO. 1985. *La science et la technologie dans les pays d'Asie et du Pacifique. Politiques, organisation et ressources*, Paris, UNESCO. (Études et documents de politique scientifique, n° 52.)
- 1990. *Annuaire statistique 1990*, Paris, UNESCO.

## L'AUSTRALIE ET L'ASIE DE L'EST

Reg Henry

Le progrès de la science et de la technologie dans la région de l'Asie de l'Est a été stimulé par la réussite économique du Japon, qui s'est faite sur des bases scientifiques et techniques, et encouragé par les succès plus récents des quatre « nouveaux pays industrialisés » (NPI) asiatiques. Ces pays — la République de Corée, Taiwan, Singapour et Hong Kong — ont démontré les effets positifs de la S et T sur le développement économique en améliorant leur productivité et leur croissance par une gestion avisée de la science. Les pays voisins — Indonésie, Thaïlande, Malaisie, Philippines — ont tenté de reproduire le succès économique des NPI en imitant leurs méthodes de gestion de l'activité scientifique. Et ils ont de fortes chances de parvenir à une croissance industrielle

du même ordre, car ils possèdent déjà des institutions et une infrastructure très proches et certaines capacités d'un niveau comparable en matière de science et de S et T.

La tendance récente à gérer la science à l'exemple des NPI apparaît logique dans une région où les bases scientifiques sont les mêmes et où les organismes chargés de promouvoir la science et les problèmes rencontrés sont de nature comparable. Ainsi, des services scientifiques publics et des universités créés sur un modèle analogue durant l'ère coloniale ont été, après l'indépendance, semblablement développés et réorganisés pour servir les mêmes objectifs scientifiques et techniques en faveur du développement. C'est pourquoi, dans toute la région, des ministères coordonnent la politique scientifique, dirigent et financent les recherches menées dans les universités et les organismes publics, stimulent et guident la recherche privée, et soutiennent et supervisent tous les aspects de l'infrastructure scientifique et technique. Les difficultés rencontrées par ces systèmes organisationnels ont poussé certains pays d'Asie de l'Est à se doter des mêmes institutions que les NPI en vue d'acquiescer, d'adapter ou de créer de nouvelles capacités scientifiques et techniques ou d'encourager la recherche-développement (R-D) privée. Tous les gouvernements de la région ont donc entrepris d'inciter le secteur privé à renforcer, comme au Japon, ses capacités scientifiques.

S'il est logique que des pays en développement prennent exemple sur les NPI, l'influence de ces derniers sur la politique scientifique de pays développés tels que l'Australie et la Nouvelle-Zélande a de quoi surprendre. Cherchant à reproduire le succès des NPI, l'Australie réorganise des institutions scientifiques établies de longue date et redéfinit le rôle de la science. Cela tient en partie aussi au mode d'organisation régional, selon lequel l'État prend à sa charge et centralise tous les aspects de la politique scientifique et technologique. Le Gouvernement australien est certes conseillé par des organes spécialisés, tels que le Conseil australien de la science et de la technologie et les académies ou les conseils sectoriels, mais il garde le contrôle de la politique scientifique. Il joue également un rôle prédominant dans le domaine de la recherche, puisque 60 % des activités de R-D sont menées par des organismes publics tels que l'Organisation du Commonwealth pour la recherche scientifique et industrielle (CSIRO), l'Organisation australienne pour la

TABLEAU 1  
SOUTIEN DU GOUVERNEMENT AUSTRALIEN  
AUX GRANDS PROGRAMMES SCIENTIFIQUES  
ET A L'INNOVATION (en millions de dollars australiens)

	1990- 1991	1991- 1992	Évolution en termes réels
CSIRO	421,1	448,2	+3%
DSTO	227,2	221,1	-6%
Autres centres de R-D	211,6	222,4	+0%
Conseil australien de la recherche	172,4	241,8	+37%
Autres laboratoires de R-D de l'enseignement supérieur	815,0	840,0	-6%
Centres de recherche en coopération	nd	19,5	nd
Participation et aide à la R-D industrielle	360,4	361,7	-3%
R-D rurale	82,2	104,7	+23%
Conseil de la santé publique et de la recherche médicale	94,7	103,3	+6%
Autre R-D en matière de santé	11,6	18,7	+56%
Autres subventions à la R-D	26,2	26,0	-4%
Total	2 422,0	2 607,0	+4,3%

Source : Science and Technology Budget Statement 1991-1992, Australian Government Publishing Service, Canberra, 1991.

TABLEAU 2  
PROGRESSION DES DÉPENSES DE R-D ET DES DÉPÔTS DE BREVETS A L'ÉTRANGER DURANT LES ANNÉES 80 EN AUSTRALIE  
ET DANS D'AUTRES PAYS DE L'OCDE

	Moyenne pour 19 pays de l'OCDE			Australie		
	1981 ou année la plus proche (par unité PIB)	1989 ou année la plus proche (par unité PIB)	Progression annuelle moyenne en termes réels (%)	1981 ou année la plus proche (par unité PIB)	1989 ou année la plus proche (par unité PIB)	Progression annuelle moyenne en termes réels (%)
Dépenses brutes de R-D	1,55	1,87	+5,7%	1,00	1,23	+6,7%
Dépenses publiques de R-D	0,71	0,74	+3,3%	0,73	0,67	+2,2%
Financement privé de la R-D	0,78	1,05	+8,0%	0,24	0,52	+15,2%
Dépenses de R-D des organismes publics et des universités	0,61	0,65	+3,7%	0,75	0,72	+2,4%
Dépenses de R-D des entreprises commerciales	0,91	1,18	+7,4%	0,25	0,51	+14,0%
Brevets déposés à l'étranger par des résidents <sup>1</sup>	5,8	8,8	+9,2%	2,7	6,1	+17,5%

1. Le numérateur n'étant plus exprimé en monnaie nationale, le PIB est calculé en millions de dollars des États-Unis à prix constants de 1985.

Source : *Science and Technology Budget Statement 1991-92*, Australian Government Publishing Service, Canberra 1991.

science et la technologie nucléaires, l'Institut australien des sciences de la mer ou l'Organisation pour la science et la technologie de la défense (DSTO), ainsi que par les universités.

C'est l'exemple des NPI qui a incité à réorienter la politique de la recherche en faveur de disciplines trouvant des applications dans les secteurs industriel et manufacturier. La comparaison avec ces mêmes pays a amené à juger la R-D australienne incapable d'alimenter le développement économique ou de renforcer la compétitivité sur les marchés internationaux. La R-D industrielle privée apparaît encore insuffisante — bien que sa part dans l'effort national de R-D soit passée de 20 à 40 % en dix ans — sur la base de comparaisons peu flatteuses avec la Corée et le Japon. De plus, des études officielles sur l'état de la recherche en Australie ont préconisé des changements structurels explicitement fondés sur l'expérience des NPI. Il a ainsi été recommandé en 1987 d'améliorer les liens avec les secteurs productifs en réorganisant les nombreux départements de recherche de la CSIRO et leurs 7000 employés pour les répartir entre six grands instituts, et en créant un Département de l'industrie, de la technologie et du commerce (DITAC) à la place d'un Ministère de la science et de la technologie. Le développement de compétences répon-

dant aux besoins économiques en restructurant l'enseignement supérieur et en articulant la recherche scientifique et technique universitaire à l'industrie était un autre objectif à atteindre.

Malgré les différences existant entre l'Australie et les autres pays de l'Asie de l'Est, comme le pourcentage du produit intérieur brut consacré aux dépenses de R-D (1,3 % contre 0,2 ou 0,3 %), la principale caractéristique de la recherche scientifique dans la région est sa très forte institutionnalisation. C'est cette caractéristique qui donne à penser que les résultats obtenus par les NPI en s'appuyant sur la recherche sont tout à fait à la portée d'autres pays et c'est elle qui explique que les gouvernements de la région aient tendance à encourager la coopération entre chercheurs du secteur public et du secteur privé, à affiner les instruments de leurs politiques, à réformer l'infrastructure et à coordonner les opérations en vue d'optimiser les avantages concurrentiels. Leurs objectifs communs sont d'asseoir la croissance sur le développement des technologies de pointe, de répondre aux exigences du marché et d'attirer les investissements. Quel qu'en soit le résultat, ces changements apportés aux structures et aux politiques assurent à la recherche scientifique un rôle central dans l'avenir de la région.

## **2** LES SYSTÈMES DE SCIENCE ET TECHNOLOGIE

---

## LES INSTITUTIONS

*Pierre Papon et Rémi Barré*

L'essor de la recherche scientifique et le développement technologique sont une grande aventure dont aucune société n'a eu le monopole. En effet, la Chine et les pays musulmans étaient parvenus à donner une forme relativement organisée et développée à l'activité scientifique bien avant les pays européens, et la paternité de grandes découvertes dans les domaines du magnétisme, de l'acoustique et de l'optique leur revient. La place éminente qu'occupent aujourd'hui la science et la technologie dans nos sociétés est donc le résultat d'une très longue évolution qui a abouti progressivement à l'émergence de la « science moderne » et de savoirs techniques qui ont donné corps à la technologie : les sciences et les techniques sont, les unes et les autres, un produit de l'histoire.

Chaque civilisation a imprimé sa marque à une organisation sociale qui permet de poursuivre une activité scientifique et technologique en symbiose plus ou moins étroite avec la société. Ainsi, presque toutes les grandes villes du monde islamique possédèrent-elles très tôt un observatoire astronomique. Ceux de Bagdad, du Caire, de Samarkand ont joué un grand rôle dans le développement de l'astronomie dès le IX<sup>e</sup> siècle. De même, en Chine, l'État impérial s'était-il doté d'un service public aux fonctions multiples au sein duquel les sciences et les techniques tenaient une place importante. L'astronomie était en quelque sorte considérée comme une science officielle car, dans un pays agraire, les astronomes étaient employés à la confection de calendriers ; il en était de même pour les mathématiques, la physique et surtout l'hydraulique. La plupart des sociétés ont donc cherché très tôt à donner une forme stable à l'activité de production de connaissances scientifiques et technologiques, ce que nous appelons aujourd'hui la recherche et le développement technologique.

Toutefois, c'est en Europe occidentale que la science a pris une forme institutionnelle stable, à l'époque de la Renaissance, où elle a pu affirmer son autonomie par rapport à la philosophie et à la théologie. Pendant longtemps, l'activité des savants (on ne l'appelait pas encore « recherche scientifique ») aura pour siège des académies ou les chaires d'enseignement des universités et des grandes écoles. La première institution scientifique moderne fut très probablement l'Academia dei Lincei, fondée à Rome en 1609, à laquelle appartient Galilée. Les académies des sciences de

Londres et de Paris (créées respectivement en 1662 et en 1666) étaient de véritables innovations institutionnelles ; elles avaient pour objectif de substituer à la spéculation purement philosophique l'observation et l'expérience. Elles instituaient aussi un nouveau mode de relation entre la science et le pouvoir politique puisqu'elles officialisaient dans la société la « recherche scientifique ».

Depuis lors, la logique de la découverte scientifique s'est institutionnalisée peu à peu. Le contexte a changé progressivement au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, car des scientifiques, des administrateurs avisés d'universités ainsi que certains hommes politiques clairvoyants prirent conscience en Europe que la production des connaissances scientifiques ne pouvait plus seulement être une affaire d'individualités brillantes isolées. La recherche scientifique requiert des moyens importants : des laboratoires et des équipements complexes, des professeurs aidés par des assistants, des étudiants, des équipes de chercheurs et de techniciens. Des instituts de recherche ont donc été créés dans les universités puis sous forme d'établissements autonomes. L'Allemagne fut la première à comprendre la nécessité de créer une organisation nouvelle de la recherche pour répondre aux nouveaux enjeux. La création, en 1911, de la société Kaiser Wilhelm pour la recherche (devenue aujourd'hui la société Max Planck) était un véritable tournant : pour la première fois un État, l'Allemagne, créait des instituts de recherche en dehors du système universitaire.

À la même époque, l'industrie créait, elle aussi, ses propres laboratoires de recherche ; les découvertes scientifiques étaient la source d'innovations technologiques de premier plan, en particulier dans le domaine de la chimie.

Aujourd'hui, la science et la technologie sont des composantes essentielles de l'activité humaine dans les sociétés modernes. Le soutien à la recherche scientifique qui produit des connaissances nouvelles, la promotion de l'innovation technologique, le lancement de grands programmes scientifiques ou technologiques sont désormais parties intégrantes des politiques publiques — avec leurs composantes industrielles et militaires — ainsi que des stratégies d'entreprises. Lancer des programmes de recherche, valoriser les résultats obtenus par les laboratoires publics, promouvoir les innovations et les stratégies de recherche industrielle, répondre à la demande sociale, monter des programmes de coopération

internationale, former des spécialistes, requièrent une pluralité d'acteurs, d'institutions, de procédures pour la prise de décision. Tout cela constitue un véritable « système » de la science et de la technologie, qui a ses composantes nationales et internationales. Les politiques nationales de la recherche et de la technologie et celles des groupes industriels ont la tâche de faire vivre et évoluer ce système avec ses institutions publiques et privées, de mettre au jour les enjeux, d'opérer les choix et les arbitrages nécessaires, dans le cadre de stratégies porteuses d'ambitions collectives.

## LES GRANDES FINALITÉS DE LA RECHERCHE ET DE LA TECHNOLOGIE

La recherche scientifique ainsi que la plupart des activités de développement technologique exigent aujourd'hui la mobilisation de compétences d'un très grand nombre de professionnels : universitaires, chercheurs, ingénieurs, techniciens. Le monde de la science et de la technologie s'est professionnalisé. Les finalités de ces activités et donc les fonctions occupées par ces professionnels sont évidemment multiples. On peut très schématiquement les répartir en cinq grandes catégories :

### *La production de connaissances de S et T de base*

Elle est l'objectif essentiel de la recherche de base, ou fondamentale, dont les résultats sont publiés dans des articles de revues scientifiques (près de 75 000 titres de journaux périodiques spécialisés toutes disciplines confondues ont été recensés !) ou diffusés dans des congrès. Elle contribue également à alimenter des bases de données.

### *La formation*

Dans tous les systèmes universitaires, les enseignants sont engagés dans une activité de recherche. Celle-ci constitue une garantie de la qualité de l'enseignement supérieur et elle est formatrice pour les étudiants, en particulier pour ceux qui s'engagent dans la préparation d'une thèse. Il faut souligner qu'aujourd'hui, dans de nombreux pays, cette activité de formation est aussi prise en charge par des chercheurs et ingénieurs de recherche de laboratoires publics et privés.

### *La production de connaissances et d'expertises*

Une partie très importante de l'action gouvernementale consiste à définir des normes et des réglementations techniques à travers divers types de procédures que l'on pourrait

qualifier de « pratique de l'expertise scientifique et de l'évaluation technologique au quotidien » : commissions de contrôle de nouveaux produits chimiques et pharmaceutiques, évaluation des risques industriels et technologiques, suivi de la qualité des eaux, etc. Tous ces travaux s'appuient sur l'expertise de chercheurs (et donc sur une recherche finalisée) qui travaillent pour la plupart au sein d'établissements publics. L'environnement, la santé, l'agro-alimentaire sont des exemples de secteurs concernés par cette activité d'expertise, qui prend une place de plus en plus grande dans nos sociétés. Celle-ci se traduit par des avis, des diagnostics, des rapports analysant des situations, des problèmes techniques de toutes sortes (état d'un environnement, sécurité d'une installation industrielle, etc.).

### *La contribution aux programmes stratégiques de l'État*

Les États modernes ont très souvent des objectifs « stratégiques », au sens large du terme, qui participent d'une logique de puissance : ils veulent disposer de systèmes d'armes complexes, sans dépendre de l'étranger, des satellites pour assurer la maîtrise de leurs télécommunications, et veulent assurer leur indépendance énergétique. Pour atteindre ces objectifs, il faut lancer des programmes de recherche et de développement technologique importants au sein de grands organismes de recherche publics chargés par exemple de la recherche nucléaire ou spatiale. Ces programmes sont également mis en œuvre, dans les pays industrialisés tout au moins, au sein de laboratoires d'entreprises industrielles (du secteur public ou privé) dans des domaines comme l'électronique et l'aéronautique. Les résultats des travaux poursuivis dans ce cadre ne sont en général pas diffusés : ils sont l'enjeu d'une compétition internationale qui n'est pas celle d'un marché libre.

### *La participation à l'innovation industrielle*

Les phases dites de « recherche et développement » précèdent l'innovation, c'est-à-dire la première utilisation ou commercialisation d'un bien ou d'un service. Les chercheurs et les ingénieurs de recherche, tout particulièrement dans les entreprises industrielles, sont donc impliqués dans un processus qui débouche sur la mise au point de nouveaux produits et de nouveaux procédés qui vont être industrialisés et mis sur le marché. Les travaux de recherche, en général de caractère appliqué ou finalisé, obéissent souvent à une logique économique basée sur la promotion

de l'innovation par les entreprises. Il faut souligner cependant que toutes les innovations ne sont pas issues de travaux de recherche. Les bureaux d'études, les services de fabrication, de l'industrie ainsi que le secteur tertiaire sont aussi à l'origine d'innovations (les logiciels sont de plus en plus eux-mêmes des innovations).

On peut dire, par analogie avec la recherche scientifique, que le brevet est le produit de base de l'activité technologique. C'est un bien immatériel, comme une publication scientifique, mais il confère un monopole à celui qui l'a déposé : il a une valeur marchande, ce que n'a pas une publication scientifique. Le brevet reconnaît une invention : un procédé industriel, un nouveau produit, un matériau, etc. Au plan quantitatif, il apparaît que, pour tous les domaines technologiques confondus, 85 000 brevets avaient été déposés aux États-Unis d'Amérique en 1990 par des inventeurs de toutes nationalités et 55 000 en Europe (brevets déposés directement par la « voie européenne »).

L'innovation technologique est aussi incorporée dans les biens d'équipement et les composants de diverses natures qu'une entreprise met au point ou utilise pour produire. Ainsi, une chaîne de production d'automobiles utilise-t-elle de nombreux ordinateurs qui pilotent des robots intervenant dans le processus de fabrication. L'innovation est donc le produit de processus très diversifiés.

L'ensemble de ces activités scientifiques et technologiques, dont certaines sont très anciennes comme on l'a vu, est englobé dans un concept qui a émergé progressivement, au début des années 60, celui de recherche-développement (R-D). Les travaux de l'OCDE sur les statistiques de dépenses de recherche ont joué un grand rôle dans la conception d'une typologie commune, qui correspond à ce que l'on appelle, depuis trente ans, le « manuel de Frascati ». Ce manuel définit trois catégories d'activités de R-D.

La recherche fondamentale regroupe tous les travaux expérimentaux et théoriques entrepris pour acquérir des connaissances de base sur les phénomènes et les faits observables sans que les chercheurs n'aient, *a priori*, de perspectives d'application pour leurs travaux. De grands noms de la science comme Albert Einstein, Max Planck, Venkata Raman, Jacques Monod, et bien d'autres ont travaillé et travaillent dans cet état d'esprit et on peut les qualifier de « fondamentalistes ». La recherche appliquée correspond, elle, aux travaux originaux qui visent à acquérir des connaissances nouvelles en vue d'une application pratique (industrielle par exemple). Louis Pasteur, lorsqu'il entreprit

ses travaux, au XIX<sup>e</sup> siècle, sur la fermentation ou la maladie du ver à soie, faisait de la recherche appliquée, même si certaines de ses découvertes d'alors eurent dans la réalité un caractère « fondamental ». Il reste enfin une troisième catégorie de travaux : le développement expérimental. Il s'agit là de travaux systématiques basés sur des connaissances existantes obtenues grâce à des travaux de recherche ou à l'expérience pratique en vue de fabriquer de nouveaux produits ou de mettre au point de nouveaux procédés industriels. Ainsi, la découverte de nouveaux polymères dans des laboratoires de recherche a permis de fabriquer des matières plastiques, mais le passage à l'industrialisation n'a été possible qu'au prix de travaux de développement nécessitant la construction de pilotes pour des essais et de la mise au point.

On voit comment se situent la recherche fondamentale, la recherche appliquée et le développement par rapport à notre typologie des activités scientifiques et technologiques (nos cinq catégories précédentes). Si la frontière entre recherche fondamentale et recherche appliquée est souvent floue, on peut néanmoins constater que, dans la quasi-totalité des systèmes nationaux de la science et de la technologie, ce sont essentiellement les entreprises et certains organismes technologiques d'État (centres nucléaires civils et militaires, instituts de recherche sur le pétrole par exemple) qui réalisent des travaux de développement en relation, soit avec l'objectif de promouvoir l'innovation industrielle, soit avec des programmes stratégiques des États. La recherche fondamentale est très souvent liée à la formation; la recherche appliquée est présente aussi bien dans les institutions produisant des connaissances et des expertises nécessaires aux politiques publiques que dans celles impliquées dans la mise en œuvre de programmes stratégiques des États, et bien sûr dans les laboratoires de recherche industrielle.

Comme toute classification, celle du « manuel de Frascati » prête le flanc à la critique. Pourquoi, pourrait-on dire, vouloir disposer d'une taxonomie des activités scientifiques et technologiques qui fasse l'unanimité! Ce souci de classification, en fait, n'est pas seulement une obsession de statisticiens ou d'administrateurs de la recherche et de la technologie. Il est motivé, en effet, dans chaque pays, par la volonté des autorités politiques et administratives et des responsables d'entreprises de posséder les bases pour des choix de stratégies.

Il faut reconnaître d'ailleurs que si la notion de développement est à peu près claire lorsqu'elle se réfère à des activi-

tés industrielles, elle est par contre plus floue lorsqu'il s'agit d'activités à finalité militaire (la mise au point de nouvelles armes). Les ministères de la défense des grands pays industriels (États-Unis d'Amérique, France, Royaume-Uni, Russie, etc.) classent en effet dans cette rubrique des travaux d'essais de prototypes (comme ceux d'avions militaires par exemple) qui, en général, sont coûteux. Il faudra donc être prudent dans l'analyse des stratégies nationales de R-D, car il faut tenir compte pour certains pays de l'élargissement du concept de développement pour certains travaux à finalité militaire.

De même, la dichotomie recherche fondamentale/recherche appliquée n'est-elle pas toujours pertinente au plan de la pratique scientifique comme au plan budgétaire. Les recherches pour comprendre le rôle du gaz carbonique ou de certaines substances chimiques dans l'effet de serre, par exemple, sont-elles fondamentales ou appliquées? La distinction est parfois spéculative, il faut bien le reconnaître. Dans certains pays, industrialisés ou en développement, où le secteur public de la recherche est très important, on est conduit à discerner au sein des dépenses publiques de recherche-développement, d'une part celles affectées à la recherche fondamentale (ou de base) et, d'autre part, celles qui concernent des programmes de recherche d'intérêt collectif.

Dans des domaines comme la santé publique, l'environnement, l'énergie, les télécommunications et les transports, des organismes de recherche publics exécutent des recherches de base et appliquées qui sont en relation directe avec des missions publiques au sens large du terme : améliorer la santé de nos concitoyens, comprendre les évolutions de notre environnement, etc. Une partie très notable de leurs travaux étant donc « finalisée », nous pouvons considérer qu'il s'agit d'une recherche « finalisée » qui vise à répondre à une demande sociale. Dans la terminologie anglo-saxonne de la R-D, cette recherche est qualifiée de « *mission oriented* ». Cette recherche finalisée est, en quelque sorte, une activité à la frontière de la recherche fondamentale et de la recherche appliquée. On peut classer dans cette catégorie une grande partie des travaux dans les sciences biomédicales (par exemple, ceux sur le virus du sida, les maladies tropicales, l'épidémiologie, etc.), dans le domaine de l'environnement, de la maîtrise de l'énergie, dans les sciences de l'ingénieur, les recherches technologiques de base en informatique et en robotique, etc. Ces travaux sont menés dans des instituts, conseils, agences de recherche de statut public.

## LES ACTEURS DANS LES SYSTÈMES NATIONAUX DE S ET T

Les acteurs de la science et de la technologie (les institutions publiques, les laboratoires des entreprises, les chercheurs, les ingénieurs de recherche, les techniciens et les personnels administratifs) constituent les systèmes nationaux de la science et de la technologie. Certes, chaque pays a façonné son système national de la recherche et du développement technologique en fonction de son histoire, de sa culture et de ses traditions propres. Il reste qu'au-delà des formes institutionnelles, nécessairement spécifiques à chaque pays, il est possible de présenter ce qui est un système de R-D technologique en général, en mettant en évidence les grands types d'acteurs définis par leurs rôles et leurs fonctions au sein du système.

### *Les établissements universitaires*

Historiquement, ce sont les universités qui ont fondé les premiers laboratoires de recherche, du moins en Europe (des observatoires astronomiques avaient été créés, très tôt on l'a vu, dans les pays islamiques, en Chine et en Inde). Les laboratoires de recherche dans les établissements d'enseignement supérieur (universités « classiques », instituts polytechniques, écoles d'ingénieurs indépendantes) jouent deux rôles différents : ils forment les scientifiques et les ingénieurs, d'une part, et exécutent de la recherche pour produire de nouvelles connaissances scientifiques et technologiques, d'autre part. L'université est, par tradition et par vocation, le lieu de la formation du personnel scientifique qui a besoin des connaissances fondamentales, des techniques, des méthodes et des réseaux de contacts professionnels nécessaires pour la recherche académique comme pour la recherche industrielle. Le mécanisme privilégié de l'acquisition des connaissances est la préparation et la soutenance d'une thèse par le jeune scientifique. L'université est aussi un des lieux où se poursuit une activité de recherche fondamentale, c'est-à-dire la production de connaissances scientifiques visant, dans un nombre sans cesse croissant de domaines, à la construction de modèles prédictifs qui, pour certains d'entre eux, peuvent avoir des impacts majeurs sur l'innovation technologique par l'émergence d'un nouveau « paradigme » (c'est le cas par exemple, aujourd'hui, avec la relation biologie moléculaire/biotechnologie; ce fut le cas avec les applications de la physique quantique à l'étude des états de la matière).

La caractéristique principale de la recherche de type universitaire est qu'elle est régie par la règle de la publication des connaissances obtenues qui ont donc le statut de biens publics.

Les universités réalisent de 10 à 20 % de la dépense de recherche totale dans les pays industriels développés. Cette proportion est plus importante dans un grand nombre de pays en développement pour lesquels le système académique est l'ossature du dispositif de recherche national. La recherche universitaire est financée principalement par des dotations annuelles budgétaires nationales et, de plus en plus, régionales. Dans les pays industrialisés, une partie croissante du budget de la recherche universitaire provient de contrats industriels et de financements publics sur projets et programmes attribués par des organismes ou des agences de recherche.

#### *Les organismes publics de recherche*

Il s'agit d'institutions qui exécutent des travaux de R-D pour l'État, dans le cadre des diverses responsabilités des pouvoirs publics au-delà de la formation. La recherche, dans de tels organismes, a donc en principe des finalités bien déterminées, correspondant à une mission explicite. Leur statut juridique ainsi que leur dénomination est très variable d'un pays à l'autre et au sein même de chaque pays. Dans la terminologie anglo-saxonne, on les classe sous la rubrique « laboratoires gouvernementaux » ou « recherche des administrations ». Dans d'autres pays, ils s'appellent « instituts », « centres », voire « académies ». Il convient de distinguer trois types d'institution, répondant à des objectifs différenciés :

- 1 Les institutions à vocation « généraliste », qui ont la mission de soutenir la recherche fondamentale dans toutes les disciplines sur programmes, en créant des laboratoires ou instituts avec leurs personnels propres. Le Centre national de la recherche scientifique (CNRS) en France, la Société Max Planck en Allemagne, le Consiglio Nazionale delle Ricerche en Italie, et leurs homologues dans certains pays d'Amérique latine (le CNPq — Conselho Nacional de Desenvolvimento científico e tecnológico au Brésil, par exemple) et d'Asie sont les prototypes de ces institutions créées souvent, en Europe du moins, pour pallier les carences de la recherche universitaire. Les académies des sciences de Russie, de Pologne, de Hongrie et de Chine (Academia sinica) relèvent aussi de cette catégorie. Il faut noter que les liens de ces académies avec la recherche universitaire sont très ténus, voire

inexistants dans certains cas, alors que des organismes de recherche comme le CNRS français ont des liens étroits avec la recherche universitaire.

- 2 Les institutions menant des travaux de recherche nécessaires à l'exercice des responsabilités de gestion et de réglementation de l'État dans les domaines qui sont de son ressort, comme par exemple la santé publique ou l'environnement, mais aussi la gestion de la forêt publique ou des zones maritimes. Les organismes de recherche publics correspondants auront entre autres un rôle d'expertise auprès des pouvoirs publics, notamment dans les processus d'établissement des réglementations ; ils seront, en général, amenés à développer, dans leur champ d'action spécifique, une recherche appliquée (ou finalisée) pour remplir leur mission et soutenir les secteurs professionnels avec lesquels ils sont en relation. Dans beaucoup de pays développés ou en développement, de très nombreux organismes de recherche publics ayant cette mission ont été créés depuis quelques décennies : instituts nationaux ou conseils de recherche médicale, de recherche agronomique, de recherche maritime ou sur l'environnement.
  - 3 Les organismes menant des travaux de recherche nécessaires à l'exercice par l'État de ses responsabilités en matière de grands équipements et d'infrastructures scientifiques et technologiques. C'est le domaine des objectifs stratégiques de l'État qui se matérialisent par la réalisation d'objets technologiques complexes. Entrent dans cette catégorie le domaine spatial, le nucléaire, les télécommunications, les systèmes d'armes avancés ainsi, d'ailleurs, que les très grands équipements scientifiques tels que les accélérateurs de particules, les installations pour la fusion nucléaire, les satellites scientifiques et les navires océanographiques. Il s'agit le plus souvent de projets qui se développent sur le long terme et dont les coûts annuels se chiffrent, dans de très nombreux cas, en centaines de millions de dollars (voire en milliards de dollars pour les accélérateurs du futur). Ces projets vont souvent de pair avec le développement du secteur industriel associé (par exemple l'électronique et l'aérospatial). Ces programmes sont exécutés dans des centres civils ou militaires : commissariat ou centre national de l'énergie atomique, des études spatiales, des télécommunications, etc.
- Le nombre et l'importance de ces organismes publics de recherche varient de manière significative d'un pays à l'autre, compte tenu par exemple des différences de concep-

tion sur la responsabilité des pouvoirs publics ou de la part plus ou moins grande des dépenses militaires. De même la part de ce qui est exécuté en propre par les organismes publics et ce qui est sous-traité à des entreprises industrielles varie beaucoup d'un pays à l'autre.

### *Les institutions publiques de financement de la recherche*

Ce type d'acteur du système de la R-D technologique se différencie des deux précédents en ce qu'il n'exécute pas de recherche lui-même, mais finance des travaux de recherche qui seront exécutés de manière contractuelle dans l'industrie, l'université ou les organismes publics de recherche. Ces recherches sont commanditées par l'agence en question dans le cadre de la mission qui lui a été attribuée par les pouvoirs publics sur une dotation budgétaire spécifique — mission qui, par hypothèse, implique la réalisation de recherches. Les agences ont donc une mission similaire à celle d'un organisme public de recherche mais, n'ayant pas de laboratoires propres, elles sous-traitent la totalité de la recherche : elles ne font pas de recherche, elles la font faire. Elles conservent, il faut le souligner, un rôle essentiel de concepteur, de coordinateur et de gestionnaire de programmes. Ces agences ont dans la plupart des cas un statut d'établissement public leur donnant une grande autonomie. Leur mission peut couvrir la recherche fondamentale, la recherche appliquée ou finalisée, mais très rarement le développement (le domaine spatial est une exception notable). On trouve ainsi dans cette catégorie la National Science Foundation aux États-Unis d'Amérique, la Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) en Allemagne, le Fonds national pour la recherche scientifique en Suisse, la Fondation nationale pour les sciences en Chine; des agences spatiales comme le Centre national pour les études spatiales (CNES) en France, des agences pour les études sur l'environnement, les économies d'énergie, le soutien aux politiques de coopération scientifique, etc.

### *Les laboratoires de recherche industrielle*

Considérés parfois comme la pièce maîtresse des économies industrielles développées, le laboratoire de recherche industrielle est le lieu où s'organise l'effort d'innovation technologique conduit par des chercheurs et des ingénieurs formés dans les universités et les instituts polytechniques. La clé de l'efficacité de la recherche industrielle réside dans sa cohérence avec la stratégie d'une entreprise industrielle, la qua-

lité de son interaction avec les fonctions marketing et production, et sa capacité à mettre en œuvre les investissements complémentaires de développement, de conception, de marketing, de production et de distribution. La technologie mise en œuvre par une firme en vue de l'innovation ne provient cependant pas exclusivement de ses laboratoires de recherche, mais aussi, et souvent exclusivement, de bien d'autres sources externes : le savoir-faire des ingénieurs et des scientifiques recrutés, les congrès scientifiques et professionnels, et, plus généralement, les échanges d'informations avec les clients, les fournisseurs et les concurrents ainsi que l'observation des produits mis sur le marché par la concurrence.

Tous ces vecteurs d'informations scientifiques et technologiques multiformes véhiculent une incessante et puissante circulation de la technologie de l'échelle locale à l'échelle mondiale. Cela ne signifie pas pour autant que la technologie soit un bien libre ou un bien public : dans tous les cas, la nature même de la technologie — son caractère partiellement tacite et spécifique à la firme — fait que son incorporation efficace dans les produits et les procédés de l'entreprise réceptrice (ou imitatrice) prend du temps et constitue un processus coûteux. De fait, la R-D industrielle est souvent considérée comme le moyen privilégié de s'intégrer dans les réseaux de la circulation de la technologie et des connaissances scientifiques applicables. Les entreprises sont amenées à la fois à protéger leurs découvertes et leurs innovations par des brevets et à participer à des programmes conjoints avec des laboratoires de recherche publics, en particulier universitaires.

Ce sont les entreprises de l'industrie chimique qui, à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, ont les premières promu une recherche industrielle dynamique. C'est à cette époque que se sont créés en Allemagne, puis aux États-Unis d'Amérique, les premiers laboratoires de recherche industrielle. Dès avant la seconde guerre mondiale, les firmes multinationales ont commencé à décentraliser leurs activités de recherche en créant des centres de recherche en dehors de leur pays d'origine. Le phénomène de multinationalisation des économies mondiales, à partir des années 60, a accentué ce phénomène, qui s'est accompagné d'un développement des alliances technologiques entre firmes : échanges de licences, créations de filiales communes pour exploiter une technologie, coopération sur des projets communs de R-D.

Dans les pays les plus industrialisés, ceux de l'OCDE, 60 à 75 % environ des travaux de la R-D nationale sont réalisés dans les laboratoires industriels, une partie de ces dépenses

étant financées sur des contrats publics (en particulier militaires), tandis que dans d'autres cas des centres techniques ou des associations regroupant les entreprises d'une même branche effectuent des travaux de recherche pour l'ensemble d'une profession. C'est en particulier le cas dans des secteurs correspondant à une industrialisation ancienne : la mécanique, le textile, la métallurgie. Ces centres techniques ne représentent en général qu'une fraction très faible de l'effort de R-D industrielle.

L'importance du rôle de chacun de ces grands acteurs de la R-D dans les systèmes nationaux de la science et de la technologie dépend beaucoup des traditions institutionnelles des divers pays, de leur système politique et économique, ainsi que de la place prise par l'industrie dans l'économie nationale. On peut très schématiquement faire quelques remarques. Les pays de tradition anglo-saxonne et les petits pays européens comme la Suisse, l'Autriche, la Belgique, ont en général accordé une place relativement importante à la recherche universitaire au sein des activités de recherche fondamentale. Les universités y ont gardé la capacité de s'administrer avec une plus grande autonomie que dans d'autres systèmes et donc avec la possibilité et la volonté de définir une politique de recherche. C'est le cas en particulier des grandes universités américaines et britanniques. Dans d'autres pays industrialisés et dans beaucoup de pays en développement, c'est une solution « mixte » qui prévaut : la recherche fondamentale est assurée à la fois par les laboratoires universitaires et par des organismes publics qui ont leurs propres laboratoires de recherche et leurs propres personnels. Dans les pays d'Europe de l'Est, ce sont les Académies des sciences qui effectuent l'essentiel de la recherche fondamentale, la recherche universitaire est en général quantitativement très faible.

La plupart des pays industrialisés et un nombre plus limité de pays en développement ont donné une place importante au sein de leur système national de la science et de la technologie aux organismes publics de recherche nécessaires à l'exercice par l'État de ses missions stratégiques dans les domaines de la défense, de l'énergie, des transports et des télécommunications. L'énergie nucléaire, l'espace et la recherche militaire sont évidemment les exemples les plus notables de secteurs où ont été créés des organismes publics de cette nature, associés à ce que l'on appelle la politique des grands « programmes scientifiques et technologiques » dédiés à la construction de nouveaux systèmes d'armes (avions, missiles), de réacteurs électronucléaires, de satelli-

tes d'observation de la Terre et de télécommunications. Quant à la recherche industrielle, elle est surtout développée dans les entreprises des pays les plus industrialisés, ceux de l'OCDE pour l'essentiel; rares sont en effet les pays en développement qui possèdent des entreprises ayant la capacité d'investir dans la R-D industrielle. Les budgets de recherche des firmes multinationales se mesurent en effet souvent en milliards de dollars.

## LES INSTITUTIONS DE LA POLITIQUE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

La recherche scientifique n'a pu acquérir un « statut » social et politique important et enviable, et se doter ainsi de moyens toujours plus importants que requiert son développement, que dans la mesure où l'État moderne a perçu son caractère « opérationnel » (elle est riche d'applications potentielles) et qu'elle pouvait être ainsi l'alliée objective du pouvoir politique et économique.

La seconde guerre mondiale a constitué un véritable tournant dans les relations entre la science, la technologie et le pouvoir politique. En effet, il était apparu que des programmes de recherche finalisée mobilisant des centaines de scientifiques permettaient d'atteindre des objectifs jugés stratégiques au sens militaire du terme, par exemple mettre au point de nouveaux systèmes d'armes (la bombe atomique, le radar) et assurer par des procédés industriels nouveaux le remplacement de matières premières de base.

Pour un État moderne, la science et la technologie représentent aujourd'hui un triple enjeu. L'objectif de la recherche est de produire des connaissances nouvelles (en sciences exactes et en sciences sociales) pour comprendre le monde et la société où nous vivons. Cela représente donc un enjeu culturel. L'innovation technologique est, nous l'avons noté, à la base du développement industriel, et la compétitivité technologique des entreprises nationales est pour un État un élément clé de sa politique. La science et la technologie représentent donc, aujourd'hui bien plus qu'il y a un siècle, un enjeu économique et social. Enfin, et de plus en plus, la recherche et la technologie représentent un enjeu stratégique au sens où la maîtrise des connaissances scientifiques et techniques est souvent vitale pour assurer à une nation, ou à un groupe de nations, les outils de l'indépendance : la capacité à communiquer, à assurer l'approvisionnement en énergie et en certaines matières premières clés. D'où l'importance prise par les programmes de recherche sur les sys-

tèmes énergétiques (le nucléaire et la fusion thermonucléaire), sur la micro-électronique et l'informatique, les télécommunications, et dans les domaines de l'espace et de l'océanographie.

Les recherches militaires représentent, bien entendu, un enjeu stratégique en soi qui mobilise des moyens importants aux États-Unis d'Amérique, en France, au Royaume-Uni, en Russie et en Chine, ainsi que dans certains pays en développement.

La quasi-totalité des pays industrialisés ainsi qu'un nombre croissant de pays du Tiers Monde, prenant conscience du rôle que jouaient désormais la science et la technologie dans les politiques publiques, ont été conduits à mettre en œuvre des politiques de la recherche et de la technologie. Celles-ci visent à définir des objectifs de développement des activités scientifiques et technologiques nationales en fixant des priorités, à mobiliser le potentiel de recherche public et privé, à promouvoir l'innovation technologique et à arbitrer les affectations de ressources (moyens financiers, personnel). Ces politiques ont aussi pour objectif de mettre en œuvre des programmes nationaux de recherche, en particulier dans les secteurs qui représentent des enjeux économiques, sociaux ou stratégiques importants, et de promouvoir également des programmes de coopération internationale.

Les gouvernements nationaux sont donc dans tous les pays des acteurs majeurs du système de la R-D technologique. Leur action s'exerce schématiquement dans trois directions.

- 1. Ils définissent les grands objectifs de la politique nationale de la science et de la technologie (les options majeures, les grandes priorités) et les missions, les orientations et les modes de fonctionnement des organismes publics de recherche et, dans une moindre mesure quelquefois, des universités.
- 2. Ils définissent le niveau de financement de la recherche publique ainsi que la nature et le volume des contrats passés aux entreprises dans le cadre de missions publiques ayant une dimension recherche. Le financement public de la recherche est compris entre 20 et 65 % du total national de la dépense de R-D dans les pays développés; dans les pays en développement, la recherche nationale est très souvent financée exclusivement sur fonds publics.
- 3. Ils façonnent les paramètres fiscaux, financiers et réglementaires de l'environnement des entreprises qui auront une incidence majeure sur leur volonté et leur capacité à effectuer de la recherche et à innover.

Ces trois volets constituent, pour l'essentiel, ce que l'on appelle la politique nationale de la recherche, du développement technologique et de l'innovation.

Pour les activités scientifiques et technologiques, les fonctions de « gouvernement » s'exercent de plus en plus à différentes échelles simultanément : outre la classique échelle nationale, l'échelle régionale tend à prendre de l'importance. Dans un État fédéral comme l'Allemagne, les Länder (gouvernements régionaux) jouent ainsi un rôle très important dans le financement des activités d'organismes publics de recherche et le soutien à la technologie; il en va de même aux États-Unis d'Amérique où les États financent des actions de soutien à la technologie de façon très significative. En France, depuis l'application des lois de décentralisation de 1982, les régions contribuent également au financement d'opérations de recherche et de développement technologique; en Chine, les provinces et certaines municipalités (comme celle de Shanghai, par exemple) financent des instituts de recherche appliquée et des projets technologiques de façon très significative. Au plan européen, la politique de R-D technologique de la Communauté européenne est un échelon important de décision et de financement; elle a un caractère supranational qui compte de plus en plus dans certains secteurs et n'a pas d'équivalent dans d'autres régions du monde. Il faut noter que dans certains pays, les départements ministériels disposent de crédits spécifiques (on les appelle en général « fonds d'incitation ») destinés à catalyser des actions de recherche nouvelles ou à promouvoir la recherche industrielle et l'innovation.

Globalement, la responsabilité des gouvernements est ainsi celle d'être un « régulateur » du système national de recherche et de la technologie, ce qui implique qu'ils exercent les fonctions suivantes :

- 1. L'analyse stratégique et prospective à l'échelle nationale, c'est-à-dire l'analyse des forces et faiblesses internes du dispositif de recherche et de développement technologique au regard des menaces et opportunités externes, présentes et à venir (la concurrence internationale, la demande sociale, etc.);
- 2. L'évaluation de fonctionnement et des missions des organismes publics de recherche, des universités et des agences;
- 3. le suivi des interfaces du système national de la recherche et de la technologie avec les secteurs industriel et éducatif, les autres domaines d'intervention de l'État (politique fiscale, industrielle, sociale, etc.) et enfin avec la société (questions d'éthique, par exemple).

En devenant progressivement une « affaire d'État » dans tous les pays, la science et la technologie ont suscité la création d'un réseau d'institutions et d'organismes gouvernementaux qui permettent de fixer des priorités, d'élaborer des stratégies et d'assurer les arbitrages nécessaires dans l'allocation des ressources. C'est ainsi qu'aujourd'hui, dans la plupart des pays, il existe une structure de rang ministériel qui a, en général, la fonction d'élaborer, d'impulser et de coordonner la politique nationale de la recherche et de la technologie. Cette structure ministérielle a cependant une position très variable dans la hiérarchie gouvernementale.

Aux États-Unis d'Amérique, le régime présidentiel tend à concentrer dans les services de la Présidence un certain nombre de fonctions gouvernementales de coordination d'activités essentielles à la politique du pays. C'est précisément le caractère stratégique de nombreuses options de programmes scientifiques et technologiques qui a conduit le Président D. Eisenhower à créer à la Maison Blanche un Office of Science and Technology Policy, dont le rôle s'est renforcé depuis; s'il ne gère pas de programmes, il joue le rôle d'un ministère fédéral de la recherche, car son poids est important dans le choix des priorités et des options stratégiques nationales et internationales des États-Unis. De façon générale, les États qui accordent une priorité importante aux grands programmes scientifiques et technologiques, qui supposent une programmation forte des projets à mettre en œuvre, confient à une structure ministérielle forte le soin de définir une politique d'ensemble de la recherche et de la technologie. (Aux États-Unis, 80 % du budget public de R-D était consacré jusqu'en 1992 aux grands programmes civils et militaires; cette proportion est également élevée en France, au Royaume-Uni et en Russie, mais plus faible en Allemagne et au Japon.)

Ainsi, en Allemagne et en France, c'est un ministère chargé de la recherche et de la technologie (avec l'enseignement supérieur en France) qui est responsable de la politique nationale. Au Japon, une Agence des sciences et des techniques, dont le directeur a rang de ministre, a un rôle semblable; le MITI (Ministère de l'industrie et du commerce extérieur) exerce toutefois une action spécifique de promotion des technologies nouvelles, en particulier dans l'industrie japonaise. Au Royaume-Uni, depuis 1992, un ministre de la science est désormais membre du Cabinet: il dispose d'un appareil administratif très léger pour remplir ses fonctions (Office of Science and Technology), placé sous la responsabilité du conseiller scientifique du Premier ministre.

En Russie, un ministère chargé de la recherche et de la technologie a la responsabilité de la politique scientifique et technologique; en Chine, le Comité d'État pour la science et la technologie remplit cette fonction.

Dans beaucoup de pays, les responsabilités ministérielles chargées de la recherche et de la technologie sont couplées ou rattachées à un ministère de l'éducation (ou des universités) et de la science, un secrétaire d'État à la recherche scientifique ayant parfois une délégation pour tout ce qui concerne la politique scientifique. C'est le cas en Italie, en Espagne et en Algérie, par exemple. Dans quelques pays, le Portugal par exemple, le Ministère chargé de la recherche est rattaché au Ministère du plan, ou parfois aussi directement au Premier ministre.

PIERRE PAPON est professeur de physique à l'École supérieure de physique et chimie industrielle de Paris et directeur général de l'Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer (IFREMER). Il est également président de l'Observatoire des sciences et des techniques (OST) et a été auparavant directeur général du Centre national de la recherche scientifique (CNRS).

RÉMI BARRÉ a une formation d'ingénieur civil (École des mines) et d'économiste. Il est le directeur de l'Observatoire des sciences et des techniques depuis sa création en 1990. Il a été auparavant le directeur d'une firme de consultation économique, a travaillé au Ministère de la recherche et de la technologie en France et a enseigné au Conservatoire national des arts et métiers.

## RECHERCHE FONDAMENTALE ET INNOVATION

*Keith Pavitt*

L'utilité économique et sociale de la recherche fondamentale, instrument de modernisation de la société, est depuis longtemps reconnue. Mais le débat reste ouvert sur la question de savoir si la recherche fondamentale est utile au pays qui la finance, de quelle façon et pourquoi.

D'un côté, les avocats du modèle dit « linéaire » font valoir que les découvertes scientifiques sont la principale source de la technologie, et du changement économique et social qui en découle. Les scientifiques mettent en évidence les lois de la nature et publient les résultats de leurs travaux, après quoi les ingénieurs et les entreprises commerciales transforment ces découvertes en réalisations utiles. L'électromagnétisme, la chimie organique et la fission nucléaire sont autant d'exemples remarquables de ce processus. Les gouvernements se doivent de subventionner généreusement la recherche scientifique car, s'il ne dépendait que d'elles, les entreprises investiraient moins que ce qui est nécessaire. En effet, ces dernières ne raisonnent qu'à court terme et sont incapables de comprendre tout l'intérêt qu'il y a à publier des travaux de recherche — et donc de les rendre librement accessibles.

A l'autre extrême, on considère que les résultats de la recherche fondamentale sont, au pire, inexploitable pour leur plus grande part et, au mieux, accessibles à quiconque dans le monde souhaite les exploiter, puisque, une fois publiés, ils deviennent des biens « gratuits ». Le rythme et l'orientation du changement technologique dans un pays donné sont en revanche beaucoup plus fortement influencés par sa situation économique et sociale. Les crédits que les gouvernements allouent à la recherche fondamentale nationale apparaissent donc comme une dépense de prestige (culturelle), au même titre que le financement des arts, du sport et d'autres activités analogues. Cela est particulièrement vrai dans les pays en développement où — font observer ces mêmes critiques — les résultats de la recherche mondiale peuvent être librement consultés dans les publications scientifiques et où la recherche locale est de moindre qualité.

Les arguments échangés sur ces thèmes rebattus sèment la confusion et sont souvent stériles, car ils simplifient à l'excès les liens multiples et variés qui existent entre la recherche fondamentale et le développement technologique. La première est en particulier profitable au second à travers la création et le transfert de connaissances, de compétences,

et de réseaux de contacts professionnels, dont dépend en grande partie la capacité de résoudre des problèmes complexes, ainsi qu'à travers la création et le transfert d'informations écrites se prêtant aisément à des applications. Tous ces liens ont d'importantes incidences sur la formulation des politiques.

RECHERCHE FONDAMENTALE  
ET TECHNOLOGIE : DEUX SYSTÈMES  
EN INTERACTION

Le débat public s'appuie souvent implicitement sur l'idée que les principaux « produits » de la recherche fondamentale et du développement technologique sont des formes très voisines de savoir codifié : publications dans le cas de la première, brevets, plans, règles de procédure ou code informatique dans le cas du second. Ce point de vue est conforté par les théories dominantes en sociologie (Merton, 1942) et en économie de la technologie (Arrow, 1962).

Des études récentes montrent cependant qu'en dépit de leur forte interaction, la recherche fondamentale et le développement technologique diffèrent à la fois par leur objet et par leur nature. Pour les besoins de l'explication et de la prédiction, la recherche fondamentale simplifie souvent, en créant des conditions « idéales » en laboratoire ou en supposant « toutes choses égales par ailleurs ». A l'inverse, le développement technologique a pour objectif de mettre au point des produits, des procédés et des systèmes qui fonctionnent hors du laboratoire dans un monde caractérisé par de multiples interactions et contraintes techniques, économiques et sociales. Ces produits, procédés et systèmes sont presque toujours trop complexes pour que l'on puisse en prédire avec certitude le fonctionnement à partir de la théorie (Kline, 1991). C'est la raison pour laquelle la principale activité des entreprises commerciales n'est pas la recherche, mais ces opérations beaucoup plus coûteuses que sont la conception, la mise au point et l'essai de prototypes et d'installations pilotes, à quoi s'ajoutent l'organisation de la production et le contrôle de qualité. C'est ce qui explique aussi pourquoi une initiation à la recherche fondamentale a été inscrite au programme de diverses disciplines de l'ingénieur — précisément pour apprendre à ceux dont le métier est de résoudre des problèmes techniques à faire la synthèse

de connaissances empruntées à différentes branches du savoir en vue de mettre au point et d'exploiter des systèmes technologiques complexes et d'identifier des problèmes concrets dont la solution exige des connaissances théoriques plus fondamentales (Rosenberg et Nelson, 1992).

### LES INTERACTIONS DIRECTES SONT TRÈS VARIABLES

Les généralisations grossières concernant les transferts directs de connaissances codifiées de la recherche fondamentale vers la technologie sont inévitablement trompeuses, car elles ne tiennent pas compte des différences considérables d'un secteur industriel à l'autre. C'est ce que confirment des études sur les brevets américains, qui révèlent de fortes variations entre secteurs industriels dans la fréquence avec laquelle les brevets citent des articles publiés dans des revues scientifiques (Narin et Olivastro, 1992). Cette fréquence est la plus élevée dans les industries chimiques et alimentaires (où les citations font essentiellement référence à des travaux de recherche fondamentale en chimie, en biologie et en médecine clinique). Vient ensuite la technologie des instruments (où les citations se répartissent à peu près également entre la recherche pure et la recherche appliquée en physique et en sciences de l'ingénieur). Fait intéressant, le secteur des transports (y compris l'industrie aérospatiale et la construction automobile) est celui où les citations de revues scientifiques sont les moins nombreuses (elles concernent essentiellement les sciences appliquées de l'ingénieur), preuve que les résultats de la recherche fondamentale n'ont guère d'utilité directe pour la conception, l'essai et l'exploitation des machines complexes qui caractérisent ce secteur.

### LES INTERACTIONS INDIRECTES SONT PLUS IMPORTANTES

Il serait toutefois erroné de penser que les citations relevées dans les brevets reflètent la totalité — ou même l'essentiel — des apports de la recherche fondamentale au développement technologique. Des études ont suggéré que ces apports prenaient la forme de connaissances et de compétences en grande partie non codifiées (tacites), à savoir les capacités de résolution des problèmes des chercheurs, leurs instruments et les réseaux souvent informels de contacts professionnels qu'ils tissent dans leur travail (Gibbons et Johns-

ton, 1974; Irvine et Martin, 1980). Une enquête d'opinion effectuée aux États-Unis d'Amérique auprès de 600 directeurs de départements de recherche-développement dans l'industrie a montré que les trois quarts des apports majeurs de la recherche théorique étaient des connaissances et des compétences non codifiées, et un quart seulement des connaissances codifiées (Nelson et Levin, 1986; Nelson, 1987). Ces dernières provenaient en général de disciplines tournées plutôt vers la recherche appliquée (informatique, science des matériaux ou métallurgie) et trouvaient des utilisations dans un nombre relativement restreint d'industries. En revanche, les connaissances et compétences non codifiées utiles étaient empruntées à tout un éventail de disciplines et se répandaient beaucoup plus largement.

### LES CONSÉQUENCES POUR L'ANALYSE ET L'ÉLABORATION DES POLITIQUES

Cette meilleure intelligence des rapports entre science fondamentale et développement technologique est lourde de conséquences pour l'analyse et l'élaboration des politiques.

#### *Les véritables retombées de la recherche scientifique*

Contrairement à une opinion répandue, les principales retombées de la recherche fondamentale ne sont pas des connaissances directement applicables dans un petit nombre de secteurs, mais des connaissances de fond, des compétences en matière de recherche, des instruments et des méthodes présentant un intérêt économique dans toute une gamme de secteurs. Il y a là, entre autres choses, un défi à relever pour les analystes et les décideurs qui continuent de penser que le principal (ou unique) « produit » de la recherche fondamentale réside dans de l'information susceptible d'être appliquée aisément et presque sans bourse délier, plutôt que dans un apport irremplaçable au processus plus coûteux et complexe qu'est le développement technologique (Pavitt, 1991).

Cette constatation a des conséquences très importantes pour les politiques des pays en développement. Elle montre en particulier qu'il n'est pas possible d'appliquer librement les résultats de la recherche fondamentale, mais qu'il faut les assimiler dans des systèmes technologiques complexes et donc se doter de capacités endogènes de résolution de problèmes en contact étroit avec les réseaux professionnels internationaux. Les responsables politiques devront par conséquent s'efforcer d'équiper les universités en moyens de recherche — sans doute dans les principales disciplines de l'ingénieur — et

d'encourager les études de troisième cycle à l'étranger afin de favoriser les liens avec les réseaux internationaux de spécialistes. Et, puisque c'est principalement à travers les contacts et la mobilité des chercheurs que la recherche fondamentale est économiquement utile, elle le sera d'autant plus que ses liens avec l'enseignement supérieur et la formation des chercheurs seront étroits.

### *Le pays qui investit dans la recherche fondamentale en perçoit-il les dividendes ?*

A la lumière de ce qui précède, il est également difficile de continuer d'affirmer que la recherche fondamentale n'apporte pas de bénéfices supplémentaires au pays qui la finance et la met en œuvre. Ses retombées économiques et sociales consistent pour une bonne part en l'existence de scientifiques et d'ingénieurs qualifiés, dont certains sont des chercheurs confirmés. Ces personnes travailleront pour les entreprises et autres centres technologiques locaux, à condition que ces derniers soient fortement incités à améliorer leurs capacités de résolution des problèmes. L'expérience des pays développés montre que cela exige des politiques d'ouverture vers l'extérieur encourageant la compétitivité sur les marchés internationaux et des mesures destinées à aider les entreprises à lancer et à financer leurs propres activités de perfectionnement technologique.

Étant donné que les entreprises privées ne peuvent pas bénéficier de toutes les retombées économiques découlant du financement de ces activités (ne serait-ce que parce que leur personnel qualifié peut trouver du travail ailleurs), une aide de l'État peut être économiquement justifiée. Cela est certainement vrai en ce qui concerne la recherche fondamentale et la formation des chercheurs, car on ne peut raisonnablement attendre des entreprises qu'elles financent à titre individuel des activités présentant un intérêt général pour l'ensemble des industries locales.

Quelle que soit la politique adoptée, l'objectif général devrait être de créer des capacités technologiques de résolution de problèmes dans les entreprises commerciales et partout où elles sont nécessaires (Bell et Pavitt, 1993). Faute de quoi, la demande de recherche fondamentale, de formation à la recherche et de mesures actuellement en vogue du type création de « cités de la science » déclinera.

KEITH PAVITT est titulaire de la chaire R. M. Phillips d'études des politiques de la science et de la technologie à l'Unité de recherche sur les politiques scientifiques (SPRU) de l'Université du Sussex (Royaume-Uni). Après avoir reçu une formation d'ingénieur et étudié la gestion industrielle et l'économie à Cambridge et Harvard, il a travaillé à Paris pour l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). Durant ses vingt années à la SPRU, il a publié de très nombreux travaux sur la gestion de la technologie et sur les politiques de la science et de la technologie. Le professeur Pavitt conseille de nombreux organismes nationaux et internationaux sur l'élaboration de politiques en faveur du changement technologique et est l'un des responsables de la rédaction de *Research Policy*.

### RÉFÉRENCES

- Arrow, K. 1962. Economic welfare and the allocation of resources for invention, dans R. Nelson (dir. publ.), *The rate and direction of inventive activity*, New Jersey, Princeton University Press.
- Bell, M. et Pavitt, K. 1993. Technological accumulation and industrial growth contrasts between developed and developing countries, *Industrial and corporate change*, (2) 2, p. 157-209.
- Gibbons, M. et Johnston, R. 1974. The roles of science in technological innovation, *Research Policy* (Amsterdam, Elsevier), 3.
- Irvine, J. et Martin, B. 1980. The economic effects of Big Science: the case of radio-astronomy, *Proceedings of the International Colloquium on Economic Effects of Space and Other Advanced Technologies*, ESA SP 151, Paris, Agence spatiale européenne.
- Kline, S. 1991. Models of innovation and their policy consequences, dans H. Inose, M. Kawasaki et F. Kodama (dir. publ.), *Science and technology policy research. What should be done? What can be done?* Tokyo, Mita Press.
- Merton, R. 1942. Science and technology in a democratic order, *Journal of Legal and Political Sociology*, 1.
- Narin, F. et Olivastro, D. 1992. Status report: linkage between technology and science, *Research Policy* (Amsterdam, Elsevier), 21, p. 237-249.
- Nelson, R. 1987. *Understanding technical change as an evolutionary process*, Amsterdam, North-Holland.
- Nelson, R. et Levin, R. 1986. The influence of science, university research and technical societies on industrial R&D and technical advance. *Research Program on Technological Change*, New Haven, Yale University. (Policy Discussion Paper Series, 3.)
- Pavitt, K. 1991. What makes basic research economically useful?, *Research Policy* (Amsterdam, Elsevier), 20, p. 109-119.
- Rosenberg, N. et Nelson, R. 1992. *American universities and technical advance in American industry*, Stanford, Center for Economic Policy Research, Stanford University.

## LES INDICATEURS : OBJET ET LIMITES

Rémi Barré et Pierre Papon

Les indicateurs de la science et de la technologie sont des mesures quantitatives des paramètres qui définissent l'état et la dynamique du système de la recherche et de la technologie. Les utilisations possibles des indicateurs sont très diversifiées : panorama national pour les responsables de la politique scientifique ou le pouvoir législatif, analyses stratégiques pour des décisions relevant d'une institution de recherche, veille scientifique et technologique, évaluation de grands programmes, etc. C'est ainsi que, de plus en plus, les responsables dans les domaines de la science et de la technologie sont confrontés à des décisions et à des choix qui doivent s'appuyer sur de tels indicateurs.

Ce besoin de disposer d'indicateurs s'est traduit, dès les années 60, par la mise en place d'enquêtes annuelles sur la recherche industrielle et sur la recherche publique. Au début des années 70, la NSF (National Science Foundation) aux États-Unis d'Amérique commence à publier la série bi-annuelle des *Science and Engineering Indicators* ; parallèlement, l'OCDE entreprend d'harmoniser ses enquêtes et travaux de production d'indicateurs à l'échelle internationale pour en permettre la comparabilité, et entreprend à cette fin la rédaction du « manuel de Frascati », qui fixe les concepts et codifie les méthodes d'enquête.

Dans la seconde moitié des années 80, la demande d'indicateurs se fait plus diversifiée en même temps que s'ouvre la possibilité d'exploiter des sources d'information nouvelles : de plus en plus d'études visant la production d'éléments quantitatifs sont lancées à l'occasion de travaux d'évaluation et d'orientation stratégique, y compris dans le cadre de la gestion des programmes communautaires. De ce fait, un certain nombre de pays sont amenés à renforcer leur dispositif permanent de production de connaissances quantitatives sur les activités scientifiques et technologiques. En France, par exemple, l'Observatoire des sciences et des techniques (OST) a été créé dans cette perspective en 1990.

Le fait nouveau de ces dernières années est qu'à la demande forte d'indicateurs venant des pouvoirs publics et des entreprises — qui existait depuis de nombreuses années — correspond désormais une plus grande capacité de production de données. Ceci tient d'une part aux efforts d'harmonisation des statistiques à l'échelle internationale, au développement de nouvelles méthodes de production d'indicateurs (bibliométrie) et, plus généralement, aux perfor-

mances toujours accrues des systèmes électroniques de stockage, d'accès et de traitement des données.

### LES INDICATEURS UTILISÉS

Il existe dans l'absolu une multitude d'indicateurs possibles. Un indicateur de la science et de la technologie peut en effet se caractériser à partir des critères suivants :

- l'objet et le paramètre mesurés : personnes (chercheurs, enseignants-chercheurs, ingénieurs, personnel de support à la recherche, avec éventuellement diplôme, âge, sexe, spécialité disciplinaire, etc.), ressources financières (en fonctionnement, en investissement, reçues du budget de l'État ou obtenues par contrat extérieur), connaissances « codifiées » (publications scientifiques ou brevets, diplômes délivrés), connaissances « incorporées » (instruments, composants ou biens d'équipement intensifs en technologie, achetés ou vendus, importés ou exportés) ;
- l'espace sur lequel le paramètre est mesuré : institution (laboratoire, entreprise, établissement public, université...) ou territoire (ville, région, nation, espace plurinationnel) ;
- la nature de l'activité mesurée : discipline ou thème scientifique, domaine ou spécialité technologique, secteur ou branche industrielle, objectif de politique publique, caractère de la recherche (fondamentale, finalisée, développement) ;
- l'échelle de la mesure : micro (échelle de l'entité décisionnelle : entreprise, laboratoire, université), méso (échelle d'une discipline, d'un domaine ou d'un secteur), macro (échelle d'un territoire) ;
- la nature de la mesure : paramètre de stock, qui mesure un volume (ou niveau), ou paramètre de relation (flux ou relation) entre deux entités.

Les indicateurs utilisés dans ce panorama mondial doivent permettre les comparaisons internationales ou interrégionales : ce sont donc des indicateurs mesurant essentiellement des volumes, à l'échelle « méso » ou « macro », concernant des disciplines scientifiques, des domaines technologiques et des secteurs industriels, à l'échelle nationale ou plurinationale.

Les indicateurs présentés sont de trois types, que nous allons brièvement examiner.

*Ressources consacrées aux activités S et T — « input »*

La mesure de ces ressources est réalisée au niveau de chaque pays par des enquêtes nationales sur les dépenses de R-D et les personnels scientifiques; les résultats de ces enquêtes sont ensuite traités et publiés par différentes institutions internationales, en particulier l'OCDE, l'UNESCO et la Commission des Communautés européennes. Plusieurs tableaux présentés ici sont élaborés à partir des données publiées par ces organisations.

*Mesure de la production scientifique par les publications — « output »*

L'activité scientifique est mesurée essentiellement par sa production de publications scientifiques (« bibliométrie science »), mais, comme on l'a vu, elle génère également d'autres « productions », par exemple la formation supérieure ou l'expertise. L'indicateur se focalise donc sur un aspect particulier de la recherche scientifique.

Les indicateurs correspondants ont été calculés à partir de la base de données du *Science Citation Index* (SCI), établie par l'Institute of Scientific Information (ISI) basé à Philadelphie (États-Unis d'Amérique). Chaque publication est affectée au pays de l'adresse du laboratoire des auteurs. S'il y a plusieurs auteurs de différents pays (trois, par exemple), on affecte à chaque pays une fraction de la publication (un tiers dans l'exemple choisi) : c'est le comptage « fractionnaire ». Les 3 500 journaux scientifiques dont les publications sont répertoriées dans la base sont regroupés en huit disciplines, définies à partir des journaux dans lesquels les publications sont faites. Les traitements consistent donc à dénombrer les fractions d'articles par année, par pays et par discipline. Le problème technique essentiel est ici celui du volume des données à traiter, dès lors qu'on veut établir un panorama mondial : le SCI répertorie environ 600 000 publications par an. On peut aussi construire des indicateurs d'impact (nombre moyen de citations reçues par article, par rapport à la moyenne mondiale) et de copublication entre pays (nombre relatif de publications cosignées par des auteurs des différents pays).

*Mesure de la production technologique par les brevets — « output »*

L'activité technologique est mesurée par la production de brevets (« bibliométrie brevet »), qui témoignent de l'activité inventive et de la création dans le domaine de la technologie à finalité industrielle.

Les indicateurs ont été calculés d'une part sur le brevet « européen » (positions technologiques prises sur le « grand marché » européen) et d'autre part sur le brevet américain (positions technologiques prises sur le marché des États-Unis). Ces deux marchés étant les plus vastes et les plus ouverts à la compétition, on considère que les positions technologiques prises sur eux sont représentatives des capacités technologiques et d'innovation des firmes industrielles à l'échelle mondiale. Ici encore, le point important est la production d'indicateurs en vue d'un panorama mondial, ce qui oblige à traiter l'ensemble des données de chaque base, sachant qu'il y a environ 40 000 brevets européens par an et 80 000 brevets américains par an. On procède, comme dans le cas des publications, à un comptage fractionnaire sur les inventeurs compte tenu du pays de leur adresse. On regroupe les brevets en domaines technologiques établis à partir de la Classification internationale des brevets (CIB).

## LES LIMITES DES INDICATEURS

Il est indispensable de procéder à une double évaluation critique des indicateurs et de leur fiabilité. La première se rapporte à la validité des modèles conceptuels sous-jacents. La deuxième concerne l'adéquation entre ce qu'on prétend mesurer et ce qu'on mesure en réalité : c'est la critique de l'insuffisante maîtrise du processus de production statistique qui va des données individuelles aux indicateurs (critique technique).

*La critique conceptuelle*

Construire des indicateurs implique des choix de paramètres liés à des modèles conceptuels du système science/technologie/société. Ces choix s'opèrent à toutes les étapes du processus de production des indicateurs : au niveau des données recueillies sur chaque paramètre s'effectue le choix des caractères mesurés; à celui des statistiques systématiques correspondent les choix de nomenclatures géographiques et thématiques; enfin, à l'étape de construction des indicateurs, on choisit les relations les plus significatives

entre divers paramètres statistiques pour cerner la réalité à décrire. Ces choix sont fondés, explicitement ou non, sur des hypothèses sur la manière dont le système science/technologie/société « fonctionne », c'est-à-dire sur un modèle conceptuel.

Le problème est que pour effectuer ces choix, on ne dispose pas toujours des connaissances nécessaires. Ainsi, par exemple, la prise en compte des phénomènes de diffusion de la technologie ou celle des relations science/technologie butent sur ce genre de difficultés. C'est ici que les travaux des chercheurs en économie du changement technique, en économie industrielle, en sociologie de l'innovation et en politique scientifique rejoignent les préoccupations de ceux qui doivent construire les indicateurs de la science et de la technologie.

Inversement, il peut aussi se faire que des idées pertinentes doivent être abandonnées, faute de capacité de mesure : ainsi, par exemple, une des missions importantes des scientifiques dans un pays est la réalisation d'expertises scientifiques et techniques nécessaires aux pouvoirs publics ; malheureusement, il n'existe pas de méthode de mesure d'une telle activité qui soit comparable sur le plan international.

#### *La critique technique*

Pour les indicateurs de ressources, les difficultés tiennent d'une part à la définition de l'activité de recherche et du chercheur, qui peuvent être très variables d'un pays à l'autre (par exemple, la définition était très extensive dans l'ex-URSS) ; le manuel de Frascati a permis de résoudre en partie ce problème en donnant des définitions aussi précises que possible des termes utilisés. Les difficultés tiennent d'autre part à l'inexistence de taux de change « en parité de pouvoir d'achat » pour la plupart des pays hors OCDE, ce qui oblige à prendre des taux de change simples. Notons enfin que les indicateurs de ressources ne permettent guère de distinguer entre les disciplines scientifiques ou technologiques.

Pour les indicateurs de production scientifiques (publica-

tions), la critique consiste à s'interroger sur la représentativité des journaux scientifiques sélectionnés dans la base de données choisie, ici le SCI. Malgré le caractère « objectif » de la sélection des journaux scientifiques dans cette base (la notoriété, mesurée par l'indice de citation moyen reçu par les publications de chaque journal), il est clair que les journaux des pays développés sont surreprésentés, et parmi eux, ceux des pays anglo-saxons. C'est la science « dominante » qui est ici mesurée, et l'activité des pays développés est mieux prise en compte que celle des autres.

Pour les indicateurs de production technologique mesurée par les brevets, la critique ne porte pas sur les bases de données (elles sont exhaustives et exactes), mais sur l'interprétation qu'on peut faire des indicateurs : le dépôt de brevet est — toutes choses égales par ailleurs — moins intense dans certaines entreprises et dans certains pays, selon leur stratégie ou leurs marchés. L'indicateur brevet est représentatif de l'activité des firmes cherchant à exporter en s'appuyant sur l'avantage concurrentiel que peut donner une innovation — autrement dit il rend mieux compte de l'activité des firmes des pays développés, et ce d'autant que ce sont les brevets déposés aux États-Unis d'Amérique et en Europe qui sont considérés.

Il est important de considérer que chaque indicateur ne représente (et encore imparfaitement) qu'une facette de la réalité : les indicateurs de ressources ne disent rien sur les résultats ; les indicateurs de publications scientifiques ne disent rien sur les activités de formation ou d'expertise ; les indicateurs de brevet ne disent rien sur les domaines technologique où l'on ne dépose pas de brevet ni sur l'utilisation du brevet pour l'innovation. Ainsi, ce qui a un sens, c'est un ensemble d'indicateurs, puisqu'à l'évidence il ne saurait exister de mesure unique d'un système complexe.

Malgré toutes leurs limites, les indicateurs actuels donnent néanmoins des ordres de grandeur corrects des paramètres mesurés et, considérés dans leur ensemble, offrent une représentation assez fiable de la réalité.

## APERÇU MONDIAL

Rémi Barré et Pierre Papon

### RESSOURCES FINANCIÈRES ET HUMAINES

On peut d'abord dresser un panorama mondial des activités de R-D sur la base des estimations des financements (tableau 1). On constate ainsi que les pays de la zone OCDE

réalisent à eux seuls de 80 à 88 % de la R-D mondiale, selon la manière dont on comptabilise la R-D de l'ex-URSS. On peut donc affirmer que plus des quatre cinquièmes de l'effort de recherche scientifique et de développement technologique mondial sont réalisés par les pays indus-

**TABEAU 1**  
**PRODUIT INTÉRIEUR BRUT (PIB), DÉPENSE INTÉRIEURE BRUTE DE R-D (DIRD) ET RATIO DIRD/PIB**  
**DANS DIFFÉRENTES PARTIES DU MONDE, 1990**

	PIB <sup>1</sup>	DIRD <sup>1,2</sup>	DIRD/PIB
CEE <sup>3</sup>	5 110	101,9	2,0%
AELE <sup>4</sup>	571	12,3	2,2%
ECO <sup>5</sup>	332	5,7	1,7%
Israël	45	0,8	1,7%
Ex-URSS <sup>6</sup>	1 673	18,9/56,9	1,1/3,4%
États-Unis d'Amérique	5 392	149,2	2,8%
Canada	512	7,2	1,4%
Amérique latine	715	2,9	0,4%
Afrique du Nord	154	0,4	0,3%
Moyen et Proche-Orient <sup>7</sup>	526	1,9	0,4%
Afrique subsaharienne	257	0,7	0,3%
Japon	2 180	67,0	3,1%
NPI <sup>8</sup>	499	8,2	1,6%
Chine	442	3,6	0,8%
Inde	308	2,5	0,8%
Autres pays d'Extrême-Orient	277	0,5	0,2%
Australie/Nouvelle-Zélande	340	3,9	1,2%
<b>Total mondial</b>	<b>19 334</b>	<b>387,7/425,7</b>	<b>2,0/2,2%</b>

1. L'unité monétaire est le milliard de dollars des États-Unis courant calculé en « parité de pouvoir d'achat » (ppa) pour les pays de l'OCDE, ou calculé à partir du taux de change pour les autres pays.

2. La dépense intérieure brute de R-D (DIRD) est la dépense d'exécution de R-D effectuée sur le territoire national, toutes sources de financements (y compris de l'étranger) confondues.

3. Allemagne, Belgique, Danemark, Espagne, France, Grèce, Irlande, Italie, Luxembourg, Pays-Bas, Portugal, Royaume-Uni.

4. Autriche, Finlande, Islande, Liechtenstein, Norvège, Suède, Suisse.

5. Pays d'Europe centrale et orientale.

6. La mesure du PIB et de la DIRD de l'ex-URSS pose le problème de la cohérence avec les définitions admises au niveau international : nous avons choisi de présenter une valeur haute, correspondant aux chiffres donnés selon une acception large de la notion de R-D et

une valeur basse — trois fois plus faible que la précédente — correspondant à peu près à la définition OCDE de la R-D (sources : CSRS et IMEMO). Ne disposant pas de taux de change en parité de pouvoir d'achat, nous avons utilisé le taux de change de 1989, auquel nous avons appliqué le taux de déflation du dollar entre 1989 et 1990.

7. De la Turquie au Pakistan.

8. Nouveaux pays industrialisés d'Asie.

Note : les données de l'OCDE ont été utilisées pour les pays de l'OCDE, celles de l'UNESCO pour les autres ; pour les pays manquants dans les statistiques UNESCO, nous avons procédé par extrapolation à partir de pays pour lesquels nous disposions de données et qui étaient similaires au plan économique.

Source : OST, d'après données OCDE et UNESCO (OST, 1993).

trialisés occidentaux et le Japon (en gros, les pays de l'OCDE); c'est bien là la caractéristique d'une situation très inégalitaire, bien plus encore que celle de la répartition du PIB.

La dépense intérieure de recherche-développement rapportée au produit intérieur brut (PIB) est un indicateur du « taux d'effort » de recherche (tableau 1). En 1990, le Japon était en tête : il consacrait 3,1 % de son PIB à la R-D. Il était suivi par les États-Unis d'Amérique (2,8 %), les pays de l'Association européenne de libre échange (AELE) (2,2 %) et de la Communauté européenne (2 %). Les estimations sont plus difficiles à faire pour l'ex-URSS : si on utilise les données fournies traditionnellement par l'ex-URSS — qui correspondent à une définition extensive de la R-D —, on arrive à des dépenses relatives qui dépassent celles de tous les autres pays (3,4 %); si on utilise une définition plus proche des définitions internationales, le taux

d'effort est alors intermédiaire entre celui des pays développés et celui des pays en développement (1,1 %). Pour les pays en développement, la dépense nationale de R-D est très inférieure à 1 % de leur PIB. Ainsi la Chine, qui a pourtant une très forte tradition scientifique, consacre-t-elle, d'après les chiffres officiels, 0,7 % de son PIB à la recherche-développement. Pour les pays les plus pauvres, c'est une fraction très minime de leur revenu national, de l'ordre de 0,2 % à 0,4 %, qui est consacrée à la science et à la technologie. On remarque que les « nouveaux pays industrialisés » d'Asie ont un taux d'effort déjà supérieur à celui d'un certain nombre de pays de l'OCDE.

L'analyse des ressources de la R-D en termes de chercheurs et ingénieurs de recherche donne un panorama différent (tableau 2) : les pays de l'OCDE ne comptent alors que pour un peu plus (58 %) ou un peu moins (47 %) du total mondial, selon la comptabilisation pour l'ex-URSS.

TABLEAU 2  
SCIENTIFIQUES ET INGÉNIEURS DE R-D ET RATIO A LA POPULATION DANS DIFFÉRENTES PARTIES DU MONDE, 1990

	Scientifiques et ingénieurs de R-D (milliers)	Population (millions)	Scientifiques par millier d'habitants
CEE <sup>1</sup>	611,4	327,2	1,9
AELE <sup>1</sup>	72,3	32,1	2,2
ECO <sup>1</sup>	263,5	124,0	2,1
Israël	20,1	4,6	4,4
ex-URSS <sup>2</sup>	465,7/1 397,0	288,0	1,6/4,9
États-Unis d'Amérique	949,3	251,5	3,8
Canada	62,5	26,6	2,3
Amérique latine	162,9	296,7	0,5
Afrique du Nord	38,1	152,5	0,3
Moyen et Proche-Orient <sup>1</sup>	19,0	301,6	0,1
Afrique subsaharienne	35,0	494,3	0,1
Japon	582,8	123,5	4,7
NPI <sup>1</sup>	92,3	89,6	1,0
Chine	410,5	1 135,5	0,4
Inde	119,0	853,4	0,1
Autres pays d'Extrême-Orient	99,7	585,9	0,2
Australie/Nouvelle-Zélande	47,5	20,5	2,3
<b>Total mondial</b>	<b>4 051,7/4 983,0</b>	<b>5 107,5</b>	<b>0,8/1,0</b>

1. Voir le tableau 1 pour les définitions.

2. Pour l'ex-URSS, nous avons appliqué au nombre de scientifiques et ingénieurs le ratio de 3 à 1 permettant de retrouver les définitions de l'OCDE (voir la note 6 du tableau 1).

Note : les données de l'OCDE ont été utilisées pour les pays de l'OCDE, celles de l'UNESCO pour les autres.

Source : OST, d'après données OCDE et UNESCO (OST, 1993).

Rapportés à la population, les chiffres distinguent les pays développés (ratio supérieur ou égal à 1,9 pour mille, allant jusqu'à 4,7 pour le Japon) et les pays en développement, avec un ration compris entre 0,1 et 0,5 pour mille. La situation de l'ex-URSS est encore une fois difficile à analyser : son ratio est le plus fort du monde ou bien en position intermédiaire, selon qu'on adopte la définition extensive ou la définition internationale de ce que sont les activités de R-D.

## LA PRODUCTION DE S ET T DANS LE MONDE

Les instruments de mesure des activités scientifiques et technologiques, les indicateurs de publications et de brevets, nous donnent probablement une vue un peu déformée de la réalité dans la mesure où, par exemple, ils prennent mal en compte les résultats de travaux de recherche publiés dans des journaux scientifiques édités dans les pays d'Europe de l'Est ou dans des pays du Tiers Monde. Ainsi, le *Science Citation Index* (SCI), qui est l'outil privilégié pour la base bibliométrique de la géographie mondiale de la science, ne retient-il qu'un faible nombre de revues scientifiques éditées dans les pays en développement parmi les 3 500 journaux scientifiques qu'il analyse. Des pays dont la population scientifique est relativement importante comme l'Argentine, le Brésil et la Chine ne sont représentés que par un nombre très minime de revues scientifiques dans cette base de données, alors que des études mettent en évidence la part significative de la recherche produite dans les pays en développement dans des domaines particulièrement importants pour eux, comme l'agronomie tropicale et la pédologie.

De même, la procédure de dépôt de brevet aux États-Unis d'Amérique et en Europe n'est-elle pas aisément accessible aux inventeurs et aux entreprises des pays du Tiers Monde et elle est de plus coûteuse. Toute une technologie « appropriée » aux pays en développement échappe ainsi aux analyses. Il en va de même pour les pays de l'Europe de l'Est. Les indicateurs macroscopiques minorent donc certainement la production scientifique et technologique des pays en dehors de la zone OCDE. Il est évident que l'on mesure ici la production des principaux domaines de S et T, ce qui n'est évidemment pas toute la science et la technologie, mais néanmoins une partie significative.

### *Les publications scientifiques*

Les indicateurs de la production scientifique mondiale confirment l'impression de très forte inégalité dans la production de connaissances que donnait l'examen des dépenses de R-D. Il ressort d'après le tableau 3 que 40,2 % des publications scientifiques sont produites par les scientifiques de l'Amérique du Nord (essentiellement des États-Unis) et 34,4 % par les scientifiques européens (Est et Ouest). Le reste est produit par les Japonais (8 %), l'ex-URSS (6,4%), les autres pays industrialisés (3,7 %) et les NPI (1 %). Les pays en

TABLEAU 3  
LA PRODUCTION SCIENTIFIQUE (PUBLICATIONS<sup>1</sup>)  
DANS DIFFÉRENTES PARTIES DU MONDE, 1991

	Poids mondial <sup>2</sup> (%)	Poids 1991 <sup>3</sup> en base 100 pour 1983
CEE <sup>4</sup>	27,7	103
AELE <sup>4</sup>	4,4	98
ECO <sup>4</sup>	2,3	91
Israël	1,0	89
Ex-URSS	6,4	79
États-Unis d'Amérique	35,8	96
Canada	4,4	107
Amérique latine	1,4	117
Afrique du Nord	0,4	113
Moyen et Proche-Orient	0,6	180
Afrique subsaharienne	0,9	96
Japon	8,0	117
NPI <sup>4</sup>	1,0	309
Chine	1,1	128
Inde	2,0	57
Autres pays d'Extrême-Orient	0,1	67
Australie/Nouvelle-Zélande	2,7	92
<b>Total mondial</b>	<b>100,0</b>	<b>100</b>

1. On mesure la production scientifique d'un pays par le comptage du nombre de publications scientifiques des chercheurs dont le laboratoire est situé dans ce pays. Les indicateurs présentés ont été calculés par l'OST à partir de la base de données du *Science Citation Index* (SCI) produite par l'Institute for Scientific Information (ISI) de Philadelphie.

2. Part de chaque région dans le total mondial, toutes disciplines confondues.

3. Part 1991 divisée par part 1983, multipliée par 100.

4. Voir le tableau 1 pour les définitions.

Source : OST, d'après les données SCI (OST, 1993).

**TABEAU 4**  
**LES SPÉCIALISATIONS SCIENTIFIQUES PAR RÉGION, 1991<sup>1</sup>**

	Europe	Ex-URSS	Amérique du Nord	Amérique latine	Monde musulman <sup>2</sup>	Afrique subsaharienne	Asie industrielle <sup>3</sup>	Autres pays d'Extrême Orient	Australie/Nouvelle Zélande
Médecine clinique	1,13	0,40	1,05	0,88	0,78	1,34	0,81	0,46	1,17
Recherche biomédicale	1,02	0,61	1,12	0,92	0,54	0,65	0,97	0,44	0,87
Biologie	0,82	0,40	1,14	1,61	1,27	2,47	0,85	1,08	2,19
Chimie	1,00	2,08	0,70	0,84	1,70	0,59	1,42	1,80	0,60
Physique	0,95	2,10	0,83	1,30	0,76	0,32	1,17	1,81	0,45
Sciences de l'Univers	0,86	1,25	1,16	1,31	1,07	1,53	0,41	1,10	1,47
Sciences de l'ingénieur	0,77	1,17	1,04	0,60	1,74	0,56	1,56	1,51	0,69
Mathématiques	0,90	0,51	1,28	0,98	0,94	0,46	0,60	1,15	0,76
<b>Total</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>	<b>1,00</b>

1. L'indicateur présenté ici est l'indice de spécialisation pour huit disciplines scientifiques : il s'agit du ratio du poids mondial du pays dans la discipline considérée au poids mondial du pays toutes disciplines confondues (un indice supérieur à 1 indique une force relative du pays, et un indice inférieur à 1 sa faiblesse relative).

2. Afrique du Nord, Proche et Moyen-Orient.

3. Japon et NPI.

Source : OST, d'après les données SCI (OST, 1993).

développement de l'Afrique, de l'Amérique latine et de l'Asie totalisent 6,5 %.

En huit ans, de 1983 à 1991, la croissance la plus importante a eu lieu au Japon, dans les NPI et en Chine : ces pays ont totalisé 7,4 % du poids mondial en 1983 et 10,1 % huit ans plus tard, ce qui représente une augmentation d'un tiers. Une croissance significative a également été perçue au Moyen et Proche-Orient, mais à partir d'un niveau de départ plus bas. L'Afrique du Nord et l'Amérique latine gagnent également du terrain, bien qu'à un rythme plus lent. Tous les pays industrialisés — sauf le Japon, le Canada et la CEE — voient leur part diminuer ainsi que l'ex-URSS et l'Inde.

La spécialisation en termes de production scientifique des différentes régions du monde est montrée dans le tableau 4. L'Europe est forte en médecine clinique, et elle est bien placée en recherche biomédicale, chimie et physique, mais paraît plus faible en sciences de l'ingénieur et en biologie. La spécialisation des pays de l'Asie industrielle est différente; elle est plutôt faible en sciences de la vie, de l'Univers et en mathématiques, et forte en physique, en chimie et en sciences de l'ingénieur, tandis que l'Amérique du Nord a une spécialisation presque inverse. Les pays en développement partagent dans l'ensemble la spécialisation

en biologie, en sciences de l'Univers, et ont une position plus faible pour ce qui est de la médecine clinique et des recherches biomédicales.

#### *Les brevets déposés dans le système européen et américain*

On peut apprécier la production technologique mondiale, en première approximation tout au moins, à l'aide de l'indicateur que représentent les dépôts de brevets tant aux États-Unis d'Amérique que dans le système européen (tableau 5). Ce qui frappe d'emblée, c'est la quasi-inexistence des pays hors OCDE : ils ne comptent que pour 1,6 % et 2,7 % dans les dépôts en Europe et aux États-Unis d'Amérique, respectivement. Les États-Unis représentaient ainsi en 1991 le quart du total mondial des brevets déposés en Europe, près de la moitié de ceux déposés aux États-Unis. La situation est symétrique pour l'Europe de l'Ouest (CEE plus AELE) : le quart des brevets déposés aux États-Unis et près de la moitié de ceux déposés en Europe; le Japon représente à peu près le quart du total mondial dans chacun des deux systèmes.

Si l'on considère les évolutions, il faut noter deux phénomènes : d'une part la montée en puissance du Japon, d'autre part celle des nouveaux pays industrialisés d'Asie.

**TABLEAU 5**  
**POIDS DES DIFFÉRENTES PARTIES DU MONDE EN DÉPÔTS DE BREVETS EN EUROPE ET AUX ÉTATS-UNIS D'AMÉRIQUE, 1991**

	Brevet européen <sup>1,3</sup>		Brevet américain <sup>2,3</sup>	
	Poids mondial 1991 (%)	En base 100 pour 1986	Poids mondial 1991 (%)	En base 100 pour 1981
CEE <sup>4</sup>	42,6	92	20,1	90
AELE <sup>4</sup>	5,8	82	3,6	81
ECO <sup>4</sup>	0,3	71	0,2	66
Israël	0,4	122	0,4	124
Ex-URSS	0,1	51	0,2	102
États-Unis d'Amérique	24,7	93	45,6	95
Canada	0,6	62	2,4	113
Amérique latine	0,1	139	0,2	102
Afrique du Nord	0,0	ns	0,0	ns
Moyen et Proche-Orient	0,0	ns	0,0	ns
Afrique subsaharienne	0,1	67	0,1	89
Japon	24,4	149	25,0	120
NPI <sup>4</sup>	0,5	246	1,5	338
Chine	0,1	119	0,1	765
Inde	0,0	ns	0,0	ns
Autres pays d'Extrême-Orient	0,0	ns	0,0	ns
Australie/Nouvelle-Zélande	0,2	23	0,6	94
<b>Total</b>	<b>100,0</b>		<b>100,0</b>	

1. La base de données sur les brevets européens enregistre les brevets 18 mois après leur déposition, qu'ils soient délivrés ou non.
2. Brevets délivrés. Par souci de simplification, nous parlerons de brevets déposés, d'autant plus qu'en réalité les poids mondiaux sont quasi identiques dans les deux cas.
3. On utilise le dépôt de brevet comme indicateur de production technologique des pays. Les indicateurs sont calculés pour le dépôt de brevets aux États-Unis d'Amérique (« brevet américain ») et le dépôt en Europe, ou plus exactement par le European Patent Office (« brevet européen ») qui permet le dépôt simultané dans plusieurs pays européens.  
 Pour le brevet américain, et pour les déposants de nationalité (adresse) américaine, on a comptabilisé les entreprises et les institutions, mais pas les déposants individuels. C'est une manière d'atténuer « l'avantage domestique » des Américains dans le brevet américain.

### Production de S et T et PIB

Si l'on rapporte l'indice des publications scientifiques au PIB, on constate que, dans l'ensemble, les pays industrialisés sont plus denses scientifiquement que les autres (tableau 6). Israël, les pays de l'AELE, le Canada, l'Australie et la Nouvelle-Zélande ont un indice particulièrement élevé. Viennent ensuite les États-Unis d'Amérique, les pays

Les indicateurs sur le brevet américain ont été établis à partir des travaux de la société CHI-Research sur la base de données de l'Office américain des brevets (USPTO); les indicateurs sur le brevet européen ont été calculés à partir de la base EPAT-bibliométrique, issue de la base EPAT des brevets déposés par la voie européenne, établie par l'Institut français de la propriété industrielle (INPI).

On ne calcule les indicateurs sur le brevet européen qu'à partir de 1986, date à laquelle la « voie européenne » pour le dépôt de brevet s'est généralisée et est donc devenue représentative de l'activité technologique.

4. Voir le tableau 1 pour les définitions.

ns : chiffre non significatif.

Source : OST, données EPAT-bibliométrique, CHI-Research - USPTO (OST, 1993).

de l'Europe centrale et orientale et la CEE. L'indice de l'Inde mérite d'être mentionné, étant bien au-dessus de la moyenne, et l'indice du Japon qui est bien au-dessous. L'Afrique, l'Amérique latine, la Chine et les PNI ont un indice inférieur de 50 % à la moyenne, proche de celui du Japon et de l'ex-URSS.

Si l'on rapporte la production de brevets au PIB, il

**TABEAU 6**  
**INDICE DE PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES ET DE DÉPÔTS DE BREVETS PAR RAPPORT AU PIB, 1991<sup>1</sup>**

	Indice Publications/PIB	Indice brevet européen/PIB	Indice brevet américain/PIB
CEE <sup>2</sup>	105	161	76
AELE <sup>2</sup>	150	196	121
ECO <sup>2</sup>	131	17	13
Israël	433	172	172
Ex-URSS	73	1	2
États-Unis d'Amérique	128	89	163
Canada	166	23	90
Amérique latine	25	3	5
Afrique du Nord	48	ns	ns
Moyen et Proche-Orient	21	ns	ns
Afrique subsaharienne	66	8	10
Japon	71	216	221
NPI <sup>2</sup>	40	19	58
Chine	46	4	4
Inde	128	ns	ns
Autres pays d'Extrême-Orient	9	ns	ns
Australie/Nouvelle-Zélande	151	11	34
<b>Total mondial</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

1. Le poids scientifique (technologique) mondial d'un pays rapporté à son PIB est une mesure de sa « densité scientifique » (ou technologique) nationale. La valeur numérique du ratio n'a pas de signification en soi, c'est pourquoi on le rapporte à la base 100 pour la moyenne mondiale, ce qui facilite la comparaison internationale.

2. Voir le tableau 1 pour les définitions.

ns = chiffre non significatif.

Source : OST, d'après EPAT et CHI-Research - USPTO (OST, 1993).

s'avère que c'est le Japon qui a la meilleure performance, aussi bien dans le brevet européen que dans le brevet américain, devant donc les Américains et les Européens sur leur propre territoire.

Les nouveaux pays industrialisés d'Asie se rapprochent de la CEE pour le brevet américain, ayant déjà dépassé l'Australie et la Nouvelle-Zélande. La performance des pays de l'AELE et d'Israël mérite d'être mentionnée.

#### SYNTHÈSE DES ACTIVITÉS DE S ET T DU MONDE

Un constat s'impose à partir des données macroscopiques dont on dispose sur la situation mondiale : les trois ensembles géographiques qui constituent la « triade » (les États-Unis d'Amérique, le Japon et les douze pays de la Commu-

nauté européenne) concentrent ensemble environ les trois quarts du potentiel mondial de production des connaissances scientifiques et technologiques. Les pays de la triade, avec lesquels on peut considérer les pays de l'AELE, ont un rythme de développement scientifique et technologique à peu près homogène malgré de fortes différences dans la structure des dépenses de R-D et les stratégies. L'Europe centrale et orientale et les pays de l'ex-URSS, dont le potentiel scientifique est important mais en cours de réorganisation complète dans un contexte économique très difficile, ainsi que les pays en développement, constituent un ensemble hétérogène dont la contribution à la production des connaissances scientifiques et technologiques est importante, mais qui a le plus grand mal à suivre le rythme des pays les plus industrialisés.

**TABLEAU 7**  
STRUCTURES COMPARÉES DE L'EXÉCUTION ET DU FINANCEMENT DES PÔLES DE LA TRIADE, 1990 (%)

	CEE	États-Unis	Japon	Total
<b>Financement DIRD</b>				
État/civil	36,2	18,5	25,4	25,6
État/militaire	11,5	30,9	1,5	18,5
Entreprises	52,3	50,6	73,1	55,9
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>
<b>Exécution DIRD</b>				
État	18,9	14,1	11,6	15,1
Universités	16,3	16,0	17,6	16,4
Entreprises	64,8	69,9	70,8	68,5
<b>Total</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

Source : OST, données OCDE (OST, 1993).

## QUELQUES COMPARAISONS

### *Les structures du financement et de l'exécution de la R-D*

Si les pays de la triade appartiennent à un même système d'économie de marché, ils n'en ont pas moins des conceptions différentes du rôle de l'État dans le développement économique et donc de son intervention dans la politique technologique. Il apparaît ainsi que l'indicateur représenté par le pourcentage de la dépense intérieure de R-D financé par l'État (à titre civil et militaire), en 1990, va de 27 % au Japon à près de 50 % aux États-Unis d'Amérique (en majorité de la R-D militaire) et dans la CEE (en majorité de la R-D civile) (tableau 7). Cet indicateur traduit, à l'évidence, l'importance considérable que les entreprises industrielles japonaises accordent dans leur stratégie à la recherche-développement, qui est pour elles un moyen privilégié de maîtriser la technologie et leurs marchés. Un ministère comme le MITI a contribué au Japon à définir des politiques communes aux entreprises et à l'État japonais dans des secteurs jugés prioritaires comme l'électronique, par exemple. Les différences sont moins marquées, il est vrai, au sein de la triade, si l'on considère la part de DIRD qui est exécutée par le secteur des entreprises (mais pas nécessairement financée par elles) : elle va de 65 % dans la Communauté européenne à 71 % au Japon, alors qu'elle est de 70 % aux États-Unis (chiffres de 1990). C'est en Europe

que le rôle de l'État est donc le plus marqué, à travers les organismes publics de recherche et les universités ; une tradition historique (plus forte en France) pèse de tout son poids dans les orientations des politiques de recherche nationales.

Il faut aussi noter que certains pays comme les États-Unis, le Royaume-Uni et la France au sein de la triade, ainsi que la Russie et la Chine en dehors de la triade, ont accordé, pour des raisons politiques, une grande priorité à la recherche militaire. Les grands programmes technologiques lancés à partir des années 50 aux États-Unis (faisant suite en quelque sorte au « Manhattan Project » pour construire la bombe atomique pendant la seconde guerre mondiale), dans l'ex-URSS, puis au Royaume-Uni, en France et en Chine, sont nés de la volonté de baser la course aux armements sur des découvertes scientifiques et des innovations technologiques. Le Japon et l'Allemagne, ne pouvant se doter de l'arme nucléaire, ne se sont pas lancés, eux, dans un effort de recherche militaire de grande ampleur, contrairement aux autres grands pays industrialisés. Il n'est donc pas étonnant de constater, au sein de la triade, de grandes disparités entre les parts des crédits de R-D qui sont consacrés à la recherche pour la défense : aux États-Unis, en 1990, 63 % des crédits publics de R-D étaient consacrés à la recherche militaire, ce pourcentage n'était que de 24 % pour la Communauté européenne (il atteignait 50 % pour la Grande-Bretagne et 34 % pour la France), et 6 % seulement pour le Japon. Il est certain que des pays comme la Russie et la

TABLEAU 8  
PARTS MONDIALES DES PÔLES DE LA TRIADE DANS LES BREVETS EUROPÉEN ET AMÉRICAIN (%)

	Brevet européen		Brevet américain		
	1986	1991	1981	1986	1991
CEE	46,5	42,6	23,4	22,3	20,1
États-Unis d'Amérique	26,5	24,7	52,7	48,0	45,5
Japon	16,3	24,4	14,3	20,8	25,0

Source : OST, données EPAT-bibliométrique, CHI-Research - USPTO (OST, 1993).

Chine consacrent des moyens très importants à la recherche militaire. La recherche-développement à finalité militaire dessine de façon très nette la géographie des efforts de recherche. Elle accentue les contrastes au sein de la triade et plus généralement entre les pays. Cet effort de R-D militaire est largement exécuté dans le cadre de commandes publiques à des entreprises industrielles qui appartiennent essentiellement à deux secteurs industriels : l'aérospatial et l'électronique.

#### *Les évolutions des positions technologiques et les spécialisations sectorielles*

Le regard sur les évolutions au cours des années 80 montre l'extraordinaire progression du Japon tant en Europe qu'aux États-Unis (tableau 8), alors que les pays de la Communauté européenne et les États-Unis sont en train de céder du terrain à la fois dans les systèmes de brevets américains et européens.

L'examen des positions des pôles de la triade par domaine technologique montre qu'en Europe (tableau 9), le Japon est le premier déposant de brevets dans le domaine de l'électronique-électricité, et qu'il fait jeu égal avec les États-Unis d'Amérique, à peine dépassés par la CEE, dans le domaine de l'instrumentation. L'examen des évolutions au cours des années 80 montre l'accentuation des efforts du Japon dans ces domaines. En Europe, les États-Unis sont forts en instrumentation et en chimie-pharmacie. La CEE, en Europe, est forte dans les domaines des procédés industriels, machines-mécanique et biens de consommation, et faible en électronique-électricité.

Les positions dans le système américain (tableau 9)

confirment la spécialisation japonaise en électronique-électricité (plus du tiers des brevets) et en instrumentation; si la faiblesse de la CEE dans ces deux domaines est aussi confirmée, elle dépasse le Japon en chimie-pharmacie et en procédés industriels.

#### LA MOBILITÉ INTERNATIONALE DES ÉTUDIANTS

Environ 1,2 million d'étudiants font leurs études dans une université à l'étranger : la mobilité internationale des étudiants est un phénomène massif. Cette mobilité permet aux étudiants des pays moins avancés d'avoir accès à des services d'enseignement supérieur, mais peut comporter un risque de fuite des cerveaux. Elle permet en outre de renforcer les réseaux scientifiques mondiaux et favorise la circulation des connaissances.

#### *Les zones de départ*

On estime qu'il y a à peu près 61 millions d'étudiants dans le monde dont environ 2 % font leurs études à l'étranger (tableau 10). Le plus grand nombre d'étudiants expatriés provient du Moyen et du Proche-Orient, d'Afrique du Nord et d'Afrique subsaharienne, des nouveaux pays industrialisés et de Chine. La CEE et l'AELE ont également un nombre important d'étudiants à l'étranger, mais il s'agit surtout d'une mobilité intrazone. En termes de taux d'expatriation, l'Afrique subsaharienne vient en tête, avec un taux de 14 %, suivie par l'Afrique du Nord et le Proche et le Moyen-Orient, avec des taux voisins de 7 %. Les NPI et la Chine

TABLEAU 9  
POIDS DES DÉPÔTS DE BREVETS PAR DOMAINE TECHNOLOGIQUE, 1991

	Brevet européen (%)			1991, en base 100 pour 1986		
	CEE	États-Unis	Japon	CEE	États-Unis	Japon
Électronique-électricité	30,4	27,7	36,7	75	93	155
Instrumentation	35,6	28,6	28,1	88	93	157
Chimie-pharmacie	39,4	29,4	24,3	99	90	129
Procédés industriels	47,4	23,7	18,4	98	94	130
Machines-mécanique	55,5	17,9	16,9	98	96	146
Biens de consommation-génie civil	60,3	15,8	8,7	102	93	151
<b>Total</b>	<b>42,6</b>	<b>24,7</b>	<b>24,4</b>	<b>92</b>	<b>93</b>	<b>149</b>

	Brevet américain (%)			1991, en base 100 pour 1986		
	CEE	États-Unis	Japon	CEE	États-Unis	Japon
Électronique-électricité	14,2	45,5	34,4	83	89	111
Instrumentation	16,1	45,8	30,4	86	99	115
Chimie-pharmacie	24,8	48,1	19,9	103	94	122
Procédés industriels	22,8	47,5	19,1	93	96	115
Machines-mécanique	23,8	41,6	23,6	91	97	106
Biens de consommation-génie civil	20,3	47,6	12,4	93	94	120
<b>Total</b>	<b>20,1</b>	<b>45,5</b>	<b>25,0</b>	<b>90</b>	<b>95</b>	<b>126</b>

Source : OST, données EPAT-bibliométrique, CHI-Research - USPTO (OST, 1993).

ont également des taux supérieurs à la moyenne mondiale. Les États-Unis d'Amérique, l'ex-URSS et les pays de l'Europe centrale et orientale ont les taux les plus bas. Les étudiants des pays en développement représentent 40 % du total mondial, mais 70 % de ceux étudiant dans un pays étranger.

#### Les zones d'accueil

Les États-Unis d'Amérique sont le pays qui accueille, et de loin, le plus grand nombre d'étudiants étrangers (tableau 11) : plus de 400 000, ce qui représente plus du tiers du total mondial, alors qu'ils ne sont eux-mêmes qu'à l'origine de 2 % de ce flux. Viennent ensuite, dans l'ordre, la France, l'Allemagne et le Royaume-Uni. Ces trois pays accueillent 75 % du nombre des étudiants reçus aux États-

Unis. Arrive ensuite l'ex-URSS, mais le nombre d'étudiants reçus diminue actuellement.

En termes de taux d'étudiants étrangers par rapport au nombre total d'étudiants de chaque pays (taux d'accueil), la Belgique et la Suisse sont les pays les plus ouverts, suivis par l'Autriche et la France. On remarque le faible taux du Japon mais aussi de l'ex-URSS et de l'Italie.

#### PANORAMA MONDIAL : DES CONTRASTES MARQUÉS ET DES DÉFIS À RELEVÉ

Il faut souligner de nouveau que si la géographie de la science et de la technologie fait apparaître un monde très inégalitaire, à l'aide d'indicateurs globaux, ceux-ci ne sont pas totalement satisfaisants : ils laissent dans l'ombre des

**TABLEAU 10**  
**MOBILITÉ INTERNATIONALE DES ÉTUDIANTS EN PROVENANCE DES DIFFÉRENTES ZONES DU MONDE, 1990**

	Nombre total d'étudiants	Étudiants expatriés	Taux d'expatriation
CEE <sup>1</sup>	8 484 000	181 300	2,1 %
AELE <sup>1</sup>	863 000	34 200	4,0 %
Ex-URSS et ECO <sup>1</sup>	8 314 000	33 400	0,4 %
États-Unis d'Amérique	13 975 500	24 900	0,2 %
Canada	1 359 000	21 000	1,5 %
Amérique latine	7 113 000	81 300	1,1 %
Afrique du Nord	1 486 000	101 900	6,9 %
Moyen et Proche-Orient <sup>1</sup>	2 641 500	183 100	6,9 %
Afrique subsaharienne	691 000	99 200	14,4 %
Japon	2 683 000	40 000	1,5 %
NPI <sup>1</sup>	1 989 000	106 000	5,3 %
Chine	2 147 000	95 000	4,4 %
Inde	4 806 000	33 600	0,7 %
Autres pays d'Asie et d'Océanie	4 998 000	70 200	1,4 %
Non spécifié <sup>2</sup>		63 000	
<b>Total</b>	<b>61 550 000</b>	<b>1 168 000</b>	<b>1,9 %</b>

1. Voir le tableau 1 pour les définitions.

2. Étudiants à l'étranger dont la nationalité n'est pas connue.

Note : les chiffres concernant la mobilité internationale des étudiants sont publiés par l'UNESCO et sont basés sur des données provenant des États membres. Cependant, étant donné que les définitions et les méthodes de collecte de l'information peuvent

varier d'un pays à l'autre, les chiffres présentés doivent être considérés comme des ordres de grandeur plutôt que comme des mesures rigoureuses.

Source : OST, d'après les données UNESCO (OST, 1993).

productions scientifiques et technologiques « locales » qui sont mal diffusées, et ils ne rendent pas suffisamment justice à des réalisations qui, dans certains pays, sont de premier plan. Ainsi, le potentiel scientifique et technologique de pays comme l'Inde, la Chine et le Brésil, s'il ne saurait être comparé quantitativement à ceux des pays de la triade, n'en est pas moins important. La Chine a connu un développement scientifique et technologique remarquable au cours des années 80 et maîtrise des techniques de pointe dans les domaines du nucléaire et de l'espace. Il en va de même de l'Inde, qui a bâti un système national de la science et de la technologie sur un réseau de grands instituts de recherche nationaux, tout en développant une recherche universitaire de qualité. Le Brésil avait fait un effort de premier plan au cours des années 60 et 70, mais l'inflation et le poids de l'endettement international du pays ont compro-

mis des réalisations qui étaient, dans certains domaines, au standard international. Enfin, sans prétendre à l'exhaustivité, il faut noter que plusieurs pays arabes d'Afrique du Nord (Algérie, Maroc, Tunisie) et du Proche-Orient (Égypte, République arabe syrienne) ont su créer et développer des instituts de recherche bien insérés dans les réseaux de la communauté scientifique internationale.

Cela étant dit, on doit constater que la situation des pays d'Afrique, de la quasi-totalité des pays d'Amérique latine, des pays du Moyen-Orient et d'une grande partie de l'Asie est très préoccupante : ne produisant par eux-mêmes qu'une fraction limitée des connaissances scientifiques et technologiques, ils n'ont qu'un accès limité au potentiel scientifique et technologique mondial.

Le développement des sciences et des techniques est largement dominé depuis plusieurs décennies par les logiques

TABLEAU 11  
LES DOUZE PAYS RECEVANT LE PLUS GRAND NOMBRE D'ÉTUDIANTS ÉTRANGERS, 1990

	Étudiants étrangers dans le pays	Répartition par pays	Taux d'accueil
États-Unis d'Amérique	408 000	34,9%	2,9%
France	136 000	11,6%	8,0%
Allemagne <sup>1</sup>	92 000	7,9%	5,3%
Royaume-Uni <sup>2</sup>	71 000	6,1%	6,0%
Ex-URSS	67 000	5,7%	1,3%
Canada	35 000	3,0%	2,6%
Belgique <sup>2</sup>	33 000	2,9%	12,3%
Australie	29 000	2,5%	6,0%
Japon <sup>2</sup>	24 000	2,0%	0,9%
Suisse	23 000	1,9%	16,5%
Italie	21 000	1,8%	1,5%
Autriche	18 000	1,6%	9,0%
<b>Total 12 premiers pays</b>	<b>957 000</b>	<b>81,9%</b>	
<b>Total mondial</b>	<b>1 168 000</b>	<b>100,0%</b>	<b>1,9%</b>

1. 1988

2. 1989

Source : OST, d'après données UNESCO (OST, 1993).

de l'économie et de la puissance, même si l'objectif d'élargir le champ des connaissances demeure une motivation profonde de la recherche scientifique. La quasi-totalité des systèmes nationaux de la science et de la technologie se sont construits autour de ces logiques. On commence cependant à s'interroger, dans certains pays, sur les équilibres qui préexistent au sein des politiques nationales de la recherche et de la technologie. De nombreux domaines de la science et de la technologie sont en relation avec une « demande sociale », c'est-à-dire avec des préoccupations sociales et politiques de nos sociétés : la santé publique, l'évolution des milieux naturels et la préservation de l'environnement, la communication dans nos sociétés, la prévision des évolutions climatiques et de leur impact à long terme, sont quelques exemples de tels domaines de recherche parmi d'autres.

Toutes les questions de société correspondent à une

demande sociale très forte : elles requièrent une véritable approche scientifique capable d'apporter des éléments de diagnostic, de faire apparaître des solutions possibles, d'aider à l'élaboration de stratégies par les décideurs. Les systèmes nationaux de la recherche et de la technologie devront reconnaître des priorités nouvelles et se donner les moyens financiers et structurels pour que la recherche soit davantage impliquée dans les questions de société. Cela exigera également que les sciences de l'homme et de la société aient un meilleur « statut » dans les politiques de recherche (l'intérêt de leur problématique doit être reconnue pour elle-même) et que des programmes de recherche associant sciences sociales et sciences exactes puissent être lancés.

Le problème d'une réponse à la demande sociale est particulièrement aigu dans les pays du Tiers Monde. En effet, dans les conditions où ils se trouvent, il leur est difficile de

réaliser un décollage scientifique et technologique avant plusieurs décennies. Leur priorité est de soutenir une recherche scientifique et technique qui contribue à poser les bases d'un développement économique et social, et à résoudre les problèmes essentiels de leurs populations (santé, alimentation), mais aussi de former des cadres et des techniciens capables de faire diffuser dans le corps social les techniques de base et les méthodes scientifiques essentielles dans toutes les sociétés modernes.

Pour les systèmes de la science et de la technologie des pays développés, l'un des défis est de trouver les moyens les plus appropriés de contribuer par une politique de coopération à ce « décollage » scientifique et technique de leurs partenaires du Sud.

Par ailleurs, les systèmes nationaux de R-D des pays industrialisés doivent réorienter leurs politiques technologiques pour tenir compte de la nouvelle donne que représentent les accords de désarmement portant sur les armes stratégiques conclus entre les États-Unis et l'ex-URSS (en particulier les accords START conclus en 1991 et 1993). Ces accords vont conduire à un ralentissement très net de la course aux armements, qui se marque déjà dans l'arrêt de la croissance des budgets de la recherche militaire dans les pays industrialisés et même dans l'amorce de leur décroissance, en particulier aux États-Unis. Un débat est déjà ouvert depuis quelques années sur l'impact des dépenses de R-D militaire sur la compétitivité technologique de l'industrie, en particulier au sein de la triade. Ce débat ne peut conduire qu'à des révisions, parfois très difficiles, des politiques. C'est un enjeu majeur pour beaucoup de pays.

Les années 90 verront très certainement s'amorcer des modifications profondes au sein des systèmes nationaux de recherche et de technologie. Les enjeux auxquels ils doivent faire face appellent en effet à des réexamens de politique, voire à des modifications structurelles fondamentales.

## LECTURES COMPLÉMENTAIRES

- Arvanitis, R. et Gaillard, J. (dir. publ.). 1992. *Les indicateurs de la science pour les pays en développement*, Paris, Éditions ORSTOM.
- Barré, R. et Papon, P. 1993. *Économie et politique de la science et de la technologie*, Paris, Hachette-Pluriel.
- Chesnais, F., 1990. *Compétitivité internationale et dépenses militaires*, Paris, Economica.
- Dunning, J.H. et Cantwell, J. 1989. *Technological innovation and multinational corporations*, Oxford, Blackwell.
- Freeman, C. 1982. *The economics of industrial innovation*, Londres, Penguin Books.
- National Science Board. 1991. *Science and engineering indicators*, Washington, D.C., US Government Printing Office.
- Niosi, J. 1992. *Technology and national competitiveness*, Montréal, McGill Queen's University Press.
- Observatoire des sciences et des techniques. 1991. *Science et technologie. Indicateurs 1992*, Paris, Economica.
- OCDE. 1992. *La technologie et l'économie*, Paris, OCDE.
- Porter, M. 1990. *The competitive advantage of nations*, Londres, Macmillan.
- Rosenberg, N. 1982. *Inside the black box : technology and economics*, Cambridge, Cambridge University Press.
- Salomon, J. J. 1990. *Guerre et paix*, Paris, Economica.
- Sharp, M. et Walker, W. 1991. *Technology and the future of Europe*, Londres, Pinter.

Les tableaux présentés dans ce chapitre sont tirés de l'ouvrage de l'Observatoire des sciences et des techniques (OST), *Science et technologie. Indicateurs 1994*, Paris, Economica, 1993.

### **3** LE PARTENARIAT EN SCIENCE

---

## LA COOPÉRATION INTERGOUVERNEMENTALE

*Michel Batisse*

La connaissance scientifique, quelle que soit la discipline dont il s'agit, est la somme de contributions innombrables, grandes et petites, apportées par de nombreux chercheurs au fil du temps. L'échange d'idées et d'informations entre hommes de science a toujours été le principal moteur du progrès scientifique, qui a, intrinsèquement, un caractère cumulatif. De grands penseurs venant de pays de la Méditerranée et du Moyen-Orient se retrouvaient déjà en des lieux tels qu'Alexandrie au cours de la période hellénistique ou Bagdad à l'âge d'or de la culture arabe. Avec l'essor de la pensée scientifique moderne dans l'Europe occidentale du XVII<sup>e</sup> siècle, un échange intense d'opinions et de résultats d'expériences a commencé à s'instaurer entre les esprits les plus illustres de différentes nations. Un exemple frappant de cette pratique est donné par le père Mersenne, à Paris, qui, pendant plus de vingt ans, par correspondance ou par contact direct, fut un véritable trait d'union entre des hommes tels que Boyle, Descartes, Galilée, Huygens, Pascal et Torricelli. Un même esprit animait Oldenburg en Angleterre et a conduit à la création de la Royal Society en 1660. A cette époque, l'échange international d'informations ne se faisait que de savant à savant. Cette pratique a pris une large extension au cours du XVIII<sup>e</sup> siècle avec le progrès rapide de la science et sa nette séparation d'avec la philosophie, mais elle est restée fondamentalement la même, et survit en fait aujourd'hui sous la forme d'un foisonnement de congrès, de colloques et de contacts personnels.

### LA SCIENCE ET LES GOUVERNEMENTS

Avec l'importance croissante de l'utilisation de divers aspects de la science à des fins industrielles ou militaires, le champ d'intérêt des gouvernements, qui s'était limité jusqu'à des sujets tels que la mesure du temps ou les méthodes de navigation, allait bientôt s'élargir. Le XIX<sup>e</sup> siècle, avec la révolution industrielle, et davantage encore le XX<sup>e</sup> siècle, avec le formidable développement de la physique nucléaire, de l'informatique, de la biologie moléculaire et d'autres domaines nouveaux, ont été marqués par une application massive de la science à tous les aspects de la vie humaine par le biais d'une variété infinie d'outils et de procédés technologiques. Cependant l'imbrication croissante de la science et de la technologie, qui est devenue la source du

pouvoir économique et politique, a considérablement compromis la tradition de libre circulation de l'information scientifique. La propriété industrielle ou le secret militaire, directement ou indirectement inspirés par des intérêts nationaux ou financiers, restreignent le libre échange des connaissances dans de nombreux domaines et, plus souvent que les milieux académiques ne veulent bien l'admettre, de nombreux scientifiques des pays industrialisés sont devenus, d'une façon ou d'une autre, prisonniers des restrictions qui, pour des raisons d'ordre industriel ou militaire, sont imposées à leur liberté de communiquer, ce qui sape, dans une plus ou moins grande mesure, l'éthique scientifique traditionnelle (Batisse, 1973).

Il importe de bien garder cette toile de fond à l'esprit chaque fois que l'on considère la coopération scientifique internationale. Dans le même temps, cette coopération, et la mise en commun des connaissances qu'elle implique, demeurent indispensables au progrès dans la plupart des disciplines, et les gouvernements eux-mêmes ont bien été obligés de reconnaître cette nécessité. Les premiers liens officiels entre deux pays pour réaliser un objectif scientifique commun sont peut-être ceux que l'Angleterre et la France ont établis à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle en vue de mesures géodésiques. Sur une base internationale plus large, le premier véritable projet de coopération scientifique a été lancé en 1824, lorsque des astronomes européens se mirent d'accord pour établir une Carte internationale du ciel. L'organisation de grands congrès dans les principales disciplines a commencé après 1860, et en 1875 la première organisation intergouvernementale permanente créée à des fins scientifiques, le Bureau international des poids et mesures, fut établie près de Paris. A partir de cette époque, la coopération dans toutes les disciplines fondamentales devait se développer sur des bases solides et de manière plus organisée avec la création progressive d'« unions internationales ». La mise en place en 1919, immédiatement au lendemain de la première guerre mondiale, d'un conseil, qui allait devenir le Conseil international des unions scientifiques (CIUS), a fourni à ces unions un cadre commun et une orientation d'ensemble en même temps qu'un mécanisme assurant le contact entre les académies nationales des sciences qui se constituaient dans un nombre croissant de pays (Baker, 1982a).

Les gouvernements n'ont pas occupé une place prépondérante dans ce processus, et c'est pourquoi le CIUS et ses unions scientifiques sont considérés comme des organisations non gouvernementales. En fait, il serait peut-être plus exact de qualifier cette structure internationale complexe et bien développée de semi-gouvernementale. Certaines unions, comme celles sur la géophysique ou la géologie, reposent en effet sur l'existence de puissants services publics nationaux. De même, les académies nationales ne sont pas tout à fait indépendantes des pouvoirs publics qui les financent. En réalité, la distinction entre ce qui est gouvernemental et ce qui ne l'est pas dans le domaine scientifique, si elle est assez nette dans quelques pays qui ont une longue tradition libérale, n'a que peu de sens dans la plupart des autres, en particulier dans les pays en développement. Comme on l'a vu précédemment, l'association de la science et des pouvoirs publics est en tout cas en relation directe avec le rôle que joue la science en tant que source principale de la technologie. En même temps, toutefois, il faut souligner que les unions scientifiques défendent les principes fondamentaux de l'éthique scientifique et s'efforcent de maintenir autant que possible la tradition de libre échange des connaissances et de libre circulation des scientifiques avec un minimum d'ingérence politique.

## LES PROGRAMMES INTERNATIONAUX

La coopération internationale n'a pas pour seul objectif l'échange de l'information existante. Elle a souvent un but plus ambitieux, qui est d'acquérir de nouvelles connaissances, dans le cadre d'un programme de recherche commun aux fins duquel les différents partenaires acceptent de conjuguer leurs ressources intellectuelles, financières et logistiques. C'est ce que Gauss avait déjà à l'esprit lorsqu'il a lancé la première entreprise coordonnée visant à étudier le magnétisme de la Terre. Cette démarche, fondée sur la coopération dans les recherches, a été illustrée ultérieurement par l'organisation, en 1882, de l'Année polaire internationale, à l'occasion de laquelle onze pays décidèrent de mener simultanément des études relatives aux phénomènes arctiques au moyen d'un ensemble de stations d'observation, et de voir leur action coordonnée par le biais d'une commission internationale (Baker, 1982*b*). Une deuxième Année polaire internationale a été lancée cinquante ans plus tard. Même si l'exploitation de ses résultats a été entravée par la seconde guerre mondiale, pas moins de 44 pays participèrent à l'entreprise. Bien évidemment, des travaux de cette enver-

gure dans des régions aussi difficiles ne pouvaient être menés qu'avec le soutien actif des gouvernements intéressés. Ce fait est apparu encore plus clairement avec l'organisation en 1957/58 d'une troisième Année polaire, appelée de façon plus appropriée Année géophysique internationale (AGI), et dont les activités furent placées sous l'égide du CIUS.

Par l'ampleur de l'entreprise, qui a compté des événements considérables comme l'exploration en profondeur de l'Antarctique, le lancement du premier satellite ou la découverte des ceintures de radiation de van Allen, l'AGI a donné une dimension entièrement nouvelle à la coopération scientifique internationale. Son succès a été tel qu'il a été décidé de poursuivre bon nombre de ses actions et de lancer, dans son prolongement, plusieurs projets de type analogue, tels que les Années internationales du soleil calme (1964/65), pour l'étude du soleil, ou le Projet de recherches sur le manteau supérieur (1962-1970) et le Projet international de géodynamique (1970-1980), pour l'étude de l'écorce terrestre. En même temps, l'AGI a considérablement stimulé la coopération dans les recherches sur l'atmosphère, qui avait commencé antérieurement en raison de l'importance pratique de l'information météorologique, et qui avait débouché sur la création en 1873 d'une Organisation météorologique internationale. De 1967 à 1970, par exemple, un Programme de recherches sur l'atmosphère globale a été mis en œuvre conjointement par le CIUS et cet organisme intergouvernemental, dont le nom était devenu Organisation météorologique mondiale (OMM). Étant donné l'inquiétude croissante que suscitait la possibilité de changements climatiques dus à l'effet de serre, la coopération pour des actions de grande envergure portant sur l'atmosphère ne pouvait que s'élargir dans le cadre de programmes tels que le Programme mondial de recherches sur le climat lancé en 1980 ou d'autres entreprises connexes (Davies, 1990).

Il importe de noter que les programmes de recherche qui viennent d'être mentionnés traitent tous de certains aspects de la physique de la Terre, et qu'en dépit du fait que l'OMM, où sont représentés tous les services météorologiques nationaux, y prend une part de plus en plus importante ces programmes ont souvent été considérés, un peu à tort, comme ayant un caractère non gouvernemental, parce qu'ils étaient fondés en grande partie sur les travaux des unions internationales. En fait, seul un nombre limité de pays pouvaient participer avec des ressources humaines et financières suffisantes à ces études géophysiques coordonnées, qui ne comportaient d'ailleurs pas d'activités au sol

dans toutes les régions du monde. En d'autres termes, la plupart des pays en développement étaient davantage des spectateurs que des acteurs dans ces grandes entreprises. Cependant, le succès de l'AGI fut tel qu'il incita d'autres groupes de scientifiques à avancer que des programmes de recherche de portée mondiale consacrés à leur propre discipline ne manqueraient pas de donner des résultats considérables et de fournir des informations dont on avait le plus grand besoin. Tel fut le cas des biologistes, qui étaient particulièrement préoccupés par la montée dans le monde entier de grands problèmes environnementaux résultant de l'accroissement parallèle de la population d'une part et de la consommation des ressources naturelles d'autre part. Cela devait se traduire bientôt par l'organisation, sous les auspices du CIUS, d'un Programme biologique international (PBI), dont les activités se déroulèrent de 1966 à 1972 et qui apporta une somme considérable de connaissances nouvelles, contribuant ainsi de façon notable à la pensée écologique moderne. Toutefois, la biologie suit des voies très différentes de la géophysique. C'est pourquoi, en dépit de son incontestable succès scientifique, le PBI a souffert d'au moins une grave lacune, que son directeur scientifique, le dynamique Barton Worthington, a bien exprimée en notant que, dans le cadre du PBI : « il s'était révélé impossible d'obtenir la pleine participation des pays en développement bien que ce soit eux qui aient les plus grandes chances de tirer profit de la recherche écologique » (Worthington, 1983). Cette situation résultait non seulement du manque de moyens scientifiques dans ces pays, mais aussi du fait que dans le Tiers Monde la science est presque entièrement l'apanage des gouvernements et qu'aujourd'hui ceux-ci veulent être associés aux travaux sur le terrain qui sont menés sur leur propre territoire. Très rapidement, en fait dès 1966, un certain nombre de gens se rendirent compte qu'il fallait donner au PBI « une suite et un prolongement adéquat » en y engageant directement un organisme intergouvernemental : cela conduisit, en 1968, à l'organisation par l'UNESCO de la Conférence sur les bases scientifiques de l'utilisation rationnelle et de la conservation des ressources de la biosphère, où furent jetées les bases du Programme sur l'homme et la biosphère (MAB) (Bourlière et Batisse, 1978).

## L'UNESCO ENTRE EN SCÈNE

Ce n'était évidemment pas la première initiative importante que prenait l'UNESCO pour promouvoir la coopération scientifique internationale. Même si, lors des premières discussions entre ministres de l'éducation qui eurent lieu à Londres au cours de la seconde guerre mondiale, il n'avait pas été prévu d'inclure la science dans le mandat de la nouvelle organisation, l'importance des découvertes scientifiques dans les affaires publiques, en particulier après Hiroshima, et la nécessité de rétablir des canaux de communication scientifique entre pays, poussèrent à l'introduction du « S » de UNESCO. Symboliquement, on choisit un éminent biologiste, sir Julian Huxley, comme premier directeur général pour lancer l'Organisation. Dès le début, dans le domaine de la science, l'UNESCO s'est consacrée à deux grands objectifs : d'une part soutenir la communauté scientifique internationale et entretenir avec elle, en particulier avec le CIUS et ses unions, des contacts étroits et, d'autre part, faciliter la participation des pays en développement au progrès des connaissances, notamment en créant des bureaux de liaison scientifique en Asie, au Moyen-Orient et en Amérique latine. A ces deux objectifs devait bientôt s'en ajouter un troisième, même si celui-ci n'était pas explicitement énoncé, à savoir : mobiliser les efforts des scientifiques à travers le monde en vue d'explorer des solutions possibles à certains problèmes importants, gardant ainsi à l'esprit qu'une organisation intergouvernementale est, au premier chef, censée prêter attention aux difficultés auxquelles ses pays membres sont confrontés.

Un premier pas dans cette direction fut la création, en 1948, conjointement avec le Gouvernement français, de l'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN), devenue depuis l'Union mondiale pour la nature. Vers la même période, suite à une proposition de l'Inde, l'UNESCO fut invitée à étudier la possibilité de créer un institut international de la zone aride, qui s'occuperait principalement des régions du monde recevant trop peu de pluie. Cette décision devait avoir d'importantes conséquences pour le développement de l'action scientifique de l'Organisation. Les experts réunis pour étudier la faisabilité de l'institut envisagé aboutirent à la conclusion, très judicieuse en vérité, que si un seul centre était créé, il serait nécessairement éloigné de la plupart des régions arides et très lourd à administrer. Ils préconisèrent à la place l'établissement d'un comité consultatif international, qui tint sa

première session à Alger en 1951, donnant ainsi le départ à un Programme de recherches sur la zone aride. Sa dernière session, tenue à Jodhpur en 1964, marqua l'achèvement de ce qui était devenu un « projet majeur » de l'Organisation. Parmi les résultats de cette entreprise de longue haleine, on peut citer la publication d'une trentaine de volumes faisant le point des connaissances, la réalisation d'études interdisciplinaires dans un certain nombre de situations concrètes, la formation de centaines de spécialistes, la création de plusieurs centres nationaux de recherche et, par-dessus tout, l'établissement d'un réseau mondial de contacts. Ce programme a eu une influence profonde sur l'évolution de la démarche de l'UNESCO quant à la coopération scientifique internationale. Les principaux enseignements que l'on pouvait tirer de cette expérience de quinze années étaient les suivants :

- ☐ Un programme international comprenant des types d'action très différents relevant de la recherche, de l'échange d'informations, de l'assistance technique, de la formation, etc., peut être guidé par un simple comité consultatif composé de personnalités bien choisies.
- ☐ Tous les pays concernés, qu'ils soient industrialisés ou en développement, se montrent particulièrement intéressés dès lors qu'il s'agit de mobiliser les ressources scientifiques du monde entier pour contribuer à résoudre un problème pratique commun qui touche l'ensemble de la planète ou une vaste région.
- ☐ Une organisation intergouvernementale constitue le mécanisme approprié pour promouvoir des programmes de coopération scientifique axés sur des questions socio-économiques, demandant une approche multidisciplinaire, et faisant appel tant à la recherche fondamentale qu'à la recherche appliquée, et tant aux sciences exactes et naturelles qu'aux sciences sociales.
- ☐ Au-delà d'une certaine ampleur, un programme de ce genre exige un engagement plus net et un soutien plus formel de la part des gouvernements pour avoir des effets décisifs et durables à l'échelon national.

#### PROGRAMMES INTERGOUVERNEMENTAUX AYANT UNE DIMENSION GÉOGRAPHIQUE

Il convient de noter, à ce stade, qu'au début des années 60, l'accès d'un grand nombre de pays à l'indépendance s'est traduit par une demande massive en matière de développement. Les modestes activités d'assistance technique

menées auparavant par les organismes des Nations Unies apparurent soudain très insuffisantes, même si la création du Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD) contribua à les renforcer. Il s'ensuivit en outre une réévaluation des rapports entre science, technologie et développement, les pays du Tiers Monde insistant de plus en plus pour participer aux activités internationales et pour se voir dotés d'un minimum de moyens à cet effet. Si l'on met ensemble cette pression exercée par les pays en développement, avec l'avènement de moyens de transport et de communication rapides et le retentissement du succès d'entreprises telles que l'AGI et le Programme sur la zone aride, on peut comprendre aisément l'accroissement spectaculaire de la coopération scientifique qui a caractérisé cette période.

L'océanographie est un domaine qui requiert un important soutien logistique, y compris avec des navires spécialisés et des moyens de communication à grande distance ; elle était donc restée jusque-là le fief jalousement gardé de quelques nations, alors que d'autres pays s'inquiétaient de plus en plus de l'exploitation possible de leurs ressources marines. L'UNESCO, qui avait déjà entrepris de favoriser la recherche dans ce domaine, devint tout naturellement l'organisme chargé de coordonner l'expansion des activités. Son premier objectif majeur fut l'organisation de l'Expédition internationale de l'océan Indien (1959-1965) à laquelle participèrent 40 navires appartenant à 13 pays (Behrman, 1984). Le moyen choisi fut de créer, dans le cadre de l'UNESCO, une Commission océanographique intergouvernementale (COI), où tous les pays pourraient être représentés et où la coopération entre les gouvernements et avec la communauté scientifique pourrait s'articuler harmonieusement. Le succès de l'expédition imprima un élan durable à la COI, qui, depuis lors, a mis en œuvre un certain nombre de programmes régionaux et mondiaux intéressants divers aspects de la recherche océanique et apporté un soutien technique aux pays en développement, offrant ainsi aux sciences de la mer un cadre de coopération intergouvernementale comparable à celui que fournit l'OMM en ce qui concerne l'atmosphère.

Par ailleurs, si le Programme sur la zone aride avait mis en relief le rôle clé que joue l'eau douce dans la mise en valeur des régions visées, il était devenu également manifeste que toutes les régions du monde, en fait, devaient de plus en plus faire face à des problèmes d'eau. Tout naturellement, ce programme de moyenne importance devait

donc être suivi par une étude mondiale en commun de grande envergure portant sur l'eau : la Décennie hydrologique internationale (DHI) (1965-1974). Il s'agissait là d'une action concertée, limitée dans le temps, visant à comprendre et à analyser le cycle de l'eau sur la planète, à évaluer les ressources en eaux de surface et en eaux souterraines, à établir les bases de leur gestion rationnelle (tant sur le plan de la quantité que de la qualité), à former les spécialistes nécessaires et à rehausser la place donnée à l'hydrologie dans tous les pays. L'ambition était comparable à celle de l'AGI ou de la COI, la méthode toutefois était différente. Le mécanisme de coordination était un conseil, comptant un nombre limité de pays participants élus à tour de rôle par la Conférence générale de l'UNESCO et représentés essentiellement par des experts, chargé de superviser un programme commun de recherche et de surveillance continue, défini par consensus. Ce conseil constituait donc un organe directeur intergouvernemental plus léger qu'une commission où sont représentés tous les États, comme la COI, mais plus représentatif de la diversité mondiale qu'un simple comité scientifique. Même si tous les pays ne faisaient pas partie du conseil, ils participaient tous au Programme par l'intermédiaire de comités nationaux spécialement établis, au sein desquels étaient représentés les divers ministères et institutions s'occupant de l'eau dans chaque pays, et bénéficiaient des services du secrétariat de la DHI (UNESCO, 1991).

Ce mécanisme de coordination s'est révélé suffisamment autonome et souple pour assurer le succès de la DHI. Par ce processus, on a été amené à considérer qu'une coopération permanente en matière d'hydrologie était souhaitable, de sorte qu'à la fin de la décennie, quand il est apparu que l'OMM ne serait pas en mesure de prendre le relais pour l'ensemble de ce domaine, il a été décidé de poursuivre les activités dans le cadre de l'UNESCO selon les mêmes modalités et selon des phases successives faisant l'objet d'un examen tous les quatre ans. Cela a conduit au Programme hydrologique international (PHI), qui se poursuit encore aujourd'hui avec des comités nationaux fonctionnant dans 140 pays.

De la même manière, on a pensé qu'il serait indiqué de voir si une telle formule pouvait être appliquée à d'autres domaines d'étude de caractère mondial où la nécessité d'une coopération intergouvernementale semblait s'être déjà fait sentir, comme en écologie, en géologie ou en sismologie. Le Programme sur l'homme et la biosphère (MAB), dont l'ori-

gine a été évoquée plus haut, fut le premier test de cette même structure institutionnelle, comportant un conseil intergouvernemental de coordination de même modèle (où sont représentés 30 pays élus ainsi que d'autres organisations gouvernementales et non gouvernementales), un réseau identique de comités nationaux et un secrétariat central à l'UNESCO. Quoique le champ d'étude du MAB soit beaucoup plus diversifié et beaucoup moins clairement circonscrit que l'hydrologie, puisqu'il traite de toute la gamme des interactions entre les activités humaines et les divers écosystèmes de la planète — naturels ou modifiés par l'homme —, et qu'il doive par essence adopter une approche interdisciplinaire et axée sur les problèmes, cette structure institutionnelle s'est dans l'ensemble révélée appropriée. Le programme se poursuit aujourd'hui, après plus de vingt ans, avec des comités nationaux dans quelque 110 pays et un réseau mondial de plus de 300 réserves de biosphère réparties entre 80 pays (Barisse, 1980, 1993).

Avant la DHI, l'hydrologie était une discipline quelque peu négligée et, avant le MAB, ce qu'on peut appeler au sens large l'écologie appliquée n'était pas un domaine structuré, ni au plan national ni au plan international, même si le PBI avait ouvert la voie, sur un registre plus fondamental. Mais la géologie se présentait sous un jour très différent, avec des services géologiques bien établis dans la plupart des pays et une union internationale récente mais puissante. Lorsque l'idée se fit jour d'une harmonisation à l'échelle planétaire de ce que l'on savait de l'histoire de la Terre dans le cadre d'un Programme international de corrélation géologique (PICG), on a donc pensé que la formule suivie pour la DHI ou le MAB ne serait pas appropriée. Ce qui a paru nécessaire était de combiner, d'une part, la coopération déjà solide entre scientifiques et services au sein de l'Union internationale des sciences géologiques (UISG), avec, d'autre part, le soutien intergouvernemental apporté par l'UNESCO, grâce auquel les pays en développement pourraient jouer un rôle actif. Le résultat a été la mise en place d'un conseil d'experts désignés conjointement par l'UNESCO et l'UISG pour assurer la supervision du programme, avec le concours technique d'un comité scientifique. Cette formule, toujours en vigueur elle aussi, a donné largement satisfaction pour un programme qui conserve un caractère foncièrement technique. Une approche analogue a été envisagée pour la sismologie, mais elle s'est révélée mal adaptée, en partie parce que l'action intergouvernementale dans ce domaine se situait davantage à l'échelon régional qu'à

l'échelon mondial. Toutefois, cette situation pourrait évoluer progressivement vu la multiplication des liaisons entre réseaux régionaux d'observation sismologique.

Il ressort tout à fait clairement du bref historique qui précède qu'une coopération scientifique mondiale impliquant les gouvernements — qu'elle soit entreprise au niveau dit « non gouvernemental » ou sous l'égide d'une organisation intergouvernementale — est la mieux appropriée, et donc relativement facile à promouvoir, lorsqu'elle porte sur des disciplines qui ont une dimension « géographique ». Il est également clair, de ce fait, que le nombre des domaines dans lesquels elle peut être appliquée est limité. En conséquence, il n'est pas surprenant que, depuis le lancement du PICG, en 1973, on ait assisté à une interruption dans l'apparition de nouveaux programmes de cette nature. A cette date, l'étude des océans, des eaux douces, de l'écorce de la Terre et des écosystèmes terrestres, où l'UNESCO jouait un rôle prépondérant, était bien couverte, alors que celle de l'atmosphère, du climat et de certains aspects de l'hydrologie était traitée par l'OMM. De nouveaux outils, tels que les satellites, et des préoccupations nouvelles, comme le changement global de l'environnement, ne faisaient qu'ajouter des dimensions nouvelles à des mécanismes qui existaient plus ou moins déjà. Le Programme international sur la géosphère et la biosphère, dont le lancement est en cours sous l'égide du CIUS, représente le dernier maillon de cette chaîne ininterrompue d'entreprises de grande envergure de recherches comparées relatives à notre planète et dans lequel les gouvernements ont inévitablement un grand rôle à jouer.

## CENTRES ET PROGRAMMES INTERNATIONAUX

Dès lors que l'on en vient à la coopération scientifique dans des domaines à caractère « non géographique », où la souveraineté nationale ou les services publics nationaux n'interviennent pas directement, l'UNESCO a généralement été amenée à adopter une approche purement non gouvernementale. Tel est le cas de la recherche sur le cerveau ou sur la cellule, où elle a facilité la création de l'Organisation internationale de recherche sur le cerveau (IBRO) en 1950, de l'Organisation internationale de recherche sur la cellule (ICRO) en 1962, ou de la Fédération mondiale des collections de cultures (WFCC) en 1970, qui furent conçues comme des organismes très légers et très souples dont le

fonctionnement est assuré par les scientifiques intéressés. En fait, l'IBRO s'est associée au CIUS en 1976 et l'ICRO en 1985, et la WFCC est devenue partie intégrante de l'Union internationale des sociétés de microbiologie. De même, c'est essentiellement par des voies non gouvernementales que l'UNESCO a mis en œuvre des programmes sur les sources d'énergie renouvelables ou sur la microbiologie et la biotechnologie. En revanche, une démarche strictement intergouvernementale a été suivie, avec plus ou moins de succès, dans certains domaines où les considérations territoriales n'interviennent pas, comme la physique ou l'informatique. Le premier exemple, tout à fait remarquable, est celui du Centre européen pour la recherche nucléaire (CERN), qui a été créé dès 1954 grâce au rôle catalyseur décisif joué par l'UNESCO; ce fait a été complètement éclipsé par la renommée même de cette institution de grande envergure qui est devenue aujourd'hui le chef de file mondial dans son domaine. En l'occurrence, le succès a été directement lié à deux facteurs précis : la volonté commune d'un groupe régional de pays industrialisés ayant des intérêts et des compétences comparables dans un domaine nouveau (la physique nucléaire), et le fait qu'aucun de ces gouvernements n'était vraiment à même de prendre seul en charge le coût de la construction et de l'exploitation d'un accélérateur géant. Pouvait-on renouveler un tel succès? Une tentative fut faite dans le domaine naissant et dynamique de l'informatique, avec la création en 1961, après une longue période d'incertitude, du Centre international de calcul mécanique de Rome. On avait là pour ambition de donner à tous les pays la possibilité d'échanger librement l'information et d'avoir accès à de grands ordinateurs. Mais le domaine en question connaissait une évolution très rapide et était lié à des intérêts commerciaux privés considérables. En fin de compte, seul un très petit nombre de pays adhérèrent au Centre. L'enseignement du Programme sur la zone aride concernant la difficulté de créer un centre international viable n'avait pas été suffisamment médité et retenu. Le Centre de Rome fut ultérieurement transformé en un Bureau intergouvernemental pour l'informatique, organisme indépendant qui fut par la suite dissous en 1988. Il n'en demeure pas moins vrai que, lorsque des pays ont des motivations communes vraiment fortes et des capacités scientifiques suffisamment homogènes, des centres de recherche intergouvernementaux de caractère régional peuvent être couronnés de succès. L'Union européenne explore cette approche aujourd'hui dans divers domaines scientifiques et techniques.

Au niveau mondial, afin de faciliter l'échange d'informations et plus encore afin d'améliorer l'accès des pays en développement à la science et à la technologie, l'UNESCO s'est efforcée de promouvoir la coopération intergouvernementale dans certains domaines dans lesquels une organisation plus structurée des activités paraissait nécessaire. On a estimé que tel était le cas dans le secteur à la fois vaste et complexe de l'information scientifique et technique, où un système mondial commença à être mis en place en 1971 sous le sigle UNISIST. Étant donné que toutes les disciplines demandaient à être prises en compte, l'initiative ne se limitait pas au domaine scientifique et elle déboucha sur un Programme général d'information (PGI). Ce programme de l'UNESCO, toujours en cours, a été à peu près organisé sur le même modèle que le PHI ou le MAB, bien qu'il soit d'une nature complètement différente puisqu'il ne s'agit pas d'un programme concerté de recherche en commun, mais essentiellement d'un moyen de promouvoir et d'assurer des coopérations. Dans un esprit quelque peu analogue, un Programme intergouvernemental d'informatique a été lancé en 1985, qui est centré sur l'établissement de réseaux régionaux d'information technique, sur la formation de spécialistes et sur le développement d'infrastructures au niveau national.

## INTÉRÊT ET LIMITES DES PROGRAMMES INTERGOUVERNEMENTAUX

Le bref aperçu de l'évolution de la coopération scientifique intergouvernementale qui précède, et du rôle majeur que l'UNESCO a joué en concevant de nouveaux moyens de l'organiser, montre qu'il importe de plus en plus d'associer les pays en développement à ce qui a été jusqu'ici un quasi-monopole du monde industrialisé. Il y a lieu à ce stade de rappeler les aspects plus ou moins communs qui caractérisent les programmes intergouvernementaux patronnés par l'UNESCO (et en fait aussi bien par l'OMM et dans certains cas par le CIUS) et de mettre ainsi en relief les avantages de cette approche ainsi que certaines de ses limites :

- ❑ Il s'agit de programmes qui, par la nature même du sujet ou du problème à traiter, requièrent une coopération internationale, habituellement à l'échelle mondiale.
- ❑ Il s'agit de programmes auxquels les pays développés comme les pays en développement ont grandement intérêt à participer, parce qu'ils contribuent à améliorer la compréhension des phénomènes naturels, la connais-

sance des ressources naturelles, ou la mise en commun de l'information.

- ❑ Il s'agit de programmes concertés ou coordonnés formulés par leurs organes directeurs internationaux, dont l'exécution repose principalement sur des activités menées par les pays participants, en général selon les orientations données par des comités nationaux *ad hoc* où sont représentés des services publics, des universités et des institutions de recherche.
- ❑ Il s'agit de programmes qui ont rendu possibles la coordination des efforts et le transfert de connaissances par l'entremise de secrétariats restreints mis en place au sein de l'UNESCO et dans le cadre desquels la coopération bilatérale ou régionale peut jouer un rôle important grâce aux contacts directs établis entre comités nationaux.
- ❑ Il s'agit de programmes qui ne sont pas conçus pour avoir un caractère académique, mais plutôt pour être orientés vers la solution de problèmes concrets ; ils supposent des approches interdisciplinaires et des activités de terrain et favorisent les interactions entre chercheurs et décideurs afin que les problèmes soient correctement cernés et que les résultats aient des applications pratiques.
- ❑ Il s'agit de programmes qui ne sont pas limités à la recherche et à l'échange d'informations, mais qui comportent une forte composante « formation », laquelle est indispensable au renforcement des capacités nationales nécessaires tant pour participer activement à l'effort international que pour réaliser les objectifs nationaux correspondants.
- ❑ Il s'agit de programmes qui doivent être mis en œuvre avec la participation active des autres institutions des Nations Unies et des organisations scientifiques non gouvernementales compétentes, représentées de plein droit au sein de l'organe directeur.

On pourrait ajouter que ce type de coopération scientifique intergouvernementale est fortement décentralisée au niveau des pays eux-mêmes par le biais des comités nationaux, et que les fonds alloués pour la coordination et la stimulation à l'échelon central et à l'échelon régional sont considérablement multipliés grâce aux contributions multilatérales et nationales qui sont apportées au stade de l'exécution. De même, le nombre des scientifiques participant à ce type de programme peut être très important si l'on prend en compte toutes les activités au niveau national ou local. En revanche, un mécanisme intergouvernemental de portée mondiale peut présenter certains dangers, le principal étant

## RÉSERVES DE BIOSPHÈRE

Naguère, la conservation de la flore et de la faune était généralement assurée au moyen de grands parcs nationaux ou de petites réserves biologiques situés dans des régions relativement vierges et d'où était exclue toute activité économique humaine. Bon nombre de ces zones protégées, en particulier dans les pays en développement, sont menacées par les empiètements des populations vivant dans des localités voisines et en quête de terres agricoles ou de bois. Par ailleurs, de nombreux espaces habités, qui ne remplissent pas les conditions requises pour bénéficier d'une protection de type classique, contiennent néanmoins d'importants éléments de la diversité biologique, y compris des congénères sauvages de plantes cultivées ou d'animaux domestiques. Ces zones, ainsi que des zones plus étendues situées autour de parcs nationaux ou de réserves biologiques, se prêtent souvent à la création de « réserves de biosphère », lesquelles constituent un type relativement nouveau, non classique, de zone protégée.

La notion de réserve de biosphère a été introduite dans le Programme intergouvernemental de recherche sur l'homme et la biosphère (MAB) de l'UNESCO au début des années 70 et conserve la souplesse nécessaire lui permettant de s'adapter à l'extrême diversité des situations rencontrées de par le monde. Pour l'essentiel, chaque réserve de biosphère remplit trois fonctions fondamentales :

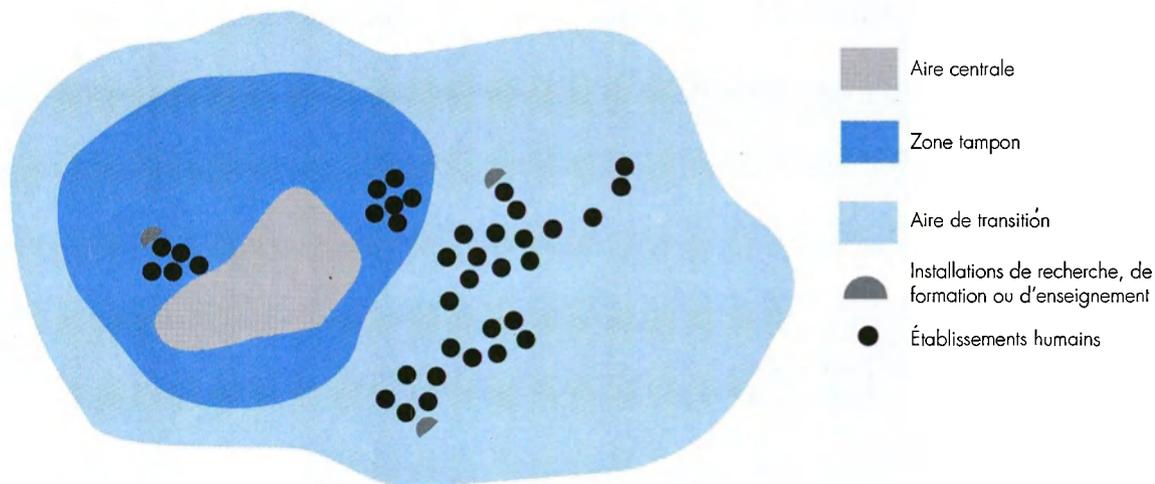
1. Une fonction de conservation : elle assure une protection *in situ* plus systématique des espèces et des ressources génétiques ainsi que des écosystèmes qui les abritent, qu'ils soient naturels ou semi-naturels.
2. Une fonction de développement : elle encourage ou perpétue des pratiques d'utilisation du sol permettant aux populations locales de tirer pleinement et directement profit de la gestion de la réserve de biosphère.

3. Une fonction logistique : elle fournit des moyens de recherche, de surveillance continue et de formation, et assure les liaisons dans le cadre d'un réseau international de réserves de biosphère.

Remplir ces trois fonctions à la fois et de façon satisfaisante représente une tâche difficile qui ne peut être menée à bien que progressivement grâce à des mécanismes de gestion appropriés. Il est fait appel en particulier à un système novateur et très largement accepté de zonage grâce auquel chaque réserve comporte d'abord une ou plusieurs aires centrales, où les perturbations sont réduites au minimum et qui sont destinées à protéger un important écosystème terrestre ou côtier. Autour de cette aire centrale s'étend une zone tampon bien délimitée consacrée à un certain nombre d'activités, qui peuvent consister, selon les cas, en utilisations traditionnelles du sol, en activités de loisir et de tourisme, en restauration des terres, en éducation et en recherche environnementales, etc., dans la mesure où ces activités sont compatibles avec les objectifs de conservation de l'aire centrale. Enfin, dans une aire de transition périphérique, on s'efforce, en coopération avec la population locale, de mettre en œuvre des pratiques de gestion durable des ressources.

Aujourd'hui, le réseau international géré par l'UNESCO compte 324 réserves de biosphère réparties dans 82 pays et couvrant une superficie totale de plus de 200 millions d'hectares. Il constitue un bon exemple de coopération intergouvernementale en vue d'une meilleure protection et d'une meilleure gestion des écosystèmes et des paysages, de l'échange d'informations et de personnels et d'activités de recherche et de surveillance écologiques concertées au niveau tant régional que mondial.

## LE CONCEPT DE RÉSERVE DE BIOSPHÈRE



que les projets se cristallisent avec le temps et risquent de tomber dans la routine si l'on ne procède pas périodiquement à une réévaluation des objectifs et si l'on ne soumet pas les activités de recherche à un contrôle de qualité adéquat. Il peut également y avoir un certain effet d'écran opéré par les comités nationaux, qui peuvent avoir tendance à monopoliser à l'excès la participation de leur pays. Il peut arriver que les représentants de certains pays faisant partie de l'organe directeur n'aient pas des qualifications scientifiques suffisantes. Ces dangers, aussi réels qu'ils soient, peuvent être surmontés. Il convient de donner la préférence à des programmes de durée déterminée, et lorsqu'il s'agit de programmes de durée indéterminée, il faut les soumettre à une évaluation critique périodique. L'organe directeur et le secrétariat doivent encourager les différents pays et leurs scientifiques à participer pleinement. Naturellement, un soutien approprié doit être apporté aux pays en développement pour les mettre en mesure de participer aussi activement que possible. A cet égard, certains projets intergouvernementaux risquent d'avoir tendance à suivre le rythme de ceux qui sont les plus lents, mais tel est le prix à payer dès lors qu'une participation universelle est requise.

Il est peu vraisemblable que le mouvement qui a conduit les gouvernements à porter un intérêt actif à la coopération scientifique s'affaiblira, comme l'a démontré récemment la signature, à l'issue de laborieuses négociations, de conventions mondiales ayant trait à des questions telles que le changement climatique et la diversité biologique, dans lesquelles de nombreuses décisions à prendre seront tributaires d'évaluations scientifiques de la situation, aussi difficile et incertain que cela soit. La revendication émanant des pays en développement pour un accès équitable à la connaissance scientifique ne peut que s'amplifier puisqu'elle constitue le fondement sur lequel peuvent s'opérer les transferts de technologie tant désirés. Dans ce contexte, l'intégrité traditionnelle de la science et la libre circulation de l'information et des scientifiques doivent être maintenues à tout prix. L'UNESCO et le CIUS doivent veiller à ce que ceci soit toujours gardé à l'esprit quand seront organisées les nouvelles entreprises de recherche concertée qui devront être mises en œuvre à l'avenir et qui, dans la plupart des cas, quel que soit le nom qui leur sera donné, impliqueront la participation directe ou indirecte des gouvernements. Dès le début même de son existence, l'UNESCO, face à la diversité des cultures, des conditions naturelles et des niveaux de développement dans le monde, s'est vue contrainte de se deman-

der comment elle pourrait parvenir à l'accord de pensée nécessaire pour atteindre ses objectifs, qui sont d'ordre avant tout intellectuel. L'expérience a montré que la coopération scientifique demeure un champ fécond et relativement ouvert où peuvent être réalisées les finalités pratiques qui sont celles de l'Organisation. Dès 1947, le philosophe français Jacques Maritain préconisait d'articuler l'action de l'Organisation essentiellement autour d'une « commune pensée pratique ». Après près de cinquante années d'expérience, il est clair que les programmes scientifiques de l'UNESCO ont su relever ce défi.

MICHEL BATISSE, ingénieur et physicien français, a été associé pendant la plus grande partie de sa carrière à l'UNESCO, où il a mis en œuvre les programmes relatifs à l'environnement et aux ressources naturelles. Il a été le coordonnateur du Projet majeur sur les terres arides, puis l'organisateur de la Décennie hydrologique internationale (DHI) et du Programme sur l'homme et la biosphère (MAB). Il a été en particulier à l'origine du concept de réserve de biosphère et occupait le poste de Sous-Directeur général (sciences) lorsqu'il a pris sa retraite. Il est actuellement président du Plan bleu pour la Méditerranée et conseiller principal auprès du PNUE et de l'UNESCO.

## BIBLIOGRAPHIE

- Baker, F. W. G. 1982a. A century of interdisciplinary cooperation, *Interdisciplinary Science Reviews*, 7, p. 270-282.
- . 1982b. Les Années polaires internationales, *Nature & ressources* (Paris, UNESCO), XVIII (3), p.15-20.
- Batisse, M. 1973. Environmental problems and the scientist, *Bulletin of Atomic Scientists* (Chicago, Science & Public Affairs), XXIX (2), p.15-21.
- . 1980. The relevance of MAB, *Environmental Conservation* (Genève), 7 (3), p.179-184.
- . 1993. The silver jubilee of MAB and its revival, *Environmental Conservation* (Genève), 20 (2), p. 107-112.
- Behrman, D. 1984. *Cap sur l'inconnu. Récit de l'Expédition internationale de l'océan Indien*, Paris, UNESCO. .
- Bourlière, F. et Batisse, M. 1978. Dix ans après la Conférence sur la biosphère : du concept à l'action, *Nature & ressources* (Paris, UNESCO), XIV (3), p. 15-19.
- Davies, A. (dir. publ.). 1990. *Forty years of progress and achievement. A historical review of WMO*, n° 721, Genève, OMM.
- UNESCO. 1991. *International Symposium to Commemorate the 25 Years of IHD/IHP*, Paris, UNESCO.
- Worthington, E.B. 1983. *The ecological century : a personal appraisal*, Oxford, Clarendon Press.

## L'EXEMPLE DE L'OCÉANOGRAPHIE

*Ulf Lie*

L'apparition dans le vocabulaire de la coopération internationale du terme « partenariat » est relativement récente. Cette notion sous-entend bien davantage une idée d'égalité et de dialogue que les expressions plus anciennes de « transfert de technologies » ou d'« assistance technique ». Un tel changement de terminologie n'est pas fortuit. Au cours de ces dix dernières années, l'idée s'est peu à peu imposée selon laquelle les problèmes auxquels l'humanité est confrontée en matière de dégradation de l'environnement, de pénurie de vivres, de croissance démographique et de guerre touchent chacun d'entre nous. Pour résoudre ces problèmes et prévenir ainsi les risques d'instabilité et de conflit majeurs, la coopération internationale doit pouvoir s'appuyer sur de véritables relations de partenariat.

Il faudrait qu'il en soit ainsi tout particulièrement dans le domaine des sciences de l'environnement. Les systèmes naturels de la biosphère, de l'hydrosphère et de l'atmosphère étant régis par les mêmes processus fondamentaux sur toute la planète, la coopération et l'échange d'informations scientifiques ne peuvent que servir l'intérêt de tous.

L'interdépendance en matière de coopération scientifique est un élément déterminant du renforcement des capacités scientifiques à l'échelle mondiale. L'échange de données et d'informations scientifiques suppose l'existence de normes de qualité universellement acceptées, qui sont elles-mêmes fonction du niveau de formation du personnel et de la disponibilité de l'instrumentation nécessaire. L'intérêt général commande par conséquent de contribuer au renforcement des capacités scientifiques dans tous les pays.

### LE PARTENARIAT ET LA COMMUNAUTÉ OCÉANOGRAPHIQUE INTERNATIONALE

Le partenariat semble naturel et même nécessaire lorsqu'il est question d'études scientifiques sur les océans. Ceux-ci forment un ensemble continu; leurs masses d'eau et leur contenu, qu'il s'agisse d'êtres vivants (les poissons, par exemple) ou de substances non vivantes (telles que les polluants) circulent librement par-delà les frontières politiques. La surexploitation des peuplements de poissons ou encore la pollution du milieu marin dans la zone côtière d'un pays ont des répercussions sur le littoral des pays voisins, ce qui, de toute évidence, est source de conflits.

Le rapide essor des pêches maritimes dans les eaux européennes qui a marqué le début du XX<sup>e</sup> siècle a fait prendre conscience de la nécessité de recourir à la coopération internationale afin de rassembler des données scientifiques dans ce domaine (Roll, 1983), ce qui a conduit en 1902 à la création du Conseil international pour l'exploration de la mer (CIEM) institué ensuite officiellement en 1964 par une convention. Lors de sa fondation, le Conseil se composait de huit États membres d'Europe; il regroupe aujourd'hui dix-huit pays d'Europe et d'Amérique du Nord. Bien qu'essentiellement destiné à l'origine à fournir une assise scientifique aux activités halieutiques, il a, par la suite, occupé une place de premier plan dans la conduite d'études océanographiques dans la région de l'Atlantique Nord. A l'heure actuelle, le CIEM joue un rôle déterminant dans la formulation des politiques de ses États membres en matière de pêche et dans la gestion des stocks communs de poissons dans la région.

Le CIEM est la première organisation au sein de laquelle des nations ont noué de fructueuses relations de partenariat pour l'étude et la gestion des océans et de leurs ressources, et cet exemple a ouvert la voie à un certain nombre de recherches océanographiques en coopération qui ont influé sensiblement sur le développement des sciences de la mer.

### L'EXEMPLE DE L'EXPÉDITION INTERNATIONALE DE L'OCÉAN INDIEN

Les fameuses expéditions océaniques du XIX<sup>e</sup> siècle et de la première moitié du XX<sup>e</sup> étaient pour la plupart organisées à l'échelle nationale (Roll, 1983), mais, après la seconde guerre mondiale, il est apparu clairement qu'un navire océanographique n'était pas en mesure à lui seul de dresser un tableau synoptique de la dynamique des océans et de ses variables, telles que les structures et la stratification des courants. De tels phénomènes ne pouvaient être valablement étudiés que dans le cadre de recherches en commun menées par plusieurs navires et équipes de scientifiques.

L'exemple le plus célèbre d'étude en commun des océans est l'Expédition internationale de l'océan Indien (EIOI), qui se déroula de 1959 à 1965. L'initiative en avait été prise par le Comité scientifique de la recherche océanique (SCOR) du Conseil international des unions scientifiques (CIUS). Parmi les grands bassins océaniques de la planète, l'océan Indien,

et les éléments physiques, chimiques, biologiques et géologiques qui le caractérisent, tout comme les mers polaires, n'étaient guère connus, et il a fallu les efforts conjugués des membres de la communauté internationale des océanographes pour en entreprendre l'étude approfondie.

La conception, la planification et, dans une large mesure, l'exécution de l'EIOI ont été assurées par les grandes institutions océanographiques de la planète, la participation des pays industrialisés y étant prépondérante. L'Inde, le Pakistan, la Thaïlande et l'Indonésie possédaient toutefois quelques-uns des quarante navires engagés dans l'expédition, et six autres pays de la région prirent part aux études (Behrman, 1984). Les relations de partenariat en matière de recherches océanographiques ont ainsi été élargies aux pays en développement, et leur efficacité a été prouvée dans le cadre des activités relatives aux composantes biologiques de l'EIOI.

Nul n'ignorait dès l'origine que l'expédition de l'importante collection de matériels biologiques, en particulier de zooplancton, à des institutions scientifiques du monde entier en vue de leur classement et de leur identification représenterait un exercice fort lourd et peu efficace. Il a donc été suggéré de mettre sur pied dans la région un centre de tri biologique où des membres de la communauté locale de scientifiques et de techniciens procéderaient, avec le concours d'éminents spécialistes mondiaux des populations planctoniques, au classement, à l'identification et au dénombrement du contenu des échantillons biologiques recueillis au cours de l'EIOI. Le Centre de biologie de l'océan Indien, mis en place en 1963 dans le Kérala (Inde), est devenu depuis un département de l'Institut national d'océanographie de Goa. Ce Centre de biologie de l'océan Indien, de même que le Comité national indien de la recherche océanographique, créé pour assurer la coordination du programme indien de l'EIOI (Qasim, 1982), ont été des facteurs déterminants de l'essor de l'Inde en tant que grande puissance dans le domaine de la recherche océanographique. De même, le développement en matière de sciences de la mer de pays de la région tels que le Pakistan, la Thaïlande et l'Indonésie a été considérablement favorisé par l'établissement de liens de partenariat dans le cadre scientifique de l'EIOI.

## LA COMMISSION OCÉANOGRAPHIQUE INTERGOUVERNEMENTALE

L'EIOI a aussi joué un rôle majeur dans la mise en place d'arrangements institutionnels dans le domaine des sciences de la mer au niveau international. Au cours de la phase de planification de l'Expédition, il est vite apparu que des campagnes océanographiques de grande envergure exigeaient la participation des gouvernements et qu'une organisation non gouvernementale telle que le SCOR n'était pas adaptée à la gestion de ce programme. Lors de la onzième session de sa Conférence générale, en 1960, l'UNESCO a créé la Commission océanographique intergouvernementale (COI), sur la recommandation de la communauté océanographique internationale travaillant à la planification et à l'exécution de l'Expédition « en vue de mieux connaître la nature et les ressources des océans grâce à l'action concertée des États membres de la Commission » (Statuts de la COI, article premier).

Chargée dès 1961 de la gestion de l'EIOI, la COI comptait au départ quarante pays membres, pour la plupart industrialisés; aujourd'hui, leur nombre est passé à cent vingt-trois, et les pays en développement sont très largement majoritaires.

Conçues sur le modèle de l'EIOI, une série d'études en commun de régions océaniques importantes, par exemple l'océan Atlantique tropical (1963-1964), le Kuro-Shio et les régions adjacentes (1965-1977) dans l'océan Pacifique occidental, ainsi que dans la mer des Caraïbes et les régions adjacentes (1967-1976), ont été menées et coordonnées par la COI. Ces recherches ont fortement contribué au progrès des sciences de la mer dans le monde et ont abouti à la formation des Sous-Commissions de la COI pour la mer des Caraïbes et les régions adjacentes ainsi que pour le Pacifique occidental.

## LE PARTENARIAT DANS LE CADRE DES CONVENTIONS INTERNATIONALES

La coopération internationale dans le cadre des conventions régissant le milieu marin est beaucoup plus récente que la coopération scientifique, tout simplement parce que la pollution marine ne posait pas véritablement de problèmes graves avant les années 50. Le premier accord international dans ce domaine est la Convention internationale pour la prévention de la pollution des eaux de la mer par les hydro-

carbures de 1952, modifiée en 1962 et en 1969. Cet instrument, qui avait pour objet de prévenir la pollution marine due aux déversements d'hydrocarbures par les navires, a été suivi d'une série de conventions de portée mondiale, telles que la Convention de Londres sur l'immersion de déchets (Convention sur la prévention de la pollution des mers résultant de l'immersion de déchets) de 1972, et de conventions régionales telles que la Convention d'Oslo de 1972 pour la prévention de la pollution marine par les opérations d'immersion effectuées par les navires et aéronefs et la Convention de Paris de 1974 pour la prévention de la pollution marine d'origine tellurique. Il existe aujourd'hui nombre de conventions mondiales et régionales pour la protection du milieu marin et la réglementation de l'exploitation des ressources marines qui ont eu une influence majeure sur l'état du milieu marin et de ses ressources.

#### LA CONVENTION DES NATIONS UNIES SUR LE DROIT DE LA MER

Les longues années de collaboration entre nations dans le domaine de l'étude scientifique des océans et pour la prise en commun, à l'échelle internationale, de mesures en vue de la protection du milieu marin et de l'utilisation rationnelle de ses ressources ont été couronnées par la tenue de la troisième Conférence des Nations Unies sur le droit de la mer. Les délibérations prolongées qui s'y sont déroulées, de 1973 à 1982, ont sans doute été aussi importantes pour le développement des sciences de la mer dans le monde que la Convention qui en a résulté (Lie, 1990). Le milieu marin et ses ressources vinrent au premier rang des préoccupations politiques internationales et des problèmes traités par les médias, les principales organisations internationales s'occupant des questions touchant à la mer participèrent toutes aux débats et un grand nombre de pays en développement prirent alors conscience de la nécessité de développer leurs capacités nationales dans le domaine des sciences de la mer.

La Convention sur le droit de la mer (UNCLOS), signée en 1982, est une tentative de réglementation globale des problèmes internationaux touchant à la mer. Près d'un tiers des 320 paragraphes de la Convention traitent des sciences de la mer et contiennent des recommandations incitant fermement à la coopération scientifique. C'est ainsi que l'article 244 stipule notamment : « Les États, tant individuellement qu'en coopération avec d'autres États et avec les organisations internationales compétentes, favorisent acti-

vement la communication de données et d'informations scientifiques, et le transfert, en particulier aux États en développement, des connaissances tirées de la recherche scientifique marine, ainsi que le renforcement de la capacité propre de ces États de mener des recherches scientifiques marines, notamment au moyen de programmes visant à dispenser un enseignement et une formation appropriés à leur personnel technique et scientifique. »

C'est dans ces termes que l'UNCLOS a lancé un appel au partenariat pour renforcer les capacités en science de la mer des États en développement. L'un des éléments de l'UNCLOS ayant eu le plus de retentissement est la création d'une zone économique exclusive, en vertu de laquelle l'État côtier ou insulaire a pleine juridiction sur la zone océanique s'étendant jusqu'à 200 milles marins du littoral. Maints petits États ont ainsi vu s'accroître considérablement la zone relevant de leur juridiction nationale et ont ainsi pu accéder aux ressources marines disponibles. On peut parler en réalité du plus grand transfert de ressources naturelles de l'histoire pour nombre d'États côtiers en développement (Lindén, 1990), phénomène qui est passé presque inaperçu.

Les États côtiers ont le droit (article 246) « de réglementer, d'autoriser et de mener des recherches scientifiques marines dans leur zone économique exclusive et sur leur plateau continental » et, de ce fait, de consentir ou non à ce que d'autres États ou des organisations internationales y mènent des activités de recherche. La décision pour l'État côtier d'accorder ou non son consentement suppose qu'il possède la capacité d'évaluer les projets de recherche proposés, c'est-à-dire qu'il soit doté d'un effectif minimum de scientifiques expérimentés. A cette fin, il était donc nécessaire de développer considérablement les moyens de formation et d'enseignement.

#### LE PARTENARIAT ET LES ACTIVITÉS DE FORMATION DE LA COI

L'expérience acquise dans le cadre de l'Expédition internationale de l'océan Indien a montré que la conduite de recherches à une échelle véritablement internationale, voire mondiale, était subordonnée à la participation active de tous les États intéressés par les questions touchant à la mer. Par ailleurs, il y avait aussi, de toute évidence, un décalage considérable entre les pays sur le plan du développement de l'océanologie, ce qui constituait un obstacle majeur à tout

nouveau pas en avant, d'où la nécessité d'offrir une assistance technique et d'opérer un transfert de technologie afin d'instaurer l'égalité indispensable à tout partenariat dans le domaine de la science. Reconnaisant l'importance du renforcement des capacités, la COI a créé, en 1972, le Comité de travail pour la formation, l'enseignement et l'assistance mutuelle dans le domaine des sciences de la mer (TEMA), dont la tâche principale est décrite à l'alinéa (iii) de son mandat dans les termes suivants : assurer « les transferts de technologie et l'assistance technique nécessaires aux États membres en développement pour les aspects des questions océaniques relatifs aux sciences de la mer, afin de leur permettre de constituer leur potentiel national de manière à participer pleinement aux recherches marines qui les intéressent, notamment aux programmes de la COI, et d'acquies leur autonomie dans le domaine des sciences de la mer en général ».

Une double tâche était donc confiée d'entrée de jeu au Comité de travail, à savoir, permettre aux États membres de participer pleinement aux recherches marines et d'acquies leur autonomie dans le domaine des sciences de la mer.

Au cours des années 70, le programme TEMA a figuré au premier plan des préoccupations de la COI : des réunions ont été organisées dans plusieurs régions du monde en vue d'examiner les besoins et de rechercher des solutions avec les États membres en développement ; des programmes de bourses d'études et autres activités de formation ont été élaborés et mis en œuvre et des efforts ont été faits pour établir un système permanent de financement des questions liées à TEMA : le Programme de coopération volontaire de TEMA.

Depuis la création du Comité de travail pour TEMA, la Commission s'est employée activement à développer ses programmes de formation et d'assistance mutuelle, mais il semble, rétrospectivement, que le rythme de croissance des activités ait été en deçà des attentes. Ce décalage s'explique notamment par le fait que la création du programme TEMA a malheureusement coïncidé avec le début d'une récession mondiale, et que les ressources y relatives se sont amenuisées, mais la raison majeure réside dans la prise de conscience soudaine de l'importance de l'océan sous l'impulsion de la Troisième Conférence des Nations Unies sur le droit de la mer. Cette nouvelle sensibilisation a entraîné une augmentation rapide du nombre des pays membres de la COI et un accroissement des demandes de programmes TEMA.

Afin de parer au besoin de programmes de formation et d'enseignement, la COI a élaboré un Plan d'ensemble UNESCO-COI pour un grand programme d'assistance destiné à renforcer les capacités des pays en développement dans le domaine des sciences de la mer. L'objectif du Plan est d'aider les États « à atteindre leurs objectifs nationaux en matière océanique et plus généralement de contribuer à la gestion rationnelle et à la protection des océans par le biais d'actions concertées menées dans le cadre des programmes scientifiques, régionaux et mondiaux ».

La stratégie de mise en œuvre du Plan d'ensemble adopté par l'Assemblée de la COI à sa douzième session, en 1982, s'échelonne sur une vingtaine d'années. Depuis lors, la Commission s'est inspirée de ce Plan pour orienter l'exécution de ses activités liées à TEMA et pour concevoir des plans d'action concrète.

Malgré les efforts impressionnants déployés par les États et les organisations internationales pour renforcer les capacités dans le domaine des sciences de la mer, l'écart entre nations développées et en développement s'est encore creusé au cours de ces dernières décennies en ce qui concerne leurs capacités scientifiques et technologiques (Lie, 1990). De 1970 à 1983, le nombre des spécialistes des sciences de la mer est passé, dans les pays industrialisés, de 4 900 à 14 400 (+294 %) et, dans les pays en développement, de 800 à 3 600 (+450 %). Certes, le taux de croissance des pays en développement est remarquable à cet égard, mais le nombre des scientifiques venus enrichir les communautés d'océanographes des pays industrialisés n'en demeure pas moins trois fois supérieur à celui des pays en développement. De plus, cette même période a été marquée par un essor très rapide de l'instrumentation océanographique perfectionnée à laquelle les scientifiques des pays en développement n'ont guère accès. Par conséquent, le partenariat ne pourra pleinement porter ses fruits dans le domaine des sciences de la mer que si l'on accroît sensiblement les efforts tendant à renforcer les capacités des pays en développement.

## LE PARTENARIAT ET L'AVENIR

Les principaux problèmes auxquels l'humanité se verra confrontée dans un proche avenir sont un possible réchauffement de la planète en raison de l'émission dans l'atmosphère de gaz à effet de serre et le spectre de graves pénuries mondiales de vivres résultant de la croissance démographique et d'un amenuisement des ressources naturelles. Afin

d'être à même de faire face à ces problèmes et de concevoir les solutions politiques qui s'imposent, toutes les nations du monde doivent pouvoir compter sur les meilleurs avis possibles de la part des scientifiques. Un tel appui doit pouvoir être obtenu, tant dans un cadre général et mondial que dans un cadre régional spécifique, ce qui suppose que la coopération internationale soit fondée sur la notion de partenariat.

Les sciences de la mer ont un rôle important à jouer dans l'étude mondiale des changements climatiques, en partie parce que les systèmes océaniques déterminent dans une très large mesure l'évolution des processus atmosphériques, et en partie parce qu'un réchauffement à l'échelle mondiale, qui pourrait avoir pour effet, par exemple, d'élever le niveau de la mer, entraînerait d'importantes conséquences sociales et économiques pour toutes les nations du monde. Les États membres des organisations internationales, y compris de la Commission océanographique intergouvernementale, s'efforcent donc activement d'organiser des études scientifiques et d'évaluer les conséquences du changement climatique. La COI, qui coparraine avec l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le CIUS le Programme mondial de recherches sur le climat, participe à un grand projet de recherche scientifique, l'Expérience sur la circulation océanique mondiale (WOCE), qui a pour objectif de mesurer et de comprendre la circulation à grande échelle et les facteurs qui influent de façon déterminante sur les masses d'eau de l'océan, ainsi que leurs relations avec le système mondial du climat.

De plus, en coopération avec l'OMM et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), la COI a pris des mesures en vue de mettre en place un Système mondial d'observation de l'océan (GOOS) qui permettra d'assurer la surveillance de l'état du milieu marin et de produire les données nécessaires à la prise de décisions concernant la gestion des océans et de leurs ressources.

Le problème de l'aptitude à satisfaire à l'avenir la demande énergétique globale est lié à la question du changement climatique. Si la production mondiale de pétrole et de gaz devait diminuer de façon radicale, nombre de pays se trouveraient sans doute dans l'obligation de recourir à l'utilisation d'autres combustibles fossiles, tels que le charbon ou les schistes bitumineux. Il est probable que ce recours à des sources d'énergie différentes accentuera encore l'effet de serre et en accélérera les conséquences néfastes. Il conviendrait dans ce contexte de ne ménager aucun effort pour rechercher s'il est possible de maîtriser le formidable poten-

tiel énergétique des océans, notamment l'énergie des vagues et des marées et, en particulier, l'énergie pouvant être tirée du gradient thermique vertical de l'océan (Conversion de l'énergie thermique des océans).

Le rôle de l'océan dans la production alimentaire mondiale est un autre domaine important susceptible de relever d'une coopération internationale fondée sur le concept de partenariat. L'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) a estimé que, si elle était équitablement répartie, la production alimentaire mondiale obtenue en 1985 devrait permettre de répondre aux besoins d'une population mondiale de 6 milliards d'habitants, soit à peu près celle d'aujourd'hui. Les pronostics varient quant à l'année où la population mondiale devrait se stabiliser. Le scénario le plus vraisemblable, d'après les estimations de l'Organisation des Nations Unies, est que la population mondiale atteindra 10 milliards d'individus en 2050 et se stabilisera aux environs de 11,6 milliards. La conclusion qui s'impose est par conséquent que la production alimentaire mondiale devra avoir pratiquement doublé d'ici 50 à 60 ans, par rapport au niveau de 1985, pour que le rapport actuel entre la production alimentaire et la population mondiale puisse être maintenu. Il est fort peu probable que l'agriculture classique seule permette d'atteindre ce but, et tout doit donc être fait pour exploiter davantage les ressources des océans.

La production alimentaire d'origine marine ne représente aujourd'hui que 5 à 10 % du total de la consommation mondiale. Gulland (1970) a estimé le rendement durable maximal des populations de poissons ayant une valeur commerciale dans le monde à environ 100 millions de tonnes par an, et de récentes statistiques halieutiques montrent que le niveau des prises, aujourd'hui relativement stable, est de l'ordre de 90 millions de tonnes par an. On assiste à un essor de la mariculture, mais le taux de croissance est très en deçà des besoins, eu égard au doublement attendu de la population mondiale au cours du XXI<sup>e</sup> siècle. Nous devons donc mobiliser toutes les compétences scientifiques de la planète en vue de concevoir des approches novatrices de la question de la productivité des océans et d'augmenter la capacité de production de ressources alimentaires marines.

**ULF LIE** est professeur de sciences de l'environnement et directeur du Centre d'études de l'environnement et des ressources de l'Université de Bergen (Norvège). Spécialiste de l'écologie marine et auteur de nombreux ouvrages sur le zoobenthos, le zooplancton et l'écologie des poissons, M. Lie a été, de 1962 à 1970, océanographe et maître de recherches à la University of Washington, Seattle (États-Unis d'Amérique), avant de retourner à Bergen. De 1987 à 1991, il a rempli les fonctions de Président de la Commission océanographique intergouvernementale (COI) de l'UNESCO.

## BIBLIOGRAPHIE

- Behrman, D. 1984. *Cap sur l'inconnu : récit de l'Expédition internationale de l'océan Indien*, Paris, UNESCO.
- Gulland, J. 1970. The fish resources of the ocean, Rome, FAO. (Tech. Paper n° 97 : 425.)
- Lie, U. 1990. The history of scientific and technical assistance in oceanography, *Deutsche Hydrografische Zeitschrift, Ergänzungsheft, Reihe B*, n° 22, p. 535-540.
- Lindén, O. 1990. Impact des activités humaines sur les zones côtières tropicales, *Nature & Resources* (Paris, UNESCO), 26 (4), p. 3-11.
- Qasim, S.Z. 1982. *New ocean regime and marine scientific research*, Paris, COI/UNESCO. (Rapport de réunion de travail n° 23. Supplément 91-115.)
- Roll, H.U. 1983. La coopération intergouvernementale au service d'une meilleure connaissance des océans, *Impact : science et société* (Paris, UNESCO), n° 3/4, p. 323-334.



## LA COOPÉRATION AUX FINS DU DÉVELOPPEMENT

Abdus Salam

Si l'on m'a demandé de contribuer au *Rapport mondial sur la science*, c'est que j'ai participé, ces trente dernières années, à la création et à la direction d'établissements scientifiques correspondant aux besoins des pays en développement. J'ai toujours été convaincu que la science faisait partie du patrimoine de l'humanité : même si au cours des derniers siècles les principaux développements en la matière ont eu lieu en Europe et dans le Nouveau Monde, il n'y a aucune raison pour que les pays pauvres ne contribuent pas au progrès de la science et ne bénéficient pas de ses fruits. Au cours de ma carrière, je me suis rendu compte de l'importance des valeurs du partenariat et de la solidarité à tous les stades de chaque action. Des hommes de grand talent — scientifiques, administrateurs, responsables nationaux, fonctionnaires internationaux et chefs d'État — m'ont aidé à créer plusieurs établissements à Trieste, ville d'Italie où je vis la plupart du temps, et à constituer un réseau mondial de chercheurs et d'établissements qui partagent un idéal commun. Dans le présent article, j'illustrerai l'intérêt du partenariat dans l'entreprise scientifique tel que je l'ai vécu moi-même.

La science s'est développée à différentes périodes de l'histoire dans différentes régions du monde, d'abord dans la Grèce antique (y compris l'Égypte, le sud de l'Italie, la Turquie et la Syrie), puis en Chine, en Inde, en Perse, en Arabie, en Turquie et en Afghanistan jusqu'en 1100 après J.-C., date à laquelle l'Europe commença à faire son entrée sur la scène scientifique. Ce n'est qu'à partir de 1450 que les pays que l'on appelle pays du Tiers Monde commencèrent à perdre du terrain par rapport à l'Europe.

De nos jours, la science est principalement l'apanage du monde occidental et du Japon. La pratique de la science est devenue onéreuse, surtout celle de la « science lourde », par exemple l'étude de la structure ultime de la matière, qui exige de grands accélérateurs de particules comme ceux des États-Unis d'Amérique ou du Centre européen pour la recherche nucléaire (CERN), à Genève, ou encore l'étude de l'espace. Le coût de ces recherches est si élevé qu'un pays ne peut les entreprendre seul ; plusieurs pays doivent mettre en commun leurs ressources financières, leurs spécialistes et leur savoir-faire technologique. L'équipement nécessaire dans des domaines moins spectaculaires peut aussi être coûteux. Ainsi, le prix de l'équipement à haute pression utilisé

pour l'étude de la catalyse en chimie peut atteindre plusieurs millions de dollars, sans parler de celui des ordinateurs rapides indispensables aux prévisions météorologiques et aux recherches sur le climat. Un progrès spectaculaire a été accompli dans les pays occidentaux du fait de l'opulence économique découlant de leur suprématie dans les domaines de la technologie, des industries de transformation et de la gestion des entreprises, ainsi que de la volonté politique des gouvernements de soutenir, soit la science lourde en coopération avec d'autres pays, soit une recherche nationale dans les universités ou dans des établissements spécialisés. Il convient de noter par ailleurs que, si les progrès de la science sont parfois le fait de percées dues à des individus hors du commun, ils résultent le plus souvent du travail que mènent des équipes composées de dizaines, voire de centaines de spécialistes.

La science est aussi une question de nombre. Le nombre des chercheurs a augmenté considérablement depuis la fin de la seconde guerre mondiale. En 1990, les pays industrialisés comptaient, selon les statistiques de l'UNESCO, 3 600 scientifiques et ingénieurs engagés dans des travaux de recherche et de R-D par million d'habitants, ce chiffre étant de 5 500 dans le cas du Japon et d'Israël. La situation est totalement différente dans les pays en développement, où il n'est que de l'ordre de 200. L'écart qui sépare le Nord du Sud est donc aussi gigantesque de ce point de vue que du point de vue économique et de la qualité de vie.

A part les pays au territoire étendu comme l'Inde, le Brésil ou l'Argentine, et quelques autres, aucun pays ne dispose d'un nombre suffisant de scientifiques pour atteindre une « masse critique », c'est-à-dire le nombre voulu de chercheurs qui, par leur travail personnel et à travers leurs contacts avec des collègues, dans leur propre pays ou à l'étranger, seraient en mesure d'obtenir des résultats significatifs sur une base continue.

A l'époque coloniale, ce que l'on appelle maintenant le monde en développement était totalement dépourvu de base scientifique, à l'exception de quelques individus tels que Bose et Rahman, en Inde. Dans les années 60, lorsque la plupart de ces pays devinrent indépendants, ils durent commencer à créer leur enseignement supérieur et leur recherche en partant quasiment de zéro.

Ce fut précisément à cette époque que je commençai à

réfléchir sur le présent et l'avenir de la science dans mon propre pays et dans les autres pays en développement. Rentrant dans mon pays, le Pakistan, en 1951, après avoir obtenu un doctorat de physique théorique à Cambridge et travaillé pendant un certain temps comme chercheur au Princeton Institute for Advanced Studies, je commençai par enseigner à Government College, à Lahore. A ce poste, je me trouvais dans un isolement total. Seul spécialiste de physique théorique dans le pays, je n'avais auprès de moi personne à qui parler, avec qui discuter ou échanger des idées. Le climat universitaire n'était guère stimulant. Au bout de trois ans, je me rendis compte que rester plus longtemps n'aurait aucun sens : mon travail allait se dégrader, les résultats que j'obtiendrais dans mes recherches en physique ne seraient pas mis à profit, et je ne serais d'aucune utilité pour mon pays. Je décidai à regret de retourner à Cambridge, rejoignant la cohorte des scientifiques d'Asie et d'Amérique latine qui, comme moi, avaient décidé de migrer vers des établissements de recherche du Nord, plus stimulants. Je repris le chemin de l'Europe, avec la détermination d'inventer quelque chose que je pourrais proposer aux hommes et aux femmes des pays en développement qui étaient placés devant ce dilemme : ou bien rester dans leur pays et mourir sur le plan professionnel, ou bien migrer vers le Nord et rester dans la course sur le plan scientifique. Dorénavant, mon temps était coupé en deux : une partie était consacrée à la recherche, l'autre à la réflexion sur les moyens de lutter contre l'exode des compétences et d'aider les scientifiques du Sud à donner la pleine mesure de leur talent. De Cambridge, je suis passé à l'Imperial College, à Londres, où le Département de physique théorique avait été fondé en 1957.

Pendant tout ce temps, je rêvais d'un lieu où les théoriciens de pays en développement et de pays industrialisés pourraient travailler ensemble dans un environnement propice à la recherche, où ils disposeraient d'une bonne bibliothèque et, dans le cas de ceux qui en auraient besoin, de bonnes installations informatiques. Ce rêve commença à devenir réalité en 1960, lorsque, en ma qualité de représentant du Gouvernement pakistanais à la Conférence générale de l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), à Vienne, je proposai la création d'un Centre international de physique théorique (CIPT). Ce fut un premier pas vers un vaste mouvement de partenariat entre organisations, gouvernements et chercheurs. Après le CIPT, mes efforts furent tendus vers la création de l'Académie des sciences du Tiers Monde (TWAS), du Réseau des organisations scientifiques

du Tiers Monde (TWNSO) et du Centre international pour la science et la haute technologie (ICS). Le Centre international de génie génétique et de biotechnologie créé en 1983 et implanté à Trieste et à Delhi fut conçu dans une large mesure sur le modèle du CIPT.

## LE CENTRE INTERNATIONAL DE PHYSIQUE THÉORIQUE DE TRIESTE

Créer un centre tel que je l'envisageais représentait à l'époque pour l'AIEA une proposition tout à fait inhabituelle. La proposition fut appuyée avec enthousiasme par les pays en développement, mais se heurta à l'indifférence des pays industrialisés, exception faite pour le Danemark, l'Italie et ce qui était alors l'URSS. Une étude préliminaire fut réalisée par des physiciens éminents et, comme suite à leurs recommandations, un séminaire international de physique théorique eut lieu pendant l'été 1962 dans une dépendance du château Miramare, à Trieste. Ce séminaire se révéla un excellent banc d'essai pour le nouveau centre. Finalement, après plusieurs débats au sein du Conseil des gouverneurs et de la Conférence générale de l'AIEA, le CIPT fut créé et implanté provisoirement à Trieste (Italie), avec une contribution annuelle de 300 000 dollars des États-Unis par le Gouvernement italien, et un apport de l'IAEA et de l'UNESCO de 55 000 et 20 000 dollars respectivement.

Plusieurs pays avaient offert d'accueillir le Centre, mais l'offre globale du Gouvernement italien et des autorités de Trieste était de loin la plus séduisante. Elle comprenait, outre une contribution au fonctionnement du Centre, la mise à disposition d'un nouveau bâtiment (ce qui fut fait en 1968) et d'une première collection d'ouvrages et de revues scientifiques destinés à la bibliothèque. Par la suite, les autorités italiennes devaient doter le CIPT d'un centre d'hébergement pouvant accueillir 100 personnes (1983) et doubler la capacité du premier bâtiment en 1989. Un troisième bâtiment où seront installés tous les services du CIPT et qui sera financé également par le Gouvernement italien est en cours de construction à proximité du bâtiment principal.

Le CIPT « décolla » rapidement en tant que centre d'excellence de la recherche multidisciplinaire. Dès les premiers mois, des résultats remarquables furent publiés en physique des hautes énergies et en physique des plasmas. D'éminents physiciens de pays industrialisés étaient attirés par la perspective de travailler en un lieu où ils pourraient discuter avec des collègues du Tiers Monde, échanger avec eux leurs

données d'expérience et aider ceux qui avaient besoin de leurs conseils. En pleine guerre froide, des théoriciens soviétiques travaillèrent pendant près de deux ans avec des spécialistes des États-Unis d'Amérique et d'Europe occidentale sur la physique des plasmas et de la fusion, domaine considéré pendant longtemps comme secret. Le renom scientifique du Centre était établi, dès le début.

La raison d'être du Centre, à savoir son utilité pour les scientifiques des pays du Tiers Monde, dicta, dès l'origine, la mise en place de plusieurs modalités visant à aider les physiciens de pays en développement à résister à l'attrait des établissements de pays industrialisés, et à recevoir une formation à un niveau aussi élevé que possible dans les domaines de recherche pour lesquels il n'existait pas de possibilités de formation dans leur propre pays.

La première de ces modalités fut le système des membres associés. Un membre associé du CIPT est un physicien ou un mathématicien d'un pays en développement, vivant dans ce pays, qui a déjà obtenu des résultats notables dans sa discipline et qui, lorsqu'il devient membre associé, a droit à des séjours périodiques au Centre, répartis sur six ans. En règle générale, les membres associés font trois séjours d'une durée comprise entre six semaines et trois mois, les frais de voyage et d'hébergement étant à la charge du CIPT. En principe, la période de six ans peut être prolongée mais, dans la pratique, du fait des restrictions budgétaires, le nombre de prolongations est limité, car la liste des candidats est très longue. Pendant leur séjour, les membres associés bénéficient de toutes les possibilités offertes par le Centre : échanges avec d'autres chercheurs, bibliothèque et installations informatiques, le cas échéant. Ils n'ont pas d'autres obligations que celles que leur imposent leurs recherches personnelles. La possibilité ainsi garantie aux chercheurs de rafraîchir leurs connaissances et d'enranger des idées qu'ils pourront ensuite élaborer et développer dans leur établissement d'origine s'est révélée un moyen efficace de lutter contre l'exode des compétences. D'anciens chercheurs associés ayant obtenu des résultats exceptionnels peuvent être nommés membres associés honoraires. Un montant forfaitaire est alors mis à leur disposition pendant cinq ans pour des séjours de brève durée au Centre, mais leurs frais de voyage doivent être couverts par des fonds provenant d'autres sources.

Pour les scientifiques moins expérimentés, le CIPT a conçu des cours de formation de haut niveau — dans un premier temps en physique nucléaire et physique de la matière condensée — et un arrangement de partage des

coûts avec des établissements connus sous le nom de système de fédération. Les établissements « fédérés » ont la possibilité d'envoyer leurs jeunes chercheurs au Centre pour une durée totale annuelle variant entre 40 et 120 jours selon la distance qui sépare l'établissement de Trieste. Pendant leur séjour, ces scientifiques participent à des ateliers de recherche, ou suivent des cours, rencontrent des experts, recueillent des données scientifiques à la bibliothèque, ou utilisent les installations informatiques lorsqu'il n'en existe pas d'adéquates dans leur propre pays. Les frais d'hébergement sont couverts par le CIPT tandis que les frais de voyage sont en règle générale à la charge de l'établissement.

Cet arrangement, reconduit tous les ans, garantit aux établissements fédérés des contacts réguliers avec un centre de recherche dynamique, ce qui les aide à maintenir et à améliorer leurs normes en matière de recherche. Un statut spécial a été accordé à certains de ces établissements (vingt à l'heure actuelle) au titre de reconnaissance de leurs réalisations scientifiques. Ces établissements dits « affiliés » reçoivent une subvention annuelle de 20 000 dollars des États-Unis pendant cinq ans pour améliorer encore leur capacité de recherche.

En 1970, la participation de l'UNESCO au fonctionnement du CIPT fut formellement consacrée par un accord signé avec l'AIEA. Avec l'UNESCO comme partenaire, le CIPT put étendre le champ de ses activités au-delà des domaines correspondant au mandat de l'AIEA, c'est-à-dire les disciplines qui ont trait aux utilisations pacifiques de l'énergie nucléaire. Ainsi, au fil des années, de nouvelles disciplines ont été ajoutées au programme d'enseignement du Centre. Pendant la dernière décennie, le Centre a organisé chaque année de 40 à 50 cours de haut niveau, des ateliers de recherche et des conférences sur les sujets les plus divers : physique fondamentale (physique des hautes énergies et des particules, relativité, cosmologie et astrophysique), physique de la matière condensée (état solide, physique atomique et moléculaire, physique des matériaux et mécanique statistique), mathématiques, physique et énergie (physique nucléaire, physique des plasmas et physique de la fusion et énergie non classique), physique et environnement (géophysique, climatologie et météorologie, physique des océans et de l'atmosphère, désertification et sols), physique de l'état vivant (neurophysique, biophysique et physique médicale), physique appliquée (microprocesseurs, communications, fibres optiques, lasers, supraconductivité et physique assistée par ordinateur), enseignement de la physique.

Les cours et ateliers durent en moyenne quatre semaines et le nombre de participants venant de pays en développement varie entre 60 et 80. Ils sont conçus afin de permettre aux participants de perfectionner et de mettre à jour leurs connaissances à l'aide de travaux pratiques, si nécessaire dans les divers laboratoires (microprocesseurs, laser, fibres optiques et supraconductivité à haute température), ou grâce au mini-ordinateur du Centre et aux nombreux ordinateurs personnels disponibles.

Dans l'ensemble, ces cours et ateliers répondent aux besoins des théoriciens. Pour la physique expérimentale, on a lancé en 1983 un programme de formation à la recherche dans des laboratoires italiens. Financé à l'origine par le Département italien de la coopération aux fins du développement, ce programme permet chaque année à 70 ou 80 scientifiques du Tiers Monde de faire des séjours de plusieurs mois à un an dans des laboratoires universitaires ou industriels en Italie. L'Institut national de physique nucléaire (INFN), le Conseil national de recherche (CNR) et le Comité des technologies nouvelles, de l'énergie et de l'environnement (ENEA) offrent également des bourses pour des travaux dans leurs laboratoires. Quelque 300 laboratoires sont ainsi en mesure d'accueillir des boursiers.

Les scientifiques des pays en développement doivent s'affirmer, et il conviendrait de les encourager à renforcer progressivement la communauté scientifique de leur pays et de leur région. A cet effet, un Bureau des activités extérieures a été créé en 1985 : il offre une aide intellectuelle et financière pour l'organisation dans les pays en développement eux-mêmes de cours, d'ateliers, de conférences, de séminaires sur l'enseignement des sciences, ainsi que de voyages de chercheurs dans ces pays. Une centaine de bourses sont accordées tous les ans dans ce but.

Ces dix dernières années, la recherche a été considérablement renforcée au CIPT. Le Centre compte désormais plusieurs chercheurs qualifiés semi-permanents en physique des hautes énergies, physique de la matière condensée, physique des plasmas et mathématiques. Ils sont chargés de guider les scientifiques titulaires d'un doctorat et, avec les spécialistes qui séjournent au Centre, aident d'autres scientifiques comme les chercheurs associés. Ils enseignent aussi dans les cours préparant au diplôme d'études approfondies en physique théorique ou en mathématiques récemment créé.

Chaque année le CIPT accueille plus de 4 000 scientifiques du Tiers Monde et des pays industrialisés. La durée moyenne de séjour est de l'ordre de cinq semaines pour les

premiers et de dix jours pour les seconds. Plus de 300 articles sont publiés chaque année par les chercheurs du Centre et les spécialistes invités. Au total, sur les 50 000 scientifiques qui ont participé depuis 1964 aux activités du Centre à un titre ou à un autre, 35 000 venaient de pays en développement.

Le CIPT doit son succès et son impact sur la situation de la recherche dans le Tiers Monde au partenariat étroit établi entre les organisations internationales — l'AIEA et l'UNESCO —, le Gouvernement italien (qui fournit 90 % des ressources budgétaires du Centre), d'autres organismes tels que l'organisme suédois de développement international, les autorités locales de Trieste et l'ensemble de la communauté scientifique mondiale.

Un accord tripartite entre le Gouvernement italien, l'AIEA et l'UNESCO, aux termes duquel la responsabilité de l'administration du CIPT est transférée à l'UNESCO, a été signé récemment et attend la ratification du Parlement italien.

Le CIPT est resté jusqu'à présent la seule expérience de ce genre qui ait été tentée, ce qui est regrettable. A notre connaissance, il n'existe aucun autre centre conçu à la même échelle qui soit l'émule du CIPT, sauf celui qui est en cours de création aux États-Unis d'Amérique.

## L'ACADÉMIE DES SCIENCES DU TIERS MONDE

Les scientifiques du Tiers Monde doivent unir leurs forces. Sans cette union, la science ne pourrait pas s'affirmer dans les pays en développement face à la mondialisation de la science et de la technologie à laquelle nous assistons aujourd'hui. Dans cette optique, j'ai discuté en 1981 avec mes collègues de l'Académie pontificale de la possibilité de créer une Académie des sciences du Tiers Monde. Deux ans plus tard, la TWAS était fondée, et, en juillet 1985, elle était inaugurée officiellement par M. Javier Perez de Cuellar, Secrétaire général des Nations Unies.

Les principaux objectifs de la TWAS étaient les suivants : reconnaître et soutenir l'excellence dans les recherches scientifiques effectuées par des chercheurs du Tiers Monde ; offrir aux scientifiques des pays en développement du Sud dont les débuts sont prometteurs les conditions nécessaires à l'avancement de leur travail ; promouvoir les contacts entre les chercheurs de pays en développement du Sud et la communauté scientifique mondiale ; fournir une information relative à la sensibilisation aux questions scientifiques dans le Tiers Monde et un appui dans ce domaine ;

encourager les recherches scientifiques sur les grands problèmes du Tiers Monde.

L'Académie des sciences du Tiers Monde compte actuellement 311 membres appartenant à 54 pays en développement, dont neuf lauréats de prix Nobel originaires du Tiers Monde. La TWAS est une organisation apolitique sans but lucratif. Elle est devenue membre associé du Conseil international des unions scientifiques (CIUS) en 1984, et le Conseil économique et social des Nations Unies lui a reconnu officiellement le statut d'ONG en 1985. Depuis 1991, l'UNESCO est chargée de son administration. Son budget représente un dixième environ de celui du Centre international de physique théorique. Cependant, elle a lancé avec succès plusieurs programmes conformes à ses objectifs, notamment les suivants :

- ❏ Des prix de l'Académie des sciences du Tiers Monde (d'un montant de 10 000 dollars des États-Unis) en biologie, chimie, mathématiques, physique et sciences médicales, décernés à des chercheurs de pays en développement qui ont contribué de manière exceptionnelle au progrès de leur discipline.
- ❏ Des prix décernés aux jeunes scientifiques de pays en développement, institués par des académies et des conseils de recherche du Tiers Monde ; l'Académie offre une aide financière à cet égard.
- ❏ Des bourses de recherche de l'Académie, d'un montant maximal de 5 000 dollars, attribuées pour des travaux et projets de recherche scientifique prometteurs exécutés dans le Tiers Monde ; des pièces de rechange destinées à des équipements scientifiques fournis aux laboratoires qui en ont besoin (pas plus de 500 dollars pour chaque envoi).
- ❏ Des bourses de recherches Sud-Sud couvrant les frais de voyage pour des séjours d'au moins quatre semaines dans des établissements scientifiques du Tiers Monde, les frais de subsistance étant couverts avec des fonds provenant de sources locales. Ont participé à ce programme, avec un total de plus de 200 voyages, les gouvernements et des organismes scientifiques des Antilles, d'Argentine, du Brésil, du Chili, de Chine, de Colombie, du Ghana, d'Inde, du Kenya, de Madagascar, du Mexique, des Philippines, de République islamique d'Iran, de République populaire démocratique de Corée, de République arabe syrienne, du Venezuela, du Viet Nam et du Zaïre. Par ailleurs, l'Académie des sciences du Tiers Monde et l'Académie chinoise des sciences ont lancé un programme de bourses pour la formation de

jeunes scientifiques du Tiers Monde dans des laboratoires chinois pendant des périodes d'un mois à un an. Un arrangement analogue a été conclu avec le Conseil indien de la recherche scientifique (CSIR) pour des bourses d'études universitaires supérieures.

- ❏ Appui apporté à des réunions internationales tenues dans les pays en développement, sous forme de bourses de voyage accordées à des conférenciers venant d'autres pays et/ou à des participants de la région. Ces réunions portent sur les sujets suivants : agriculture et biochimie, biotechnologie, chimie, géologie, sciences de l'ingénieur et sciences médicales.
- ❏ Un programme de conférences exécuté en collaboration avec le CIUS, l'UNESCO et le Comité scientifique du Commonwealth (CSC), offrant à des scientifiques de pays en développement des possibilités de discussion et de coopération avec d'éminents collègues d'autres pays.
- ❏ Un programme de bourses exécuté en collaboration avec l'UNESCO, grâce auquel des scientifiques de pays en développement peuvent travailler dans des laboratoires de biologie moléculaire qui participent au projet relatif au génome humain. Situés dans les pays industrialisés, les laboratoires hôtes offrent aux boursiers une formation générale aux techniques analytiques de biologie moléculaire, l'accent étant placé sur les méthodes utilisées pour le séquençage du génome humain.
- ❏ Ouvrages et revues faisant l'objet de dons de particuliers et d'établissements de pays industrialisés envoyés à des bibliothèques scientifiques du Tiers Monde.

L'Académie tient tous les deux ans une conférence générale, la dernière ayant été accueillie par le Gouvernement koweïtien en novembre 1992. Outre l'examen des affaires courantes, les conférences générales sont l'occasion pour les membres de se rencontrer et d'échanger leurs vues, de la remise des prix de l'Académie, de discussions en groupes et de causeries sur des questions scientifiques et technologiques qui sont d'actualité dans la région où se tient la conférence générale. Les conférences générales précédentes ont eu lieu à Trieste (1985), en Chine (1988) et au Venezuela (1990).

#### RÉSEAU DES ORGANISATIONS SCIENTIFIQUES DU TIERS MONDE

L'Académie des sciences du Tiers Monde collabore avec le bureau central du Réseau des organisations scientifiques du Tiers Monde (TWNOS), qui est implanté en son siège.

Ce réseau comprend 26 ministères de la science et de la technologie, 39 académies des sciences, 42 conseils scientifiques et 20 autres organismes appartenant à 69 pays en développement.

Le TWNSO a été créé en 1988 avec les objectifs suivants : encourager les gouvernements à allouer des ressources adéquates à la science et à la technologie du Sud ; promouvoir l'intégration de la science et de la technologie dans les plans nationaux des pays du Tiers Monde ; améliorer la contribution et la participation du Sud aux projets scientifiques mondiaux et aux programmes de pointe en matière de science et de technologie ; promouvoir des programmes de collaboration entre établissements de recherche dans les domaines de la science, de la technologie et de l'environnement qui présentent une importance critique pour le développement du Sud ; reconnaître et encourager les innovations scientifiques et techniques qui auraient des retombées importantes pour le développement économique et social du Sud.

Le Réseau décerne deux prix annuels (de 10 000 dollars chacun), en agriculture et en technologie, à des instituts ou à des chercheurs dont les innovations scientifiques et techniques ont apporté des solutions réelles et durables aux problèmes du Tiers Monde. Il fournit en outre un appui financier à ses membres pour la création de prix annuels destinés à promouvoir la sensibilisation du public à la science. Par ailleurs, le TWNSO publie un annuaire contenant des informations sur les programmes de ses membres et prépare un inventaire des centres d'excellence en matière de recherche et de formation. Des bureaux régionaux du Réseau ont été établis en Afrique (Lagos, Nigéria), dans la région des États arabes (Tunis), dans la région de l'Amérique latine et des Caraïbes (Mexique) et dans celle de l'Asie et du Pacifique (Kuala Lumpur, Malaisie). Deux sections, l'une au Royaume-Uni et l'autre aux États-Unis d'Amérique, assurent la liaison entre le TWNSO et les établissements scientifiques des pays industrialisés.

#### CENTRE INTERNATIONAL POUR LA SCIENCE ET LA HAUTE TECHNOLOGIE

Bien que le Centre international de physique théorique ait fait beaucoup pour former des jeunes scientifiques, hommes et femmes, en sciences pures et appliquées, il fallait créer un autre type d'établissement de formation et de recherche pour que les pays en développement puissent participer

d'avantage au progrès technologique. La technologie, en particulier la technologie à fort contenu scientifique sur laquelle reposent des industries comme les communications, le laser, l'industrie pharmaceutique et les nouveaux matériaux, est une source de richesse pour les pays qui en ont la maîtrise. On peut certes former des scientifiques et des ingénieurs dans ces domaines dans des établissements de pays industrialisés, mais le risque d'exode des compétences est alors très élevé du fait de l'attrait exercé par les conditions économiques offertes par les entreprises locales aux scientifiques ainsi formés.

J'ai donc conçu un lieu où les scientifiques du Tiers Monde pourraient être formés à la recherche dans des domaines qui sont à l'interface de la science pure et de la R-D industrielle, sous l'égide d'un organisme des Nations Unies. En février 1988, j'ai présenté au ministre italien des affaires étrangères mon projet de création d'un nouveau centre à Trieste. Quatre mois plus tard, le Gouvernement italien a ouvert des crédits pour une étude de faisabilité qui a été faite sous la direction de l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI), en tant qu'agent d'exécution.

Cette étude a été réalisée en consultation avec des scientifiques renommés de pays en développement, d'Italie et d'autres pays industrialisés (y compris trois lauréats de prix Nobel, K. A. Müller (Suisse), K. M. Siegbahn (Suède) et K. von Klitzing (Allemagne)). Donnant suite aux recommandations formulées pendant la réalisation de l'étude de faisabilité, le Gouvernement italien a alloué des crédits pour des projets de recherche pilotes. La deuxième étape a commencé en 1990, les programmes étant centrés sur trois grands domaines : chimie pure et appliquée ; hautes technologies et nouveaux matériaux ; sciences et technologies de la Terre, de l'environnement et de la mer.

Trois instituts internationaux correspondant à ces domaines ont été créés ; ensemble, ils constituent actuellement le Centre international pour la science et la haute technologie (ICS). L'Institut international pour la chimie pure et appliquée oriente ses recherches vers la réactivité et les macromolécules. L'Institut international pour les hautes technologies et les nouveaux matériaux travaille dans quatre directions : photonique, matériaux composites, supraconducteurs et semi-conducteurs. Le troisième élément de l'ICS, l'Institut international pour les sciences et les technologies de la Terre, de la mer et de l'environnement, étudie les changements climatiques et planétaires, les interactions

écologiques, la prospection géophysique ainsi que les sciences et technologies de la mer et la gestion des zones côtières.

Les recherches de l'ICS ont lieu dans des laboratoires provisoires situés sur le campus du CIPT, ou à l'Université de Trieste et dans le périmètre abritant les installations de recherche de Trieste. En 1991-1992, les trois instituts de l'ICS ont accueilli dans leurs laboratoires 66 scientifiques et stagiaires représentant au total 600 personnes-mois. Des résultats de recherche ont été publiés dans 63 communications. L'ICS est également très actif dans le secteur de la formation. En 1992, 15 cours, ateliers et conférences ont été organisés pour former des scientifiques de pays en développement dans des matières en rapport avec les programmes des lignes de recherche. Au total, 958 scientifiques, dont 602 appartenant à des pays du Tiers Monde, ont pris part à ces actions de formation. La plupart des cours et ateliers ont eu lieu à Trieste, mais certains ont été accueillis dans des pays en développement. Ce fut le cas d'un cours d'écologie mathématique organisé en 1992 à Addis-Abéba (Éthiopie). En 1993, l'Argentine, l'Égypte et l'Inde ont accueilli des cours qui portent, respectivement, sur la supra-conductivité, l'énergie solaire et la synthèse organique. Dans le cadre de ses programmes interdisciplinaires, le Centre offre périodiquement des cours de gestion appliquée à la recherche et à l'innovation. Un de ces cours a eu lieu à Moscou (Russie) en 1992, tandis que l'Argentine et la Hongrie accueillirent ceux de 1993.

Le Centre a montré qu'il était capable, avec des ressources limitées, de répondre aux besoins des pays en développement de manière efficace et souple. Les résultats des projets pilotes ont déjà fait l'objet d'une appréciation favorable de l'équipe d'évaluation de l'ONUDI, et le Centre est prêt à entamer la phase opérationnelle dès que le financement en sera assuré.

## CONCLUSION

Jetant un regard sur ces trente-trois années d'activité, je mesure l'ampleur et la qualité des bonnes volontés des partenariats qui, sous diverses formes, ont contribué à faire de mes idées une réalité. En tant que fonctionnaire international, je tiens d'abord à souligner le rôle et l'importance de l'UNESCO et de l'AIEA dans la création du CIPT à Trieste et dans le soutien apporté à l'Académie des sciences du Tiers Monde, et ceux de l'ONUDI dans le lancement de

l'ICS. Ces organisations ont fourni, outre les ressources financières, un cadre qui a facilité la participation des scientifiques du monde entier aux programmes des instituts de Trieste et ont contribué à les faire mieux connaître.

D'autres organisations, telles que le Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD), l'Organisation météorologique mondiale (OMM), le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et la Communauté économique européenne ont, d'une manière ou d'une autre, soutenu nos programmes.

L'Italie a été un partenaire exceptionnel, le Gouvernement italien prenant à sa charge 90 % des frais de fonctionnement de l'Institut de Trieste. Les autorités locales ont également apporté des contributions importantes. Les universités italiennes, celle de Trieste en particulier, de même que des organismes nationaux prestigieux comme l'INFN, le CNR et l'ENEA, ont collaboré de diverses manières avec le CIPT, l'ICS et la TWAS.

Parmi les autres partenaires, on peut citer l'Agence suédoise de coopération scientifique avec les pays en développement (SAREC), l'Agence canadienne de développement international (CIDA) et le Fonds de l'OPEP. Enfin, je dois mentionner la communauté mondiale des scientifiques, du Sud et du Nord, de l'Est et de l'Ouest, qui a toujours soutenu nos efforts.

Notre présence à Trieste a suscité d'autres initiatives, devenues aujourd'hui réalités : l'École internationale supérieure d'études avancées, située près du CIPT, et le Laboratoire de rayonnement synchrotron, à 13 kilomètres du Centre, qui sera mis en service en 1994.

Trieste a été surnommée la « cité de la science ». Toutefois, ses établissements scientifiques ne suffisent pas encore pour faire face aux besoins du Tiers Monde. C'est pourquoi j'ai avancé, à la troisième Conférence générale de l'Académie des sciences du Tiers Monde à Caracas (1990), l'idée de créer, directement dans les pays en développement, un certain nombre de centres internationaux ou régionaux pour la science, la haute technologie et l'environnement. A ce jour, le Réseau des organisations scientifiques du Tiers Monde a reçu de 23 pays en développement 33 propositions visant à moderniser des centres existants pour les amener à un niveau de qualité tel qu'ils puissent fonctionner sur une base régionale. Toutes ces propositions ont été soumises par des premiers ministres ou des ministres de la science et de la technologie. Elles feront l'objet d'une éva-

luation en plusieurs étapes, et il appartiendra à une commission ministérielle de décider si elles peuvent être retenues. L'ONUDI participe activement à ce processus d'évaluation. Je suis convaincu qu'une grande occasion s'offre à nouveau pour qu'un partenariat s'établisse sous toutes les formes qui se sont révélées fécondes à Trieste, et j'espère vivement que la communauté scientifique mondiale, comme toujours, s'en saisira pour renforcer la solidarité entre le Sud et le Nord.

Fondateur et directeur du Centre international de physique théorique, à Trieste, le professeur **ABDUS SALAM** est aussi président de l'Académie des sciences du Tiers Monde et du Réseau des organisations scientifiques du Tiers Monde. Après des études à l'Université du Penjab au Pakistan et à St. John's College, à Cambridge, il a enseigné à Government College, à Lahore, et à l'Université du Penjab et, depuis 1957, il est professeur à l'Imperial College, à Londres. Parmi les nombreux prix qu'il a reçus figurent notamment le prix Nobel de physique, qui lui a été décerné en 1979 pour récompenser ses travaux sur l'unification des interactions électromagnétiques et des interactions faibles, et la médaille Copley (1990). Il est membre d'académies et de sociétés savantes appartenant à 24 pays du Tiers Monde et pays industrialisés, et il a été fait docteur *honoris causa* de plus de 40 universités réparties dans 28 pays. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages scientifiques et de nombreux articles sur la physique des particules élémentaires, ainsi que sur les politiques scientifiques et éducatives pour les pays en développement.

## 4 ÉVOLUTION RÉCENTE

---

# MATHÉMATIQUES

*Ian Stewart*

A l'approche de la fin du  $xx^e$  siècle, la recherche mathématique se porte très bien, avec de nombreux problèmes anciens en cours de résolution et l'apparition de nombreux domaines de recherche nouveaux. L'aspect le plus encourageant est peut-être le renforcement marqué de la relation entre les mathématiques et les sciences appliquées, avec des échanges d'idées dans les deux directions. L'importance des mathématiques ne réside pas dans leurs applications à tel ou tel domaine de la science, mais dans leur capacité de « transférer des technologies » entre différents domaines d'application. Les technologies transférées sont des concepts et des techniques mathématiques, et non des matériels, mais elles ont un effet tout aussi puissant. Les concepts mathématiques étant généraux, les idées qui apparaissent pour la première fois dans un domaine particulier peuvent se transférer aisément dans un autre domaine, en apparence très différent. Des exemples en sont donnés dans les pages qui suivent : les nouveaux résultats de la théorie des nœuds, provenant de la physique mathématique et appliqués en biologie moléculaire ; un problème de musique dont la solution a éclairé la théorie des ondes ; un problème d'optimisation qui a conduit à des questions fondamentales sur la calculabilité ; un nouveau type de géométrie qui a pour origine la mécanique classique et occupe maintenant une place centrale dans la mécanique quantique.

La valeur des mathématiques pour l'humanité est attestée en fin de compte par des retombées pratiques, mais beaucoup d'idées importantes ne sont pas issues d'une application particulière. Elles découlent des besoins internes des mathématiques elles-mêmes. Si des questions fondamentales restent sans réponse, la compréhension mathématique comporte une lacune qui sera une source de difficultés dans toute la discipline, du point de vue aussi bien théorique que pratique. A long terme, les problèmes centraux de mathématiques pures sont donc tout aussi importants que les applications. Les mathématiques trouvent leur inspiration partout où elles le peuvent.

Les domaines majeurs des mathématiques se comptent par centaines. Ils font tous l'objet de recherches, et se ramifient en milliers de subdivisions bien définies. Il n'est pas possible de donner une vue complète de la recherche mathématique actuelle dans son intégralité. C'est pourquoi j'ai choisi six domaines qui, à eux tous, donnent une idée de

l'étendue, de la puissance et de l'originalité des mathématiques à la fin du  $xx^e$  siècle ainsi que du chemin qui mènera à celles du  $xxi^e$  siècle. Dans chaque cas, je ne peux présenter qu'un échantillon des travaux actuellement en cours. Ces domaines sont les suivants : les nœuds et la topologie des espaces de basse dimension ; les systèmes dynamiques non linéaires (popularisés sous le nom de théorie du chaos) ; les équations diophantiennes ; la géométrie symplectique ; les algorithmes et la complexité ; le spectre de l'opérateur de Laplace (« entendre la forme d'un tambour »).

## LES NŒUDS ET LA TOPOLOGIE DES ESPACES DE BASSE DIMENSION

La topologie est l'étude des propriétés des formes qui ne sont pas affectées par des déformations continues, par exemple la connexité, le fait d'être noué, la présence ou l'absence de « trous ». Depuis au moins un siècle, les topologues essaient de trouver des moyens efficaces de distinguer des nœuds différents mais, jusqu'à une date récente, les méthodes disponibles se limitaient à celles introduites dans les années 20. La découverte dans les années 80 d'une approche entièrement différente — le polynôme de Jones, inventé par le mathématicien néo-zélandais Vaughan Jones<sup>1</sup> — a constitué en la matière une révolution. Il s'agit là d'un problème central et important, parce que la distinction entre les nœuds pose de la façon la plus simple et la plus naturelle une question très générale : celle de la distinction entre les différentes façons de plonger un espace dans un autre. La théorie des nœuds a des applications pratiques, avec des problèmes aussi variés que les diagrammes de Feynmann en physique quantique ou le découpage des molécules d'ADN par les enzymes. Cependant, l'attrait réel des nœuds réside dans leur subtilité inattendue.

Un nœud mathématique est une boucle fermée dans un espace à trois dimensions. Deux nœuds sont topologiquement équivalents si l'on peut transformer l'un en l'autre par une déformation continue, en étirant et en courbant l'espace qui les entoure. Tout ce qui peut se déformer pour aboutir à un cercle n'est pas noué ; dans tous les autres cas, on a affaire à un nœud véritable. C'est cette faculté de déformer les nœuds qui les rend si subtils : si l'on veut prouver que deux nœuds sont différents, il faut d'une

1. Université de Californie à Berkeley, États-Unis d'Amérique.

manière ou d'une autre éliminer toutes les déformations concevables. Toutes les méthodes connues se ramènent à trouver des invariants — c'est-à-dire des propriétés que les déformations ne modifient pas. Les nœuds qui ont des invariants différents sont forcément différents topologiquement.

L'invariant clé de la période classique, les années 20, a été découvert par J. W. Alexander. Il associe à tout nœud une expression algébrique, son *polynôme d'Alexander*. Les nœuds dont les polynômes sont différents ne peuvent pas être transformés l'un en l'autre par une déformation. Ainsi, le polynôme d'Alexander d'un nœud en trèfle est  $t^2 - t + 1$ , alors que celui d'un nœud en figure huit est  $t^2 - 3t + 1$ . Ces deux polynômes étant différents, les deux nœuds le sont aussi. Malheureusement, la réciproque n'est pas vraie : deux nœuds peuvent avoir le même polynôme d'Alexander sans être topologiquement équivalents. Le nœud en trèfle et son image symétrique ont le même polynôme d'Alexander. Le nœud plat et le nœud de vache (fig. 1) ont l'un et l'autre le même polynôme d'Alexander  $(t^2 - t + 1)^2$  bien qu'ils soient

différents, comme cela a été classiquement démontré par des méthodes plus ésotériques.

En 1984, Jones inventa un nouvel invariant de nœud, qui est aussi un polynôme. Travaillant dans le domaine de l'analyse, il étudiait les algèbres de von Neumann qui interviennent en physique mathématique. Il remarqua certaines caractéristiques structurelles curieuses, semblables à des résultats classiques d'Emil Artin sur la théorie des tresses, qui sont des nœuds à brins multiples. En suivant ces similarités, il aboutit à un nouvel invariant de nœud tout à fait inattendu, assez puissant pour résoudre aisément des problèmes qui avaient à tel point sollicité les méthodes classiques que leurs limites avaient presque été atteintes. Par exemple, le polynôme de Jones pour un nœud en trèfle est  $t + t^3 - t^4$ , alors que celui de son image symétrique est obtenu en remplaçant  $t$  par  $t^{-1}$ , ce qui donne  $t^{-1} + t^{-3} - t^{-4}$ , soit un résultat manifestement différent. De même, le polynôme de Jones du nœud plat est

$$-t^3 + t^2 - t + 3 - t^{-1} + t^{-2} - t^{-3},$$

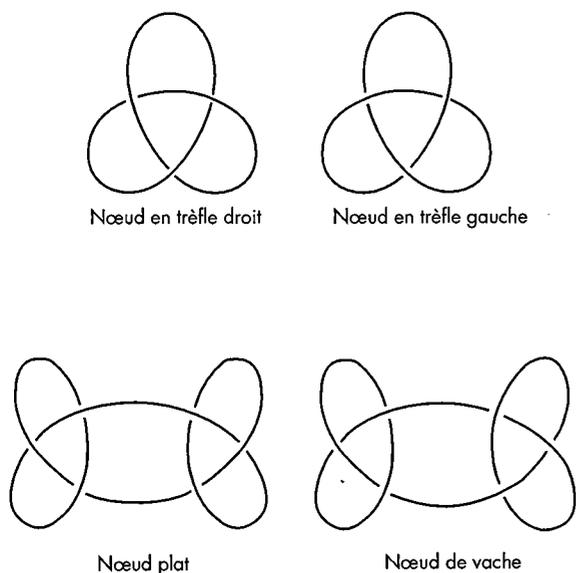
qui est évidemment différent du polynôme de Jones du nœud de vache :

$$t^8 - t^7 + t^6 - 2t^5 + 2t^4 + t^2.$$

D'autres mathématiciens ont découvert, depuis, de nombreuses variantes de la méthode de Jones, de sorte qu'on est parvenu à toute une palette, à première vue déconcertante, de nouveaux invariants de nœuds.

Mais la question de ces invariants a été considérablement éclairée par des idées provenant de plusieurs domaines de la physique mathématique. Jones a remarqué assez tôt un lien curieux avec la mécanique statistique, discipline qui, à première vue, n'a rien à voir avec les nœuds. Elle tire son origine des efforts déployés par les physiciens pour comprendre la matière macroscopique — la nature des gaz, des liquides et des solides. La partie la plus intéressante de la physique a trait aux transitions de phase — les passages de l'état solide à l'état liquide ou de l'état liquide à l'état gazeux. Les transitions de phase ne se produisent pas graduellement, mais soudainement, à des températures très précises. Une façon d'aborder ce phénomène consiste à utiliser des modèles d'état — arrangements géométriques dont les éléments sont appelés *sites*. En 1971, bien avant que Jones ne commence ses travaux, H. N. V. Temperley et E. H. Lieb avaient découvert un lien entre deux types différents de modèles exactement résolubles de la mécanique statistique,

FIGURE 1  
INVARIANTS DE NŒUDS



Le nœud en trèfle droit et son image symétrique sont topologiquement distincts mais ils ont le même polynôme d'Alexander. Le polynôme de Jones les distingue sans difficulté. Il en est de même pour le nœud plat et le nœud de vache.

appelés modèles de Potts et de la glace. Leur explication de ce lien fait intervenir des algèbres de von Neumann identiques à celles qu'a étudiées Jones; en mécanique statistique, on les appelle algèbres de Temperley-Lieb. Un diagramme de nœud peut être considéré comme un modèle d'état. Ses sites sont ses croisements, les interactions étant déterminées par la géométrie du nœud qui les joint. L'étrange coïncidence des algèbres de Temperley-Lieb donne à penser que nous pouvons interpréter le polynôme de Jones dans le langage de la mécanique statistique. C'est ce qu'ont fait, en 1987, Yasuhiro Akutsu<sup>2</sup> et Miki Wadati<sup>3</sup>. La même année, Louis Kauffman<sup>4</sup> a découvert une interprétation du polynôme original de Jones du point de vue de la mécanique statistique et l'a utilisée pour répondre (par l'affirmative) à une question posée depuis longtemps en théorie classique des nœuds, la conjecture de Tait. Beaucoup d'autres conjectures classiques n'ont pas résisté aux nouveaux invariants.

Ces idées nouvelles sont importantes dans d'autres domaines des sciences, dont le plus inattendu à cet égard est la biologie moléculaire. Il y a quarante ans, James Watson et Francis Crick découvraient la structure de la molécule d'ADN, armature sur laquelle sont stockées et manipulées les informations génétiques. L'ADN forme une double hélice ressemblant à une corde à deux brins; quand une cellule se divise, l'information génétique est transférée aux nouvelles cellules par un processus de séparation de ces deux brins, de réplication de chacun d'eux et de constitution de paires composées d'un nouveau brin et d'un ancien. Quiconque a essayé de séparer les brins d'une longue corde sait qu'ils s'emmêlent à mesure qu'on tire pour les séparer. La biochimie génétique doit emmêler et démmêler cet échec de manière rapide, répétée et exacte; la chaîne même de la vie en dépend. Comment est-ce possible?

Les biologistes abordent le problème en recourant à des enzymes afin de briser la chaîne d'ADN en morceaux assez petits pour être étudiés en détail. Un segment d'ADN est un nœud moléculaire compliqué et le même nœud peut avoir un aspect très différent après avoir été déformé par quelques manipulations. Jusqu'à une date récente, les biologistes ne disposaient d'aucune méthode systématique pour distinguer ces structures emmêlées, ou pour déterminer les réactions chimiques associées. Le polynôme d'Alexander, par exemple, n'est pas un outil assez puissant. Mais les nouveaux invariants de nœuds polynomiaux sont beaucoup plus efficaces et la topologie des nœuds constitue maintenant un

enjeu pratique important pour la biologie moléculaire. Un nœud, par définition, est intrinsèquement tridimensionnel. Mais le polynôme de Jones et tout ce qui a suivi fonctionne sur des images bidimensionnelles des nœuds, des diagrammes dans le plan, des croisements ou des enjambements. Un nœud vraiment tridimensionnel ne devrait pas « avoir connaissance » de cela. En 1988, sir Michael Atiyah<sup>5</sup> a mis les mathématiciens et les physiciens au défi de trouver une approche intrinsèquement tridimensionnelle du polynôme de Jones. En 1988, le spécialiste de physique mathématique Edward Witten<sup>6</sup> a précisément découvert une relation de ce genre, qu'il a appelée théorie topologique des champs quantiques. Il en résulte principalement qu'il existe une formule — inspirée par la mécanique statistique mais maintenant sous une forme quantique — qui est de toute évidence topologiquement invariante. Cette fonction contient tout un éventail d'autres invariants, notamment le polynôme de Jones et ses généralisations. La formule fonctionne avec le nœud lui-même, plongé dans l'espace tridimensionnel, indépendamment de toute représentation ou diagramme bidimensionnels, et répond ainsi au défi d'Atiyah.

En prime, l'approche de Witten résout un autre problème difficile : comment généraliser le polynôme de Jones aux nœuds que l'on fait non pas dans un espace à trois dimensions ordinaire mais dans une variété tridimensionnelle quelconque. (Une variété est une « surface » courbe multidimensionnelle.) On peut même oublier les nœuds pour obtenir de nouveaux invariants topologiques des variétés tridimensionnelles.

Mais les nœuds ont encore plus à nous offrir. Un autre invariant de nœud vient d'être découvert; ce n'est pas un polynôme, mais un nombre. Imaginons qu'on fasse un nœud avec une longue tige de caoutchouc. Plus le nœud est complexe, plus on doit courber la tige pour la nouer et plus elle acquiert, par conséquent, d'énergie élastique. Toutefois, il semble maintenant que le concept énergétique le plus intéressant pour les nœuds ne soit pas lié à l'énergie élastique mais à l'énergie électrostatique, comme l'a suggéré Shinji Fukuhara<sup>7</sup> en 1987. Imaginons que le nœud soit un fil flexible de longueur fixe, capable si besoin est de passer dans ses propres boucles et de se munir d'une charge électrostatique uniforme. Les charges de même signe se repoussant, un nœud qui est libre de se mouvoir essaiera de maintenir les brins voisins aussi écartés les uns des autres que possible. Cela revient à dire qu'il minimisera son énergie électrostatique. Cette valeur minimale de l'énergie est un invariant, qui

2. Université Kanagawa, Yokohama, Japon.

3. Université de Tokyo, Japon.

4. Université de l'Illinois à Chicago, États-Unis d'Amérique.

5. Université de Cambridge, Royaume-Uni.

6. Institute for Advanced Study, Princeton, États-Unis d'Amérique.

7. Tsuda College, Kodaira, Japon.

a plusieurs propriétés sympathiques. Ainsi, en 1991, Jun O'Hara<sup>8</sup> a démontré que l'énergie minimale d'un nœud augmente effectivement avec sa complexité : il n'existe qu'un nombre fini de nœuds topologiquement différents dont l'énergie est inférieure ou égale à toute valeur choisie. Il existe donc une échelle numérique naturelle de complexité pour les nœuds, allant des nœuds simples de faible énergie vers des nœuds plus complexes de plus haute énergie.

Quels sont les nœuds les plus simples selon cette échelle ? Steve Bryson<sup>9</sup>, Michael Freedman<sup>10</sup>, Zheng-Xu He<sup>11</sup> et Zenghan Wang<sup>12</sup> ont récemment démontré que ce sont exactement ceux qu'on attendrait. Ce sont les « cercles ronds » — c'est-à-dire des cercles au sens ordinaire, non topologique. L'énergie d'un cercle rond est de 4, et toutes les autres boucles fermées ont une énergie plus élevée. Toute boucle ayant une énergie inférieure à  $6\pi + 4$  est topologiquement non nouée. Plus généralement, un nœud ayant  $c$  croisements (dans une certaine projection bidimensionnelle) a une énergie supérieure ou égale à  $2\pi c + 4$ . (Cette borne n'est probablement pas la meilleure possible : l'énergie la plus faible que l'on connaisse pour un nœud « en point de surjet » est d'environ 74.) Le nombre de nœuds topologiquement distincts d'énergie  $E$  ne peut dépasser  $0,264(1,658)^E$ .

## DYNAMIQUE NON LINÉAIRE ET THÉORIE DU CHAOS

Albert Einstein était convaincu que Dieu ne joue pas aux dés, autrement dit que l'Univers est gouverné par des lois précises et non par le hasard. Le domaine généralement connu sous le nom de théorie du chaos clarifie la question par un nouveau paradoxe : des lois précises peuvent susciter l'aléatoire. Il en résulte que nos convictions les plus chères concernant le déterminisme, la prévisibilité et la complexité sont remises en question. Pourquoi est-il possible de prédire les marées, mais non le temps ? Les premières sont provoquées par l'attraction gravitationnelle du Soleil et de la Lune ; le second par le mouvement de l'atmosphère sous l'influence de la chaleur du Soleil. La loi de la gravitation n'est guère plus simple que les lois de la dynamique des fluides. Pourquoi, dans ces conditions, pouvons-nous prédire les marées des années à l'avance et nous tromper sur le temps qu'il fera dans quelques jours ?

La clé du problème est une idée si simple que sa signification est restée inaperçue jusqu'à il y a une vingtaine

d'années. Tout cuisinier sait que l'on peut très bien mélanger des blancs d'œufs en imprimant à un fouet un mouvement de rotation régulier et prévisible. Mais si l'on essaie de suivre chaque particule de blanc d'œuf, on constate qu'elles se conduisent de manière très irrégulière et imprévisible. Le mélange est un processus prévisible au résultat imprévisible.

Afin de comprendre comment un mélange peut s'effectuer simplement, il faut introduire le concept général de système dynamique. C'est un système qui peut se trouver dans un état  $x$  (pouvant comporter de nombreuses variables) à chaque instant  $t$ . Il en existe deux sortes : les systèmes à temps continu déterminés par des équations différentielles

$$dx/dt = f(x)$$

et les systèmes à temps discret déterminés par des équations aux différences

$$x_{t+1} = f(x_t).$$

$f$  est ici une fonction fixe, non aléatoire. Les systèmes dynamiques sont déterministes, en ce sens que les conditions initiales déterminent de manière univoque tout le comportement futur. Il est particulièrement facile de le constater pour les systèmes à temps discret. Étant donné  $x_0$ , état au temps  $t = 0$ , on obtient successivement

$$\begin{aligned} x_1 &= f(x_0) \\ x_2 &= f(x_1) = f(f(x_0)), \end{aligned}$$

et, en général

$$x_t = f^{(t)}(x_0) = f(\dots f(f(x_0))\dots) \text{ (où } f \text{ apparaît } t \text{ fois).}$$

Ce processus est connu sous le nom d'« itération » de la fonction  $f$ . Le cas continu est plus subtil et nécessite des théorèmes d'unicité pour les solutions des équations différentielles.

Comment une règle déterministe peut-elle conduire à un comportement aléatoire et au mélange ? Un des exemples les plus simples est celui où l'état  $x$  est un nombre écrit sous forme décimale et où la fonction  $f$  « consiste à éliminer tout ce qui figure avant la virgule et à multiplier par 10 », c'est-à-dire :

$$f(x) = 10(x - [x])$$

où  $[ ]$  signifie partie entière. Ce système offre plusieurs types de dynamique dont certains sont réguliers et d'autres chaotiques. Ainsi, quand  $x = 10/3 = 3,3333\dots$ , on élimine le premier 3 pour obtenir  $0,3333\dots$ , puis on multiplie par 10

8. Université métropolitaine de Tokyo, Tokyo, Japon.

9. NASA Ames, États-Unis d'Amérique.

10, 11. Université de Californie à San Diego, États-Unis d'Amérique.

12. Université de Princeton, États-Unis d'Amérique.

pour retrouver la valeur 3,3333... initiale. Par conséquent,  $f(10/3) = 10/3$  et cette valeur de départ particulière est un état stationnaire de la dynamique. Si maintenant on part de la fraction  $40/33 = 1,212121\dots$ , dont les décimales alternent, une première application de la règle donne 2,121212... et une seconde application ramène à la valeur initiale 1,212121... Cette fois-ci, la dynamique est périodique, de période 2.

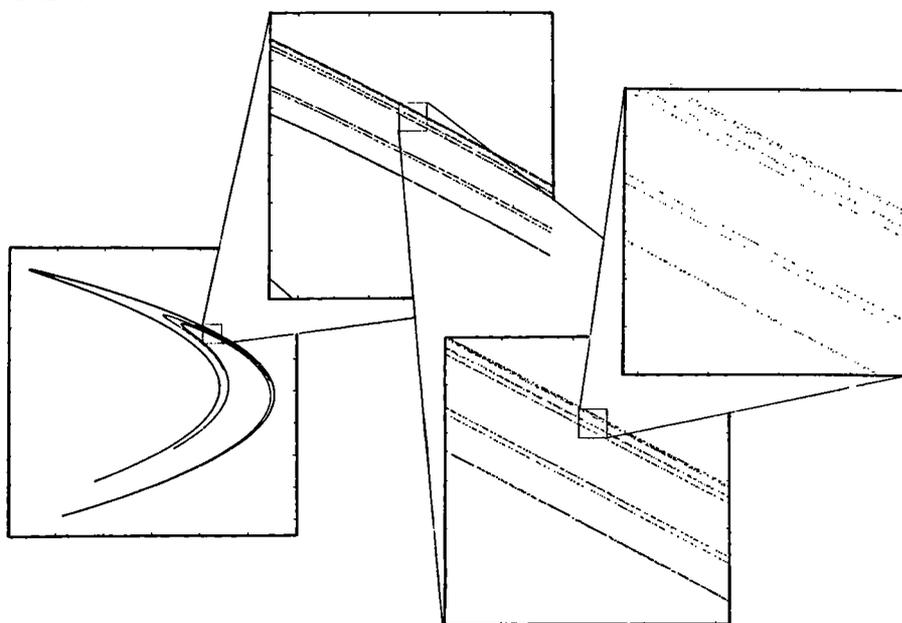
Pour obtenir un comportement plus complexe, partons du nombre  $\pi = 3,1415926535\dots$ , dont les décimales ne se répètent pas périodiquement. Les états successifs du système sont

- $x_0 = 3,14159265\dots$
- $x_1 = 1,41592653\dots$
- $x_2 = 4,15926535\dots$
- $x_3 = 1,59265358\dots$
- $x_4 = 5,92653589\dots$
- $x_5 = 9,26535897\dots$

et ainsi de suite. Les décimales se déplacent d'un cran vers la gauche à chaque étape et le premier chiffre est éliminé. Les décimales de  $\pi$  ne forment jamais un cycle répétitif, il en est de même de la dynamique correspondante. Ce n'est ni un état stationnaire ni un état périodique.

Imaginons que l'on utilise cette règle pour prévoir les nombres successifs qui vont se présenter. Supposons que, au lieu de  $\pi$ , on prenne une valeur de départ  $\pi'$  qui soit identique à  $\pi$  jusqu'à la millionième décimale mais qui en diffère ensuite de façon arbitraire. Le nombre  $\pi'$  est une très bonne approximation de  $\pi$ , beaucoup plus précise que ne pourrait l'être une quelconque mesure physique, et, pour de nombreuses itérations de la règle dynamique  $f$ , les deux séries de prévisions sont presque identiques. Mais l'erreur glisse vers la gauche. Au terme d'une étape, elle ne se situe plus à la millionième décimale mais à la 999 999<sup>e</sup>. Au terme de deux étapes, elle a glissé à la 999 998<sup>e</sup>. Après 999 999 répétitions, elle apparaît dans la première décimale et la prévision faite avec  $\pi'$  comme valeur initiale diffère considérablement de celle obtenue avec  $\pi$ . La valeur suivante pourrait être... n'importe quoi. Elle dépend de la 1 000 001<sup>e</sup> décimale de  $\pi'$ . A partir de là, les prévisions reposant sur  $\pi$  comme valeur initiale et celles qui ont pour base l'approximation incroyablement précise de  $\pi'$  sont totalement indépendantes. On pourrait penser qu'une prévision qui devient inexacte après un million d'opérations ne pose aucun problème. Mais si l'on essaie de prévoir le vainqueur d'une

FIGURE 2  
L'ATTRACTEUR DE HÉNON



Structure fine de l'attracteur de Hénon. Les courbes qui le composent se subdivisent continuellement à chaque degré successif de grossissement.



course de chevaux et si chaque étape du calcul est un millionième de seconde, on perd la trace du cheval avant même qu'il ait quitté la ligne de départ.

Cette imprévisibilité tient au fait que les états du système sont continuellement tirés chacun de leur côté puis repliés dans le même espace borné — ce qui les mélange exactement comme le pétrissage mélange la pâte à pain. Tout système de ce type débouche sur le *chaos* — comportement apparemment aléatoire dans un système déterministe. Les équations des marées sont des systèmes dynamiques non chaotiques : la prévision à long terme fonctionne bien ; au contraire, celles de la météo sont chaotiques. La différence entre un système chaotique et un système non chaotique est très simple. Dans les systèmes dynamiques classiques, les erreurs relatives aux états initiaux ne croissent pas très rapidement. Dans les systèmes chaotiques, par contre, leur croissance est exponentielle. A partir d'un certain point de l'avenir, suivant la taille de l'erreur et l'échelle de temps de chaque étape de la prévision, l'erreur l'emporte sur les éléments corrects de la prévision. Dès lors, celle-ci, quelle qu'elle soit, n'a plus aucun rapport significatif avec le comportement réel.

Bien que le chaos ne soit pas prévisible, il possède aussi de forts éléments de stabilité, comme on peut le voir en représentant géométriquement le système dynamique. L'ensemble des états  $x$  forme un espace, appelé espace des phases du système. Quand un point initial change avec le temps, il se déplace dans cet espace, en décrivant une courbe (temps continu) ou une suite de points (temps discret) que l'on appelle son « orbite ». De nombreux systèmes possèdent un ou plusieurs attracteurs : objets géométriques dans l'espace des phases vers lesquels tendent les orbites de tous les points qui commencent à se déplacer à proximité. Un état stationnaire est un attracteur ponctuel ; l'attracteur correspondant à une orbite périodique est une boucle fermée ou cycle. Les attracteurs chaotiques sont habituellement des fractals — formes géométriques ayant une structure fine à toutes les échelles. Par exemple, le système de Hénon

$$f(x,y) = (1 - ax^2 + y, bx)$$

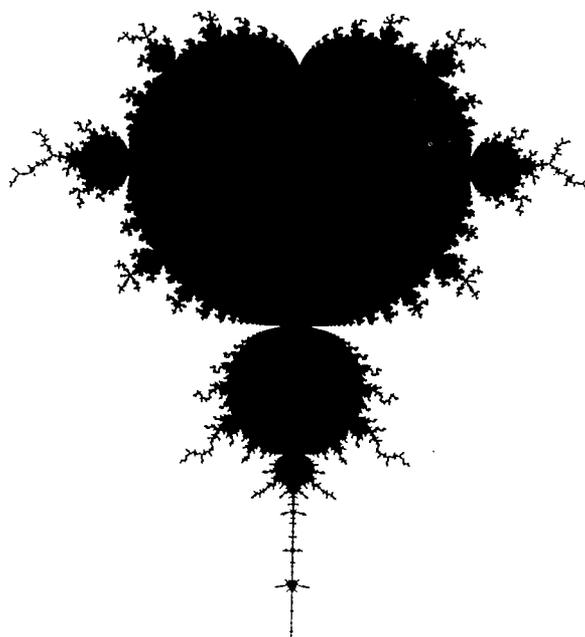
où  $a$  et  $b$  sont des constantes  $a$  (pour certaines valeurs de ces paramètres, notamment  $a=1,4$ ,  $b=0,3$ ) un attracteur qui ressemble à une parabole assez floue. Les simulations sur ordinateur donnent à penser que, lorsque l'on grossit l'attracteur, ce qui apparaissait comme des courbes bien définies se subdivise en couches toujours plus nombreuses

(fig. 2). Un récent acquis important est la démonstration, par Michael Benedicks<sup>13</sup> et Lennart Carleson<sup>14</sup>, que c'est effectivement ce qui se passe — au moins quand  $b$  est assez petit et pour un ensemble de valeurs de  $a$  de mesure non nulle.

Les attracteurs sont stables en ce sens que les points initiaux voisins ont des orbites qui s'en approchent indéfiniment. Le chaos se produit dans le mouvement sur l'attracteur ; le mouvement vers l'attracteur est régulier et inflexible. Différents types de chaos se produisent pour différents attracteurs.

Les applications sont nombreuses. Le chaos causé par le champ gravitationnel de Jupiter peut détacher les astéroïdes de leur orbite et les précipiter vers la Terre. Les épidémies, les nuages de sauterelles et les battements de cœur irréguliers sont des exemples de chaos plus ordinaires. Le chaos fait lui-même partie d'un des principaux domaines en plein développement de la recherche mathématique actuelle, la théorie des systèmes dynamiques non linéaires. (Un système

FIGURE 3  
L'ENSEMBLE DE MANDELBROT



Source : H.O. Peitgen et D. Saupe, *The science of fractal images*, New York, Springer-Verlag, 1988, p. 195, figure 4.16.

#### LAURÉATS DE LA MÉDAILLE FIELDS EN 1990

Il n'existe pas de prix Nobel en mathématiques, mais il y a un équivalent, en prestige sinon financièrement, la médaille Fields, qui a été créée par une dotation du mathématicien canadien J.C. Fields et qui est décernée tous les quatre ans à l'occasion du Congrès international des mathématiciens. Une récompense analogue pour la recherche en informatique, le prix Rolf Nevanlinna, est aussi décernée à l'occasion de ce congrès. Au congrès le plus récent, tenu en 1990 à Kyoto (Japon), quatre médailles Fields et le prix Nevanlinna ont été décernés. Les noms des lauréats sont donnés ci-après avec une brève description de leurs travaux.

#### MÉDAILLES FIELDS

**Vladimir Drinfeld**, du FTINT, Kharkov, Russie, pour les travaux suivants : le Programme de Langlands visant à élucider les groupes de Galois des corps locaux et globaux de dimension 1 ; la classification des instantons ; les groupes quantiques — généralisation passionnante des groupes de Lie classiques, réalisée dans le cadre des algèbres de Hopf.

**Vaughan Jones**, de l'Université de Californie à Berkeley, États-Unis d'Amérique, pour ses travaux sur le théorème de l'indice pour les algèbres de von Neumann, sa relation avec les nouveaux invariants de nœud (décrits dans le présent chapitre) et leur relation avec la mécanique statistique et les groupes quantiques.

**Shigefumi Mori**, de l'Université de Kyoto, Japon, pour la classification des variétés algébriques tridimensionnelles — analogues tridimensionnels des courbes et surfaces définies par des équations polynomiales.

**Edward Witten**, de l'Institute for Advanced Study, Princeton, États-Unis d'Amérique, pour ses travaux sur la supersymétrie et la théorie de Morse, le théorème de l'indice pour l'opérateur de Dirac, les théorèmes de la rigidité en théorie des cordes, les interprétations intrinsèques des invariants de nœud au moyen de la théorie topologique des champs quantiques (évoquée dans le présent chapitre) et la démonstration de la positivité de l'énergie dans la théorie de la gravitation d'Einstein.

#### PRIX NEVANLINNA

**Alexander Razborov**, pour avoir déterminé, en se fondant sur des modèles de circuits booléens, les limites inférieures de complexité de divers problèmes de calcul.

est *non linéaire* si la fonction  $f$  n'est pas une simple combinaison linéaire des coordonnées de l'état  $x$ , telle que  $2x_1 + 5x_2 - x_3$ . Le système de Hénon, par exemple, fait intervenir le terme non linéaire  $x^2$ .)

Une caractéristique frappante du chaos est qu'il suscite un comportement très complexe à partir de règles simples. La fonction  $f(x) = 10(x - [x])$  est très simple, mais les décimales successives de  $\pi$  que font apparaître l'itération de  $f$  en prenant  $\pi$  comme condition initiale sont extraordinairement complexes. On ne peut y distinguer *aucune* configuration. L'image la plus célèbre du chaos, l'ensemble de Mandelbrot — du nom de son inventeur, Benoit Mandelbrot<sup>15</sup>, fondateur de la théorie des fractals — illustre ce point de manière encore plus spectaculaire. Cet ensemble découle de la fonction encore plus simple

$$f(z) = z^2 + c$$

où  $z$  est un nombre complexe et  $c$  une constante complexe. Pour chaque valeur de  $c$ , procéder à l'itération de  $f$  en partant de la valeur initiale  $z = c$ . L'ensemble  $M$  de Mandelbrot est l'ensemble de tous les  $c$  tels que les valeurs restent bornées. Il ressemble un peu à un hybride de chat, de cactus et d'un arbre en hiver (fig. 3). Il a une frontière infiniment compliquée. Si l'on examine une petite région proche de la frontière et qu'on la grossisse, on observe des structures géométriques complexes de plus en plus ténues — spirales, taches, hippocampes, éventails, arabesques, arbres, cristaux, nervures, etc. (voir la figure A, planches en couleurs, p. i). Cette complexité à petite échelle — belle mais imprévisible et, comme on le verra ci-après, incalculable — se poursuit indéfiniment. La frontière de l'ensemble de Mandelbrot est un fractal. A tout fractal est associé un nombre, sa dimension de Hausdorff-Besicovitch, qui mesure son comportement sous l'action des changements d'échelle ou sa rugosité. Mitsuhiro Shishikura<sup>16</sup> a récemment démontré que la dimension de Hausdorff-Besicovitch de la frontière de l'ensemble de Mandelbrot est exactement 2. Cela implique que certaines régions de la frontière sont presque aussi plissées qu'une courbe qui remplit le plan.

L'image est extrêmement compliquée mais le processus qui la génère est simple. La science s'efforce de déduire les lois naturelles de l'observation de leurs effets et l'ensemble de Mandelbrot illustre un point important. Les observations peuvent paraître compliquées même quand les lois sous-jacentes sont simples. Cela nous encourage à rechercher la simplicité à l'intérieur de données apparemment

15. Centre de recherche Thomas J. Watson d'IBM, Yorktown Heights, États-Unis d'Amérique.

16. Institut de technologie de Tokyo, Japon.

complexes. Le chaos nous enseigne une leçon importante pour l'ensemble de la science.

## ÉQUATIONS DIOPHANTIENNES

Un des problèmes non résolus les plus célèbres des mathématiques est le grand théorème de Fermat, qui date de 1650 environ. Pierre de Fermat, juriste et brillant mathématicien amateur, l'a écrit dans la marge de son exemplaire de l'*Arithmétique* de Diophante. En notation moderne, il affirme que l'équation

$$x^n + y^n = z^n$$

n'a pas de solution en entiers  $x, y, z \neq 0$ , pour tous les entiers  $n \geq 3$ . Les équations à résoudre en nombres entiers sont appelées équations diophantiennes. Au cours des siècles, divers mathématiciens ont démontré des cas particuliers : Fermat lui-même a démontré sa conjecture pour  $n=4$ , Euler pour  $n=3$ , Dirichlet et Legendre pour  $n=5$ . Ernst Kummer a élaboré la théorie algébrique des idéaux afin d'étendre l'éventail des valeurs pour lesquelles on peut démontrer le théorème. Nous savons que le grand théorème de Fermat est vrai pour tous les  $n \leq 4\,000\,000$ , grâce à une étude assistée par ordinateur menée récemment par Joe Buhler<sup>17</sup>, Richard Crandall<sup>18</sup>, Tauno Metsänkylä<sup>19</sup> et Reijo Ernvall<sup>20</sup>.

Si  $(x, y, z)$  est une solution de l'équation de Fermat, il en est de même de  $(cx, cy, cz)$  où  $c$  est un entier quelconque. Une solution est donc appelée primitive si  $x, y$  et  $z$  n'ont pas de facteur commun. Ce que l'on savait, jusqu'à une date récente, c'est que s'il existe une exception au grand théorème de Fermat pour certaines valeurs de  $n \geq 3$ , il ne peut y avoir qu'un nombre fini de solutions primitives pour cet exposant  $n$ . Cette découverte était le fruit d'une percée majeure réalisée dans la théorie des équations diophantiennes. On peut récrire l'équation de Fermat sous la forme

$$X^n + Y^n = 1$$

où  $X = x/z$  et  $Y = y/z$ . Les solutions en rationnel de cette équation à deux variables correspondent précisément aux solutions en entiers de l'équation de Fermat. Or on peut considérer qu'une équation à deux variables  $f(X, Y) = 0$  définit une courbe complexe qui, en tant qu'objet réel, est bidimensionnelle et définit donc une surface. Cette surface est topologiquement équivalente à un tore à  $g$  trous, où  $g$  est un nombre appelé le « genre ». En 1922, Leo Mordell a

remarqué que les seules équations  $f(X, Y) = 0$  connues pour avoir une infinité de solutions en rationnels correspondaient à un  $f$  de genre égal à 0 ou 1. Il a donc énoncé la conjecture de Mordell : si le genre  $f$  est supérieur ou égal à 2, le nombre des solutions est fini. Le genre de l'équation de Fermat est égal à  $1/2 (n-1)(n-2)$ , qui est plus grand que 1 quand  $n \geq 3$ . La conjecture de Mordell implique, par conséquent, que le nombre de solutions en entiers primitives de toute équation de Fermat est fini. En 1983, Gerd Faltings<sup>21</sup> a démontré la conjecture de Mordell, ce qui représente une des avancées mathématiques majeures de ces dernières années. Depuis lors, D.R. Heath-Brown<sup>22</sup> a démontré que le grand théorème de Fermat est presque toujours vrai : la proportion des entiers  $n$  pour lesquels il n'existe pas de solution tend vers 100 % à mesure que  $n$  augmente.

En juin 1993 est parvenue la nouvelle étonnante que le théorème de Fermat avait été démontré, complètement, par Andrew Wiles, de l'Université de Princeton. La démonstration qui, selon les sources, remplit entre 200 et 1 000 pages, aborde le problème du même point de vue général que Faltings. Dans les années 80, Ken Ribet, s'appuyant sur les travaux de Jean-Pierre Serre, a étudié les courbes de la forme  $Y^2 = X(X-x^n)(Y-y^n)$  où  $(x, y, z)$  est une solution supposée de l'équation de Fermat. C'est un exemple de ce que l'on appelle une *courbe elliptique*, de la forme  $Y^2 = aX^3 + bX^2 + cX + d$ . On sait beaucoup de choses sur l'arithmétique des courbes elliptiques. Au moyen de cette puissante théorie, Ribet a démontré que le grand théorème de Fermat serait une conséquence de la conjecture de Weil-Taniyama, selon laquelle toute courbe elliptique définie sur les nombres rationnels peut être paramétrisée par des fonctions modulaires elliptiques. (Le processus est analogue à la paramétrisation du cercle  $X^2 + Y^2 = 1$  par les fonctions trigonométriques :  $X = \sin \theta, Y = \cos \theta$ .) Wiles démontre un cas particulier de la conjecture de Taniyama, pour les courbes « semi-stables », et montre que cela suffit pour démontrer le grand théorème de Fermat. La conjecture de Weil-Taniyama générale reste un problème ouvert. La démonstration de Wiles reste à vérifier, mais la plupart des experts semblent convaincus.

Puisqu'il n'est pas possible, en additionnant deux cubes, d'en obtenir un autre, le serait-ce pour trois ? Réponse affirmative : en fait,  $3^3 + 4^3 + 5^3 = 6^3$ . Leonhard Euler a conjecturé que, pour tout  $n$ , la somme de  $n$  puissances  $n$ èmes peut être une puissance  $n$ ème, mais que c'est impossible pour  $n-1$ . Cependant, la conjecture d'Euler est fautive. En

17. Reed College, Portland, États-Unis d'Amérique.

18. NeXT Computer Inc., Redwood City, États-Unis d'Amérique.

19, 20. Université de Turku, Finlande.

21. Université de Princeton, États-Unis d'Amérique.

22. Université d'Oxford, Royaume-Uni.

1966, L.J. Lander et T.R. Parkin ont trouvé quatre puissances cinquièmes dont la somme est elle-même une puissance cinquième :

$$27^5 + 84^5 + 110^5 + 133^5 = 144^5.$$

En 1988, Noam Elkies<sup>23</sup> a découvert le premier contre-

exemple à la conjecture d'Euler pour les puissances quatrièmes :

$$2\ 682\ 440^4 + 15\ 365\ 639^4 + 187\ 960^4 = 20\ 615\ 673^4.$$

Il est parvenu à ce résultat en procédant à une étude approfondie de la surface  $x^4 + y^4 + z^4 = 1$ . En utilisant un

### CONTROVERSE AU SUJET DES ORDINATEURS

Avec l'apparition d'ordinateurs dotés d'énormes mémoires, pouvant faire rapidement des calculs arithmétiques rapides et ayant de bonnes capacités graphiques, les mathématiciens ont acquis un outil expérimental puissant. Les mathématiciens peuvent explorer des cas particuliers de problèmes et voir à quelles réponses l'ordinateur aboutit. Ils peuvent ensuite réfléchir aux structures que ces expériences ont révélées et essayer de démontrer qu'elles existent de manière générale. Toutefois, les expériences, même à grande échelle, peuvent être trompeuses. Ainsi, les expériences sur ordinateur montrent que, jusqu'à des limites atteignant plusieurs milliards, les nombres premiers de la forme  $4k+1$  sont moins nombreux que ceux de la forme  $4k+3$ . Cela pourrait apparaître comme un fait incontestable mais on a démontré qu'en réalité les nombres premiers de la forme  $4k+1$  finissent par rattraper leur retard. Dans cet ordre d'idées, on a démontré assez tôt que les nombres premiers de la forme  $4k+1$  repassent en tête avant  $10^{1034}$ , nombre si énorme qu'il resterait à jamais introuvable par expérimentation directe.

Les expériences en mathématiques n'ont rien de radicalement nouveau. Les cahiers de Carl Friedrich Gauss, par exemple, contiennent d'innombrables calculs au moyen desquels il a essayé de deviner les réponses à des problèmes de théorie des nombres. Les papiers d'Isaac Newton contiennent aussi de nombreux calculs expérimentaux. La nouveauté réside dans l'ordinateur, qui peut venir à bout d'un nombre d'expériences tout à fait hors de portée du seul cerveau humain, et dans une évolution des mathématiciens, qui sont beaucoup plus disposés à s'exprimer sur leur recours à des expériences. En fait, ils vont aujourd'hui jusqu'à les publier, en l'absence même de démonstrations rigoureuses. Une nouvelle revue de mathématiques expérimentales vient d'ailleurs d'être lancée.

Les mathématiques expérimentales sont controversées. Certains mathématiciens, parmi lesquels Steven Krantz, de la Washington University, États-Unis d'Amérique, et John Franks, de la Northwestern University, Evanston, États-Unis d'Amérique, ont une grande aversion pour cette approche et ont écrit des articles pour la condamner. Ils sont convaincus qu'elle porte atteinte à l'intégrité de leur discipline. Ils soulignent que les expériences peuvent être trompeuses : ainsi, les images de l'ensemble de

Mandelbrot le font apparaître non connexe alors qu'il l'est.

Les partisans des mathématiques expérimentales, dont Mandelbrot lui-même, pensent que les arguments de leurs opposants sont mal fondés. Selon eux, il est bon que les chercheurs en mathématiques — notamment la génération à venir — ne voient pas seulement des démonstrations achevées mais aussi les indications qui ont montré le chemin aux chercheurs. Ils font observer que toutes les expériences doivent être connues et interprétées avec rigueur. La première fois où Mandelbrot a dessiné son ensemble, il a observé de petites taches séparées du reste. Mais quiconque fait de l'infographie comprend rapidement qu'il peut exister une structure fine invisible, au-dessous des limites de résolution des images. En fait, Mandelbrot a conjecturé que l'ensemble était connexe et c'est devenu un problème célèbre.

Finalement, John Hubbard, de l'Université de Richmond, États-Unis d'Amérique, et Adrien Douady, de l'Université de Paris-Sud, Orsay, France, ont démontré de façon rigoureuse que l'ensemble de Mandelbrot est bien connexe. Hubbard a expliqué que les images informatiques ont joué un rôle important dans la découverte de cette démonstration. Ces images représentaient l'ensemble au moyen de contours multicolores qui — a-t-on constaté — n'entouraient pas les taches, comme ils auraient dû le faire si elles avaient réellement été séparées. Au contraire, ils semblent se pelotonner autour de fins filaments qui courent entre les taches et le corps central de l'ensemble de Mandelbrot. Loin d'être trompeuses, les données expérimentales ont conduit directement à la vérité.

Il devrait être assez facile de mettre fin à cette controverse. Si les expériences sur ordinateur sont mal réalisées ou si l'on en tire des conclusions hâtives en oubliant ce que les images informatiques ne peuvent pas montrer, on peut aboutir à des absurdités. Mais tout expérimentateur connaît ce genre de problèmes, qu'il surmonte grâce à sa technique et aux enseignements tirés de ses efforts antérieurs. La plupart des mathématiciens sont très satisfaits de l'emploi des ordinateurs en tant qu'outils capables de mettre sur la piste de théorèmes intéressants. Ils savent bien que les expériences ne sont pas des démonstrations, mais ils les trouvent néanmoins utiles. Ils ne rejettent pas l'ordinateur mais ils ne croient pas tout ce qu'il leur dit. En mathématiques, comme dans les autres sciences, la théorie et l'expérience peuvent aller de pair.

procédé général permettant de construire de nouvelles solutions en rationnels à partir des anciennes, il a démontré que les points rationnels sont denses sur cette surface. Bref, il existe une infinité de solutions en entiers.

Après la découverte par Elkies de l'existence d'une solution, Roger Frye<sup>24</sup> a trouvé la plus petite possible en effectuant une recherche sur ordinateur :

$$95\,800^4 + 217\,519^4 + 414\,560^4 = 422\,481^4.$$

De nombreuses questions concernant les équations diophantiennes restent sans réponse, mais beaucoup d'idées nouvelles circulent, qui pourraient contribuer à les résoudre.

## GÉOMÉTRIE SYMPLECTIQUE

Le déplacement de la matière est une des sources de concepts mathématiques les plus riches. On peut déceler une filiation continue partant des expériences de Galilée et des lois empiriques de Johannes Kepler pour arriver, en passant par Isaac Newton, Joseph-Louis Lagrange et les analogies optico-mécaniques de William Rowan Hamilton, jusqu'à une grande partie du courant dominant des mathématiques actuelles : équations différentielles, variétés, groupes de Lie, théorie de la mesure, formes quadratiques, séries de Fourier et analyse fonctionnelle, par exemple. Mais le concept qui a potentiellement la plus grande portée est la « géométrie symplectique », qui s'inspire d'une interprétation géométrique du formalisme général de Hamilton en mécanique. Son importance pour la mécanique est devenue manifeste, notamment grâce aux travaux menés par les écoles russe et américaine des systèmes dynamiques au cours des trois dernières décennies. Mais un mouvement plus large prend aujourd'hui son essor. Vladimir Arnold<sup>25</sup> a formulé ce qu'on pourrait appeler le manifeste des mathématiques symplectiques — les mathématiques appliquées du XXI<sup>e</sup> siècle.

Le qualificatif de « symplectique » a été forgé par Hermann Weyl dans son traité sur les groupes classiques. Il indique dans une note qu'il l'a tiré du mot grec signifiant « complexe ». Le livre de Weyl traite des groupes de déplacements dans divers types fondamentaux de géométrie multidimensionnelle. Dans la géométrie euclidienne ordinaire, les déplacements forment le groupe orthogonal. Weyl aborde très brièvement le groupe symplectique — c'était alors une curiosité assez déconcertante qui devait sans doute avoir une utilité que l'on ne distinguait pas encore clairement. Maintenant nous la connaissons : c'est la dynamique.

Dans la géométrie euclidienne ordinaire, le concept central est la distance. Pour représenter algébriquement la notion de distance, nous utilisons le produit scalaire (ou intérieur)  $x \cdot y$  de deux vecteurs  $x$  et  $y$ . Si  $x = (x_1, x_2)$  et  $y = (y_1, y_2)$  sont des vecteurs du plan,

$$x \cdot y = x_1 y_1 + x_2 y_2.$$

Une formule similaire s'applique pour les dimensions plus élevées. Tous les concepts de base de la géométrie euclidienne peuvent être obtenus en partant de ce produit scalaire. En particulier, une transformation  $T$  n'est un déplacement que si elle préserve le produit scalaire, de sorte que  $Tx \cdot Ty = x \cdot y$ .

Si l'on remplace le produit scalaire par d'autres expressions algébriques similaires, on obtient de nouvelles sortes de géométrie. La géométrie symplectique correspond à la forme  $x_1 y_2 - x_2 y_1$  qui est l'aire du parallélogramme formé par les vecteurs  $x$  et  $y$ . On remarquera le signe moins : il laisse son empreinte dans tout le paysage symplectique. Cette forme symplectique dote le plan d'une nouvelle sorte de géométrie, où tout vecteur est de longueur zéro et est perpendiculaire à lui-même. Il existe des notions analogues dans les espaces ayant un nombre pair quelconque de dimensions.

Ces géométries bizarres peuvent-elles avoir un intérêt pratique ? Réponse affirmative : ce sont les géométries de la mécanique classique. Dans le formalisme de Hamilton, les systèmes mécaniques sont décrits par des coordonnées de position  $q_1, \dots, q_n$ , des coordonnées de quantité de mouvement  $p_1, \dots, p_n$  et une fonction  $H$  de ces coordonnées (appelée aujourd'hui l'Hamiltonien) que l'on peut se représenter comme l'énergie totale. Les équations du mouvement de Newton prennent la forme élégante

$$\begin{aligned} dq_i/dt &= \partial H / \partial p_i, \\ dp_i/dt &= -\partial H / \partial q_i. \end{aligned}$$

Quand on résout les équations de Hamilton, il est souvent utile de changer de coordonnées. Mais si l'on transforme les coordonnées de position d'une certaine manière, il devient nécessaire de transformer de façon cohérente les quantités de mouvement correspondantes. En poursuivant cette idée, on découvre que ces transformations doivent être des analogues symplectiques des déplacements euclidiens. Dans le domaine de la dynamique, les changements de coordonnées naturels sont symplectiques. C'est une conséquence de l'asymétrie des équations de Hamilton, où  $dq/dt$  est égal

24. Thinking Machines Corporation, États-Unis d'Amérique.

25. Université d'État de Moscou, Russie.

à plus  $\partial H/\partial p$  alors que  $dp/dt$  est égal à moins  $\partial H/\partial q$ . Encore ce signe moins !

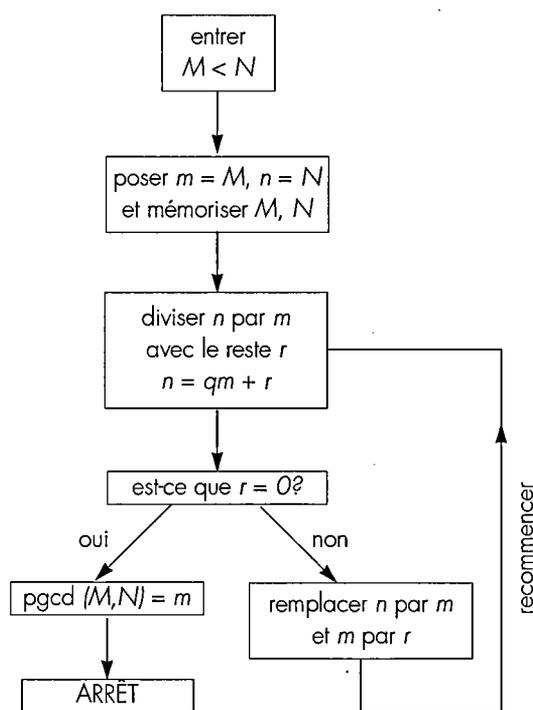
Pour la *topologie* symplectique, il faut être plus souple et utiliser des transformations qui « à petite échelle » ressemblent à des déplacements symplectiques. Nous les appellerons « transformations symplectiques ». Dans le plan, la forme symplectique représente l'aire, si bien qu'un déplacement symplectique est une transformation linéaire qui la préserve. Pour ajouter de la souplesse, il faut renoncer à la condition de linéarité. Une transformation symplectique du plan est donc une transformation quelconque qui préserve l'aire. Toutefois, les formes peuvent changer radicalement. Pour en avoir une image mentale, représentons nous le plan comme un fluide incompressible et une transformation symplectique comme quelque chose qui remue le fluide. (Ce n'est

pas qu'une image : on peut utilement réexprimer la mécanique des fluides en langage symplectique.)

La topologie différentielle est l'étude des transformations lisses d'une variété. De manière analogue, la topologie symplectique est l'étude des transformations symplectiques d'une variété symplectique. Le théorème le plus ancien de la topologie symplectique, inventé bien avant que ce domaine existe, est le dernier théorème géométrique d'Henri Poincaré, qui a pour origine un problème de mécanique céleste. Ce théorème énonce qu'une transformation d'une couronne circulaire (région comprise entre deux cercles) avec conservation de l'aire (c'est-à-dire symplectique) qui déplace les deux cercles frontières dans des directions opposées a au moins deux points fixes. Ces « théorèmes des points fixes » sont très puissants : celui-ci, démontré par George Birkhoff en 1913, implique l'existence d'orbites périodiques dans le mouvement de gravitation de trois corps. Si la transformation n'est pas symplectique, il n'y a pas nécessairement de points fixes ; la géométrie symplectique a donc son caractère propre. Un résultat important, la conjecture de Weinstein concernant l'existence de trajectoires périodiques, a été démontré par Claude Viterbo<sup>26</sup> en 1987. Il existe des versions symplectiques de la théorie des nœuds, et de nombreux problèmes qui sont propres au monde symplectique.

Les applications traditionnelles de la géométrie symplectique sont la mécanique et l'optique. Mais l'application actuelle qui est la plus importante est la théorie quantique des champs, où le langage de la géométrie symplectique a beaucoup éclairé le processus de la quantisation — le passage d'un système classique à son homologue quantique.

FIGURE 4  
L'ALGORITHME D'EUCLIDE



Ordinogramme de l'algorithme d'Euclide permettant de trouver le plus grand commun diviseur pgcd de deux entiers M et N.

## ALGORITHMES ET COMPLEXITÉ

L'informaticien Donald Knuth a remarqué un jour que la principale différence entre les mathématiques et l'informatique réside dans le fait que les mathématiciens ne se soucient pas du coût d'un calcul. Il ne parlait pas du coût monétaire, mais de la quantité de calcul nécessaire pour obtenir une réponse. Un nouveau domaine des mathématiques, qui connaît un développement rapide, a précisé ces concepts et soulevé des questions absolument fondamentales sur la nature du calcul. Il s'agit de la théorie de la complexité (ou théorie de la complexité de calcul, pour la distinguer d'un autre domaine de la science appelé aussi théorie de la complexité, qui étudie l'émergence de l'ordre dans les systèmes très complexes).

26. CNRS, Paris, France.

De nombreux procédés mathématiques courants donnent des réponses en principe mais non en pratique. Ainsi, on peut déterminer si un nombre  $n$  est premier en essayant tous les diviseurs possibles jusqu'à  $\sqrt{n}$ . Mais cette méthode est impraticable pour des nombres comportant par exemple 50 chiffres, qui exigeraient  $10^{25}$  essais de division. Avec un supercalculateur qui pourrait effectuer un milliard d'opérations de ce genre par seconde — et fonctionnerait donc plus vite que les matériels actuellement disponibles —, cette vérification prendrait environ 300 millions d'années. (Des raccourcis simples permettent d'en réduire la durée : si l'on ne divise que par des nombres impairs et par 2, il ne faut plus que 150 millions d'années. Mais le gain de temps ainsi réalisé est plus qu'annulé si on veut tester un nombre de 52 chiffres, ce qui prend 10 fois plus de temps par l'une ou l'autre méthode.) Il est cependant tout à fait possible de vérifier si des nombres ayant jusqu'à 100 ou 120 chiffres sont des nombres premiers, non par des essais de division mais au moyen de méthodes ingénieuses issues de la théorie des nombres.

Dans ce domaine, on s'intéresse non pas à la réponse à un problème mathématique mais au procédé — ou algorithme — employé pour calculer cette réponse. Un algorithme peut être défini approximativement comme un ensemble de calculs garantissant une réponse. Le procédé consistant à « essayer des diviseurs au hasard jusqu'au moment où on en trouve un » n'est pas un algorithme permettant de déterminer si un nombre est premier parce qu'il peut se poursuivre indéfiniment sans aboutir à une conclusion certaine. Pour définir avec précision le terme « algorithme », il faudrait une définition formelle du processus de calcul, mais il suffit de se le représenter ici comme un programme d'ordinateur.

La plupart des questions de calcul dépendent d'une « entrée » — nombre ou ensemble de données plus complexe. L'algorithme de détermination du caractère premier dépend de l'entrée du nombre  $n$ . On mesure la taille de l'entrée par le nombre de chiffres binaires (0 ou 1) nécessaires pour la spécifier, qui est dans le cas présent approximativement égal à  $\log_2 n$ . Ce qui nous intéresse est de savoir comment le temps d'exécution de l'algorithme — le nombre d'opérations de calcul — varie avec la taille de l'entrée. On pourrait penser que cela dépend de la nature précise de l'opération — les multiplications prennent plus de temps que les additions, par exemple —, mais la distinction la plus fondamentale est indépendante de ces considérations. Il ne s'agit pas, en effet, du temps d'exécution précis mais

de la façon dont il croît quand la taille des données d'entrée augmente.

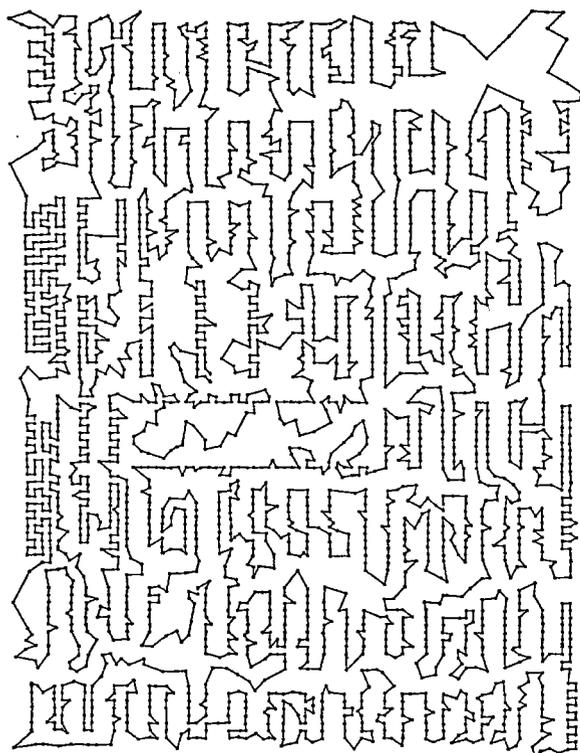
Quel est en général l'ordre de grandeur du temps d'exécution de l'algorithme inapplicable en pratique qui consisterait à faire des essais de division? Un nombre d'entrée à  $n$  chiffres binaires sera de l'ordre de  $2^n$  et sa racine carrée est donc de l'ordre de  $2^{n/2} = (\sqrt{2})^n$ . Cette expression croît exponentiellement quand  $n$  augmente, ce qui rend l'algorithme inapplicable même pour des  $n$  de taille moyenne. Par contre, le temps d'exécution de l'algorithme classique d'Euclide permettant de trouver le plus grand commun diviseur de deux nombres (fig. 4) est de l'ordre de  $16n$  pour des nombres d'entrée à  $n$  chiffres binaires. Cette expression est linéaire par rapport à  $n$ , elle croît donc beaucoup plus lentement : des nombres d'entrée à un million de chiffres ne nécessitent que 16 millions de calculs, soit moins d'une seconde sur notre hypothétique supercalculateur.

Les algorithmes dont le temps d'exécution varie à peu près comme  $n^2$  ou  $n^3$ , ou plus généralement comme une puissance fixe de  $n$ , sont également « pratiques ». Du point de vue de la théorie, l'essentiel est la distinction entre les algorithmes dont le temps d'exécution est au plus  $Kn^a$ , où  $K$  et  $a$  sont des constantes, et ceux dont le temps d'exécution est supérieur à  $Lb^n$ , où  $L$  et  $b$  sont des constantes. On dit que les premiers fonctionnent en *temps polynomial* (ou sont de classe  $P$ ), et que les seconds fonctionnent en *temps exponentiel*. Entre les deux, on trouve des algorithmes dont le temps d'exécution est plus long que celui des premiers mais plus court que celui des seconds : les meilleurs algorithmes connus pour déterminer si un nombre est premier sont en fait de ce type.

Le noyau de la théorie de la complexité est la manière dont les temps d'exécution des algorithmes croissent avec la taille des données d'entrée, ce qui limite leur rendement possible. Le plus difficile est de démontrer que certains problèmes conduisent inévitablement à des algorithmes non performants. Si le meilleur algorithme connu pour un problème fonctionne, disons, en temps exponentiel, on ne peut en conclure que *tout* algorithme destiné à résoudre le même problème fonctionne aussi en temps exponentiel. Il existe peut-être un algorithme performant encore inconnu qui fonctionne beaucoup plus rapidement.

Le problème du voyageur de commerce, imaginé aux États-Unis d'Amérique dans les années 30, aux premiers temps de la recherche opérationnelle, illustre bien ce point. Un voyageur de commerce doit se rendre dans un certain

FIGURE 5  
LE PROBLÈME DU VOYAGEUR DE COMMERCE



Le record actuel pour le problème du voyageur de commerce : itinéraire passant par 3038 points sur une carte de circuits imprimés.

nombre de villes et revenir à son point de départ. On connaît les villes et les distances qui les séparent : quel est l'itinéraire le plus court ? Comme pour le problème consistant à déterminer si un nombre est premier, la méthode évidente — examen de toutes les possibilités, sans exception — est désespérément inefficace. Pour  $n$  villes, le nombre d'itinéraires est  $(n-1)!$ , qui augmente plus vite qu'exponentiellement.

Existe-t-il un algorithme performant pour le problème du voyageur de commerce ? En particulier, en existe-t-il un dans la classe  $P$  ? Personne n'en a jamais trouvé. La recherche sur ce type de question est actuellement axée sur une classe particulière de problèmes appelée  $NP$  (temps polynomial non déterministe). En gros, ce sont les problèmes pour lesquels il existe un procédé de vérification efficace pour

toute solution proposée. Ainsi, bien qu'il faille peut-être plusieurs jours pour reconstituer un puzzle compliqué, un simple coup d'œil permet de vérifier si la solution est correcte. Le problème du voyageur de commerce appartient à la classe  $NP$ , mais il y a conceptuellement une énorme différence entre vérifier efficacement une solution et en trouver une efficacement. Pensez au puzzle ! En fait, le plus grand problème non résolu dans tout ce domaine est de savoir si  $NP$  est différent de  $P$ .

En 1971, Stephen Cook<sup>27</sup> a découvert ce qui apparaissait comme le plus difficile des problèmes  $NP$ . Il a montré que si un problème particulier de logique mathématique, que l'on savait de classe  $NP$ , était en fait de classe  $P$ , il devait en être de même pour tout autre problème de classe  $NP$ . Autrement dit, si ce problème de logique précis appartient à la classe  $P$ ,  $NP = P$ . (En particulier, il existerait forcément, dans ce cas, un algorithme performant pour le problème du voyageur de commerce.) On dit que les problèmes de ce genre sont  $NP$ -complets. Toutefois, il est apparu par la suite que ce problème précis n'est pas aussi particulier qu'il le semble : tous les problèmes  $NP$  qui ne sont pas connus comme de classe  $P$  sont  $NP$ -complets — y compris celui du voyageur de commerce. En effet, chacun de ces problèmes peut se transformer en un cas particulier de chacun des autres d'une manière qui change le temps d'exécution de manière polynomiale. Si quelqu'un arrive à démontrer que le problème du voyageur de commerce est effectivement difficile (qu'il n'est pas de classe  $P$ ), il montrera automatiquement qu'un nombre gigantesque d'autres problèmes sont également difficiles. Mais personne ne sait même par où commencer.

En pratique, des problèmes de voyageur de commerce de taille déjà importante peuvent être résolus par des méthodes particulières. Le record actuel est de 3038 villes (fig. 5). Mais certaines questions posées par la fabrication des puces d'ordinateur (déplacement d'un laser entre différentes positions successives pour forer de minuscules trous) sont équivalentes à un problème de voyageur de commerce devant se rendre dans plus d'un million de villes. On peut se contenter en pratique, faute de pouvoir trouver la solution optimale, de bonnes approximations de celle-ci et des algorithmes approximatifs performants ont été découverts pour de nombreux problèmes. Cependant, Sanjeev Arora<sup>28</sup>, Madhu Sudan<sup>29</sup>, Rajeev Motwani<sup>30</sup>, Carsten Lund<sup>31</sup> et Mario Szegedy<sup>32</sup> ont démontré que, si  $NP \neq P$ , il existe pour la taille des données d'entrée un plafond au-dessus

27. Université de Toronto, Canada.

28, 29. Université de Californie à Berkeley, États-Unis d'Amérique.

30. Université Stanford, États-Unis d'Amérique.

31, 32. Bell Laboratories, États-Unis d'Amérique.

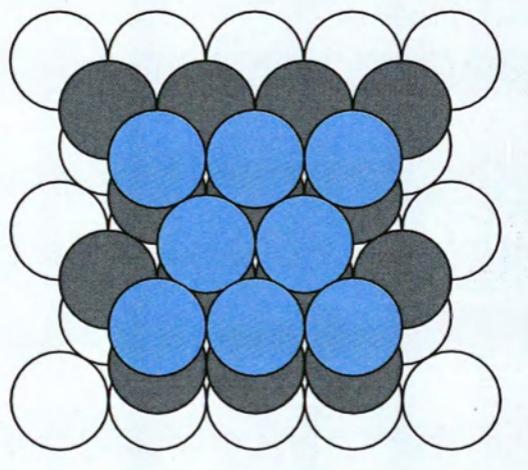
CONTROVERSE AU SUJET DE KEPLER

Le problème de Kepler est une des énigmes les plus anciennes des mathématiques, précédant de trente ans le grand théorème de Fermat. Ce problème a persisté pendant près de quatre siècles. Enfin, Wu-Yi Hsiang, de l'Université de Californie à Berkeley, États-Unis d'Amérique, annonça une démonstration en 1991. Toutefois, sa validité est actuellement controversée.

Johannes Kepler est surtout connu pour ses lois sur le mouvement des planètes mais, dans un livre écrit comme cadeau de nouvel an pour son mécène, il a médité sur les flocons de neige. Pourquoi ont-ils une symétrie hexagonale? Cette question l'a amené à certaines intuitions remarquables sur la structure des cristaux, trois siècles avant que les physiciens ne commencent à élaborer la théorie atomique de la matière, et au problème mathématique consistant à empiler des sphères identiques dans le plus petit espace possible. Il a examiné trois types d'empilement particuliers, connus des cristallographes sous les noms de réseau cubique, réseau hexagonal et réseau cubique à faces centrées (voir la figure à droite). Kepler affirme que l'empilement sera maximisé avec le réseau cubique à faces centrées. Le problème de Kepler consiste à le démontrer — non en se limitant à ces trois types d'empilement mais quel que soit celui-ci, régulier ou aléatoire. Sa densité — proportion de l'espace occupé par les sphères — est  $\pi\sqrt{18}$ , soit environ 74 %.

La démonstration de Hsiang est entièrement formulée dans le langage classique de la géométrie sphérique, des vecteurs et de l'analyse, et, dans sa première version, elle remplissait 100 pages de géométrie subtile. Elle n'a pas encore été publiée, mais elle est largement disponible sous forme de publication préliminaire. Il a fallu environ un an pour que des doutes commencent à se manifester. John Horton Conway, de l'Université de Princeton, États-Unis d'Amérique, et Thomas Hales, de l'Université de Chicago, États-Unis d'Amérique, ont été les premiers à proclamer leur scepticisme. Ils ont fait observer que les documents originaux de Hsiang contiennent plusieurs erreurs évidentes. Depuis, celui-ci a corrigé ces erreurs et considérablement simplifié sa démonstration, mais beaucoup de mathématiciens hésitent maintenant à prendre le temps d'essayer de comprendre une démonstration dont la première version était si défectueuse. Jon Reed, de l'Université d'Oslo, Norvège, est de ceux qui ont fait cet effort et il est convaincu que la démonstration est maintenant correcte. Le meilleur résultat universellement admis est dû à Douglas Muder,

Trois couches successives du réseau cubique à faces centrées, dont beaucoup de mathématiciens conjecturent qu'il représente la manière la plus efficace d'empiler des sphères identiques dans l'espace.



de la Mitre Corporation, Bedford, Massachusetts, États-Unis d'Amérique, qui a démontré que la densité de tout empilement de sphères ne peut dépasser 77,386 %. Muder reste préoccupé par ce qu'il appelle des « assertions sans preuves » dans la tentative de démonstration de Hsiang. Il veut bien croire qu'il est peut-être possible de les justifier rigoureusement, mais il dit que la démonstration actuelle ne le fait pas. De son côté, Hsiang pense qu'il suffit d'attendre que l'intuition géométrique des autres mathématiciens rattrape la sienne. Quand des démonstrations longues et compliquées concernant des problèmes difficiles non résolus sont présentées pour la première fois, les mathématiciens peuvent avoir besoin d'un laps de temps assez long pour les décrypter, comprendre les idées principales et se familiariser avec la démonstration. Plus le théorème est important, plus les spécialistes tendent à réagir initialement par le scepticisme. Les versions initiales des démonstrations compliquées contiennent presque toujours des erreurs; certaines peuvent être fatales, d'autres sont rattrapables: Pour le problème de Kepler, le jury n'a pas encore rendu son verdict. La sociologie de la démonstration mathématique est presque aussi complexe que sa logique.

duquel les approximations deviennent nécessairement mauvaises. La théorie de la complexité est un domaine qui offre des perspectives de développement. La question fondamentale, qui est de savoir si  $NP \neq P$ , est très difficile, mais les chercheurs ont une grande latitude pour inventer des algorithmes — exacts ou approximatifs — nouveaux et

plus performants pour résoudre des problèmes pratiques ainsi que de nouvelles techniques pour déterminer le temps d'exécution d'algorithmes connus, etc. Il existe aussi des extensions importantes de cette théorie. Lenore Blum<sup>33</sup>, Michael Shub<sup>34</sup> et Stephen Smale<sup>35</sup> ont élaboré une théorie du calcul sur les nombres réels qui modélise les techniques

33. International Computer Science Institute, Berkeley, États-Unis d'Amérique.

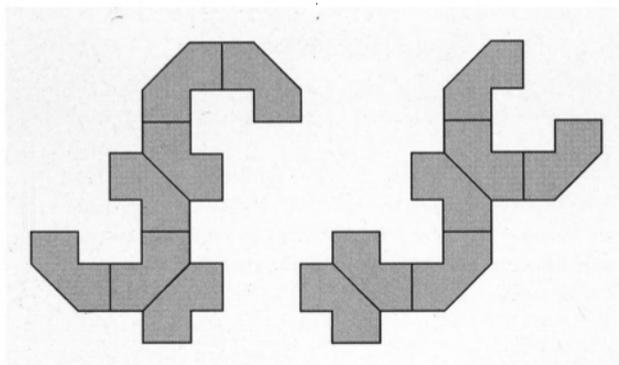
34. Centre de recherche Thomas J. Watson d'IBM, Yorktown Heights, États-Unis d'Amérique.

35. Université de Californie à Berkeley, États-Unis d'Amérique.

de l'analyse numérique. Dans leur théorie, les calculs sont considérés comme menés jusqu'à une précision infinie. Cela permet notamment de vérifier la conjecture de Roger Penrose<sup>36</sup> selon laquelle l'ensemble de Mandelbrot est incalculable, en ce sens qu'aucun algorithme utilisant des nombres réels à précision infinie ne peut déterminer si un nombre donné appartient ou non à cet ensemble. La théorie de la complexité apporte une preuve rigoureuse du fait que le chaos échappe au calcul.

FIGURE 6

DEUX TAMBOURS DIFFÉRENTS AYANT LE MÊME SPECTRE DE VIBRATION



### LE SPECTRE DE L'OPÉRATEUR DE LAPLACE

Tout vibre dans l'Univers. La lumière qui nous arrive des galaxies les plus lointaines comme le chant du rossignol nous sont communiqués par des vibrations — du continuum espace-temps et de l'atmosphère, respectivement. La sonorité d'un stradivarius, comme la stabilité d'une roue de voiture, dépendent de la façon dont ils vibrent. En outre, chaque objet n'a pas seulement une fréquence de vibration mais toute une gamme de fréquences de résonance particulières appelées modes normaux. Mathématiquement, les vibrations de petite amplitude de tout milieu sont décrites par l'équation d'onde, qui a été initialement élaborée au XVIII<sup>e</sup> siècle par Leonhard Euler dans une étude des instruments musicaux, étendue par Joseph-Louis Lagrange aux ondes sonores, puis de nouveau étendue peu après à d'autres domaines.

L'équation est peut-être devenue la plus importante de toutes les équations de la physique mathématique. Elle a pour forme mathématique

$$\frac{d^2f}{dt^2} = \Delta f$$

où l'opérateur de Laplace  $\Delta$  est défini par

$$\Delta f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial z^2}$$

Les fréquences particulières d'une forme qui vibre correspondent aux valeurs propres  $\lambda$  du laplacien, c'est-à-dire aux solutions de l'équation  $\Delta f + \lambda f = 0$ . Dans cette équation, il faut considérer que la limite est maintenue fixe et que le reste de la forme vibre, exactement comme pour un tambour ou une corde de violon.

La fréquence fondamentale d'un violon est déterminée par la tension de la corde, mais il peut aussi produire des harmoniques de la fréquence fondamentale — vibrations deux fois, trois fois, quatre fois, etc., plus rapides. Dans ce cas, la situation est facile à décrire : les fréquences possibles suivent la série des nombres entiers 1, 2, 3, ... Mais des formes plus compliquées produisent des séries de fréquences plus complexes. Hermann Weyl a démontré que, si elles ont des bords lisses, toutes les formes vibrent selon une suite de fréquences

$$\lambda_1 \leq \lambda_2 \leq \lambda_3 \leq \dots$$

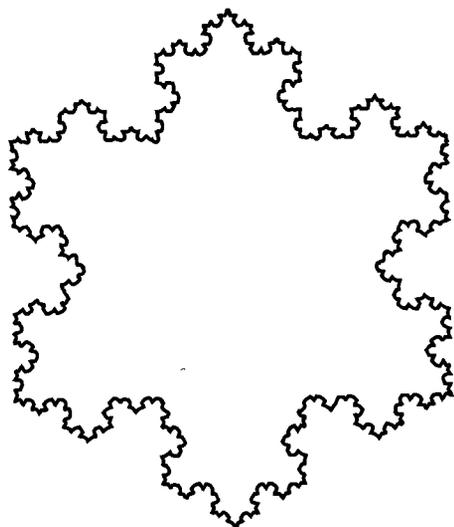
Cette suite est appelée le spectre de la forme.

En 1966, Mark Kac demanda si des formes différentes ont nécessairement des spectres différents. Selon ses termes, peut-on entendre la forme d'un tambour ? Il montra que l'aire et le périmètre d'un tambour — forme bidimensionnelle plane — sont déterminés par son spectre. (Weyl avait déjà démontré un théorème impliquant que le spectre détermine l'aire — voir ci-après.) Après plus d'un quart de siècle, une réponse — négative — vient d'être apportée à sa question par Carolyn Gordon<sup>37</sup>, David Webb<sup>38</sup> et Scott Wolpert<sup>39</sup>, qui ont construit deux tambours différents (fig. 6) ayant un spectre identique. On connaissait des exemples similaires dans des dimensions supérieures depuis 1964, date à laquelle John Milnor<sup>40</sup> a découvert deux tores à 16 dimensions ayant le même spectre. En 1985, Toshikazu Sunada<sup>41</sup> a découvert un critère général déterminant que deux formes ont le même spectre. En l'appliquant, Peter Buser<sup>42</sup>, Robert Brooks<sup>43</sup> et Richard Tse ont découvert deux surfaces courbes (en cloche)

36. Université d'Oxford, Royaume-Uni.  
37, 38. Dartmouth College, États-Unis d'Amérique.  
39. Université du Maryland, États-Unis d'Amérique.

40. Institute for Advanced Study, Princeton, États-Unis d'Amérique.  
41. Université de Nagoya, Japon.  
42. Ecole polytechnique, Lausanne, Suisse.  
43. Université de Caroline du Sud, États-Unis d'Amérique.

FIGURE 7  
LA COURBE DU FLOCON DE NEIGE



Source : H. O. Peitgen, H. Jurgens et D. Saupe, *Chaos and fractals : new frontiers of science*, New York, Springer-Verlag, 1993, p. 99, figure 2.29.

distinctes dans l'espace tridimensionnel ayant le même spectre. Les tambours de la figure 6 sont des versions aplaties d'un de leurs exemples.

Parmi les premières contributions d'Hermann Weyl figure la démonstration du fait que le spectre d'une variété détermine toujours son « volume » multidimensionnel. Il est parvenu à ce résultat en démontrant une formule qui décrit les propriétés asymptotiques des vibrations à haute fréquence. Plus précisément, soit  $N(\lambda)$  le nombre des fréquences particulières inférieures à une valeur donnée  $\lambda$ . Il a montré que  $N(\lambda)$  est asymptotique à  $k\lambda^n$ , où  $n$  est la dimension de l'objet qui vibre et où la constante  $k$  dépend de son volume. Le terme « asymptotique » signifie ici que le rapport entre la véritable réponse et celle donnée par la formule de Weyl tend vers 1 quand  $\lambda$  tend vers l'infini. Mais cela ne donne qu'une information très rudimentaire. Pour affiner la formule de Weyl, il faut s'interroger sur le degré d'importance que l'erreur peut atteindre. En 1980, Michael Berry<sup>44</sup> conjectura, sur la base de considérations physiques, qu'une version plus précise des résultats de Weyl devait être vraie et qu'elle devait s'appliquer non seulement aux formes lisses envisagées par lui, mais aussi aux formes ayant des frontières fractales.

44. Université de Bristol, Royaume-Uni.

On a vu qu'un fractal est une forme présentant une structure tourmentée à tous les degrés de grossissement. Beaucoup d'objets naturels sont mieux modélisés par des fractals que par des surfaces lisses et les vibrations des objets fractals sont importantes. On peut en donner comme exemples celles de l'eau dans un lac ayant un bord irrégulier, les oscillations sismiques de l'ensemble de la Terre et les propriétés acoustiques d'une salle de concert ayant des murs de forme irrégulière. L'archétype du fractal est la courbe du flocon de neige (fig. 7). On part d'un triangle équilatéral. Sur chaque côté on ajoute un triangle équilatéral trois fois plus petit que le premier. On répète ensuite ce processus indéfiniment, en ajoutant des triangles toujours plus petits. Comment un tambour en forme de flocon de neige vibre-t-il ? Selon Berry, à peu près comme un tambour à bord lisse, sauf si on s'intéresse aux détails fins, c'est-à-dire aux vibrations à haute fréquence qui pénètrent dans les minuscules crevasses de la frontière. Là, des vibrations plus nombreuses doivent être possibles, les objets fractals ayant des quantités de crevasses toujours plus petites. Le nombre  $N(\lambda)$  doit donc être plus grand. Berry avança des arguments donnant à penser que l'erreur devait être de l'ordre de  $\lambda^d$ , où  $d$  est la dimension de la frontière du flocon de neige.

Qu'entendons-nous par « dimension de la frontière » quand celle-ci est un fractal irrégulier ? Selon la conjecture de Berry, il devrait s'agir de la dimension fractale, ou dimension de Hausdorff-Besicovitch. Ce concept, qui est fondamental dans l'analyse des fractals, mesure leur comportement quand on change d'échelle. En particulier, ce n'est pas forcément un nombre entier, contrairement à la notion plus habituelle de dimension. Pour le flocon de neige, la valeur approximative de  $d$  est 1,2618. L'erreur dans la formule de Weyl devait donc être du même ordre de grandeur que  $\lambda^{0,6309}$ , à comparer à  $\lambda^{0,5}$  pour un tambour à bord lisse.

La première chose à dire sur la conjecture de Berry est qu'elle est fautive, comme l'ont montré Jean Brossard<sup>45</sup> et René Carmona<sup>46</sup> en 1986. On pourrait penser que c'est la fin de l'histoire, mais l'intuition physique qui sous-tendait la conjecture reste très séduisante. Michael Lapidus<sup>47</sup> et Jacqueline Fleckinger-Pellé<sup>48</sup> ont montré que la conjecture devient exacte lorsqu'on remplace la dimension de Hausdorff-Besicovitch par celle, moins familière, de Minkowski.

L'intérêt de l'intuition physique pour la découverte mathématique est évidente et cette importante extension du résultat classique de Weyl en offre un excellent exemple.

45. Université de Grenoble, France.

46. Université de Californie, Irvine, États-Unis d'Amérique.

47. Université de Géorgie, Athens, États-Unis d'Amérique.

48. Université de Toulouse-I, France.

Mais on peut en tirer aussi d'autres leçons. La première est la nécessité de la rigueur mathématique, sans laquelle on ne se serait pas rendu compte que la définition la plus courante de la dimension fractale n'était pas celle qui convenait ici. La deuxième est que, si l'intuition peut donner le sentiment que certains résultats sont conformes à la réalité, elle ne livre pas toujours l'angle d'attaque voulu pour une démonstration — qui nécessitait ici des méthodes analytiques classiques. La troisième, enfin, est que les idées relativement négligées issues des mathématiques pures — en l'occurrence, la version de Minkowski de la dimension — peuvent soudain reprendre vie dans de nouvelles applications.

Les mathématiques ont besoin des autres sciences, comme celles-ci ont besoin d'elles.

## LECTURES COMPLÉMENTAIRES

Comptes rendus techniques : Mathematical Society of Japan.  
*Proceedings of the International Congress of Mathematicians, Kyoto 1990*, 2 volumes, Tokyo, Berlin, Heidelberg et New York, Mathematical Society of Japan et Springer-Verlag, 1991.

Exposé informel : Stewart, I. *The problems of mathematics* (2<sup>e</sup> édition), Oxford, Oxford University Press, 1992.

IAN STEWART est professeur à l'Institut de mathématiques de l'Université de Warwick, Royaume-Uni, et a occupé des postes de professeur invité en Allemagne, en Nouvelle-Zélande et aux États-Unis d'Amérique. Il est l'auteur de plusieurs ouvrages sur les mathématiques et est chargé de la rubrique « Mathematical Recreations » dans *Scientific American* (publiée également en français sous le titre *Pour la science*). Actuellement, ses travaux de recherche ont trait aux effets de la symétrie sur la dynamique, avec des applications à la formation des configurations, à la locomotion des animaux et au chaos.

Le professeur Stewart est diplômé de l'Université de Cambridge et titulaire d'un doctorat de l'Université de Warwick.

# PHYSIQUE

*Phillip F. Schewe*

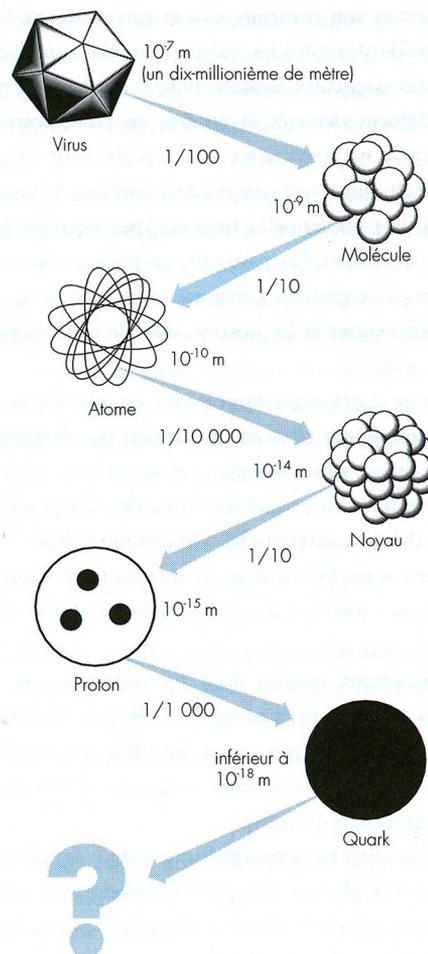
La meilleure façon de saisir l'évolution récente de la physique consiste peut-être à faire le tour des nouvelles connaissances acquises sur la gamme étendue des échelles de distance, autrement dit de partir du quark — dont on considère qu'il est la particule la plus petite (voire de dimension nulle) et la plus élémentaire de toutes —, puis de passer à des objets de taille croissante : noyau, atome, solide, planète, galaxie, pour considérer enfin l'Univers dans sa globalité. Beaucoup d'efforts ont été déployés au niveau de la théorie pour unifier les éléments du savoir, aussi bien sur la petite échelle qui caractérise les interactions entre particules subatomiques ou sur les échelles gigantesques propres à la formation et à la collision des galaxies.

Au niveau de l'expérimentation, la panoplie toujours plus perfectionnée des outils disponibles — lasers, microscopes, pièges à atomes, accélérateurs et télescopes — nous permet aujourd'hui de couvrir un éventail extrêmement large de températures (allant du billionième à des milliards de degrés), de longueurs d'onde (depuis les grandes ondes radio des confins du système solaire jusqu'aux très courtes longueurs d'onde des rayons gamma provenant du centre de notre galaxie) et de temps (les particules  $Z^0$  se désintègrent en  $10^{-24}$  secondes tandis que les micro-ondes cosmiques mettent quinze milliards d'années pour parvenir jusqu'à la Terre).

## LE MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE DES PARTICULES

Quelles sont les composantes élémentaires de la matière ? Dans l'Antiquité, certains Grecs pensaient que la nature était un assemblage d'« atomes ». Les théoriciens du Moyen Age considéraient que toute la matière se façonne à partir de quatre éléments : le feu, l'air, l'eau et la terre. Plus récemment, comme on ne cessait de découvrir de nouveaux éléments chimiques, l'idée de prendre les atomes comme unité de base pour la matière a de nouveau été retenue. Au XIX<sup>e</sup> siècle, l'articulation des propriétés des éléments est devenue manifeste et a été codifiée sous la forme d'une classification périodique. Puis, en 1911, Ernest Rutherford a démontré que les atomes étaient aussi constitués d'éléments distincts : un noyau central lourd entouré d'électrons. Il est

FIGURE 1  
STRUCTURE DE LA MATIÈRE, AVEC SES DIMENSIONS CARACTÉRISTIQUES (en mètres)



parvenu à ce résultat en bombardant une mince feuille d'or de particules alpha. Le mode de diffusion de ces particules ne pouvait s'expliquer que si les atomes d'or avaient un noyau lourd. On a découvert ultérieurement que le noyau lui-même est formé de neutrons et de protons. On sait maintenant que ces particules elles-mêmes, qui étaient encore considérées comme élémentaires pendant les années 60, ont des composantes appelées quarks.

Une image globale de la physique des particules commence à se dessiner depuis une vingtaine d'années, avec une description des forces physiques connues et un consensus sur ce qui constitue une particule élémentaire. Ce cadre théorique, appelé modèle standard, part de l'hypothèse qu'il existe deux familles principales de particules élémentaires ; les quarks, qui sont de six types ou « saveurs » : up, down, étrange, charme, vérité et beauté, et les leptons, qui comportent également six saveurs : électron et son neutrino, muon et son neutrino, tau et son neutrino. Selon le modèle standard, toutes les autres particules sont formées à partir de ces particules fondamentales. Les leptons peuvent être directement détectés et étudiés en laboratoire tandis que les quarks n'apparaissent jamais seuls, mais en groupes de deux (états liés), appelés mésons (comme le pion ou le kaon), ou de trois, appelés baryons (par exemple les protons et les neutrons). Les particules en général sont en outre divisées en deux grandes catégories : les fermions, qui ont un spin demi-entier et les bosons, dont le spin est entier (0 ou 1 ou 2, etc.).

Selon une autre règle importante du modèle standard, toutes les particules sont en interaction par le truchement de quatre forces, dont chacune a pour vecteur un « boson de jauge » qui lui est propre (ce terme de « jauge » étant un vestige de théories antérieures). On distingue donc :

- ☛ les interactions fortes, dont les quanta de champ sont les gluons ; internes au noyau, elles assurent sa cohésion ;
- ☛ les interactions faibles, dont les quanta de champ sont les bosons intermédiaires  $Z^0$ ,  $W^+$ , et  $W^-$ . Elles sont aussi internes au noyau, mais sont bien plus faibles que les précédentes et sont responsables de certains types de désintégration radioactive ;
- ☛ les interactions électromagnétiques, dont le quantum de champ est le photon, assurent la cohésion des atomes et sont responsables de tous les phénomènes électriques et magnétiques et des réactions chimiques ;
- ☛ les interactions de gravitation, dont le quantum de champ serait le graviton, sont les plus faibles des quatre, mais n'en sont pas moins puissantes à l'échelle de distance et de masse du cosmos.

Le modèle standard comporte plusieurs théories spécifiques, appelées théories de jauge, qui expriment l'idée de force dont les vecteurs sont des « bosons de jauge ». L'une d'entre elles, l'électrodynamique quantique, est la théorie des interactions électromagnétiques. On lui doit beaucoup

de prévisions extrêmement précises concernant des phénomènes électromagnétiques très divers, en particulier à l'échelle atomique. De nombreuses expériences ont démontré sa validité. La théorie électrofaible réunit les interactions électromagnétiques et faibles dans un même cadre mathématique. Il est bien évident que ces deux interactions ont aujourd'hui des propriétés très différentes, mais on pense qu'à une époque antérieure, alors que l'Univers était plus chaud, elles constituaient deux manifestations d'une même force sous-jacente. Une troisième théorie, la chromodynamique quantique, décrit les interactions fortes. Les particules (mésons et baryons) qui sont en interaction sont appelées hadrons. En chromodynamique quantique, on dit que les quarks possèdent une charge particulière, la charge de couleur, ainsi nommée par analogie avec la charge électrique ; c'est pourquoi on désigne parfois sous le nom de force de couleur — d'où le terme de chromodynamique — l'interaction forte qui s'exerce entre les quarks. Il y a encore une autre théorie, la théorie de la grande unification (assez mal nommée car elle ne prend pas en compte la gravitation) qui cherche à unifier les interactions fortes et électrofaibles.

Toutes ces théories doivent être vérifiées par l'expérimentation. Comme l'étude des propriétés des particules et la recherche de nouvelles interactions s'effectuent en provoquant des collisions entre particules de haute énergie, la physique des particules est souvent appelée physique des hautes énergies. En fait, les accélérateurs qui propulsent des faisceaux de particules à des vitesses proches de celle de la lumière peuvent être comparés à des microscopes géants qui permettent de voir la matière à la plus petite échelle possible. Plus l'énergie de l'accélération s'accroît, plus augmente le « pouvoir de résolution », c'est-à-dire la possibilité de faire une exploration plus fine de la matière.

C'est pour cette raison que la terminologie utilisée en physique des particules s'explique largement par la nécessité d'accélérer les particules pour atteindre de hautes énergies. Ainsi, l'électronvolt (eV), défini comme l'énergie acquise par un électron accéléré sous une différence de potentiel de 1 volt, est devenu l'unité de base de l'énergie. Les accélérateurs produisent couramment aujourd'hui des faisceaux d'énergie de milliards d'électronvolts (gigaélectronvolt ou GeV), voire des billions d'électronvolts (teraélectronvolt ou TeV). Les masses elles-mêmes sont exprimées en unités d'électronvolts : on dit que le proton a une masse de  $0,938 \text{ GeV}/c^2$ , où  $c$  est la vitesse de la lumière.

## EXPÉRIENCES PROTON-ANTIPROTON

Pour étudier la matière sur des échelles de distance plus petites, les chercheurs ont besoin d'énergies toujours plus grandes et de « microscopes » plus grands et plus coûteux. Les machines générant les plus hautes énergies sont les accélérateurs dans lesquels deux faisceaux de protons entrent en collision frontale. Au collisionneur SSC (Superconducting Super Collider), en cours de construction près de Dallas, au Texas, deux faisceaux distincts de protons décriront une trajectoire de 83 km de circonférence et se heurteront dans plusieurs zones déterminées de collision avec une énergie de 40 TeV. Ce projet, dont le coût est de 11 milliards de dollars, devrait être achevé peu après la fin du siècle.

L'autre grand collisionneur proton/proton à l'étude est le LHC (Large Hadron Collider), qui devrait utiliser le tunnel souterrain du LEP (Large Electron Positron Collider), le collisionneur du Centre européen de recherches nucléaires (CERN) à Genève, Suisse. Le projet LHC, qui n'a pas encore été pleinement approuvé par le Conseil multinational du CERN, devrait avoir une énergie totale de 16 TeV, soit un peu moins que le SSC, mais les deux machines auraient des buts comparables : l'étude de la matière sur de petites échelles de distance, peut-être de l'ordre de  $10^{-18}$  mètres, et la recherche de nouvelles particules comme le boson hypothétique de Higgs.

En attendant, les plus grandes énergies de collision jamais atteintes dans un accélérateur sont obtenues au Tevatron de 7 km de l'accélérateur du Fermilab (Fermi National Accelerator Laboratory) près de Chicago, Illinois. La collision de faisceaux de protons et d'anti-protons y intervient avec une énergie totale de 1,8 TeV. En plus de faisceaux destinés à se heurter de front, le Tevatron produit des faisceaux avec lesquels on peut bombarder des cibles fixes. Ces faisceaux peuvent se composer de protons ou de diverses particules secondaires telles que les mésons et les neutrinos.

La recherche du quark vérité (voir la figure B, planches en couleurs, p. ii) est peut-être l'objectif le plus important du Fermilab. Ce type de quark est le seul des six catégories du modèle standard qui n'a pas encore été observé en laboratoire. Selon des résultats récents publiés par l'équipe du CDF (Collider Detector at Fermilab), la masse de ce quark ne doit pas être inférieure à 108 GeV. Une valeur comparable de 103 GeV a été fournie par le détecteur D0. Chacun de ces deux détecteurs colossaux mobilise plus de 400 physiciens et de nombreuses nations. Ils ont l'un et l'autre enregistré un

petit nombre d'événements (officiellement deux au CDF et un au D0) qui donnent à penser qu'une production de quarks vérité a lieu. Au cours de ces événements, la collision proton-antiproton a donné naissance à un muon ou à un électron de haute énergie, parallèlement à des jets d'autres particules. Les chercheurs du Tevatron admettent, toutefois, que cela pourrait aussi être attribué à diverses réactions du fond continu de rayonnement sans rapport avec le quark vérité.

John Peoples, directeur du Fermilab, dit qu'un inventaire de dix événements au moins dans chaque détecteur serait nécessaire avant qu'on puisse même envisager de déclarer que le quark vérité avait incontestablement été produit. Cela souligne le caractère statistique de la recherche de ce quark : le Tevatron a une énergie plus que suffisante pour créer des quarks ayant des masses de 200 GeV ou plus, mais la probabilité que cela se produise au cours d'une interaction déterminée est extrêmement faible. Des données bien plus nombreuses sont indispensables et un moyen important pour les obtenir consiste à accroître la luminosité, la vitesse à laquelle les particules des deux faisceaux peuvent être dirigées sur le point d'interaction. Après un arrêt programmé (juin-octobre 1993), on s'attend à ce que le Tevatron fonctionne avec une plus grande luminosité et une énergie plus élevée (2 TeV).

## EXPÉRIENCE ÉLECTRON-POSITRON

Le SSC, le LHC et le Tevatron utilisent des faisceaux de protons ou d'antiprotons, qui sont des objets composites contenant des quarks. Pour certains types d'expériences, il est préférable d'employer des faisceaux d'électrons ou de positrons qui, selon les théoriciens, ont une dimension réellement nulle. Ainsi, le boson  $Z^0$ , qui est un des quanta de champ de l'interaction faible, a été détecté pour la première fois au début des années 80 au CERN dans un collisionneur proton-antiproton. Mais depuis lors, l'étude de cette particule s'est poursuivie principalement dans des collisionneurs électron/positron où les bosons  $Z^0$  sont produits (en grand nombre si l'énergie de collision s'y prête exactement) à partir de la boule de feu miniature qui se crée quand un électron et un positron s'annihilent mutuellement lors d'une collision.

En fait, plus d'un million de  $Z^0$  ont été enregistrés par les quatre détecteurs du LEP et un nombre bien plus petit par le collisionneur SLC (Stanford Linear Collider) du SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) en Californie. Au LEP et au SLC, l'énergie de collision est de 100 GeV.

Mais, alors que le LEP est un accélérateur classique à anneau de stockage, avec des faisceaux d'électrons et de positrons circulant des millions de fois autour d'un tore d'aimants, les particules du SLC sont accélérées dans un couloir rectiligne de 3 km et dirigées (dans un sens pour les électrons et dans l'autre pour les positrons) autour de bras semi-circulaires courts, puis subissent une seule collision dans une zone du détecteur et ne sont pas remises en circulation.

### Propriétés du boson $Z^0$

Les expériences conduites au SLC et au LEP visent principalement à étudier les propriétés du boson  $Z^0$  et divers aspects de l'interaction électrofaible. Examinons une courbe représentant le nombre de phénomènes d'annihilation observés en fonction de l'énergie de collision. On voit aux

alentours de 91 GeV une bosse qui correspond à la production par résonance de bosons  $Z^0$ . Autrement dit, bien que le boson  $Z^0$  n'existe pas normalement en tant que particule libre, la nature a fait en sorte que, lorsqu'un électron et un positron s'annihilent à une énergie de 91 GeV, l'énergie libérée se manifeste sous la forme d'un tel boson. Celui-ci se décompose assez vite, mais les chercheurs ont quand même le temps d'apprendre beaucoup de choses à son sujet. Ainsi la courbe passe par un maximum à une valeur égale à la masse du boson  $Z^0$ . Une mesure actuelle du LEP donne une valeur de 91,187 GeV/c<sup>2</sup> (avec une incertitude de 0,007).

La largeur de la bosse a aussi son importance. Selon le principe d'incertitude de Heisenberg, la largeur du pic de résonance du boson  $Z^0$  est inversement proportionnelle à sa durée de vie, qui est elle-même fonction du nombre de possibilités de désintégration qui s'offrent. Plus il y a de types,

### EXPÉRIENCES MENÉES AVEC DES ATOMES PIÉGÉS

Toute une catégorie d'expériences de physique atomique est conditionnée par la possibilité de piéger et d'étudier un petit nombre d'atomes et de molécules. Le dispositif de piégeage utilise habituellement une série de faisceaux laser, parfois qualifiée de « mélasse optique », pour ralentir les atomes et, dans certains cas, avec l'aide supplémentaire de champs électrostatiques ou magnétiques, pour les fixer sur place. La « température » d'un petit échantillon de ces atomes lents serait extrêmement basse. A titre d'exemple, Steven Chu et ses collègues de l'Université de Stanford aux États-Unis d'Amérique ont refroidi un échantillon d'atomes de sodium qu'ils ont ensuite éjecté par le haut (en utilisant un autre laser) dans une cavité où une nouvelle sélection d'atomes pouvait être effectuée en fonction de la vitesse. Ils ont ainsi créé un faisceau secondaire d'atomes ayant une dispersion monodimensionnelle en vitesse de 270 microns par seconde seulement — ou une « température monodimensionnelle » équivalente de 24 picokelvins.

L'équipe de David Pritchard au MIT (voir la figure C, planches en couleurs, p. ii) a effectué de nouvelles mesures de masses atomiques qui sont de 20 à 1 000 fois plus précises que les valeurs antérieures. Les masses de l'hydrogène, du deutérium, de l'oxygène, du néon et de l'argon ont été mesurées avec une précision de l'ordre du cent millionième. Les chercheurs ont effectué leurs mesures au moyen d'un piège de Penning, dispositif dans lequel le mouvement d'un ion isolé dans le champ magnétique d'un cyclotron est comparé à celui d'un ion de référence. Les masses relatives sont déterminées par le rapport des fréquences cyclotron, puis comparées au moyen d'une échelle de référence

qui a pour base le carbone 12. Les chercheurs du MIT ont aussi fait part de leur intention de « peser » les énergies des liaisons chimiques, mais, pour y parvenir, il leur faut découpler la précision. Pritchard est convaincu qu'une amélioration de cette ampleur passe par la mise au point d'une technique qui permette à deux ions d'occuper simultanément le piège de Penning. D'après Robert Van Dyck, de l'Université de Washington, la différence de masse entre l'hélium 3 et le tritium mesurée avec le piège de Penning est de 18 590,1 eV, avec une incertitude de 1,7 eV. Cette mesure autorise une vérification systématique des expériences de la désintégration bêta du tritium lors de l'étude sur l'existence possible de la masse du neutrino.

L'équipe de Ulli Eichmann a réalisé à l'Institute of Standards and Technology de Boulder, au Colorado, une nouvelle version de l'expérience des franges d'interférence de Young. Elle a remplacé les deux fentes de l'écran par deux ions de mercure placés dans un piège à atomes pour diffuser des ondes lumineuses et produire des franges d'interférence. Les chercheurs ont utilisé un seul faisceau laser destiné, d'une part, à refroidir jusqu'à une température exprimable en microkelvins les ions maintenus dans les champs électriques non homogènes d'un piège à atomes et, d'autre part, à servir de source lumineuse pour produire des phénomènes d'interférence. Des images d'interférence stables ont été réalisées pour différentes distances entre les ions (généralement quelques microns). L'image d'interférence peut ensuite servir à mesurer la température ou la distance entre les ions dans diverses expériences de piégeage.

ou de « générations », de particules élémentaires (tout au moins de générations de particules dont les masses sont égales à moins de la moitié de celle du boson  $Z^0$ ), plus la durée de vie du boson  $Z^0$  sera courte et plus la bosse sera large. Actuellement, le modèle standard prend en compte trois générations — électron, mu et tau —, mais sans exclure expressément la possibilité qu'il en existe d'autres. On a calculé que chaque génération apporte une contribution de l'ordre de 160 MeV à la largeur de la courbe de résonance du boson  $Z^0$ , de sorte qu'une mesure exacte de cette largeur fournirait un nombre vraisemblable de générations de particules. D'après les expériences menées au LEP et au SLC, et même au Tevatron, il semblerait que le nombre total de générations de particules correspond précisément aux trois que nous connaissons déjà. Cette découverte n'est pas seulement importante pour les spécialistes de la physique des particules, elle l'est aussi pour les cosmologistes qui s'efforcent de comprendre la dynamique de l'Univers à ses débuts.

Il est intéressant de noter que les effets de marée lunaire constituent la cause principale d'erreur dans la détermination de la masse du boson  $Z^0$ . Les chercheurs du CERN, avec l'aide de ceux du SLAC et de l'Université de Lausanne, ont constaté que la force d'attraction de la Lune produit une déformation atteignant un millimètre (sur une circonférence totale de 27 km) du collisionneur du LEP. Cela introduit une approximation de l'ordre de 10 MeV dans les estimations de la masse du boson  $Z^0$ . Désormais il sera tenu compte de la phase de la Lune pour calibrer l'énergie du faisceau.

### *La théorie de la grande unification*

D'autres expériences menées au LEP s'interrogent sur la nature de la théorie de la grande unification de la physique des particules. Cette théorie prédit qu'à de très hautes énergies ( $10^{15}$  GeV), correspondant aux conditions qui régnaient il y a très longtemps, peu après le Big Bang, les interactions électromagnétiques faibles et fortes devaient être comparables. Pour les énergies plus faibles disponibles dans les accélérateurs de particules, les forces relatives de ces interactions s'expriment sous la forme de trois « constantes de couplage ».

En utilisant les données du LEP, les scientifiques ont extrapolé la valeur des « constantes de couplage » jusque dans la gamme des énergies où l'unification serait possible. Selon certains d'entre eux, le fait que les trois courbes ne se coupent pas en un même point semble apporter la preuve

de l'existence de nouveaux phénomènes physiques, dont ce qu'on appelle le modèle standard ne rend pas compte.

### *Le modèle de la « supersymétrie »*

Le modèle de la « supersymétrie », théorie qui repose sur l'hypothèse d'une relation de symétrie entre les fermions et les bosons, fournit une explication de ces phénomènes. Cette théorie prévoit, par exemple, que les bosons, tels que les photons et les gluons, ont pour homologues des fermions (qui seront dans ce cas des photoninos et des gluinos) et que les fermions, par exemple les leptons et les quarks, auraient des homologues bosons (appelés en l'occurrence des sleptons et des squarks). L'un des objectifs de cette théorie est d'unifier toutes les forces, y compris la gravitation, dans un seul cadre. Si les accélérateurs du LEP et le Tevatron permettent d'espérer que l'on pourra observer directement en laboratoire de telles particules supersymétriques, les valeurs extrapolées des constantes de couplage du LEP apportent au moins une information indirecte sur la supersymétrie.

Le SLC produit bien moins de bosons  $Z^0$  que le LEP, mais il a pu partiellement polariser son faisceau d'électrons. Dans un faisceau polarisé, certains électrons ont été spécialement orientés pour que leur spin se situe dans le sens du mouvement ou dans le sens inverse. On dit que ces électrons sont polarisés à droite ou à gauche. Il s'avère que l'interaction électrofaible est sensible à la polarisation ; de ce fait, la production des bosons  $Z^0$  devrait présenter une asymétrie gauche-droite. Autrement dit, le taux de production des bosons  $Z^0$  devrait être différent suivant que les électrons sont polarisés à gauche ou à droite. Or une asymétrie de cette nature a bien été constatée lors des expériences faites au SLC.

L'asymétrie gauche-droite peut servir pour mesurer l'angle de Weinberg (ou plus précisément le carré du sinus de l'angle de Weinberg). Ce facteur est appelé ainsi en l'honneur du physicien Steven Weinberg, de l'Université du Texas ; il décrit l'importance relative des bosons  $Z^0$  et des photons dans la théorie de l'interaction électrofaible. La nouvelle valeur de ce facteur trouvée au SLC, soit 0,2378, est comparable en précision aux mesures faites au cours d'autres expériences d'interaction. Toutefois, puisque les travaux se poursuivent au SLC et que le degré de polarisation augmente (à ce jour, des polarisations supérieures à 50 % ont été obtenues), la mesure de l'angle de Weinberg deviendra également plus précise.

*Exploration de la structure interne du proton*

Les expériences décrites jusqu'ici mettaient en jeu des interactions protons-antiprotons ou électrons-positrons. Il en existe d'autres, également importantes, entre les électrons (ou les autres leptons comme les muons ou les neutrinos) et les protons. Les leptons étant insensibles à la force nucléaire, ils fournissent d'excellentes sondes pour explorer la structure interne des protons ; ils sont capables de pénétrer profondément le proton, et souvent à un tel point qu'ils ne sont pas diffusés par le proton lui-même, mais par l'un de ses quarks. Une expérience de cette nature a été faite par le Spin Muon Collaboration (SMC) au CERN. Cette expérience, au cours de laquelle des muons polarisés ont été diffusés par des deutérons polarisés (isotopes de l'hydrogène, composés d'un proton lié à un neutron), a débouché sur un résultat intéressant, en permettant de constater qu'une très faible proportion (moins de 12 %) du spin d'un proton ou d'un neutron provient du spin des quarks qui le constituent.

Une expérience comparable, effectuée au SLAC (la collaboration E 142), a porté sur la diffusion d'électrons polarisés par une cible fixe d'atomes d'hélium 3, également polarisés ; elle a donné un résultat très différent de celui de l'expérience précédente, à savoir que les quarks véhiculent jusqu'à 60 % au moins du spin du nucléon. Les équipes du SLAC et du CERN envisagent l'une et l'autre des mesures plus poussées pour procéder à des vérifications à ce sujet.

La diffusion par collision lepton-proton à très haute énergie a lieu à l'accélérateur HERA (Hadron-Electron Ring Accelerator), à Hambourg, Allemagne, dans lequel des électrons de 30 GeV entrent en collision avec des protons de 820 GeV (voir la figure D, planches en couleurs, p. iii). Deux paramètres — l'énergie totale du centre de masse et le transfert de la quantité de mouvement — doivent y être au moins dix fois supérieurs aux valeurs qu'ils ont dans les autres accélérateurs, où l'exploration des collisions leptons-hadrons passe par des expériences sur des cibles fixes. De plus grands transferts de la quantité de mouvement permettent aux chercheurs d'explorer la distribution de la matière à l'intérieur des protons jusque sur de très petites échelles de distance — pour HERA, jusqu'à  $10^{-18}$  cm, soit le dix-millième de la taille du proton. Ce n'est que depuis les dernières semaines de 1992 que des expériences de physique sont effectuées sur HERA et les chercheurs essaient encore actuellement d'optimiser ses conditions de fonctionnement.

## PHYSIQUE NUCLÉAIRE

On pense que les leptons et les quarks sont de dimension nulle ; les protons et les neutrons sont constitués de quarks. La structure de taille immédiatement supérieure est le noyau. On peut parfois étudier les noyaux en observant passivement leur désintégration radioactive, mais il faut des énergies de millions ou de milliards d'électron-volts pour exciter les noyaux jusqu'à de nouveaux états exotiques. C'est pourquoi les spécialistes de la physique nucléaire, comme ceux de la physique des particules, ont recours aux accélérateurs.

Depuis quelques années, on étudie une nouvelle forme de matière nucléaire, les éléments superlourds dont le numéro atomique est supérieur à 106. Les éléments lourds qui se trouvent juste au-dessous dans la classification périodique ont été produits par bombardement d'éléments plus légers avec des neutrons ou des particules alpha. Mais cette méthode ne convient pas pour créer des radioéléments synthétiques au-delà de 106, à cause de l'instabilité propre à ces noyaux superlourds. Les chercheurs du GSI (Institute for Heavy-Ion Research de Darmstadt, Allemagne) recourent donc à des techniques plus douces. Tout en utilisant des faisceaux accélérés d'ions lourds, ils s'en tiennent à des énergies relativement modestes afin que le noyau projectile réussisse à s'unir au noyau cible (de poids nucléaire approximativement égal) et à créer un noyau composite lourd, dont l'existence et les propriétés peuvent être déduites de la détection d'une série de produits de désintégration tels que les particules alpha et les noyaux-fils plus légers. Ce travail a porté ses fruits avec la découverte des éléments 107, 108 et 109, qui ont reçu récemment les noms officiels de Nielsbohrium, Hassium et Meitnerium, donnés respectivement en l'honneur de Niels Bohr, de l'État allemand de Hesse et de Lise Meitner.

L'apparition de faisceaux d'ions lourds dépouillés de la totalité ou de la quasi-totalité de leurs électrons a permis aux scientifiques d'étudier des phénomènes nucléaires très divers. Au GSI, par exemple, ils ont observé récemment le premier cas de désintégration bêta à état lié. Par désintégration bêta ordinaire, un noyau se transforme essentiellement par conversion d'un de ses neutrons en proton. Ce processus s'accompagne de l'émission de deux particules, un électron et un antineutrino, qui s'échappent du noyau en cours de désintégration. Mais lors de l'expérience au GSI, il s'est produit un phénomène tout à fait différent : l'électron émis s'est lié à l'atome fils. C'est en 1947 que ce processus, appelé désintégration bêta à état lié, a été prédit pour la pre-

mière fois. Les chercheurs du GSI ont observé cette désintégration dans des atomes de dysprosium (numéro atomique 66) complètement ionisés circulant dans un anneau de stockage. Bien que le dysprosium neutre soit stable, il donne par désintégration bêta à état lié, une fois entièrement dépouillé de ses électrons, de l'holmium fortement ionisé (numéro atomique 67) ayant une période de 47 jours. Cette valeur a été obtenue par mesure du temps de stockage des ions fils d'holmium. Selon les chercheurs du GSI, la désintégration bêta à état lié présente une importance minimale dans le cas des atomes neutres, mais pourrait être le mode de désintégration prédominant des atomes fortement ionisés tels ceux que l'on rencontre à l'intérieur des plasmas stellaires lors de la synthèse nucléaire. L'étude de ces désintégrations (qui s'accompagnent de l'émission d'un anti-neutrino monoénergétique) peut aussi déboucher sur la fixation de limites plus précises pour la masse de l'antineutrino.

#### *La mesure du facteur S*

Une autre expérience récente de physique nucléaire a des implications pour les astronomes. Le taux de combustion de l'hélium dans les étoiles massives, et en particulier le rapport entre deux réactions — la fusion de trois noyaux d'hélium pour former de l'oxygène 16 — déterminent la séquence selon laquelle des éléments lourds se sont formés dans le cœur des étoiles et la chronologie fatidique qui conduit les étoiles massives vers l'état de supernovæ. Au cours de deux expériences distinctes, réalisées respectivement à l'Université Yale dans le Connecticut, et à l'accélérateur Triumph, à Vancouver, en Colombie britannique, on a mesuré le taux de production d'oxygène, le « facteur S », après avoir mesuré au préalable le taux de production de carbone. Lors de ces deux expériences, les chercheurs ont étudié le mode de désintégration de l'oxygène 16 pour donner du carbone et de l'hélium. Il a fallu mesurer cette réaction inverse, car la vitesse de fusion du carbone et de l'hélium, tout au moins dans les conditions régnant en laboratoire sur la Terre, était trop petite pour être utilisable. Les résultats des deux expériences ont été assez semblables et largement en accord avec les calculs théoriques.

Les noyaux très déformés, aplatis ou étirés et en rotation rapide à la suite de collisions à haute énergie, sont une autre forme exotique de la matière nucléaire. Souvent, ces noyaux se désactivent en émettant une série de photons de haute énergie (rayonnement gamma). Dans un certain nombre de laboratoires<sup>1</sup>, des chercheurs ont remarqué depuis quelques années que la séquence (ou bande) des rayons gamma émis par les noyaux

très déformés de dysprosium 152 et de terbium 151 ressemblait étonnamment aux configurations observées pour les noyaux comme celui du mercure dont la masse atomique se situe aux alentours de 190. On appelle jumelage des bandes cette curieuse similitude des spectres d'énergie. D'après Marie-Anne Deleplanque<sup>2</sup> : « nous ne pouvons expliquer aucune de ces propriétés en nous basant sur notre connaissance actuelle de la structure nucléaire ».

#### *Noyaux à halo*

Le noyau du lithium 11 (Li 11) comprend neuf nucléons entourés à une certaine distance par une paire de neutrons qui constituent un halo faiblement lié. On a commencé à soupçonner l'existence de ce halo il y a cinq ans, lorsque des expériences de diffusion nucléaire ont révélé que la probabilité de réaction du Li 11 était sensiblement plus grande que prévu ; cela suggérait que la dimension du noyau devait être supérieure à la normale. Aujourd'hui, on a effectivement mesuré, dans le cadre d'une nouvelle expérience, la taille du halo lors d'un processus de rupture. Au National Superconducting Cyclotron Laboratory de la Michigan State University (MSU), on a créé un faisceau de Li 11 radioactif en envoyant des ions d'oxygène 18 sur une mince feuille de lithium. Le Li 11 est alors diffusé par une cible de noyaux de plomb dont les champs électriques produisent une rupture relativement douce du Li 11 en donnant du Li 9 et une paire de neutrons. En revanche, lorsque le Li 11 est diffusé par des noyaux légers, comme le béryllium 9, la fragmentation se produit par le truchement d'une interaction forte. Ces deux types de diffusion donnent à penser que le halo du Li 11 a une dimension cinq fois supérieure à celle du noyau du Li 9. Le halo représentant une sorte de « matière neutronique », les expériences menées à la MSU et dans plusieurs autres laboratoires (GANIL et Saclay en France, RIKEN au Japon, etc.) devraient, espère-t-on, permettre d'étudier les interactions entre les neutrons du halo et de rechercher d'autres noyaux ayant un halo.

#### *Plasma quarks-gluons*

La forme peut-être la plus exotique de matière nucléaire recherchée par les scientifiques dans les expériences menées grâce aux accélérateurs est appelée plasma quarks-gluons. C'est un état hypothétique dans lequel les quarks et les gluons confinés dans les protons et les neutrons du noyau seraient tous éjectés ensemble dans les conditions de tempé-

1. Notamment le Lawrence Berkeley Laboratory, Californie, États-Unis d'Amérique ; l'Argonne National Laboratory près de Chicago, États-Unis d'Amérique ; le Daresbury Laboratory, Royaume Uni ; le Chalk River, Canada, et l'Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, États-Unis d'Amérique.

2. Lawrence Berkeley Laboratory, Californie, États-Unis d'Amérique.

rature et de pression élevées provoquées par les collisions à haute énergie. Les noyaux les plus lourds utilisés aux énergies les plus hautes employées jusqu'ici sont ceux du soufre (de poids atomique 32), tandis que pour les noyaux les plus lourds auxquels on ait recouru jusqu'à présent, les énergies les plus élevées ont été de l'ordre de 1 GeV par nucléon. Mais cela n'a pas suffi pour obtenir un plasma quarks-gluons, et les spécialistes de la physique nucléaire envisagent donc des expériences à plus grande échelle au moyen de noyaux plus lourds — qui fournissent en principe plus de particules de plasma que les noyaux légers — et de plus hautes énergies.

Au collisionneur SPS du CERN (où ont été découvertes les particules  $Z^0$  et  $W^+$  et  $W^-$  au début des années 80), on accélérera des ions de plomb (probablement en 1994) jusqu'à des énergies de 180 GeV par nucléon. Le Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) en construction au Brookhaven National Laboratory, à New York, devrait (en 1997) permettre des collisions entre des ions d'or avec des énergies totales (en fin de processus) atteignant 40 TeV.

#### PRIX NOBEL

Pierre-Gilles de Gennes, du Collège de France (Paris), a reçu le prix Nobel de physique en 1991 pour « avoir découvert que les méthodes élaborées pour l'étude des phénomènes d'ordre dans des systèmes simples pouvaient être généralisées à des formes de matière plus complexes, en particulier à des cristaux liquides et à des polymères ». De Gennes est très apprécié de ses pairs pour la clarté et la rigueur avec lesquelles il étudie des systèmes physiques complexes et pour les efforts qu'il déploie afin de développer des liens interdisciplinaires entre des domaines disparates.

Il a notamment contribué à donner à la physique des polymères une base plus mathématique. Ainsi, il a calculé des paramètres adimensionnels incorporant certaines propriétés des polymères comme leur longueur, leur poids moléculaire et leur rayon de giration, qui obéissent à des lois de similitude. Autrement dit, ces paramètres caractérisent la conformation et le comportement du polymère dans des conditions expérimentales très diverses (température ou concentration du polymère, par exemple).

Il a formulé une théorie qui décrit la « reptation », mouvement des polymères à travers le milieu qui les entoure, dans le sens de leur axe longitudinal. Ses travaux ont en fait, selon certains scientifiques, posé les jalons nécessaires pour comprendre la viscosité et l'élasticité des polymères au niveau moléculaire.

Il a été à l'avant-garde de l'étude des polymères aux interfaces, qui a des applications pratiques dans divers domaines : suppression des turbulences, lubrification, récupération secondaire de l'huile, immunologie et traitement des déchets.

Dans des conditions aussi extrêmes, ces interactions devraient générer jusqu'à 10 000 particules chargées par événement, soit plus qu'une collision typique au SSC.

#### PHYSIQUE ATOMIQUE ET MOLÉCULAIRE

Après les quarks, les protons et les noyaux, les atomes représentent la plus grosse agrégation de matière dans l'univers. L'étude des atomes et des molécules a été grandement facilitée par la souplesse des lasers, leur utilisation en régime pulsé, leur cohérence et l'énergie considérable qu'ils permettent de concentrer. L'utilisation de faisceaux d'atomes neutres a aussi revêtu une grande importance. Ainsi, il devient plus courant de manipuler des faisceaux d'atomes grâce à des techniques qui servent normalement pour des faisceaux lumineux. Les champs électriques forts présents dans la lumière intense du laser et le développement de la nanoélectronique ont facilité la mise au point de toutes sortes de dispositifs de fractionnement des faisceaux atomi-

Georges Charpak a reçu le prix Nobel en 1992 pour ses nombreuses contributions à la mise au point des instruments utilisés dans les accélérateurs à haute énergie. C'est grâce aux détecteurs conçus ou améliorés par Charpak qu'ont été découvertes un grand nombre de nouvelles particules au cours des dernières décennies. En particulier, la chambre à fils en régime proportionnel qui étend d'une certaine façon le principe du compteur Geiger, qu'il a mise au point, a permis pendant les années 60 de suivre, sur des distances de plusieurs mètres ou davantage avec une précision spatiale de moins de 1 millimètre, les trajectoires de particules émises par des collisions à haute énergie. De plus, la fréquence des mesures, compte tenu du temps de désionisation entre deux mesures successives, atteint plusieurs milliers par seconde.

Ces caractéristiques du détecteur de Charpak — haute résolution spatiale et fréquence élevée des mesures — ont joué un rôle important pour l'étude des interactions rares ou la création de particules exotiques à vie courte. Pour ces expériences, on a souvent besoin d'utiliser des faisceaux intenses et l'échantillonnage d'un grand nombre d'événements concentrés sur une courte période. Le travail de Charpak a contribué à ouvrir la voie vers une plus grande intégration des ordinateurs dans le processus d'acquisition des données. Charpak, citoyen français, a fait une bonne partie de sa carrière au laboratoire du CERN, à Genève.

ques, de lentilles, de miroirs et d'interféromètres. Par exemple, un faisceau laser dirigé à travers un diélectrique par réflexion totale interne mettra en évidence un champ évanescent, champ lumineux à décroissance exponentielle dans le vide, juste à l'extérieur du diélectrique. Cette lumière a été utilisée pour réfléchir des atomes neutres. Selon Martin Sigel et Jürgen Mlynek<sup>3</sup>, si ce dispositif ou d'autres types de miroir atomique pouvaient servir à creuser une cavité pour y loger les ondes stationnaires ou progressives associées aux atomes, il deviendrait possible de stocker des atomes froids ou même de produire des faisceaux d'atomes cohérents.

### Interférométrie atomique

L'optique atomique a également été utilisée par des scientifiques<sup>4</sup> pour faire des démonstrations d'interférométrie atomique. Les ondes (à titre d'exemple, les ondes lumineuses provenant d'un laser) sont d'abord divisées, puis on les fait interférer. On obtient ainsi une image caractéristique d'interférences alternativement constructives et destructives. L'interférométrie a auparavant été appliquée aux électrons et aux neutrons qui, d'après la mécanique quantique, ont des propriétés ondulatoires. Ce processus est maintenant étendu aux atomes. David E. Pritchard<sup>5</sup> a fait passer un faisceau de sodium fortement collimaté, avec une longueur d'onde broglie (la longueur d'onde des « ondes de matière » du sodium) de 0,16 angströms ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ), à travers trois séries de réseaux de diffraction, les deux premiers servant à produire les interférences et le troisième à balayer l'image.

Dans une autre expérience, O. Carnal et J. Mlynek<sup>6</sup> ont fait passer un faisceau d'atomes d'hélium avec une longueur d'onde broglie de 0,56 à 1,03 Å à travers un système de fentes, créant une image d'interférence reçue sur un plan distant de 64 cm. L'interférométrie atomique permettra certaines études nouvelles de mécanique quantique et pourra servir à vérifier la relativité générale. Des mesures extrêmement précises de rotation — avec des applications éventuelles aux systèmes de guidage inertiel — deviendront peut-être possibles. Steven Chu<sup>7</sup>, par exemple, est convaincu que la gravitation locale sera mesurable avec une précision d'un pour  $10^{10}$  ou même  $10^{12}$ .

Les atomistes aimeraient, bien entendu, étudier les anti-atomes. La première étape pour faire de l'antihydrogène, en créant des positrons et des antiprotons, est déjà difficile, mais il semble encore plus dur d'arriver à former un anti-

atome stable à partir d'antiparticules. Gerald Gabrielse<sup>8</sup> utilise le Low Energy Antiproton Ring (LEAR) du CERN auquel il ajoute son piège à atomes électrostatique pour ralentir (et stocker) des antiprotons jusqu'à de faibles énergies (0,3 MeV). Il faudra encore quelques années avant de les mettre en contact avec des positrons (peut-être dans un dispositif à double piégeage). Au Fermilab, Charles Munger, du SLAC, compte rechercher les très rares atomes d'antihydrogène qui, soupçonne-t-il, pourraient être générés lorsqu'un faisceau d'antiprotons, frappant une cible d'hydrogène, crée des paires électron-positron : il pourrait parfois arriver, en effet, que le positron s'attache à l'un des antiprotons. La collision de faisceaux d'antiprotons et de positrons pourrait être une méthode directe, mais, selon Gabrielse, elle aurait très probablement pour résultat de faire rebondir les particules l'une contre l'autre plutôt que de les faire s'accoupler. Les chercheurs s'attendent à ce qu'une fois obtenu l'antihydrogène soit utile pour l'étude de la gravitation et de la mécanique quantique.

### Étude des charges électriques

On suppose habituellement que la charge de l'antiproton a exactement la même valeur que celle du proton (bien que de signe opposé), mais est-ce vrai ? La charge électrique des antiprotons, tout comme celle des positrons, a été étudiée à partir de données obtenues lors d'expériences sur la fréquence cyclotron (qui ont trait au comportement de particules dans un champ magnétique), en comparant les protons aux antiprotons et les électrons aux positrons ; on a également utilisé des mesures spectroscopiques d'états à vie courte contenant de l'antimatière, comme le positonium et les atomes antiprotoniques. Richard Hughes<sup>9</sup> et B. I. Deutch<sup>10</sup> ont calculé que les charges du positron et de l'électron sont approximativement égales à  $10^{-8}$  près, tandis que la charge de l'antiproton est égale à celle de l'électron à  $10^{-5}$  près. La précision de ces calculs serait meilleure si les chercheurs pouvaient étudier l'antihydrogène.

Même si les atomes sont complètement neutres, est-il vrai que dans l'atome, le centre de la charge positive coïncide avec celui de la charge négative, ou faut-il penser que les atomes ont des moments électriques dipolaires ? Les recherches de moments électriques dipolaires non nuls dans les atomes offrent la possibilité de tester la supersymétrie, théorie qui met l'accent sur une symétrie hypothétique entre

3. Université de Constance, Allemagne.  
 4. Au Massachusetts Institute of Technology et à l'Université Stanford, États-Unis d'Amérique, ainsi qu'aux Universités de Constance et de Brunswick, Allemagne.  
 5. Massachusetts Institute of Technology, États-Unis d'Amérique.  
 6. Université de Constance, Allemagne.  
 7. Université Stanford, Californie, États-Unis d'Amérique.

8. Université Harvard, États-Unis d'Amérique.  
 9. Laboratoire national de Los Alamos, Nouveau-Mexique, États-Unis d'Amérique.  
 10. Université d'Aarhus, Danemark.

les fermions et les bosons pour tenter d'unifier les interactions électrofaible et forte dans un même cadre. Ce modèle prédit l'existence d'un moment électrique dipolaire non nul au niveau de  $10^{-27}$  cm (multiplié par la charge de l'électron) ou, ce qui revient au même, que dans certains atomes les centres des charges négative et positive devraient être décalés très légèrement, de moins de  $10^{-27}$  cm (par charge unitaire). Lorsque les expériences miniaturisées sur le dipôle qui sont réalisées actuellement<sup>11</sup> auront atteint le niveau de précision requis dans ce genre de mesures — il s'en faut aujourd'hui d'un facteur 10 —, elles compléteront les expériences faites dans les accélérateurs pour tenter d'étudier la supersymétrie.

## PHYSIQUE DE LA MATIÈRE CONDENSÉE

La physique de la matière condensée étudie les propriétés de la matière en phases solide, liquide et gazeuse dense. Il ne s'agit plus ici de quarks, de protons ou d'atomes isolés, mais de millions d'atomes ou de molécules ( $10^{24}$  par centimètre cube). Une foule de propriétés — optiques, électriques, mécaniques ou thermiques — qui ne s'appliquent pas aux atomes isolés ont une importance capitale pour l'étude des solides. L'exploration de ces propriétés ouvre de nouvelles pistes pour la physique et favorise la mise au point de nouvelles technologies et de nouveaux produits.

En fait, beaucoup des technologies qui sont aujourd'hui les plus marquantes — lasers, télécommunication, etc. — dépendent du développement de matériaux ayant des propriétés révolutionnaires. Les supraconducteurs en offrent un exemple. La supraconductivité, qui fait perdre à certains matériaux toute résistance électrique lorsqu'ils sont refroidis au-dessous d'une température de transition particulière, peut permettre la mise au point de dispositifs plus rapides, ayant un meilleur rendement énergétique. Ses avantages sont partiellement contrebalancés par le coût du refroidissement des matériaux, et il est donc souhaitable de découvrir des composés qui demeurent supraconducteurs à des températures aussi élevées que possible. Actuellement, le matériau dont la température de transition est la plus élevée (133 K) est un composé d'oxyde de cuivre et de mercure, mis au point au laboratoire ETH à Zurich (Suisse).

L'amélioration de la performance des appareils électriques (vitesse, consommation d'énergie, capacité de stockage, etc.) passe aussi par une miniaturisation plus poussée. Cette tendance pourrait bientôt conduire à la mise au point de composants discrets, presque aussi petits que les atomes

ou, au moins, imitant leur comportement. Ces « atomes artificiels » sont essentiellement des systèmes de dimension nulle, fabriqués par l'être humain, qui comportent habituellement des structures semiconductrices nanométriques faites sur mesure, où la présence ou le mouvement de chaque électron peut être important. La boîte quantique illustre particulièrement bien cela. C'est une structure de « puits quantique » de dimension nulle, où les électrons d'une très mince couche semiconductrice sont pris en sandwich entre deux autres couches semiconductrices. On peut la fabriquer sur un substrat sous forme d'un bourgeonnement minuscule en grattant sélectivement le matériau environnant, ou sous forme de région isolée de dimension nulle dans un sandwich semi-conducteur en utilisant des électrodes métalliques placées au-dessus pour prélever un petit volume du matériau en faisant intervenir des champs électriques. Selon la mécanique quantique, pour un tel dispositif comme pour les atomes, les particules confinées dans un espace suffisamment petit (en gros 10 nm pour les électrons dans les semiconducteurs) ne peuvent prendre que des énergies discrètes (voir la figure E, planches en couleurs, p. iv).

### *Dispositifs monoélectroniques*

Si les boîtes quantiques sont des atomes artificiels, un réseau plan d'un million de ces boîtes pourrait constituer une structure cristalline artificielle. Les chercheurs ont créé de tels réseaux, mais ils ne sont pas encore capables de contrôler suffisamment l'uniformité du cristal et la disposition des électrodes pour être à même d'étudier la structure des bandes d'énergie du système comme on le fait pour un « vrai » cristal. En plus des effets du confinement spatial, les effets de quantification de charge peuvent aussi influencer sur le comportement des boîtes quantiques. En d'autres termes, ces boîtes peuvent être conçues pour n'accepter qu'un seul ou quelques électrons dont les allées et venues sont surveillées ; lorsque la tension augmente, de nouveaux électrons peuvent vaincre la résistance des électrons déjà dans la boîte qui s'efforcent de les exclure grâce à une barrière de Coulomb électrostatique. Cette dépendance à l'égard d'un électron peut servir pour élaborer toute une gamme de nouveaux dispositifs.

En fait, ces derniers pourront permettre un jour aux circuits intégrés de comporter jusqu'à dix milliards de dispositifs électroniques par centimètre carré, soit une densité mille fois supérieure à ce qui était jugé réalisable pour les circuits intégrés classiques. Développés depuis le milieu des

11. Université de Massachusetts, Amherst, États-Unis d'Amérique ; Université de Californie à Berkeley, États-Unis d'Amérique et Université Yale, États-Unis d'Amérique.

années 80, ces dispositifs se composent de deux électrodes (habituellement de 30 nm de large) séparées par une couche d'isolant de 1 nm d'épaisseur que les électrons peuvent franchir l'un après l'autre par effet tunnel. Ces dernières années, des chercheurs ont construit des dispositifs à deux jonctions comportant une électrode centrale commune. Ces dispositifs sont appelés des transistors monoélectroniques parce que, comme pour les transistors classiques, on peut contrôler leur courant en modifiant la charge de surface sur l'électrode centrale, ce qui en fait un élément idéal pour un circuit intégré. Toutefois, un circuit composé de tels dispositifs devrait être exploité à une température maximale de 4 K afin de réduire les effets thermiques qui perturbent les mouvements des électrons isolés dans le solide.

#### *Propriétés optiques des semi-conducteurs*

Les propriétés optiques des semi-conducteurs ont aussi leur importance, car les ordinateurs et les systèmes de communication de l'avenir seront probablement des hybrides de l'électronique — information codée sous forme d'électrons — et de la photonique — information codée sous forme de photons. A cet égard et malgré les services qu'il rend dans d'innombrables circuits électroniques, le silicium est gênant parce qu'il n'émet généralement pas de lumière. Dans les semi-conducteurs composés d'éléments des colonnes III et V du Tableau périodique, comme le GaAs, l'énergie libérée par la recombinaison des électrons et des trous (les trous correspondent simplement à l'absence d'électrons) peut prendre la forme d'un photon, et ce phénomène peut être exploité au niveau des dispositifs optoélectroniques. Avec le silicium, par contre, l'énergie de recombinaison se présente habituellement sous forme de chaleur. Leigh Canham et d'autres scientifiques<sup>12</sup> ont réussi à obtenir de la lumière (de toutes les couleurs) à partir de minuscules filaments de silicium fabriqués en trempant ce dernier dans un bain d'acide de façon à obtenir des structures alvéolaires minces. Les chercheurs ont supposé que la lumière pouvait provenir d'un effet quantique ; en d'autres termes, la taille infime des filaments de silicium (quelques nanomètres seulement dans certains cas) a modifié la « structure de la bande », la séquence des niveaux d'énergie autorisés, dans le matériau.

#### *Émission de lumière*

Entre-temps, les propriétés électroluminescentes d'autres semi-conducteurs sont également appliquées dans certains dispositifs. Les composés d'éléments des colonnes III et V

du Tableau périodique (comme GaAs) produisent facilement de la lumière, mais surtout dans l'infrarouge. Pour obtenir des longueurs d'onde plus courtes dans le créneau du visible, les chercheurs ont étudié des composés, comme ZnSe, qui associent des éléments des colonnes II et VI ; dans ces composés, les bandes interdites sont généralement supérieures à 2 eV. Les problèmes de dopage et d'harmonisation cristalline convenable entre le matériau émetteur de lumière (II-VI) et celui du substrat (III-V) ont fait obstacle au développement de dispositifs. Les nouvelles techniques épitaxiales (dans l'épitaxie, de très minces couches d'atomes différents peuvent être déposées les unes sur les autres) ont partiellement modifié cela. Par exemple, des lasers utilisant des éléments de type II ou VI ont fonctionné à température ambiante et au-dessous avec des puissances allant jusqu'à 700 mégawatts et avec des cycles utiles (proportion du temps où le laser fonctionne) atteignant 40 %. Les diodes électroluminescentes composées de semi-conducteurs de type II et VI émettent dans les longueurs d'onde très courtes (490 nm). Avant que de tels lasers bleu-vert puissent être commercialisés, il faudra résoudre plusieurs problèmes techniques, en particulier ceux du rendement de conversion énergie-lumière et de la surchauffe.

#### *La « bande interdite »*

Eli Yablonovitch et ses collègues<sup>13</sup> ont mis au point un « semi-conducteur » pour ondes lumineuses, matériau dans lequel certaines longueurs d'onde des photons seraient exclues, ce qui créerait effectivement une bande d'énergie interdite pour les photons, comme c'est le cas pour les électrons dans les semi-conducteurs. Ils ont percé trois séries de trous dans la surface supérieure d'une plaque de diélectrique pour créer une structure entrecroisée. Les théoriciens avaient prédit qu'une telle structure alvéolaire excluait certaines longueurs d'onde de la lumière. En fait, quand Yablonovitch a envoyé des hyperfréquences dans un échantillon (vide à 78 % à cause des trous qui avaient été percés), il a découvert la « bande interdite » attendue, une fourchette de fréquences pour lesquelles la lumière ne passe tout simplement pas à travers le matériau. En ajustant convenablement les trous, on peut aussi produire des bandes dans les longueurs d'onde du visible, ce qui rendra utiles ces « cristaux photoniques » dans divers domaines de la recherche, comme la physique atomique et la microélectronique.

Une application de ce concept a été mise au point récemment par des scientifiques du Laboratoire Lincoln du MIT

12. Royal Signals and Radar Establishment, Royaume-Uni.

13. Université de Californie à Los Angeles, États-Unis d'Amérique.

et Yablonovitch. Il s'agit d'une antenne montée sur un cristal photonique qui peut coupler un rayonnement hyperfréquences aux dispositifs de circuits intégrés. Cette configuration permet de recevoir des hyperfréquences dans les circuits intégrés ou, inversement, de convertir le courant électrique en hyperfréquences. Le montage utilisé traditionnellement pour cet usage comporte des antennes placées sur des substrats semi-conducteurs ; il transmet seulement un faible pourcentage de la puissance totale, le restant étant rayonné dans le semi-conducteur. La nouvelle antenne a un bien plus grand rendement, car la bande interdite du cristal photonique sur lequel elle est montée est assez grande dans la région des hyperfréquences.

## LE SYSTÈME SOLAIRE

En quelques années, les télescopes puissants et les missions de satellites sur toutes les planètes (excepté Pluton) ont appris beaucoup de choses aux scientifiques sur le système solaire. Les ordinateurs ont apporté eux-mêmes un concours à cette exploration. Ainsi, la simulation par ordinateur de l'évolution du système solaire sur une période de plusieurs millions d'années met en évidence un comportement chaotique. En d'autres termes, même en s'appuyant sur les lois du mouvement, la prévision à longue échéance des trajectoires devient moins fiable en raison de la complexité des interactions entre les planètes. Gerald Sussman et Jack Wisdom<sup>14</sup> ont effectué les calculs les plus détaillés jamais entrepris sur les mouvements des planètes dans un avenir très lointain (plus de cent millions d'années) et ont constaté qu'après seulement quatre millions d'années la position des planètes ne peut être prédite avec une quelconque certitude. Ces nouveaux calculs, qui ont demandé un temps d'ordinateur considérable, sont venus confirmer des études antérieures (1989) mais moins détaillées de Jacques Laskar<sup>15</sup>, qui révèlent un comportement chaotique dans l'ensemble du système solaire.

### *Le « problème des neutrinos solaires »*

Au centre du Soleil, qui est lui-même au centre du système solaire, des particules fantômes appelées neutrinos sont créées au cours des réactions de fusion qui s'y produisent. Ces neutrinos s'échappent du Soleil et voyagent jusqu'à la Terre où ils peuvent être détectés indirectement. Le modèle solaire standard, qui incorpore la toute dernière théorie relative aux réactions nucléaires dans le Soleil, prédit que le

détecteur de neutrinos de Homestake, exploité pendant vingt ans par Ray Davis dans une mine d'or du Dakota du Sud, devrait observer en moyenne 1,8 neutrino solaire par jour. Or le chiffre résultant des observations de Davis est constamment bien plus faible. Ces dernières années, deux autres groupes se sont attaqués à ce problème de neutrinos solaires et ont eux aussi obtenu des résultats déconcertants. En trois ans, le détecteur japonais Kamiokande II a observé un taux de neutrinos égal à la moitié environ de celui prédit par le modèle standard, soit à peu près autant que la moyenne de Davis pour la même période. Contrairement à Kamiokande et à Homestake, qui ne sont sensibles qu'aux neutrinos d'énergie relativement haute libérés par la désintégration bêta du bore dans le Soleil, l'expérience soviéto-américaine SAGE (Soviet-American Gallium Experiment) dans les montagnes du Caucase est conçue de manière à observer les neutrinos de plus basse énergie provenant des réactions plus abondantes de fusion proton-proton dans le Soleil. Pendant cinq mois, SAGE n'a virtuellement observé aucun neutrino, ce qui a encore épaissi le mystère. Certains théoriciens estiment que cela pourrait s'expliquer par le fait que les neutrinos solaires « oscilleraient » d'un type (électron, muon, tau) à un autre durant leur trajet vers la Terre et éluderaient ainsi les tentatives de détection.

Dans un quatrième détecteur, Gallex, on a observé un taux de 83 unités de neutrino solaire, ou UNS (1 UNS =  $10^{-36}$  captures de neutrinos par atome par seconde). Une équipe multinationale détecte les neutrinos solaires dans un bain de cinquante mille litres de chlorure de gallium installé dans le tunnel du Gran Sasso, sous les montagnes des Abruzzes, en Italie. Les neutrinos, qui proviennent surtout des réactions de fusion proton-proton, mais aussi de la désintégration du béryllium et du bore intervenant dans le Soleil, voyagent jusqu'à la Terre et pénètrent dans le détecteur où ils convertissent un noyau de gallium 71 en un noyau de germanium 71. Le germanium radioactif est extrait toutes les trois semaines et étroitement surveillé dans un récipient distinct. Le taux de production de 83 UNS est à comparer avec les estimations théoriques qui s'échelonnent entre 124 et 132 UNS. Pour le chiffre estimatif de 132 UNS, 74 devraient provenir de réactions proton-proton (énergie relativement basse), 34 de la désintégration du béryllium 7, 14 de celle du bore 8, et 10 de l'azote 13 et de l'oxygène 15. Les résultats de Gallex sont beaucoup plus proches des estimations théoriques que ceux des détecteurs du Dakota du Sud ou de Kamiokande, qui ne sont sensibles qu'aux

neutrinos de haute énergie. Ils contrastent de façon marquée avec ceux de SAGE.

### *Vénus a encore une activité volcanique*

Passons maintenant du Soleil à Vénus. Les images recueillies récemment par la sonde Magellan, qui ont permis d'établir la première carte globale de Vénus, montrent que cette planète a encore une activité volcanique. Ainsi, dans une coulée de lave de la taille de l'Australie, située au nord de l'équateur vénusien, on ne trouve aucune trace de cratères météoriques : l'âge de la lave n'est donc pas supérieur à quelques dizaines de millions d'années. La plupart des cratères d'impact semblent relativement jeunes, ce qui s'explique peut-être par le fait que de grandes coulées de lave sont venues recouvrir les cratères plus anciens. D'autres études révèlent que Vénus ne possède pas de dorsale médio-océanique comme on en observe sur la Terre. L'hypothèse selon laquelle les dorsales d'« Ovda Regio » sont le résultat d'une expansion océanique sur Vénus a été infirmée par les nouvelles images radar provenant de la sonde Magellan.

Lors d'un passage de la sonde Galilée à proximité de Vénus, des éclairs ont peut-être été observés sur cette planète. Du fait des caractéristiques liées à son atmosphère épaisse, la plupart des spécialistes n'ont jamais vu en elle un endroit se prêtant à ce genre de phénomènes. Mais la détection par Galilée de six fulgurations analogues à des éclairs les a incités à chercher des explications. Il est possible, par exemple, que ces fulgurations soient dues à l'activité volcanique, ou plus précisément aux frottements des particules présentes dans les flux de roches chaudes qui remontent à la surface. Ces panaches, on le sait, provoquent des éclairs sur la Terre. La sonde Magellan a d'ailleurs détecté (et continue à chercher) des traces de cendres volcaniques sur Vénus, même si on pense que les volcans actifs y sont rares.

### *Jupiter et les régions plus lointaines*

Ulysse, première sonde qui ait visité Jupiter (février 1992) depuis les missions de Voyager dans les années 70, devrait passer au-dessous du pôle Sud du Soleil durant l'été 1994. En attendant, son passage à proximité de Jupiter a fourni une moisson d'informations sur l'environnement de cette planète : on a constaté que la magnétosphère s'était considérablement gonflée depuis l'époque des Voyagers ; la présence dans la magnétosphère d'ions de soufre et d'oxygène, produits principalement dans Io, satellite volcanique de

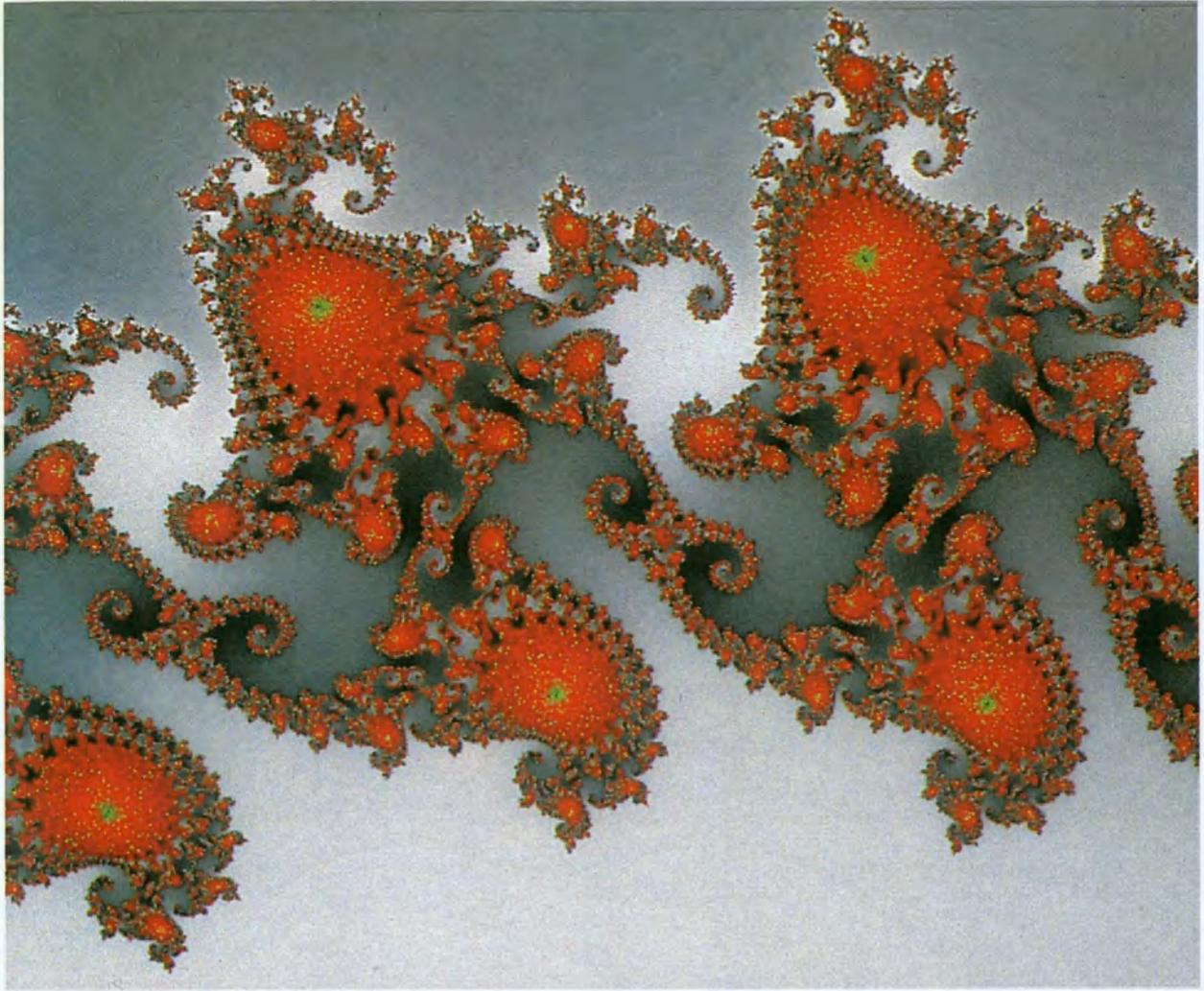
Jupiter, à la cadence d'environ une tonne par seconde, a été confirmée ; la quantité de poussière trouvée au voisinage de Jupiter est très faible ; Loki, principal volcan d'Io, était calme. Ulysse a effectué des mesures du champ magnétique de Jupiter, le plus intense de tout le système solaire. La magnétosphère était plus plate que prévu. Selon André Balogh, membre de l'équipe scientifique qui suit cette sonde, cela serait dû en partie à la présence d'un gigantesque courant d'un milliard d'ampères qui s'écoule dans le tore d'Io, feuillet d'ions de soufre et d'oxygène qui s'en échappe.

Bien au-delà de Pluton, aux confins du système solaire, se trouve l'héliopause, où les particules du vent solaire qui s'échappent du Soleil rencontrent le flux directionnel des particules du milieu interstellaire. Les deux sondes Voyager ont récemment détecté des signaux radio qui en provenaient. Selon l'interprétation qu'en donnent les chercheurs concernés, une éruption solaire puissante survenue en mai-juin 1991 aurait provoqué un afflux de particules de vent solaire qui ont ensuite interagi avec l'héliopause, créant de gigantesques sursauts radioélectriques (à plus de  $10^{13}$  watts, c'est la radiosource la plus puissante du système solaire) détectés par les sondes Voyager à compter de juillet 1992. De forte puissance, mais avec une fréquence basse (2-3 kilohertz), ces signaux radio ne pouvaient pas être détectés à l'intérieur du système solaire. Cependant, Voyager-1, situé à 52 UA (UA, l'unité astronomique, est la distance de la Terre au Soleil) et Voyager-2, à 40 UA, étaient bien placés pour effectuer une mesure. Le chronométrage des signaux a permis d'estimer que l'héliopause se situait à une distance de 80 à 130 UA.

## ÉTOILES ET GALAXIES

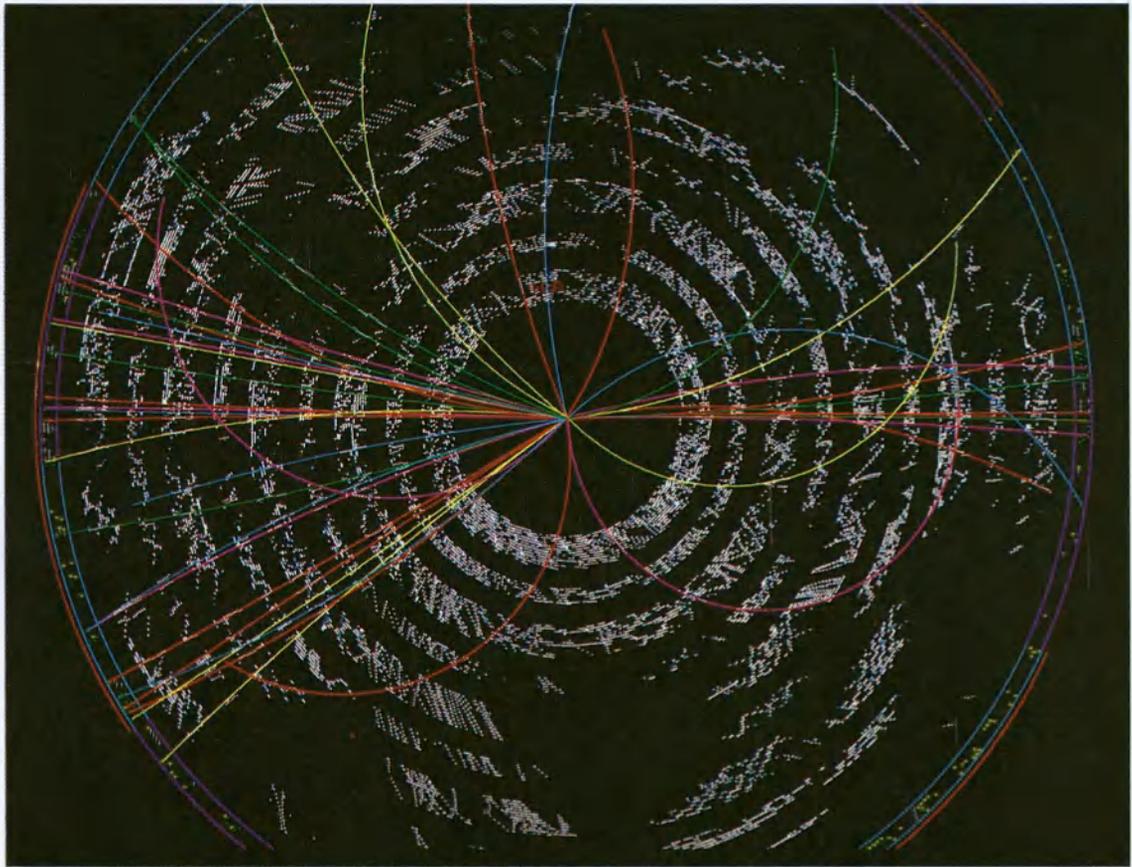
Pour voir au-delà de notre système solaire, vers les étoiles et les galaxies, il faut de puissants télescopes. Dans le domaine des longueurs d'onde du visible, le télescope spatial Hubble a fait des observations dignes d'être notées en dépit d'une mise au point quelque peu défectueuse, problème qui pourrait être bientôt résolu grâce aux techniques de correction d'images. En attendant, plusieurs télescopes optiques importants sont en cours d'achèvement au sol. Celui de Keck, au sommet du Mauna Kea à Hawaii, composé d'une mosaïque de 36 petits éléments de miroirs hexagonaux et ayant un diamètre de 10 mètres, est le plus grand télescope opérant dans les bandes du visible et de l'infrarouge ; sa luminosité est quatre fois supérieure à celle du télescope de 200 pouces

FIGURE A  
STRUCTURE FINE DE LA FRONTIÈRE DE L'ENSEMBLE DE MANDELBROT



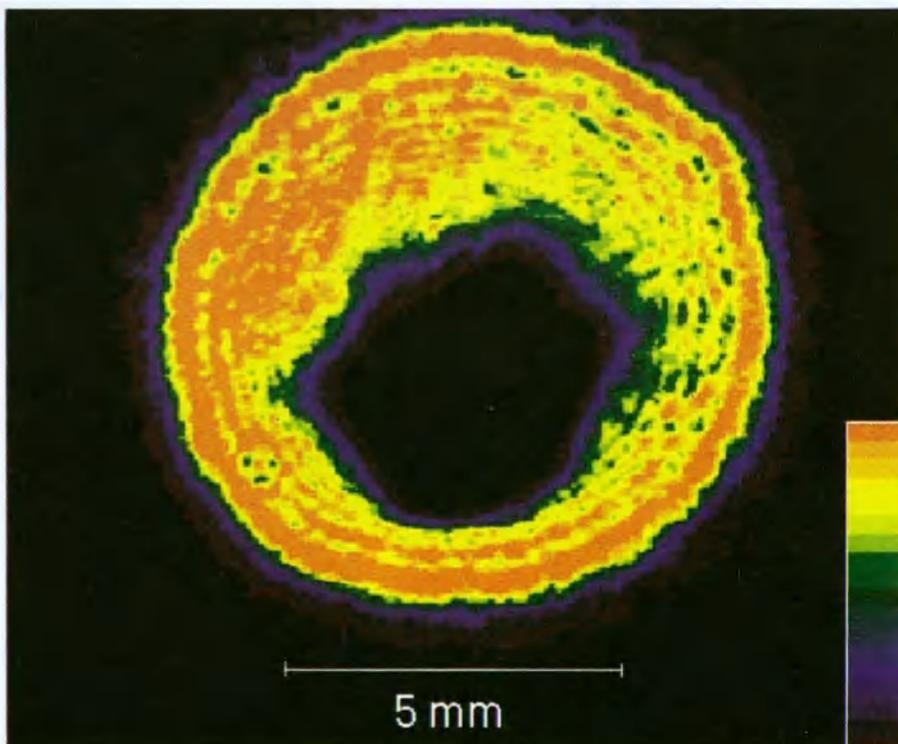
Source : H.-O. Peitgen, et P. H. Richter, *The beauty of fractals*, New York, Springer-Verlag, 1986, p. 85, planche 44.

**FIGURE B**  
**COLLISION PROTON-ANTIPROTON**



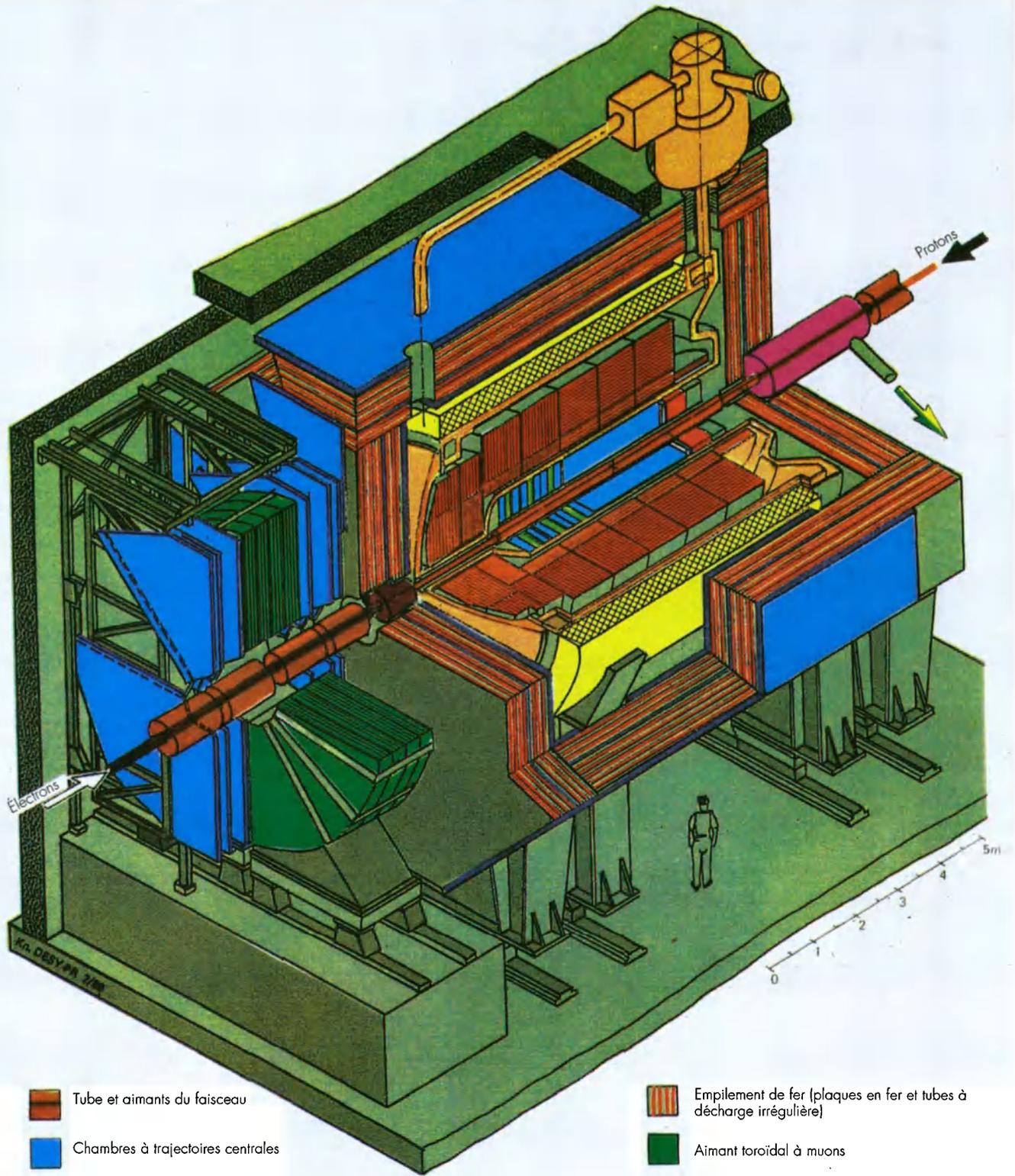
Sur cette image reconstituée par ordinateur, chaque trajectoire colorée représente une particule élémentaire différente provenant d'une collision proton-antiproton, au Fermi Accelerator Laboratory (Fermilab). Actuellement, les travaux des physiciens du Fermilab portent sur la recherche de l'insaisissable quark vérité qui permettra de mieux comprendre la structure de la matière. Photographie publiée avec l'aimable autorisation du Fermilab.

**FIGURE C**  
**DENSITÉ ATOMIQUE**

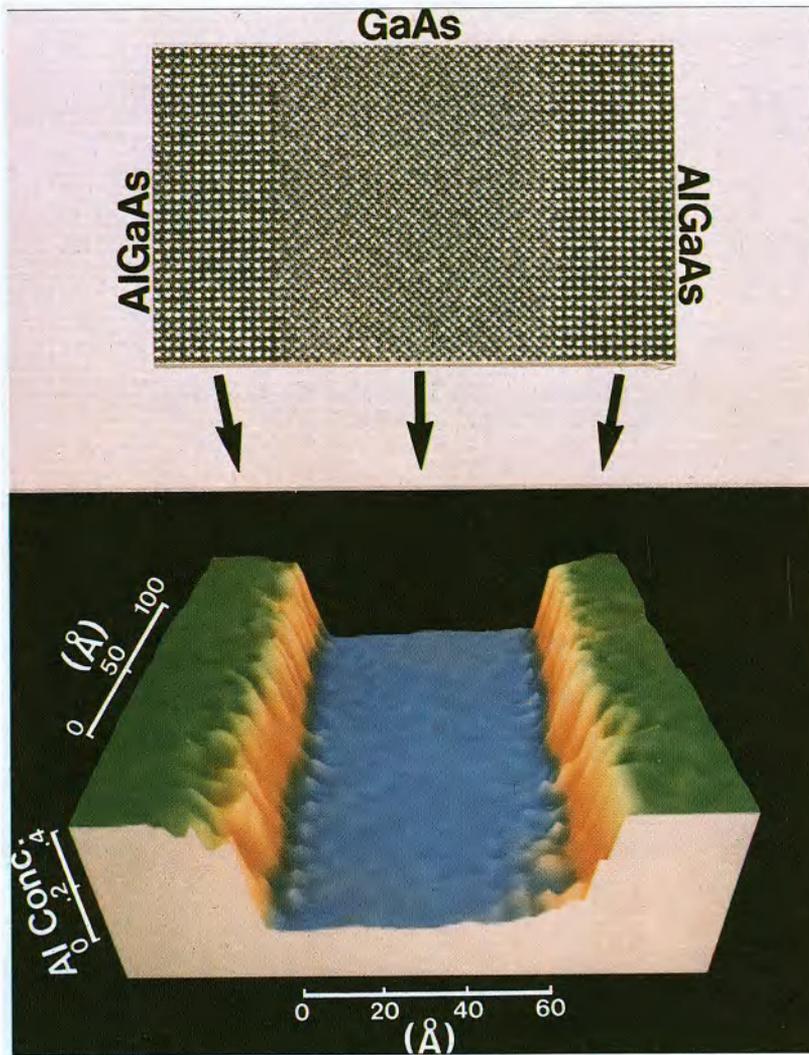


L'ombre des atomes contenus dans un piège magnéto-optique au MIT. La densité des atomes — près de  $10^{12}$  par centimètre cube — est si forte que la lumière du laser ne les traverse pas.

FIGURE D  
 LE DÉTECTEUR DE L'ACCELERATEUR CIRCULAIRE HERA (HADRON-ELECTRON RING ACCELERATOR) :  
 COUPE VERTICALE LE LONG DU FAISCEAU



- |   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|
|  | Tube et aimants du faisceau                                 |  | Aimant compensateur   |  | Empilement de fer (plaques en fer et tubes à décharge irrégulière)                  |
|  | Chambres à trajectoires centrales                           |  | Cryogénie à l'hélium  |  | Aimant toroïdal à muons   |
|  | Chambres à trajectoires antérieures et émetteur transitoire |  | Chambres à muons  |  | Calorimètre électromagnétique à température ambiante                                |
|  | Calorimètre électromagnétique (plomb)                       | } Argon liquide   |   |  | Calorimètre bouchon (Cu, Si)  |
|  | Calorimètre hadronique (acier inoxydable)                   |   |  | Bobine supraconductrice (1,2 tesla)   |  |
|   |   |   |   |  | Cryostat à argon liquide  |



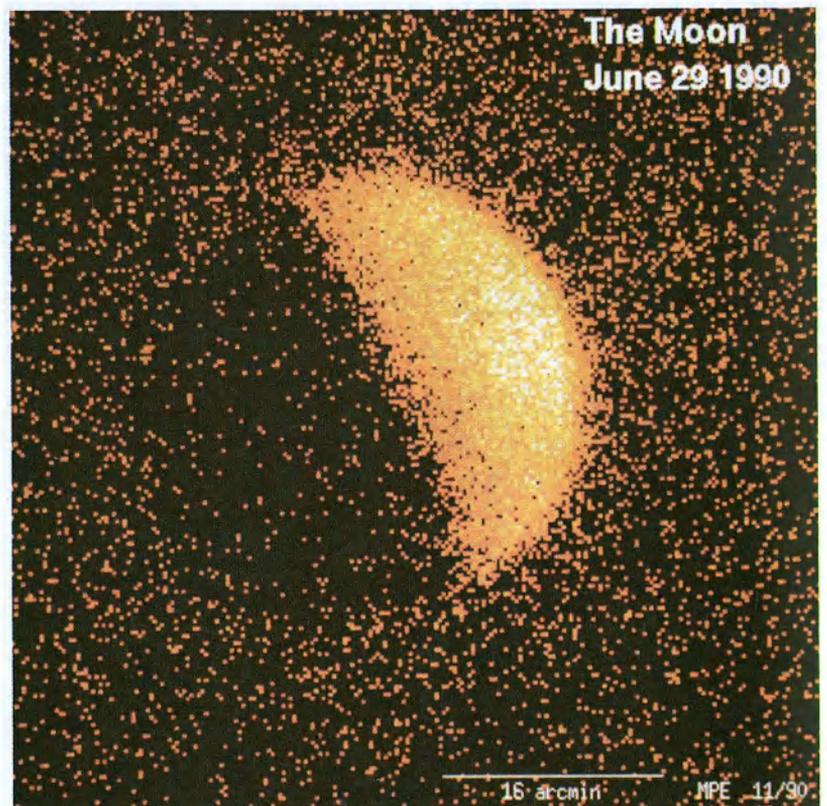
**FIGURE E**  
« PUIQS QUANTIQUE »

En haut : micrographie avec résolution atomique d'une structure de puits quantique composée d'une couche de GaAs entre deux couches d'AlGaAs.

En bas : image tridimensionnelle montrant comment la concentration en aluminium diminue dans une ou deux couches atomiques.

Photo publiée avec l'aimable autorisation d'Ourmazd, Kim et Taylor (AT&T Bell Laboratories).

**FIGURE F**  
IMAGE DE LA LUNE ENREGISTRÉE PAR LE  
SATELLITE ALLEMAND ROSAT EN JUIN 1990



Source : Rosat.

**FIGURE G**  
**IMAGE INFRAROUGE DE NOTRE GALAXIE JUSQU'À CINQ ANNÉES-LUMIÈRE**

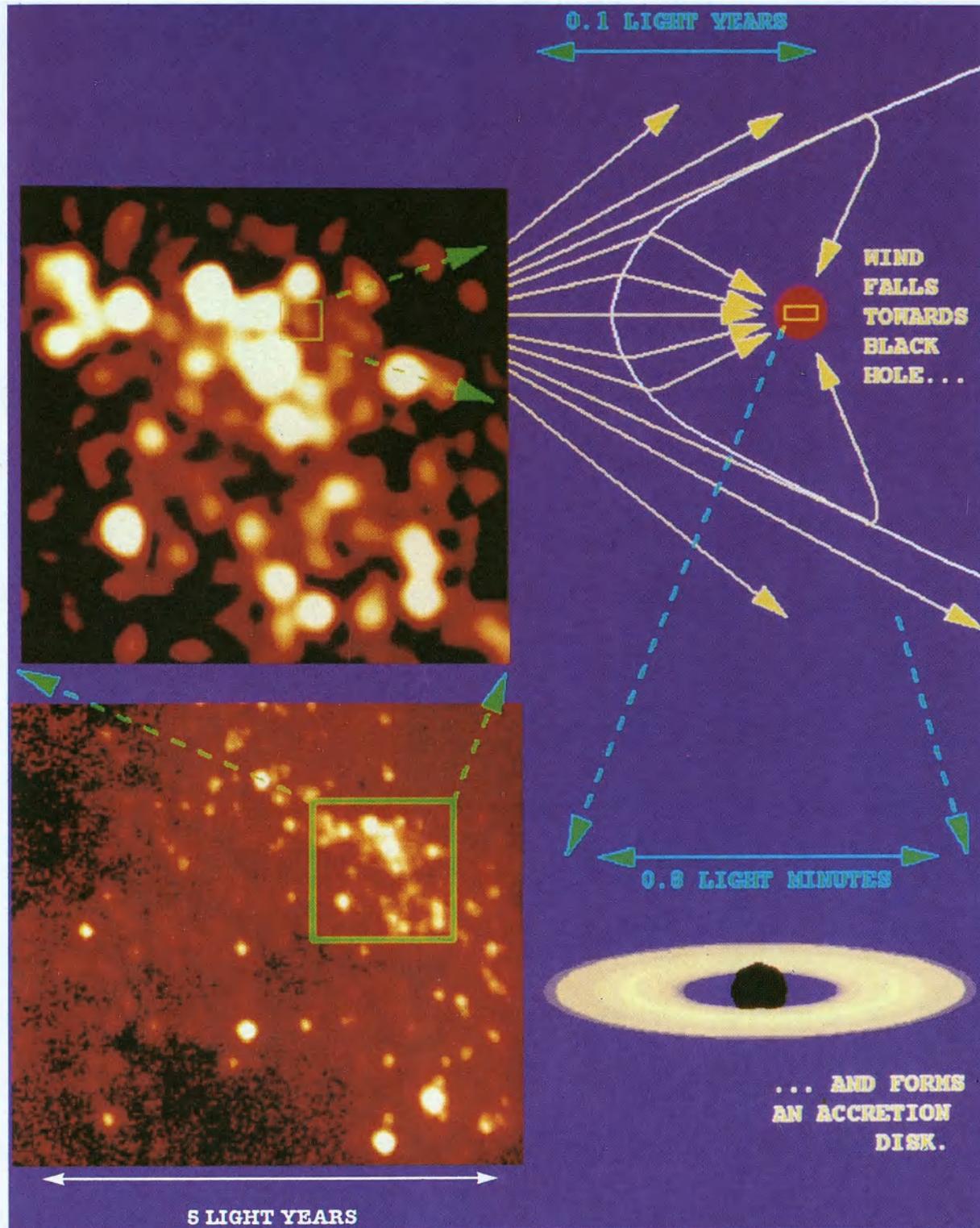


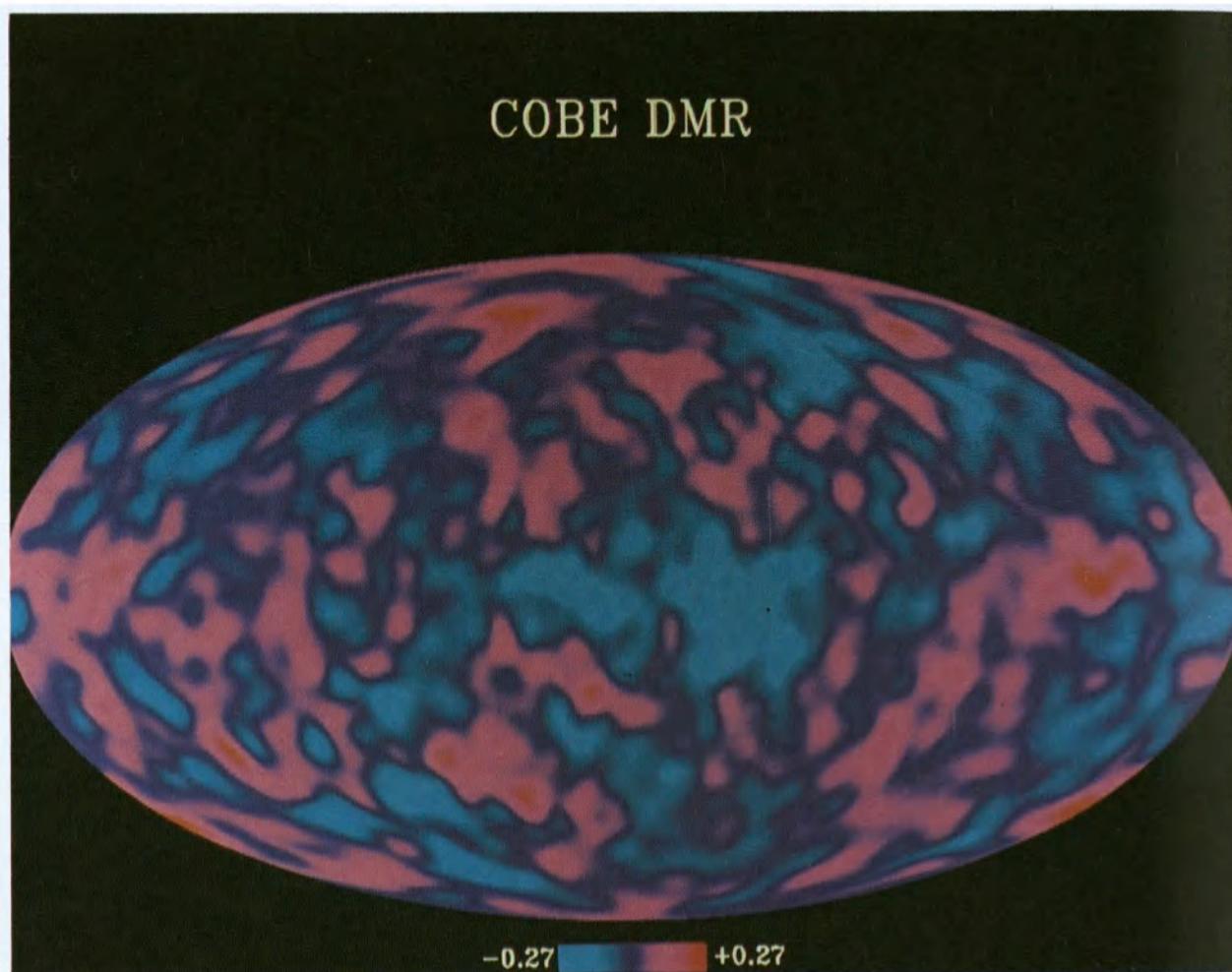
Image infrarouge de notre galaxie jusqu'à cinq années-lumière obtenue grâce au télescope de l'Observatoire Steward à Kitt Peak, près de Tucson, Arizona. Au centre de cet amas d'étoiles superdense se trouve le candidat trou noir massif Sgr A\*. En haut à gauche, « zoom » de l'image du bas jusqu'à 1,5 années-lumière. Pour la première fois, on y voit distinctement une source ponctuelle faible (mais réelle) de l'émission infrarouge à l'emplacement de Sgr A\* (la position de Sgr A\*, donnée par les cartes radio, se trouve dans le petit cadre vert de cette partie de la figure).

La luminosité de cette source ponctuelle est bien du même ordre de grandeur que celle du trou noir d'un million de masses solaires, prédite par un modèle de Sgr A\*. Dans ce modèle, les « vents » stellaires locaux

intenses sont capturés par l'attraction gravitationnelle de Sgr A\* (voir le diagramme de la partie supérieure droite de la figure). Le moment cinétique du vent l'oblige, juste avant qu'il n'atteigne le trou noir, à tomber dans un disque mince (en bas à droite). Ce disque rayonne dans l'infrarouge (à cause de la friction), et le plus probable est qu'il soit incliné vers notre ligne de visée. La friction entre les particules de gaz fait passer ce dernier lentement à travers le disque, puis, après de nombreuses orbites, tomber finalement dans le trou noir.

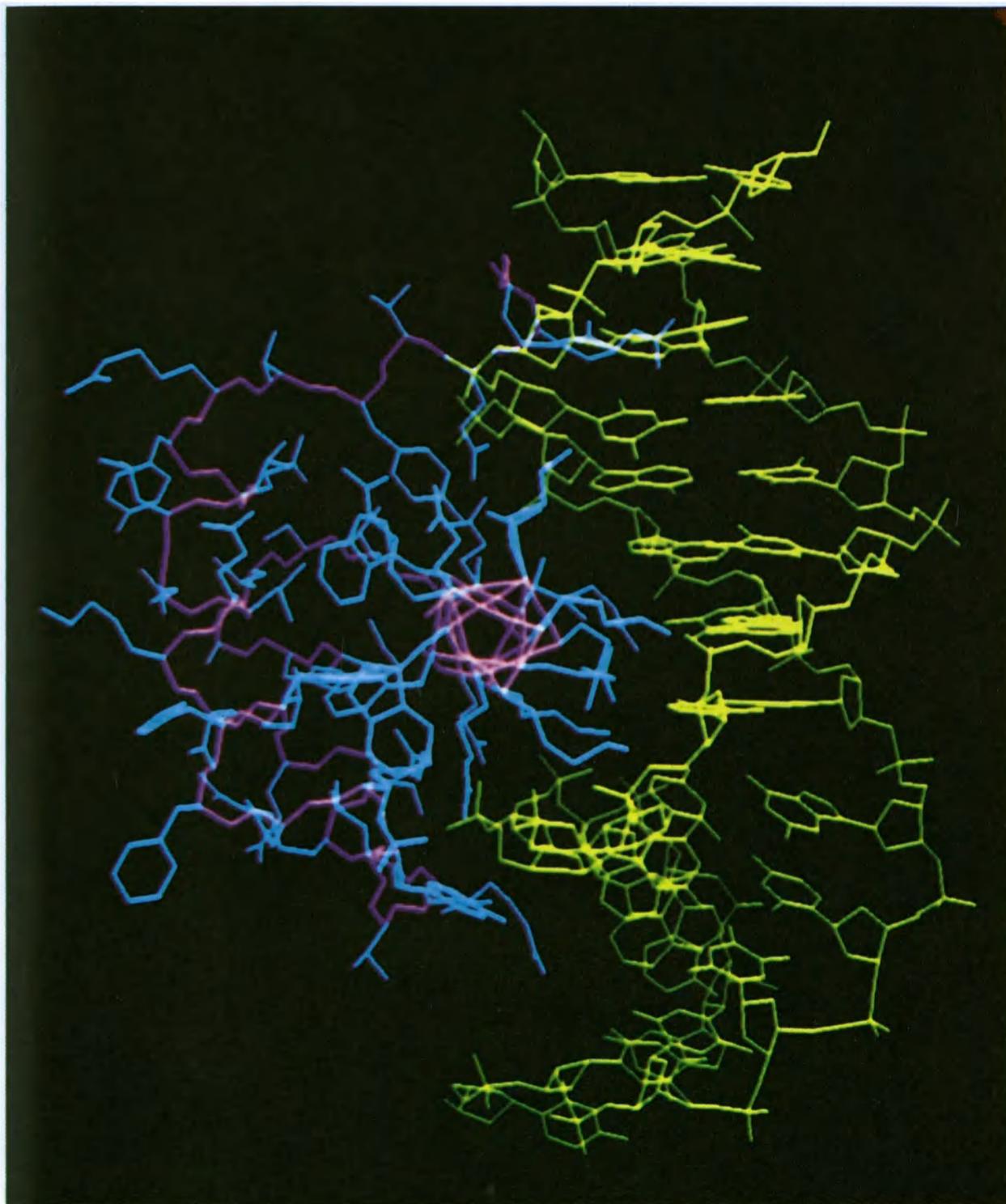
Photo publiée avec l'aimable autorisation de Laird M. Close, Steward Observatory, Université de l'Arizona, États-Unis d'Amérique.

FIGURE H  
IMAGE PROVENANT DU SATELLITE COBE (COSMIC BACKGROUND EXPLORER) D'EXPLORATION DU FOND CONTINU  
DE RAYONNEMENT COSMIQUE



Le radiomètre hyperfréquences différentiel placé à bord de COBE révèle de petites fluctuations de la température de l'Univers à travers le ciel ; les taches rouges et bleues correspondent respectivement aux zones dont la température est légèrement supérieure ou inférieure à la température moyenne.

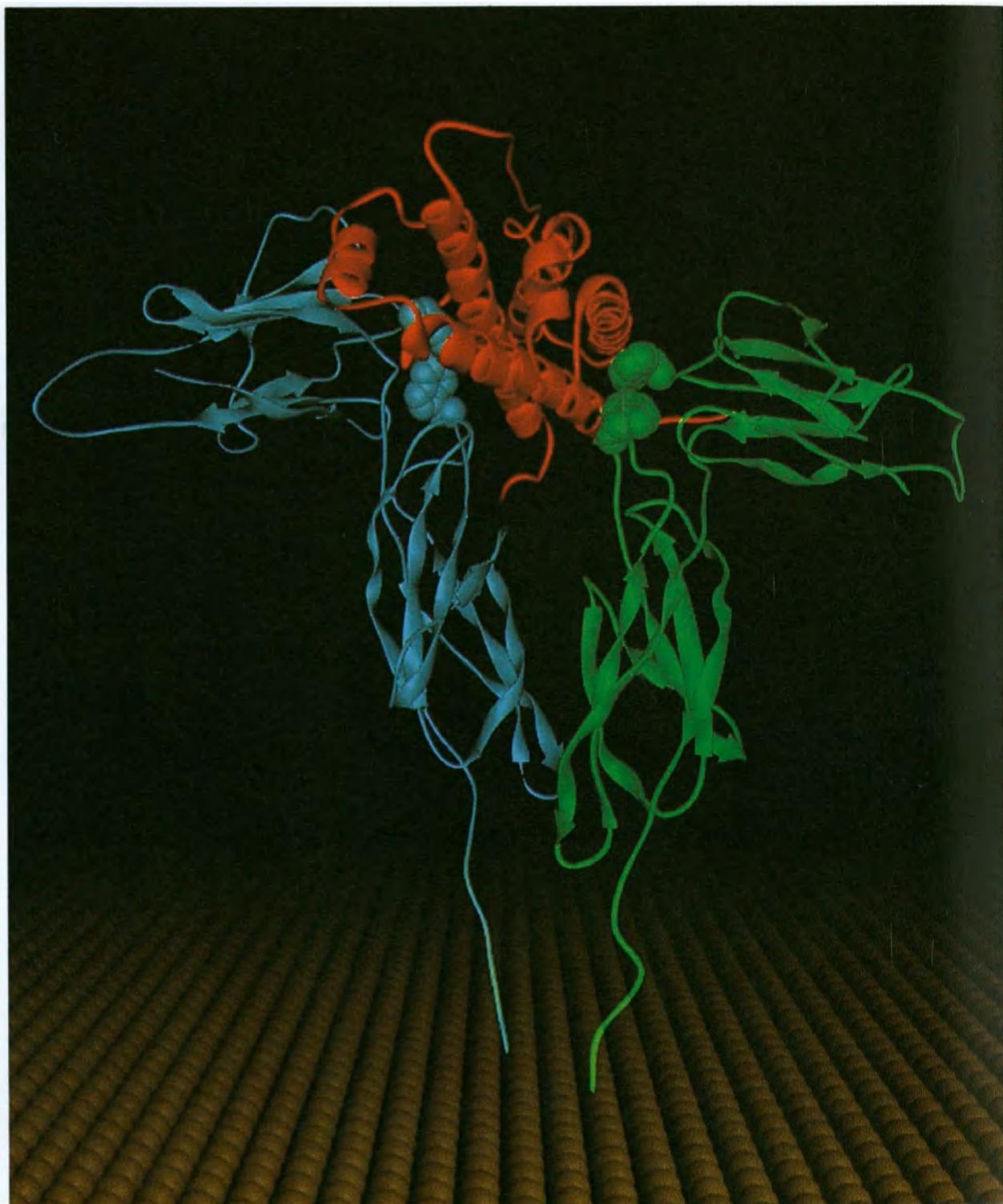
FIGURE I  
STRUCTURE TRIDIMENSIONNELLE D'UN COMMUTATEUR D'ADN



« Main » de protéine (en bleu et violet) interagissant avec un « commutateur » sur la double hélice de l'ADN (en jaune) visualisée ici en trois dimensions par résonance magnétique nucléaire.

Source : W.J. Gehring et K. Wüthrich, Structural and functional analysis of homeodomain-DNA interactions, *Structure*, 25 avril 1993, p. v.

**FIGURE J**  
**LIAISON LIGAND-RÉCEPTEUR**



Molécule d'hormone de croissance humaine (en rouge) liée à deux molécules de son récepteur (en bleu et vert), telle que visualisée en trois dimensions par radiodiffusion. Une extrémité de chacune des molécules du récepteur apparaît attachée à une membrane cellulaire.

Source : A. A. Kossiakoff, M. Ultsch et A. M. de Vos, Human growth hormone-receptor complex, *Structure*, 25 avril 1993, p. xvii.

de Hale. Le TGT (Très Grand Télescope), que l'Organisation européenne pour des recherches astronomiques dans l'hémisphère austral est en train de construire au sommet du Cerro Paranal, au Chili, sera encore plus grand. Il sera composé de quatre télescopes de 8,2 m, dont le premier devrait être installé d'ici à 1995. Le dispositif complet correspondra à 16 mètres de diamètre et sera donc beaucoup plus grand que le télescope de Keck (10 mètres) ou celui de Hale (6 mètres).

L'utilisation croissante de la technologie numérique est un facteur complémentaire d'amélioration des observations astronomiques. D'après Larry Smarr<sup>16</sup>, l'astronomie sera la première science entièrement numérisée. Les dispositifs à transfert de charges (CCD), qui convertissent les photons incidents en infimes signaux électriques, deviennent le moyen le plus utilisé pour effectuer des observations. Ils ont un bon rendement (jusqu'à 80 % des photons incidents sont enregistrés, contre 2 % pour les pellicules photographiques). Les données se présentent sous une forme facilement traitée par ordinateur. Cela facilitera les projets à grande échelle, en partie automatisés, comme celui de l'Université de Chicago visant à faire en cinq ans un relevé de la position d'un million de galaxies et de cent mille quasars.

#### *Voir au-delà du visible*

L'astrophysique a fait aussi de grands progrès pour la cartographie du ciel dans les longueurs d'onde autres que celles du visible. Les satellites astronomiques spécialisés dans les rayons X, comme l'allemand Rosat et le japonais Ginga, ceux spécialisés dans les rayons gamma comme le Compton Gamma Ray Observatory américain et le satellite d'observation solaire japonais Yokohoh, et ceux spécialisés dans l'ultraviolet comme ASTRO et Extreme Ultraviolet Explorer, ont découvert un grand nombre d'objets célestes et obligé les astronomes à expliquer de nombreux phénomènes nouveaux. Ainsi, Rosat a donné des images de parties du ciel beaucoup plus lointaines, ou si l'on préfère, remontant plus loin dans le temps, que toutes celles qui avaient été obtenues auparavant dans la région des rayons X (voir la figure F, planches en couleurs, p. iv). Ces images révèlent une forte densité — voire un amas de quasars dont les décalages vers le rouge varient de un à deux. La majeure partie du temps d'observation de Rosat a servi à faire la cartographie totale du ciel dans les longueurs d'onde des rayons X.

Rosat a fait aussi un balayage du fond continu de rayon-

nement X cosmique qui, détecté pour la première fois en 1971, pourrait provenir pour une bonne part du rayonnement des quasars discrets. Les membres de l'équipe scientifique qui suit Rosat ont observé une région très lointaine et très bien définie du ciel et ont découvert trente neuf sources de rayons X ; des observations ultérieures faites avec un télescope optique ont révélé que vingt-quatre d'entre elles étaient des quasars. On en a conclu qu'au moins 30 % (mais peut-être la quasi-totalité) du fond continu de rayonnement X (tout au moins pour l'intervalle d'énergie de 1 KeV) provient des quasars.

#### *La violence du rayonnement gamma*

Pour des longueurs d'onde d'énergie encore plus grande, dans la région des rayons gamma, l'Univers apparaît particulièrement violent. Ainsi, le quasar 3C279 a émis en une semaine un rayonnement gamma de  $10^{54}$  ergs, soit à peu près la même énergie qu'on obtiendrait si toutes les particules de notre Soleil devaient disparaître sous forme de rayonnement. Bien que les chercheurs ne connaissent pas encore la nature du moteur qui produit cette prodigieuse quantité de rayons gamma, leurs sources peuvent au moins être répertoriées et étudiées par le satellite GRO (Compton Gamma Ray Observatory), lancé en avril 1991. En plus de 3C279, GRO a découvert trois nouveaux quasars qui émettent des rayons gamma (de façon non continue), à un rythme de  $10^{48}$  ergs par seconde. Les deux premiers, découverts respectivement dans la nébuleuse du Crabe et dans la constellation des Voiles (Vela), émettent deux fois par rotation du pulsar ; le troisième, dans la constellation du Compas (Circinus), une fois seulement.

GRO a également observé plus de 600 sources de sursauts gamma, sources mystérieuses de sursauts énergétiques de rayonnement gamma, de courte durée ; leur distribution dans le ciel reste isotrope, ce qui exclut presque à coup sûr la possibilité qu'elles proviennent du plan de la galaxie. Deux des principales explications données à cette isotropie soulèvent des questions intéressantes en elles-mêmes : si les sources de sursauts se trouvent dans le halo de la galaxie, celui-ci aurait dû être beaucoup plus grand qu'on ne l'imaginait et son rayon devrait dépasser 150 000 années-lumière. Mais si ces sources sont extragalactiques, comment se fait-il qu'un aussi grand nombre de gammas aient pu venir de si loin ?

Enfin, GRO a surveillé le rayonnement d'annihilation électrons-positrons provenant du centre de notre galaxie et a constaté que, contrairement aux mesures effectuées anté-

rieurement par d'autres détecteurs moins sensibles, ce rayonnement ne semble pas varier dans le temps.

### *L'ultraviolet et l'infrarouge*

L'ultraviolet lointain (longueurs d'onde entre 5 et 100 nm) est invisible pour les télescopes au sol parce que l'atmosphère fait écran. Le détecteur embarqué à bord du satellite Rosat a donc ouvert des perspectives entièrement nouvelles à l'astronomie. Les chercheurs britanniques chargés d'étudier les observations de Rosat dans l'ultraviolet lointain ont signalé plus de 700 sources là où on n'en connaissait auparavant qu'une douzaine. Cela a entraîné notamment une révision à la baisse de la densité estimée de l'hydrogène dans la région du système solaire ; on pensait que cet hydrogène devait empêcher le rayonnement ultraviolet lointain, qui provient en majeure partie d'étoiles chaudes, d'atteindre la Terre.

Comme l'ultraviolet lointain est absorbé par le gaz interstellaire, qui se compose principalement d'hydrogène et d'hélium, c'est avec une certaine surprise qu'on a constaté que Rosat et les télescopes du satellite Extreme Ultraviolet Explorer (EUVE) avaient pu observer aussi loin. Dans ce cas, les mesures dans l'ultraviolet lointain bénéficient du fait que notre système solaire semble se trouver dans une bulle au moins partiellement vidée de matière interstellaire, peut-être par les supernovæ du passé. Cela permet aux télescopes de voir des objets (principalement des naines blanches chaudes) à des centaines de milliers d'années-lumière. Dans certaines directions, les conditions de visibilité sont si bonnes que des galaxies éloignées peuvent être vues.

Aux longueurs d'onde radio, les astronomes ont trouvé des indices de la présence de planètes en orbite autour des pulsars. Alexandre Wolszczan<sup>17</sup> et Dale Frail<sup>18</sup> ont rapporté des faits qui semblent témoigner de la présence de deux, voire de trois planètes autour du pulsar PSR 1257+12. Les deux planètes dont la présence est la mieux étayée ont des orbites dont la dimension est comparable à celle de Mercure autour de notre Soleil et la troisième, si elle existe, a une orbite dont la dimension est comparable à celle de la Terre. C'est la mesure du retard à l'arrivée des ondes radio venues de PSR 1257+12 par rapport à ce qui était prévu qui tend à confirmer l'hypothèse de l'existence de ces planètes.

Les nouvelles études entreprises dans les longueurs d'onde de l'infrarouge (IR) tendent à déterminer s'il existe un trou noir au centre de notre galaxie. Une source de rayonnement infrarouge a, en particulier, été découverte à

l'emplacement de l'objet appelé Sgr A\*. Les nouveaux résultats obtenus dans l'infrarouge renforcent la conviction, déjà ancrée par des mesures de Sgr A\* faites antérieurement dans les bandes radio, X et gamma, qu'il existe un trou noir au cœur de la Voie lactée. Laird Close<sup>19</sup> a présenté des images du cœur de la galaxie aux longueurs d'onde de 1,6 et 2,2 microns ( $\mu\text{m}$ ) obtenues avec le télescope de 2,3 m de Kitt Peak (voir la figure G, planches en couleurs, p. v). Ces observations, pour lesquelles les techniques de l'optique d'adaptation ont été employées pour la première fois dans l'infrarouge, avaient une résolution suffisante pour constater que la largeur de cette source infrarouge n'était pas supérieure à 0,006 année-lumière. L'astronome Joseph Haller a présenté d'autres études faites dans l'infrarouge sur la vitesse des étoiles en fonction de leur distance de Sgr A\*. Elles montrent que les vitesses augmentent, passant de zéro, à une distance de 1,4 années-lumière de Sgr A\*, pour atteindre près de 100 km par seconde à une distance de 0,7 année-lumière. Cette caractéristique, ajoutée à la conviction qu'il doit y avoir au moins cent fois plus de matière à moins de 0,7 année-lumière que les étoiles observables ne l'expliquent à elles seules, a suggéré à Haller l'existence d'un trou noir de 900 000 masses solaires à l'emplacement de Sgr A\*.

### *Les trous noirs existent-ils ?*

Beaucoup d'astronomes pensent que les trous noirs supermassifs existent, mais ils ne sont pas pour autant convaincus par l'impressionnante augmentation de la luminosité des étoiles au voisinage du centre de certaines galaxies. Selon Alan Dressler<sup>20</sup>, l'étude spectroscopique du mouvement des étoiles au voisinage des trous noirs devrait apporter des preuves concluantes de leur existence. La haute résolution nécessaire pourra être obtenue grâce au télescope spatial Hubble rajeuni ou aux nouveaux télescopes optiques en cours de construction au sommet du Mauna Kea et au Chili. En tenant compte d'études préliminaires sur le mouvement des étoiles, les galaxies les plus susceptibles de comporter un trou noir supermassif sont Andromède, sa galaxie satellite M 32 et la galaxie NGC 3115 (dont le candidat trou noir aurait une masse supérieure à un milliard de masses solaires). A long terme, il sera peut-être plus facile de chercher des trous noirs dans des galaxies relativement calmes comme celles-là, où l'absence de l'éclat d'énergie associé aux galaxies actives ne peut que faciliter l'observation du mouvement des étoiles proches du noyau de la galaxie. Comme

17. Université Cornell, New York, États-Unis d'Amérique.

18. Observatoire national de radioastronomie, Nouveau-Mexique, États-Unis d'Amérique.

19. Université de l'Arizona, États-Unis d'Amérique.

20. Institut Carnegie, États-Unis d'Amérique.

pour le trou noir qui se nicherait dans notre Voie lactée, ces études sont entravées par un problème d'une autre nature : la présence de poussière. Cependant les mesures indirectes du mouvement des étoiles ne contredisent pas le principe d'un trou noir au cœur de la galaxie.

## COSMOLOGIE

La cosmologie est l'étude de l'origine, de l'évolution et de la structure globale de l'Univers. Comme la physique des particules, elle comporte un « modèle standard », une théorie généralement admise selon laquelle l'Univers a été créé lors d'une explosion de l'espace lui-même, un « Big Bang », suivi par un processus d'expansion et de refroidissement. Les infimes inégalités au niveau de la distribution de la matière dans tout l'Univers ont ultérieurement entraîné la formation des étoiles, des galaxies et des grands amas de galaxies.

Le fond continu de rayonnement micro-onde cosmique (CMB) est la plus grande structure de l'Univers qui peut être étudiée, le bain d'énergie de rayonnement qui reste du Big Bang. Pendant longtemps, on a pensé que le fond continu de rayonnement micro-onde devait présenter des fluctuations ténues correspondant à la sorte d'irrégularités de la matière qui résulte de la formation des galaxies. Mais les mesures paraissent depuis bien des années indiquer que le CMB est uniforme. S'il en est bien ainsi, où sont les « semences » qui ont donné naissance aux galaxies ?

Le Cosmic Background Explorer (COBE) a finalement découvert les « semences » primordiales, au niveau de un pour 100 000. Les théories qui prévalent en cosmologie, comme le modèle inflationniste du Big Bang (selon lequel l'Univers est initialement passé par une période exceptionnelle de gonflement avant que le rythme actuel d'expansion se mette en place), prédisent que les mesures du CMB devraient révéler dans le ciel des petites fluctuations de la température de l'Univers (voir la figure H, planches en couleurs, p. vi). Ces fluctuations — parcelles de ciel dont la température est légèrement supérieure ou inférieure à celle des zones environnantes — correspondent à des régions de l'Univers ancien ayant des concentrations de matière légèrement supérieures ou inférieures. Ce modèle de matière servirait en quelque sorte de gabarit de l'évolution cosmique. En dépit de leur petite taille, on pense que les taches de plus forte densité que l'on observe ont contribué à former une « vallée » gravitationnelle suffisante pour y rassembler la

matière environnante. On suppose qu'après des milliards d'années ce processus a entraîné la formation des amas de galaxies que nous voyons aujourd'hui.

Les fluctuations observées par les chercheurs qui suivent COBE correspondent à des variations de température de l'ordre de 30 microkelvins pour une température moyenne du ciel de 2,73 K. Selon George Smoot<sup>21</sup>, chef de l'équipe qui assure le fonctionnement du radiomètre à hyperfréquences différentiel, l'un des trois principaux instruments embarqués à bord de COBE, ces résultats sont fondés sur une analyse sur ordinateur rigoureuse des données recueillies en un an. Il fallait, pour cette analyse, prendre soin de faire abstraction des émissions hyperfréquences concurrentes provenant d'objets proches comme la Terre et la galaxie et tenir compte de l'effet sur tout l'Univers du mouvement de la Terre (et celui de notre galaxie), qui affecte d'un décalage dipolaire la configuration des mesures de température à travers le ciel.

Edward Wright<sup>22</sup> a affirmé que les nouveaux résultats étayaient certaines théories, comme celles qui stipulent l'existence de la matière noire, mais en excluaient d'autres, comme celles qui suggéraient l'existence de « textures », de plissements de l'espace-temps. Sans matière noire, par exemple, les fluctuations de température (ou celles de la densité de matière, ce qui est équivalent) auraient dû être supérieures à celles qui sont observées.

Au cours de l'expansion inflationniste initiale de l'Univers, les ondes de gravitation ont peut-être aussi été un élément important de la structuration de la matière et peuvent expliquer une partie (peut-être même une grande partie) de l'anisotropie mesurée du CMB. D'après Lawrence Krauss et Martin White<sup>23</sup>, les ondes de gravitation de grande longueur (aussi grandes que l'Univers visible lui-même) entraîneraient une anisotropie quadripolaire du CMB ayant une valeur comparable à celle qui est effectivement mesurée par COBE. En fait, la valeur du quadripole, prédite par le modèle de la matière noire froide en tenant compte exclusivement des fluctuations de densité, est de toute façon trop faible, si bien qu'il est plausible, ou en tout cas Krauss l'affirme, qu'une part de l'anisotropie quadripolaire soit imputable au fond continu de rayonnement des ondes de gravitation. Ultérieurement, des mesures très sensibles du CMB, couplées à des expériences de physique des particules entreprises pour rechercher des particules supersymétriques, pourraient permettre de distinguer l'influence relative des ondes de gravitation et les fluctuations de densité de matière du CMB.

21. Lawrence Berkeley Laboratory, Californie, États-Unis d'Amérique.

22. Université de Californie à Los Angeles, États-Unis d'Amérique.

23. Université Yale, États-Unis d'Amérique.



**PHILLIP F. SCHEWE** est responsable de la rédaction scientifique à l'Institut de physique américain. Il est aussi rédacteur en chef de *Physics News* (publication annuelle) et de *Physics News Update* (aperçu hebdomadaire des nouveautés de la physique diffusé par courrier électronique).

P. F. Schewe a étudié la physique à l'Université de l'Illinois. Il a obtenu son doctorat à l'Université d'État du Michigan pour ses travaux de recherche sur la physique des particules de haute énergie au Fermilab (Fermi National Accelerator Laboratory). Il a également travaillé au Laboratoire national de Brookhaven.

## LECTURES COMPLÉMENTAIRES

- Chaisson, É. J. 1992. « Les premiers résultats du télescope spatial Hubble », *Pour la science*, n° 178, août.
- Chu, S. 1992. « Le piégeage optique des particules neutres », *Pour la science*, n° 174, avril.
- Gleick, J. 1987. *Chaos : making a new science*, New York, Viking. (L'importance croissante de l'étude des phénomènes non linéaires.)
- Lightman, A. 1992. *Great ideas in physics*, New York, McGraw Hill. (Recueil de cours destinés aux étudiants du premier cycle universitaire.)
- Overbye, D. 1991. *Lonely hearts of the cosmos : the scientific quest for the secrets of the Universe*, New York, Harper-Collins. (Présentation des derniers acquis de la cosmologie.)
- Reed, M. A. 1993. « La fabrication de circuits nanométriques comme boîtes quantiques », *Pour la science*, n° 185, mars.
- Weinberg, S. 1992. *Dreams of the final theory*, New York, Pantheon. (Tour d'horizon des recherches récentes en physique des particules.)
- Will, C. 1986. *Was Einstein right ? Putting general relativity to the test*, New York, Basic Books. (Tour d'horizon des recherches sur la relativité et la gravité.)

# CHIMIE

*Michael Freemantle*

Les progrès réalisés en chimie depuis vingt ans figurent parmi les plus rapides que l'on ait enregistré dans le domaine des sciences fondamentales, mais l'avenir montrera sans doute qu'ils n'auront fait qu'annoncer le rythme de développement que cette discipline connaîtra au début du XXI<sup>e</sup> siècle. Cet essor de la recherche s'explique principalement par la très large application des découvertes de la chimie pour mettre au point des matériaux ou des procédés qui sont utilisés dans d'innombrables domaines de l'activité humaine, depuis la « haute cuisine » jusqu'aux technologies de pointe. Au rythme actuel, on peut prévoir chaque année, pour cette science, la publication d'environ 500 000 communications et la délivrance d'une centaine de milliers de brevets.

Afin de passer en revue d'une manière représentative mais néanmoins concise les progrès de la chimie au cours des trois dernières années, il a fallu recourir à différents critères pour sélectionner des thèmes dans la masse des informations disponibles. Le premier de ces critères est lié au caractère d'actualité qui résulte d'une activité de recherche intense dans un domaine donné. Les chimistes du monde entier s'accordent dans une certaine mesure à reconnaître que certains « points chauds » de la chimie peuvent être identifiés d'après le nombre de communications auxquelles ils donnent lieu. Ils se répartissent dans chacune des principales branches de la chimie : physique, inorganique, organique, analytique et macromoléculaire. Les questions évoquées ci-après sont donc celles qui ont fait l'objet d'une activité de recherche intense. Certaines — les CFC, les supraconducteurs, les fullerènes — ont en outre été largement couvertes par la presse grand public à travers le monde.

Le caractère pluridisciplinaire de certaines de ces questions a également constitué un critère de sélection. La chimie à l'échelle atomique et les nouveaux supraconducteurs, par exemple, intéressent à la fois les chimistes et les physiciens. Les CFC et leurs produits de substitution suscitent beaucoup d'attention non seulement en chimie pure et appliquée, mais aussi dans les diverses branches de l'écologie. L'électronique moléculaire est un autre exemple de thème pluridisciplinaire puisqu'elle concerne la chimie, la physique, la biologie, l'électronique et les technologies de l'information.

L'intérêt potentiel pour l'humanité a été un troisième

critère. Les progrès récents des synthèses asymétriques et, en particulier, la mise au point de médicaments chiraux sont significatifs à cet égard. Si les scientifiques, au début des années 60, avaient connu les synthèses asymétriques et les techniques associées dont on dispose aujourd'hui, des catastrophes comme la tragédie de la thalidomide auraient pu être évitées. Les fullerènes, qui ouvrent des perspectives extrêmement vastes dans de nombreux domaines, notamment la médecine, offrent un autre exemple de progrès de la chimie qui aura probablement des retombées positives.

## CHIMIE A L'ÉCHELLE ATOMIQUE

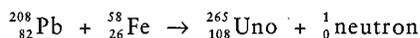
La perspective de manipuler des atomes pris isolément et de construire des structures chimiques atome par atome a non seulement retenu l'attention des chimistes, mais aussi intéressé des spécialistes des matériaux, des minéralogistes et des ingénieurs électroniciens qui prévoient différentes applications susceptibles d'affiner diverses technologies de pointe tout en accroissant leur puissance. Ainsi, dans le domaine de recherche connu sous le nom de nanotechnologie, l'utilisation de particules isolées comme dispositifs électroniques pourrait conduire à la mise au point d'une nouvelle génération de microprocesseurs. Certains chercheurs ont même laissé entendre qu'à l'avenir on pourrait fort bien arriver à stocker tout le contenu de la Bibliothèque du Congrès des États-Unis d'Amérique sur un unique disque de silicium de 30 centimètres de diamètre. Une autre application possible est la production d'ordinateurs de poche dotés d'une mémoire comparable à celle d'un superordinateur d'aujourd'hui. Les spécialistes de la nanotechnologie envisagent la mise au point de détecteurs d'échelle atomique qui pourraient être implantés dans le corps humain pour surveiller les concentrations des constituants du sang. On prévoit également la mise au point de dispositifs capables de se déplacer avec le sang et d'éviter les thromboses ou de réparer les lésions cérébrales. Comme la fabrication de tels dispositifs passe par la connaissance de l'agencement et de la stabilité des particules constitutives du noyau des atomes, les travaux de recherche sur les noyaux atomiques se sont récemment multipliés.

Les protons et les neutrons, qui composent le noyau des atomes, sont appelés collectivement nucléons. Des chercheurs

des universités de Birmingham, d'Oxford et d'York, au Royaume-Uni, ont étudié la disposition des nucléons à l'intérieur du noyau au moyen d'une installation d'étude de la structure nucléaire générant des faisceaux de noyaux, qui sont accélérés en direction d'une cible. Il en résulte des collisions de haute énergie qui provoquent la fragmentation des noyaux. L'étude des produits de désintégration ainsi obtenus grâce à des diodes détectrices à semi-conducteurs a révélé que les nucléons se présentaient en grappes. Ainsi, un atome d'oxygène comportant 16 nucléons (et donc désigné par le symbole  $^{16}\text{O}$ ) a produit une particule alpha composée de quatre nucléons et un noyau de carbone en regroupant 12 ( $^{12}\text{C}$ ). L'atome de magnésium ( $^{24}\text{Mg}$ ) a subi une fission symétrique pour former deux noyaux  $^{12}\text{C}$  (fig. 1). Ces grappes de

nucléons, qu'on a appelées molécules nucléaires, ont une durée de vie de l'ordre de  $10^{-20}$  secondes.

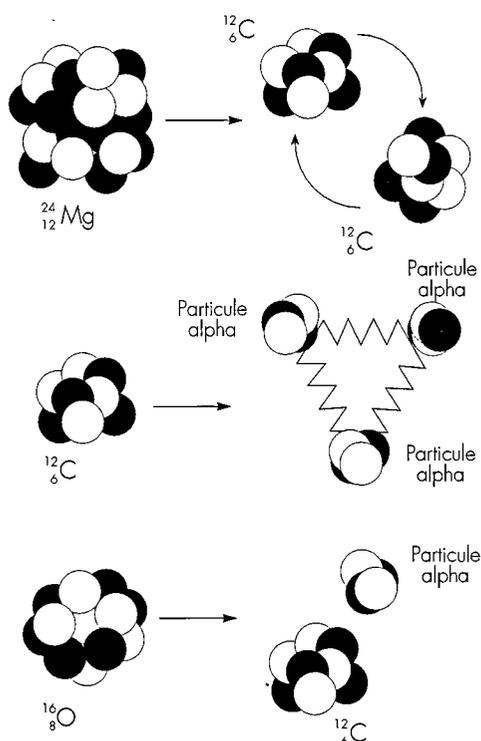
Depuis quelques dizaines d'années, des groupes de chercheurs du Lawrence Berkeley Laboratory, en Californie (États-Unis d'Amérique), du Laboratoire de recherche sur les ions lourds de Darmstadt (Allemagne) et du Laboratoire de réactions nucléaires de Dubna, près de Moscou (Fédération de Russie) mènent des travaux sur les synthèses des éléments transuraniens, dont le nombre atomique est au moins 93. Ils utilisent des cyclotrons et des accélérateurs linéaires pour bombarder un élément avec des neutrons ou avec des noyaux d'autres éléments. De nouveaux éléments sont formés lorsque les neutrons ou les noyaux qui la bombardent pénètrent dans le noyau de la cible. Les éléments de nombre atomique entre 93 (neptunium) et 100 (fermium) ont tous été synthétisés dans les années 40 et au début des années 50. Plus récemment, les éléments de nombre atomique compris entre 101 (mendélévium) et 109 (appelé provisoirement unilennium) ont été réalisés atome par atome. Ainsi, l'élément 108 (appelé unniloctium, symbole Uno) a été synthétisé en bombardant du plomb-208 (nombre atomique 82) avec du fer-58 (nombre atomique 26).



Ces éléments transuraniens sont instables et deviennent plus difficiles à synthétiser à mesure que leur nombre atomique augmente. Trois atomes seulement de l'élément 109 (unilennium) ont pu être réalisés à ce jour et chacun d'eux n'a existé que 3,4 millisecondes. La mise en évidence d'un nouvel élément représente, par conséquent, un des problèmes majeurs de ce type de recherche. Selon Glenn Seaborg, prix Nobel de chimie en 1951, dont l'équipe, au Lawrence Berkeley Laboratory, a synthétisé 10 éléments transuraniens, l'amélioration de la sensibilité des détecteurs constitue un des principaux axes des travaux actuels.

Des progrès rapides sont également accomplis depuis quelques années dans la mise au point et l'application de dispositifs tels que le microscope à effet tunnel, qui permet aux scientifiques d'examiner la topographie de la surface d'un matériau à l'échelle atomique. Ce microscope est pourvu d'une sonde électronique constituée d'un métal tel que l'or ou le tungstène. La pointe de la sonde a l'épaisseur de quelques atomes ; elle est amenée à une distance de la surface qui est du même ordre. La très grande proximité de la sonde provoque, depuis la surface de l'échantillon, une émission secondaire d'électrons qui peut être décelée et

FIGURE 1  
GRAPPES DE NUCLÉONS



Le magnésium (en haut) peut exister sous forme d'une molécule nucléaire, avec deux noyaux de carbone se déplaçant sur la même orbite. Le carbone (au centre) et l'oxygène (en bas) peuvent également présenter une structure complexe.

Source : *New Scientist*, 6 avril 1991, p. 21.

affichée sur un écran cathodique sous la forme d'une image. Lorsque la sonde est déplacée sur l'échantillon, les contours de la surface de celui-ci peuvent être visualisés sur l'écran.

Initialement, ce microscope était utilisé dans un rôle passif en vue de produire des images des atomes à la surface d'un échantillon. Depuis, on lui a donné aussi un rôle actif dans la mise au point de dispositifs électroniques d'échelle atomique. De nouvelles structures peuvent être créées à la surface d'un échantillon grâce à la manipulation précise d'atomes et de molécules au moyen de la pointe d'un tel microscope. Le premier exemple de ce rôle actif a été mentionné en 1987 lorsque Becker<sup>1</sup> et ses collaborateurs ont transféré un atome de germanium isolé de la pointe d'une sonde de microscope à effet tunnel sur une surface de germanium en portant brusquement à 4 volts la tension maximale.

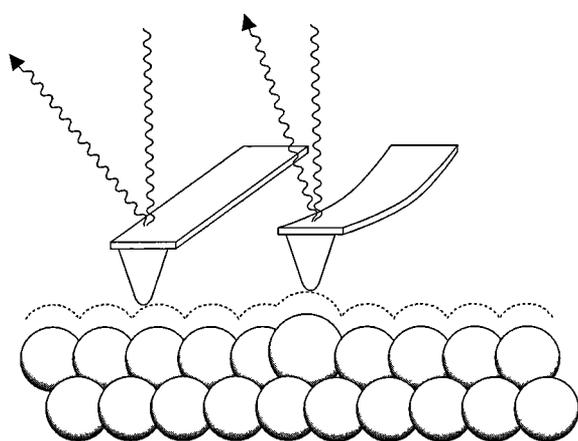
Plus récemment, Whitman et ses collaborateurs<sup>2</sup> ont fait état de la manipulation d'atomes et de molécules adsorbés sur des surfaces à température ambiante au moyen du champ électrique produit par une pointe de microscope à effet tunnel. L'induction de la diffusion directionnelle d'atomes de césium adsorbés sur les surfaces de semi-conducteurs tels que l'arséniure de gallium (GaAs) constitue un

exemple de ce type de manipulations.

In-Whan Lyo et Phaedon Avouris<sup>3</sup> ont également fait appel au microscope à effet tunnel pour la manipulation contrôlée d'atomes de silicium fortement liés ou de grappes d'atomes à l'échelle du nanomètre ( $10^{-9}$ m), en vue de fabriquer des dispositifs électroniques d'un genre nouveau. Le microscope à effet tunnel est également utilisé, comme on le signale souvent, pour la construction des commutateurs atomiques. Dans ces dispositifs, la pointe en tungstène d'un microscope à effet tunnel est maintenue immobile à une distance de 0,5 nanomètres au-dessus d'une surface en nickel. Un creux dans le nickel contient un atome isolé du gaz rare qu'est le xénon. En ajustant l'impulsion de tension, on peut amener l'atome de xénon à passer de la surface en nickel sur la pointe et *vice versa*. L'état du commutateur (position de l'atome de xénon) est mis en évidence en mesurant la conductance à travers l'intervalle.

Une technique apparentée fait appel à un microscope à force atomique pour produire des images d'atomes sur une surface solide en amenant une pointe de métal en contact avec la surface et en la faisant se déplacer d'avant en arrière (fig. 2). Cette technique, qui a été employée par Robert Barrett<sup>4</sup> pour stocker des quantités de charge dans un isolateur mince à triple couche nitrure-oxyde-silicium, pourrait permettre de stocker 10 milliards de bits d'information — l'équivalent de plus de 31 000 pages dactylographiées — sur un centimètre carré de support.

FIGURE 2  
LE MICROSCOPE A FORCE ATOMIQUE



Le microscope à force atomique perçoit les caractéristiques de la surface par balayage vertical de la pointe de la sonde sur une lame de ressort souple. Ici, la lumière réfléchie sur la lame est utilisée pour mesurer ce balayage.

Source : *Chemistry & Industry*, 21 septembre 1992, p. 687.

## CHIMIE A L'ÉCHELLE DE LA FEMTOSECONDE

Depuis quelques années, on s'intéresse beaucoup à la dynamique des réactions chimiques élémentaires et aux processus photochimiques primaires que l'on étudie à l'aide de diverses techniques fondées sur l'emploi de faisceaux moléculaires ou sur les derniers développements en matière de laser. Depuis une quarantaine d'années, il est devenu possible de déceler des intermédiaires chimiques d'une durée de vie qui, progressivement, est de plus en plus brève. Initialement, ces réactions étaient mesurées à l'échelle de la milliseconde ( $10^{-3}$  s), mais on a appris peu à peu à réaliser des mesures de l'ordre de la nanoseconde ( $10^{-9}$  s). Avec les progrès des lasers et des synchrotron, on peut aujourd'hui caractériser des intermédiaires d'une durée de vie voisine de la picoseconde ( $10^{-12}$  s).

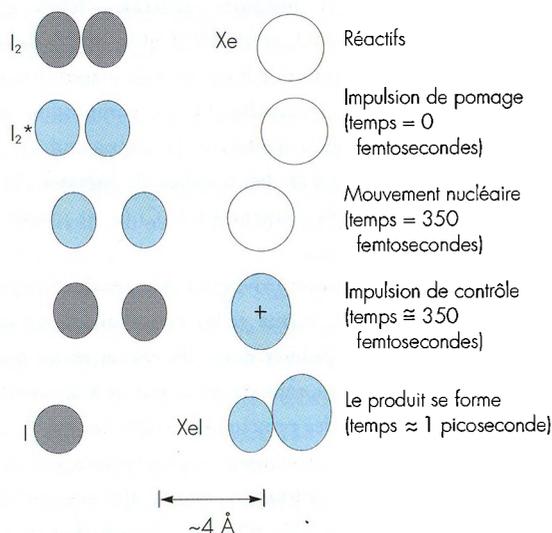
En juin 1991, Ahmed Zewail<sup>5</sup> et ses collaborateurs ont décrit des expériences qui leur avaient permis de prendre

1. AT&T Bell Laboratories, New Jersey, États-Unis d'Amérique.  
2. National Institute of Standards and Technology, États-Unis d'Amérique.

3. IBM, Yorktown Heights, NY, États-Unis d'Amérique.  
4. Université Stanford, Californie, États-Unis d'Amérique.  
5. California Institute of Technology, Pasadena, États-Unis d'Amérique.

des « instantanés », à l'échelle de la femtoseconde ( $10^{-15}$  s), d'états transitoires qui se produisent au cours des réactions chimiques. Dans cette technique, on initie une réaction chimique en exposant des molécules isolées issues d'un faisceau moléculaire à une impulsion d'excitation fournie par un laser. Les produits intermédiaires activés de cette réaction font l'objet d'une étude spectroscopique au moyen d'une source d'impulsion d'électrons utilisée comme sonde ; le diagramme de diffraction électronique obtenu est relevé au moyen d'un groupe linéaire de diodes. Cette technique a été utilisée pour étudier la réaction entre l'iodure d'hydrogène (HI) et le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Dans un premier temps, on brise la liaison entre l'hydrogène et l'iode au moyen d'une impulsion de pompage. L'hydrogène libre issu de la réaction attaque le  $\text{CO}_2$ , auquel il reste collé durant quelques centaines de femtosecondes. L'hydrogène écarte ensuite un des atomes d'oxygène de la molécule  $\text{CO}_2$  et

FIGURE 3  
UTILISATION D'IMPULSIONS A L'ÉCHELLE  
DE LA FEMTOSECONDE

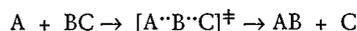


Un laser de pompage à l'échelle de la femtoseconde propulse une molécule de  $\text{I}_2$  à un état excité ( $\text{I}_2^*$ ) où la liaison I a une longueur de  $2,5 \text{ \AA}$  (1 angström =  $10^{-10}$  m). Après 350 femtosecondes, la longueur de liaison est portée à  $4,5 \text{ \AA}$ . Une impulsion de contrôle est alors imposée, ce qui provoque la formation du produit  $\text{XeI}$ .

Source : *Chemical & Engineering News*, 6 janvier 1992, p. 7, adapté de *Nature*. Reproduit avec l'autorisation de *Nature*, 355 (2 janvier 1992). © Macmillan Magazines Ltd.

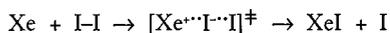
5 picosecondes environ après le début de la réaction, un radical libre hydroxyle (OH) se forme.

Lors de l'étude de la dynamique des réactions élémentaires, on examine le mouvement des atomes et des molécules dans les réactions chimiques élémentaires générales. La réaction suivante en est un exemple :



Les produits AB et C sont formés à partir de réactifs A et BC après passage par l'état transitoire  $[\text{A}^{\cdot\cdot}\text{B}^{\cdot\cdot}\text{C}]^{\ddagger}$  durant un moment d'une brièveté infinitésimale lors de certaines réactions. La dynamique de ces réactions peut être étudiée grâce à des méthodes dont on dispose maintenant, notamment la spectroscopie des états transitoires et la photochimie alignée de surface. Cette dernière technique est en expansion rapide : des cristaux isolés sont édifiés sous un vide extrêmement poussé et recouverts par moins d'une couche monomoléculaire de substrat. Celui-ci est ensuite irradié avec un laser pour induire une réaction photochimique. On pense que ces réactions sont analogues à celles qui sont observées au niveau de la chimie prébiotique (réactions chimiques qui ont rendu possible l'apparition de la vie sur terre), de l'appauvrissement de la haute atmosphère en ozone et de l'attaque des semi-conducteurs.

Il est possible d'utiliser des impulsions de l'ordre de la femtoseconde pour influencer sur le cours d'une réaction durant la formation et la rupture de l'état transitoire. Avec une séquence de deux impulsions cohérentes de laser, on peut réguler la réaction des molécules d'iode ( $\text{I}_2$ ) avec les atomes de xénon (Xe) qui donne naissance à de l'iodure de xénon ( $\text{XeI}$ ) en excitant les réactifs à travers l'état transitoire  $[\text{Xe}^{\cdot\cdot}\text{I}^{\cdot\cdot}\text{I}]^{\ddagger}$  selon un processus en deux étapes (fig. 3).



En ayant recours à ce qu'on appelle un effet de communication, réalisé en modifiant le délai entre les impulsions, les chercheurs sont en mesure d'enclencher ou d'arrêter la formation de l'iodure de xénon :  $\text{XeI}$ .

L'étude des réactions chimiques au moyen d'expériences dont le temps de résolution s'exprime en femtosecondes pourrait être un progrès révolutionnaire dans la mesure où il est fort possible qu'elle permette aux chimistes de contrôler les mouvements d'atomes isolés inclus dans des molécules complexes pendant qu'ils se réordonnent au cours d'une réaction. Ces techniques fourniront peut-être aussi des instruments puissants aux spécialistes d'autres disciplines : les

biologistes pourraient les utiliser pour étudier des modes d'action des enzymes et des hormones et les spécialistes de l'étude des surfaces pour des recherches sur le mouvement des atomes lors des catalyses hétérogènes — procédé largement utilisé dans la préparation de substances chimiques d'usage courant telles que l'ammoniac et l'acide sulfurique.

## NOUVEAUX MATÉRIAUX SUPRACONDUCTEURS

La découverte en 1986 des supraconducteurs à haute température a mis la communauté scientifique — les chimistes comme les physiciens — en ébullition et a eu un grand retentissement dans la presse mondiale. Les possibles applications évoquées vont de la production de puces supraconductrices aux trains sans roues.

Les supraconducteurs sont des matériaux qui laissent passer l'électricité sans lui opposer de résistance. Les courants électriques peuvent donc y cheminer sans déperdition d'éner-

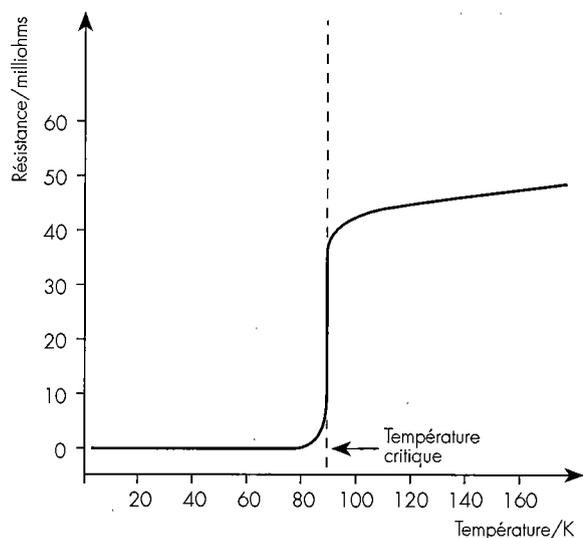
gie. En d'autres termes, un courant, appelé courant de supraconductivité, peut circuler indéfiniment dans un anneau de matière supraconductrice tant que celle-ci est maintenue à une température inférieure à la température de transition, ou température critique, autrement dit la température au-dessous de laquelle la matière devient supraconductrice (fig. 4).

Avant 1986, la température critique la plus élevée — 23,3 K — avait été obtenue avec un alliage de niobium et de germanium. En janvier 1986, Georg Bednorz et Alex Müller<sup>6</sup> ont découvert qu'un matériau céramique composé des éléments lanthane, baryum, cuivre et oxygène n'offrait pas de résistance au passage des courants électriques à 35 K, découverte capitale qui valut à ses auteurs le prix Nobel de physique en 1987. L'année suivante, on a découvert qu'un autre matériau céramique composé d'yttrium, de baryum et de cuivre ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ) — appelé supraconducteur 1-2-3 — était supraconducteur à 94 K, température plus élevée que le point d'ébullition de l'azote liquide (77 K). Avant cette découverte, il était nécessaire d'utiliser de l'hélium liquide, beaucoup plus cher que l'azote liquide, pour maintenir les alliages en dessous de leur température critique.

Les supraconducteurs contenant du cuivre et de l'oxygène répondent à des formules générales telles que  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ ,  $\text{Nd}_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$  et  $\text{La}_{2-x}\text{M}_x\text{CuO}_4$ , où M est un métal tel que le strontium ou le baryum. Ces matériaux ont des structures de type pérovskite (fig. 5), comportant des plans  $\text{CuO}_2$  dans lesquels s'effectue la supraconduction. Entre ces plans se trouvent des couches de métaux et/ou d'oxydes métalliques qui soutiennent le  $\text{CuO}_2$  et jouent le rôle de réservoirs de charge.

Depuis 1987, l'euphorie provoquée par ces découvertes a quelque peu diminué, même si les communications des chercheurs, les articles publiés dans des revues et les nouvelles données dans les journaux continuent de s'accumuler au même rythme. L'un des principaux problèmes est la fragilité et la rigidité des céramiques supraconductrices étudiées qui excluent leur utilisation comme fils susceptibles d'être enroulés en bobines. De plus, leur densité de courant critique — l'intensité de courant électrique qu'ils peuvent transporter — est limitée. Plus récemment, certains laboratoires ont fait état de la fabrication réussie de fils supraconducteurs souples et du premier moteur doté de bobines supraconductrices à haute température produisant une puissance de sortie utilisable. Les bobines se composent d'un supraconducteur à base de bismuth et fonctionnent à la température de l'azote liquide.

FIGURE 4  
SUPRACONDUCTIVITÉ



Sous l'effet du refroidissement, la résistance électrique d'un supraconducteur tombe à zéro lorsque la température critique est atteinte.

Source : *Impact : science et société*, n°154, 1989, p. 152.

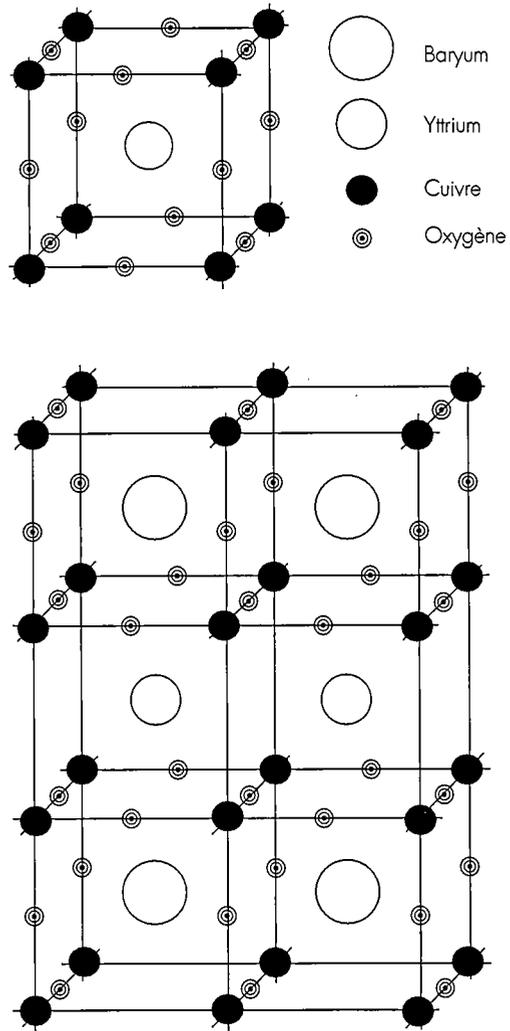
Les appareils dits « SQUID » (*superconduction quantum interference device*) ou interféromètres quantiques supraconducteurs à haute température, qui servent à détecter les infimes variations des champs magnétiques et des courants électriques, sont actuellement disponibles dans le commerce, de même que toute une palette de filtres à couche mince et de dispositifs à couche épaisse supraconducteurs à haute température tels que des écrans protecteurs et des bobines captrices.

Les recherches sur l'omniprésent  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  se sont poursuivies sur un rythme soutenu au cours des dernières années et on serait parvenu, selon un rapport, à augmenter la densité de courant critique de ce matériau. Un autre groupe de chercheurs, au Laboratoire national de Los Alamos (États-Unis d'Amérique) a déposé  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  en couches minces grâce à une technique appelée pulvérisation cathodique, qui consiste à bombarder le matériau avec des molécules de gaz ionisé dans une chambre à vide. La couche mince a été examinée par microscopie à effet tunnel et microscopie à force atomique.

La recherche de nouveaux supraconducteurs à base d'oxyde de cuivre ou d'une autre sorte s'est poursuivie. Une découverte passionnante a été faite : celle de la supraconductivité en dessous de 40 K dans le cas d'un composé « multicouches » de strontium, de néodymium, de cuivre et d'oxygène. On a également découvert une nouvelle famille de supraconducteurs contenant l'élément gallium. Ils répondent à la formule générale  $\text{LnSr}_2\text{Cu}_2\text{GaO}_7$  où Ln peut être l'yttrium ou l'un quelconque des 14 lanthanides. Une supraconductivité à 30 K et à 73 K a été observée dans ces substances. Peter Edwards, Ru Shi Liu<sup>7</sup> et le Centre de recherches interdisciplinaires sur la supraconductivité (Cambridge, Royaume-Uni) ont étudié des supraconducteurs à base de thallium de formule générale  $\text{Tl}_2\text{Ca}_2\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ . Leur température critique peut atteindre 128 K, valeur la plus élevée mentionnée à ce jour (fin 1992). Certains chercheurs prévoient maintenant que des expériences complémentaires sur ces matériaux permettront de porter les températures critiques à 180 K ou même plus.

En 1983, on a montré que certains sels organiques contenant du soufre étaient supraconducteurs jusqu'à des températures de 10,4 K. Ces supraconducteurs organiques ont des structures en sandwich qui consistent en couches conductrices de molécules organiques plates séparées par des couches isolantes d'ions inorganiques. Le composé de formule  $\text{K}(\text{ET})_2\text{Cu}[\text{N}(\text{CN})_2]\text{Cl}$ , où ET correspond au composé

FIGURE 5  
MATÉRIAUX SUPRACONDUCTEURS



Une pérovskite a une structure cubique (en haut) comportant en son centre un gros atome de métal — yttrium, par exemple — et en chacun de ses sommets de petits atomes de métal — cuivre, par exemple. Les arêtes du cube comportent des atomes d'oxygène. Les supraconducteurs 1-2-3 ont des structures de type pérovskite (en bas). Toutefois, les atomes d'oxygène sont absents des arêtes verticales entourant les atomes d'yttrium et de certaines arêtes horizontales entourant les atomes de baryum.

Source : *Impact : science et société*, 1989, p. 158.

7. Université de Birmingham, Royaume-Uni.

organique bis(éthylènedithiolo)-tétrathiafulvalène, a une température critique de 12,8 K — valeur la plus élevée enregistrée à ce jour (1992) pour des sels de ce type.

En 1991, Arthur F. Hebard, Robert C. Haddon et leurs collaborateurs<sup>8</sup> ont démontré que le fullerène dopé au potassium  $K_3C_{60}$  est supraconducteur à 18 K. Quelques mois plus tard, un groupe dirigé par Kutsumi Tanigaki<sup>9</sup> a poussé à 33 K la température critique des fullerènes en utilisant le composé  $Cs_2RbC_{60}$ . Depuis lors, cette valeur a été encore accrue de 10 K (voir ci-après).

La synthèse de supraconducteurs ayant des températures critiques de plus en plus élevées témoigne des efforts déployés par les spécialistes de ce domaine pour mettre au point des matériaux qui seraient supraconducteurs à température ambiante. Les applications techniques de tels supraconducteurs auraient un intérêt économique considérable. Actuellement, le transport d'électricité par lignes à haute tension entraîne des pertes d'électricité appréciables dues à la résistance des câbles traditionnels. Des câbles supraconducteurs à haute température permettraient d'éliminer presque entièrement cette perte d'énergie parce qu'ils n'offrent aucune résistance au passage du courant électrique. Ces matériaux sont également de bons conducteurs de la chaleur, et pourraient donc être utilisés pour la fabrication d'ordinateurs miniaturisés puisqu'ils éviteraient une accumulation de chaleur excessive, phénomène qui, aujourd'hui, empêche une miniaturisation plus poussée des puces.

Les matériaux supraconducteurs disponibles actuellement sont déjà utilisés comme enroulements pour de puissants électro-aimants et dans des moteurs linéaires propices à la lévitation. En fait, ils ont été utilisés au Japon dans la construction d'un train « prototype » qui flotte sur un champ magnétique.

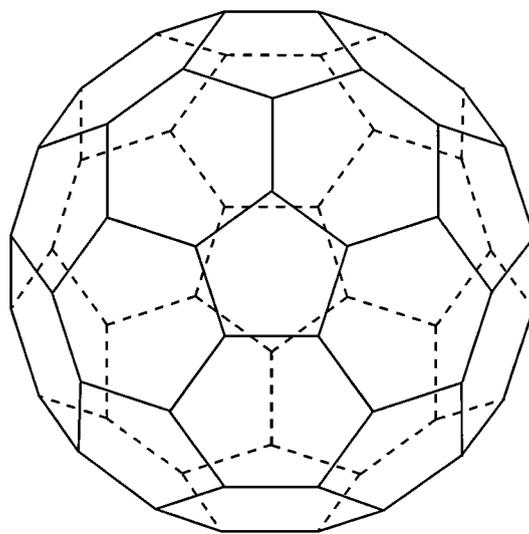
## LES FULLERÈNES

Depuis trois ans, ce sont les fullerènes qui, en chimie, retiennent le plus l'attention. Environ 700 communications ont été publiées à leur sujet en 1992, soit une toutes les 13 heures. Une molécule de fullerène possède un nombre pair d'atomes de carbone organisés en une configuration qui forme des cages fermées et creuses. Ces molécules ont été observées pour la première fois en 1984 lorsqu'on a découvert que du graphite vaporisé contenait de grandes grappes composées de nombres pairs d'atomes de carbone

compris entre 40 et 100. Richard E. Smalley<sup>10</sup>, Harry F. Kroto<sup>11</sup> et leurs collaborateurs ont mis en évidence la plus célèbre d'entre elles, le buckminsterfullerène, de formule  $C_{60}$ , en tant que grappe particulièrement stable, présente dans la vapeur de carbone produite par irradiation du graphite au moyen d'un laser. On a constaté que les 60 atomes de carbone de la molécule s'organisaient en réseau géodésique — faisant penser à un ballon de football. Le nom du  $C_{60}$  lui a été attribué en hommage à l'architecte et inventeur américain Richard Buckminster Fuller, dont le dôme géodésique (mis au point pour la première fois en 1947) représente pour une quantité donnée de matière un plus grand volume que toute autre structure (fig. 6) et a été considéré comme l'innovation la plus significative du xx<sup>e</sup> siècle dans ce domaine.

Bien que le buckminsterfullerène ait été mis en évidence il y a quelques années, il n'a été préparé en quantités macroscopiques utilisables qu'en 1990. Cette réalisation a entraîné la publication d'un nombre prodigieux de communications à son sujet et sur les molécules similaires telles que le  $C_{70}$ , dont la forme est analogue à celle d'un ballon de rugby. Parmi ces communications figurent des études sur la structure radiocristallographique d'un tétraoxyde d'osmium ( $OsO_4$ ) dérivé du  $C_{60}$ , sur l'utilisation du microscope à effet

FIGURE 6  
BUCKMINSTERFULLERÈNE



Source : *Chemistry International*, 1987, 9(6), p. 212.

8. AT&T Bell Laboratories, New Jersey, États-Unis d'Amérique.  
9. Société NEC, Japon.

10. Rice University, Houston, Texas, États-Unis d'Amérique.  
11. Université du Sussex, Brighton, Royaume-Uni.

tunnel (voir ci-dessus) en vue d'étudier la croissance de la couche de recouvrement de  $C_{60}$  sur l'arséniure de gallium, ainsi que sur l'emploi du microscope à force atomique (voir ci-dessus) et la diffractométrie aux rayons X pour étudier la topographie des films de  $C_{60}$  sur des substrats de fluorure de calcium.

Le  $C_{60}$  est le plus simple de tous les fullerènes. Ses atomes de carbone occupent tous des positions équivalentes et son spectre de résonance magnétique nucléaire (RMN) n'a donc qu'un seul pic. Le  $C_{70}$  a cinq pics, et le  $C_{76}$  en a 19. Lorsque Sumio Iijima<sup>12</sup>, en 1991, a annoncé la préparation d'un nouveau type de structure de fullerène composée de tubes creux en graphite en forme d'aiguilles de dimensions nanométriques ( $10^{-9}$  m), ceux-ci ont été rapidement baptisés « buckytubes ». Ces tubes, qui sont formés de nombreuses feuilles d'atomes de carbone enroulées en hexagones, ont été utilisés comme moules pour obtenir par tréfilage des fils métalliques de quelques nanomètres de diamètre. La synthèse de ces tubes en quantités de l'ordre du gramme a été réalisée par T. W. Ebbesen et P. M. Ajayan<sup>13</sup> en utilisant une technique classique de décharge en arc pour la synthèse de fullerènes sous atmosphère d'hélium. Robert L. Whetten et ses collaborateurs<sup>14</sup>, ainsi que François Diedrich<sup>15</sup> ont annoncé la fusion du  $C_{60}$  et du  $C_{70}$  sous forme de vapeurs denses et chaudes pour donner naissance à des fullerènes supérieurs stables ; et de grosses molécules, telles que le  $C_{120}$ , le  $C_{140}$  et même le  $C_{240}$ , qui sont des multiples du  $C_{60}$  et du  $C_{70}$ , ont été mises en évidence dans les spectres de masse de ces vapeurs. En ayant recours à des techniques de spectroscopie classique, le  $C_{60}$  et le  $C_{70}$  ont été identifiés par un groupe du MIT, Cambridge, Mass., dans des échantillons de produits de condensation et de suie recueillis à partir des flammes produites par la combustion d'hydrocarbures, tandis que trois chercheurs australiens, Louis S. K. Pang, Anthony Vassallo et Michael A. Wilson, décelaient du  $C_{160}$  et des fullerènes supérieurs lors de l'irradiation de lignite par laser. Des quantités macroscopiques de ces fullerènes ont été préparées à partir de coke dérivé du charbon, et leur identité a été vérifiée en utilisant un spectromètre de masse cyclotronique pour ions. En outre, un certain nombre de fullerènes supérieurs comprenant du  $C_{76}$ , du  $C_{84}$ , du  $C_{90}$  et du  $C_{94}$  ont été isolés et partiellement caractérisés.

Peter R. Buseck, Semeon J. Tsipursky<sup>16</sup> et Robert Hettich<sup>17</sup> ont découvert que les fullerènes  $C_{60}$  et  $C_{70}$  étaient naturellement présents dans un échantillon de shungite, une roche rare, riche en carbone, trouvée près de la ville de

TABLEAU 1  
APPLICATIONS POTENTIELLES DU FULLERÈNE  $C_{60}$   
ET DES MOLÉCULES DU MÊME ORDRE

CATALYSEURS	Les matériaux fullerènes pourraient être utilisés comme supports pour des catalyseurs métalliques fortement dispersés.
SUPRACONDUCTEURS	Le $C_{60}$ dopé aux métaux alcalins tels que le potassium et le rubidium peut conduire l'électricité sans résistance.
LIMITEURS OPTIQUES	Les fullerènes pourraient servir de limiteurs optiques pour protéger les détecteurs optiques d'une intensité lumineuse excessive.
DIAMANTS INDUSTRIELS	Le $C_{60}$ peut être écrasé sous haute pression à la température ambiante pour former un solide plus dur que le diamant.
TRAITEMENT DU CANCER	Des anticorps destinés à combattre les cellules cancéreuses peuvent être fixés aux molécules de fullerènes, qui sont ensuite guidées jusqu'à la tumeur.
SYSTÈMES « SUR MESURE » D'ADMINISTRATION DE MÉDICAMENTS	Des médicaments pourraient être incorporés dans les cages creuses de fullerènes et libérés à l'intérieur de l'organisme.
PILES MOLÉCULAIRES	Celles-ci pourraient être produites en piégeant divers atomes dans les cages de fullerène.
PUCES D'ORDINATEURS	Des nanotubes en carbone ultraminces pourraient être utilisés comme fibres pour remplacer les fils de cuivre qui sont connectés aux puces d'ordinateurs, ce qui permettrait de fabriquer des processeurs beaucoup plus rapides.
CARBURANTS DE FUSÉES	Comme le $C_{60}$ peut supporter des pressions extrêmes, il pourrait être utilisé dans les carburants des fusées.
SUPERFIBRES	Les fibres de carbone utilisées actuellement sont très solides. Des fibres composées de nanotubes de fullerène le seraient encore beaucoup plus.
LUBRIFICATION	Des molécules de fullerène entourées d'atomes de fluor seraient extrêmement stables chimiquement et physiquement. Elles constitueraient des lubrifiants idéaux.

12, 13. Laboratoire de recherche fondamentale, Société NEC, Japon.  
14. Université de Californie, Los Angeles, États-Unis d'Amérique.  
15. Institut technique fédéral, Zürich, Suisse.  
16. Arizona State University, États-Unis d'Amérique.  
17. Oak Ridge National Laboratory, Tennessee, États-Unis d'Amérique.

Shunga en Russie. L'origine de cette roche est incertaine, mais on pense que son âge dépasse 600 millions d'années. Toutefois, certaines indications fournies par l'astrophysique donnent à penser que le carbone, dans sa configuration de fullerène, pourrait se rencontrer ailleurs que sur la planète Terre ; beaucoup des caractéristiques mystérieuses des spectres d'émission dans l'infrarouge de la matière interstellaire — dont on pense qu'elles tirent leur origine d'un matériau riche en carbone — correspondent assez bien au spectre de vibration calculé pour le  $C_{60}H_{60}$  (hydrure saturé du  $C_{60}$ ).

Les fullerènes constituent la troisième forme de carbone pur que l'on ait identifiée, après le graphite et le diamant, qui sont d'usage courant depuis des siècles. Les fullerènes sont des substances non réactives parce que toutes les valences de chacun de leurs atomes de carbone sont engagées dans des liaisons covalentes ; leurs formes sphériques ou quasi sphériques ne présentent pas de sites réactifs faisant saillie propices à l'attaque de molécules. Une molécule de  $C_{60}$  ne se dissociera qu'à une température de 3 000 K.

L'utilisation des fullerènes comme supports fortement dispersés pour catalyseurs métalliques pourrait être une de leurs applications. On a découvert que des métaux pouvaient être fixés directement sur la charpente de carbone par réaction du  $C_{60}$  avec les réactifs organométalliques du ruthénium et du platine. La préparation de fullerènes contenant du lanthane a également pu être réalisée en vaporisant à l'aide d'un laser une tige en matériau composite oxyde de lanthane-graphite chauffée à 1 200 °C dans un courant d'argon. La préparation d'un fullerène dont la cage de carbone contient un atome isolé d'un métal transitoire (comme un atome de fer) en vaporisant du graphite dans une atmosphère du composé  $Fe(CO)_5$ , représente un autre progrès analogue, décrit par C. N. R. Rao et son équipe de chimistes<sup>18</sup>.

Une autre utilisation possible des fullerènes est devenue évidente lorsque Art Hebard et ses collaborateurs<sup>19</sup> ont découvert que des couches minces de la substance dopée avec divers métaux alcalins (par exemple, le potassium) conduisaient l'électricité lorsqu'elles étaient maintenues à l'abri de l'air. Des travaux ultérieurs ont révélé que, lorsque le  $C_{60}$  est dopé au moyen d'une petite quantité d'atomes de potassium, le matériau devient supraconducteur (voir ci-dessus) à la température de 18 K. Des études visant à élucider sa structure cristalline ont montré que des échantillons purs de fullerène de métal alcalin  $K_3C_{60}$  consistent en un réseau cubique à faces centrées de  $C_{60}$ , dont tous les interstices octaédriques et tétraédriques sont occupés par des

atomes de potassium. Plus récemment encore, on a découvert que le  $C_{60}$  dopé au césium et au rubidium est supraconducteur à 33 K. On sait maintenant que la supraconductivité de fullerène de métaux alcalins pourrait être améliorée en obtenant une nouvelle élévation de 10 K de sa température critique, qui la porterait à 42 K, en ajoutant du thallium au  $C_{60}$  dopé au rubidium et au potassium. Sekin et ses collaborateurs<sup>20</sup> ont observé une élévation supplémentaire de la température critique, jusqu'à 57 K. Des chercheurs ont également établi que le  $C_{60}$  dopé au composé organique tétrakis (diméthylamino)éthène (TDAE) devient un aimant ferromagnétique moléculaire organique à 16,1 K.

Le  $C_{60}$  en solution dans le toluène a été amené à réagir avec le xylène — composé dérivé du benzène — pour former un composé brun insoluble. En faisant appel à la spectroscopie RMN, à l'analyse gravimétrique thermique et aux données de l'analyse élémentaire, les chercheurs Douglas A. Loy et Roger A. Assink<sup>21</sup> ont montré que ce produit est probablement un copolymère du  $C_{60}$  et du xylène de rapport 1 : 3,4.

On a également découvert certaines propriétés optiques inhabituelles du buckminsterfullerène qui pourraient se révéler utiles. Des recherches ont montré que les molécules de  $C_{60}$  photoexcitées absorbent mieux la lumière que les molécules dans leur état fondamental. Cette propriété du  $C_{60}$  pourrait être utilisée pour limiter la performance des détecteurs optiques qu'il faut protéger des lumières trop fortes lorsqu'ils sont employés avec des sources intenses telles que les lasers et les soudeuses à arc.

Les molécules de buckminsterfullerène, à la géométrie en ballon de football très symétrique, sont extrêmement stables au point de vue physique. Malgré cela, une équipe de chercheurs de Grenoble, France, a annoncé qu'elle avait réussi à transformer du  $C_{60}$  en diamant à température ambiante en le soumettant à de très fortes pressions. On a suggéré que cette découverte pourrait déboucher sur une nouvelle méthode de production de diamants industriels.

## LES CFC ET LEURS PRODUITS DE SUBSTITUTION

Les chlorofluorocarbones (CFC) et les composés chlorés et bromés apparentés sont très largement utilisés depuis quelques dizaines d'années comme réfrigérants, propulseurs d'aérosols, agents moussants, solvants pour le nettoyage, etc. Jusqu'aux années 70, ces composés ont été considérés

18. Indian Institute of Science, Bangalore, Inde.

19. AT&T Bell Laboratories, New Jersey, États-Unis d'Amérique.

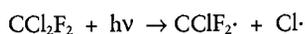
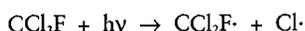
20. Institut national de recherche sur les métaux, Tsukuba, Japon.

21. Sandia National Laboratories, Nouveau-Mexique, États-Unis d'Amérique.

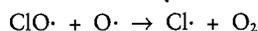
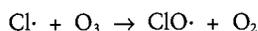
comme sans danger pour l'environnement et particulièrement intéressants du point de vue chimique parce qu'ils étaient non toxiques, ininflammables, non volatils, non corrosifs et très stables. Ainsi, le CFC-12 (dichlorofluorométhane,  $\text{CCl}_2\text{F}_2$ , appelé également FREON-12) était initialement considéré comme un réfrigérant miraculeux. Il n'est, dès lors, pas surprenant que la production mondiale de CFC ait atteint environ un million de tonnes par an à la fin des années 70.

C'est un peu moins de dix ans plus tôt qu'on a commencé à s'interroger sur la diminution de l'ozone stratosphérique et en 1974 que ce phénomène a été relié pour la première fois au CFC. Sachant que les radicaux chlore sont capables de catalyser la décomposition de l'ozone dans la stratosphère, des chercheurs ont suggéré que la principale source anthropogénique du chlore de la stratosphère, les CFC, pourrait être responsable de l'appauvrissement de la couche d'ozone. Ils ont calculé que si la production des CFC se poursuivait au même rythme, un demi-million de tonnes de chlore s'accumulerait chaque année dans la stratosphère et multiplierait ainsi par deux le rythme naturel de décomposition de l'ozone, entraînant une déperdition d'ozone comprise entre 7 et 13 %.

Des radicaux chlore ( $\text{Cl}\cdot$ ) sont produits par photodissociation des CFC dans la basse stratosphère. Les réactions concernant respectivement le CFC-11 et le CFC-12 sont typiquement les suivantes :



Ces radicaux sont alors disponibles pour catalyser la destruction de l'ozone à toutes les altitudes de la stratosphère au cours d'une série complexe de processus, notamment le suivant, qui fait intervenir du monoxyde de chlore ( $\text{ClO}\cdot$ ) :



Les scientifiques estiment qu'un seul radical chlore est capable d'entrer en réaction avec 100 molécules d'ozone. Qui plus est, ils prédisent qu'en raison de la stabilité des CFC leur survie dans la stratosphère peut atteindre 100 ans.

Un groupe de composés contenant du brome apparentés aux CFC et baptisés halons ( $\text{CF}_2\text{BrCl}$  et  $\text{C}_2\text{F}_4\text{Br}_2$ ) ont été largement utilisés dans les extincteurs et sont encore plus des-

## PRIX NOBEL

Le prix Nobel de chimie a été décerné en 1992 à Rudolph A. Marcus, titulaire de la chaire de chimie Arthur A. Noyes au California Institute of Technology, pour ses contributions à l'étude des réactions avec transfert d'électrons dans les systèmes chimiques. Sa théorie concourt à expliquer des phénomènes très divers, notamment la fixation d'énergie lumineuse par les plantes vertes, la chimioluminescence, la synthèse et l'analyse électrochimiques, la corrosion, la conduction de l'électricité par des polymères et la production photochimique de carburant.

Le chimiste physicien Richard Ernst, de Eidgenössische Technische Hochschule (ETH) à Zürich, Suisse, a obtenu en 1991 le prix Nobel de chimie pour ses travaux de recherche sur la résonance magnétique. La spectroscopie de résonance magnétique nucléaire (RMN) est employée couramment dans les départements de chimie du monde entier pour analyser les structures de matériaux. Ernst a fortement amélioré la sensibilité de la technique et a été le premier à introduire une version à deux dimensions, rendant ainsi possible son application à de beaucoup plus grosses molécules qu'auparavant. Ses découvertes ont également ouvert la voie à un dispositif entièrement nouveau d'obtention d'images médicales du corps humain par résonance magnétique. Cette technique permet de déceler des tumeurs et pourrait bien se substituer au scanner pour diagnostiquer le cancer.

tructeurs. Ils libèrent des radicaux brome ( $\text{Br}\cdot$ ) qui donnent du monoxyde de brome ( $\text{BrO}\cdot$ ) au cours de réactions analogues à celles qui sont décrites plus haut. La concentration de halon dans la stratosphère augmente à un rythme dépassant 5 % par an.

La teneur totale de la stratosphère en chlore est aujourd'hui de l'ordre de 3 parties par milliard (ppm, c'est-à-dire 3 parties pour  $10^9$  molécules d'air). Cette valeur était de 0,6 ppm il y a un siècle et de 2 ppm à la fin des années 70. Dans la stratosphère, le chlore est surtout présent sous forme de CFC et de leurs dérivés photochimiques tels que le monoxyde de chlore. Le brome, sous forme de halons et de monoxyde de brome, est également présent à une concentration d'environ 0,02 ppm.

Les CFC sont aussi des gaz à effet de serre responsables de 15 à 20 % de la couverture thermique qui entoure la Terre. Le réchauffement dû à l'effet de serre provoqué par

**TABEAU 2**  
**POTENTIEL DE DESTRUCTION DE L'OZONE (ODP)**  
**ET POTENTIEL DE RÉCHAUFFEMENT DE LA PLANÈTE (GWP)**  
**DES CFC, DES HCFC ET DES HFC**

Composé	Formule	ODP (rapporté à la valeur de référence CFC-11 = 1,0)	GWP (rapporté à la valeur de référence CFC-11 = 1,0)
CFC-11	CCl <sub>3</sub> F	1,00	1,0
CFC-12	CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	1,00	2,8-3,4
CFC-113	CCl <sub>2</sub> FCClF <sub>2</sub>	0,80	1,4
CFC-114	CClF <sub>2</sub> CClF <sub>2</sub>	1,00	3,7-4,1
CFC-115	CClF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	0,60	7,5-7,6
HCFC-22	CHClF <sub>2</sub>	0,05	0,34-0,37
HCFC-123	CHCl <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	0,02	0,017-0,020
HCFC-124	CHClFCF <sub>3</sub>	0,02	0,092-0,10
HCFC-141b	CH <sub>3</sub> CCl <sub>2</sub> F	0,10	0,087-0,097
HCFC-142b	CH <sub>3</sub> CClF <sub>2</sub>	0,06	0,34-0,39
HFC-125	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	0	0,51-0,65
HFC-134a	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	0	0,25-0,29
HFC-152a	CH <sub>3</sub> CHF	0	0,026-0,033

une molécule de CFC-11 ou de CFC-12 équivaut à celui de 10 000 molécules de CO<sub>2</sub>.

Depuis vingt ans, la société est, dans le monde entier, de plus en plus consciente de diverses sortes de pollution planétaire qui pourraient compromettre la vie sur Terre : la diminution de la couche d'ozone, le réchauffement par effet de serre, les pluies acides et le « smog » ou brouillard photochimique.

Sur la base des nombreuses indications scientifiques accumulées, des organismes nationaux et internationaux ont commencé à reconnaître, vers 1975, que les CFC pourraient compter parmi les principaux facteurs qui contribuent à la pollution planétaire. En 1976, l'Agence des États-Unis pour la protection de l'environnement a annoncé son intention d'interdire, lorsqu'elle ne répondait pas à une nécessité, l'utilisation des CFC comme propulseurs d'aérosols. Malgré cela, en 1984, la production annuelle mondiale de CFC atteignait plus d'un million de tonnes, dépassant le niveau enregistré avant l'interdiction.

Afin de prévenir tout effet potentiellement catastrophique sur la biosphère qui pourrait résulter d'un amincissement supplémentaire de la couche d'ozone de la strato-

sphère, 24 pays ont signé, le 16 septembre 1987, le Protocole de Montréal, élaboré sous les auspices du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Le protocole énonçait trois prescriptions essentielles :

☐ A compter du deuxième semestre 1989, le niveau de consommation des CFC-11, -12, -113, -114 et -115 ne devra excéder celui de 1986.

☒ Le niveau de production atteint en 1986 devra être réduit de 20 % à partir du 1<sup>er</sup> juillet 1993 et à nouveau de 30 % d'ici au 1<sup>er</sup> juillet 1998 (soit une réduction totale de 50 %).

☒ Le niveau de consommation des halons devra, en 1994, être gelé au niveau de 1986.

D'autres pays ont souscrit au Protocole lors des conférences internationales sur l'ozone organisées à Londres en mars 1989, avec la participation de 123 pays, et à Helsinki, en mai 1989. En 1990, les hydrochlorofluorocarbones (HCFC) — fabriqués comme produits de remplacement des CFC — ont été incorporés au Protocole en tant que produits transitoires.

En raison de la baisse spectaculaire de la production de CFC et de composés analogues prévue au cours de la dizaine d'années à venir, les producteurs de CFC investissent des sommes importantes dans la mise au point et l'analyse de produits de substitution des CFC et de technologies de remplacement respectant l'environnement tout en répondant aux besoins de la société. Toutefois, il est reconnu que dans de nombreux cas — réfrigération et climatisation, par exemple — des réductions importantes des émissions, particulièrement à court terme, pourraient être réalisées en récupérant et en recyclant les CFC en cours d'emploi.

Plusieurs entreprises sont engagées dans la mise au point de systèmes au charbon actif pour la récupération des CFC utilisés comme agents gonflants dans les procédés de fabrication des mousses. Ces systèmes sont chers, mais susceptibles de permettre la récupération de 40 % des agents gonflants. Selon certains industriels, il est probable que la conservation des CFC et l'utilisation de produits ou de technologies de remplacement réduiront la demande de CFC dans une proportion pouvant aller jusqu'à 60 %. Cela ouvrira 40 % du marché actuel aux produits de substitution — soit peut-être 500 000 tonnes par an.

Il est en un sens paradoxal que leur stabilité, la caractéristique même qui a rendu les CFC si importants, fasse d'eux aujourd'hui une menace pour l'environnement. Il est possible d'obtenir une réduction de cette stabilité dans

l'atmosphère grâce à la présence, dans la molécule, d'hydrogène permettant la dégradation du composé par les radicaux hydroxyles (OH·). Des composés du méthane et de l'éthane partiellement halogénés — contenant tous de l'hydrogène — ont été mis au point et sont maintenant fabriqués à grande échelle. Ce sont les HCFC. Moins nocifs que les CFC pour la couche d'ozone, ils ont quand même encore pour effet de l'appauvrir (tableau 2). Les départements industriels de recherche-développement s'emploient activement aujourd'hui à trouver de nouvelles voies menant à des composés qui respectent la couche d'ozone comme les hydrofluorocarbones (HFC), qui ne contiennent ni chlore ni brome. La capacité des CFC ou des HCFC à détruire l'ozone dépend de la quantité de chlore qu'ils contiennent et de leur durée de vie dans l'atmosphère. Les potentiels de destruction d'ozone (ODP) mesurent la contribution des divers CFC et de leurs produits de remplacement possibles à la dégradation de l'ozone par rapport au CFC-11, auquel on attribue une valeur de 1,0. Les potentiels de réchauffement global (GWP) ont été calculés à l'aide de modèles informatiques également établis en prenant CFC-11 = 1,0 comme valeur de référence. Certaines des valeurs citées dans des rapports récents figurent dans le tableau 2.

En janvier 1988, un programme destiné à tester la toxicité de fluorocarbones de substitution (PAFT) a été lancé en vue d'évaluer la sécurité de produits de remplacement des CFC. Les résultats des études de toxicité aiguë, subaiguë et subchronique, de même que les essais *in vitro* sur les propriétés mutagènes et tératogènes du HCFC-123, du HFC-134a et HCFC-141b ont révélé qu'ils ont à maints égards des profils de toxicité très proches de ceux du CFC-11 et du CFC-12. Les tests sur deux ans de toxicité chronique et de carcinogénéité de ces produits se poursuivent et la publication des résultats est attendue prochainement. Les résultats des études relatives au HCFC-124 et au HFC-125 sont attendus en 1994 ou 1995.

Le Protocole de Montréal de 1987 et ses amendements ultérieurs ont été révisés à la réunion mondiale des ministres de l'environnement organisée à Copenhague, Danemark, en novembre 1992 : de nouvelles diminutions de la production et de l'utilisation des CFC et des composés du même ordre ont été imposées par rapport aux niveaux de 1986 (tableau 3).

Lors de la réunion de Copenhague, les restrictions relatives aux HCFC, qui avaient été incorporées en 1990 au Protocole de Montréal en tant que produits transitoires, ont

TABLEAU 3  
NOUVELLES DATES BUTOIRS IMPOSÉES PAR LA RÉVISION DU  
PROTOCOLE DE MONTRÉAL (COPENHAGUE, NOVEMBRE 1992)

Composés	Utilisations	Première réduction		Interdiction Année
		Année	%	
CFC	Aérosols, réfrigération, climatisation, nettoyage, mousses	1994	75	1996
HCFC	Substituts des CFC	1996	Plafonnement	2030
Halons	Extincteurs			1994
CCl <sub>4</sub>	Solvant	1995	85	1996
CH <sub>2</sub> CHCl <sub>2</sub>	Solvant	1994	50	1996
CH <sub>3</sub> Br	Fumigateur	1995	Plafonnement	non fixée

également été étendues : à partir de 1996, leur utilisation sera plafonnée aux niveaux de 1989 majorés de 3,1 %. Ensuite, l'emploi des HCFC sera progressivement réduit : de 35 % d'ici 2004, de 65 % d'ici 2010, de 90 % d'ici 2015, de 99,5 % d'ici 2020 et de 100 % d'ici 2030.

Le bromure de méthyle, CH<sub>3</sub>Br, qui est employé comme fumigateur pour tuer les ravageurs dans le sol et dans les récoltes de fruits stockées, a été ajouté au Protocole de Copenhague. En 1995, sa production sera gelée aux niveaux de 1991, et des réductions seront envisagées ultérieurement.

## LA SYNTHÈSE ORGANIQUE

L'ampleur de la branche de la chimie couramment appelée synthèse organique est largement attestée par les quelque 600 communications présentées à la 9<sup>e</sup> Conférence internationale sur la synthèse organique, organisée à Montréal, Canada, en juillet 1992, où des exposés ont été faits sur les synthèses de composés organiques divers : acides aminés, dérivés des glucides, antibiotiques, composés polyaromatiques, esters, celluloses, composés organométalliques, composés antiviraux, vitamines, agents antitumoraux et alcools. La conception et la mise au point de nouvelles molécules chimiques destinées à traiter, à guérir ou à prévenir des maladies de l'être humain et de l'animal, en particulier, font l'objet de nombreuses recherches. Cela est apparu clairement non seulement à la Conférence de Montréal mais aussi au 33<sup>e</sup> congrès de l'UICPA organisé à Budapest en août 1991, où environ 400 communications ont été présen-

tées dans la section « Chimie et biochimie des composés organiques biologiquement actifs ».

Parmi les travaux relatifs aux composés ayant une valeur thérapeutique qui ont été synthétisés récemment figuraient des communications relatives à la sesbanimide A et à la manzanmine A, deux alcaloïdes de structure nouvelle qui sont actifs contre les tumeurs, à un nouveau médicament contre l'asthme appelé MK-679 ou Verlukast, à des composés comportant le groupe guanidine, à l'identification, à la purification, au mécanisme d'action et à la synthèse de récepteurs d'anesthésiques, à des études sur l'insuline et sur le récepteur de celle-ci, à la mise au point d'un anticoagulant peptidique qui pourrait trouver une utilisation clinique pour le traitement et la prévention des thromboses.

Beaucoup de recherches récentes ont été axées sur la synthèse asymétrique et, en particulier, sur celle de médicaments énantiomères ou chiraux. On se trouve en présence d'un phénomène de chiralité lorsqu'une molécule est asymétrique et peut donc exister sous deux formes dont chacune est l'image de l'autre dans un miroir. Deux énantiomères sont physiquement et chimiquement semblables, à ceci près qu'ils ont des propriétés optiques différentes.

La plupart des molécules d'acides aminés possèdent un

atome de carbone asymétrique. Ces acides aminés sont donc chiraux et optiquement actifs, comme le sont les glucides tels que le glucose et d'autres monosaccharides. La chiralité revêt une importance cruciale dans les systèmes biologiques : les enzymes et la plupart des composés sur lesquels ils agissent sont optiquement actifs et stéréosélectifs. Par exemple, un seul des deux énantiomères du glucose est susceptible d'être métabolisé par les animaux et fermenté par l'action des levures.

La synthèse des composés asymétriques ou stéréosélectifs biologiquement actifs, en particulier des médicaments, suscite donc un très vif intérêt dans les départements de chimie depuis quelques années. Malheureusement, les méthodes classiques de synthèse organique de composés optiquement actifs ont pour effet de produire des mélanges racémiques ou mélanges de quantités égales des formes optiquement opposées.

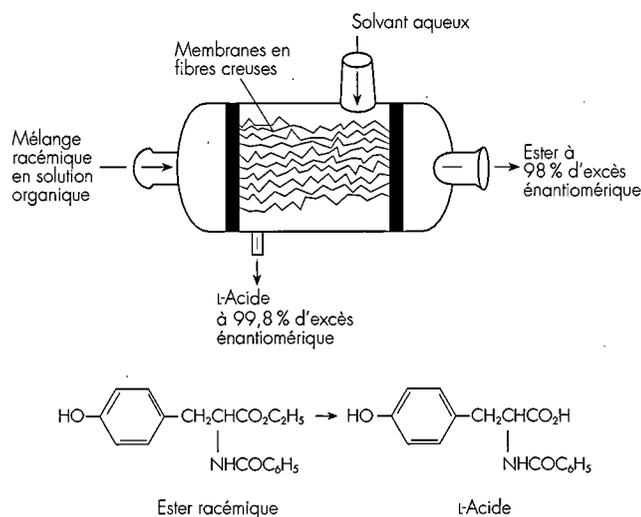
Un rapport de recherche récent a donné un aperçu des méthodes actuellement utilisées ou susceptibles de l'être à l'avenir pour produire des médicaments chiraux administrés dans le traitement d'affections du système cardio-vasculaire, de l'appareil génito-urinaire, du système nerveux central et de l'appareil respiratoire. Ce rapport décrit des méthodes de production stéréospécifique d'anti-inflammatoires et d'analgésiques, de médicaments anticancéreux, d'antibiotiques, de médicaments anti-infectieux et antiviraux, d'hormones, d'antihistaminiques, d'antitussifs et de médicaments contre le rhume.

Un des procédés utilisés est fondé sur l'emploi d'enzymes stéréosélectifs immobilisés dans des réacteurs à membranes en fibres creuses pour séparer les mélanges racémiques (fig. 7). Lorsqu'une solution d'un mélange racémique dans un solvant organique est amenée à circuler à travers le réacteur, l'enzyme hydrolyse un des énantiomères mais pas l'autre. L'énantiomère hydrolysé est éliminé par lavage dans la phase aqueuse, laissant l'énantiomère recherché dans le solvant organique.

Des chimistes ont également élaboré des techniques de préparation, avec un haut rendement et un fort excès énantiomérique, d'alcènes substitués offrant des perspectives de production commerciale de médicaments, de pesticides, de phéromones (composés chimiques sécrétés par des animaux, qui influent sur le comportement d'autres animaux, généralement de même espèce), d'aromatisants et d'additifs énantiomériques.

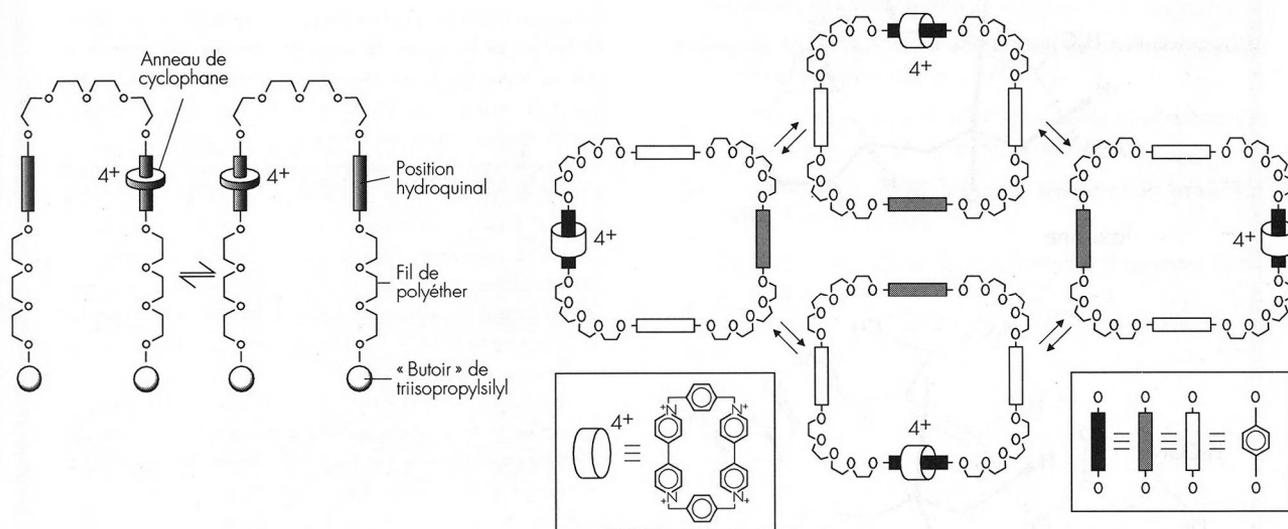
La synthèse de molécules autorépliquables a aussi suscité récemment beaucoup d'intérêt et de passion. Des expériences ont montré que la répllication non enzymatique est pos-

FIGURE 7  
LES RÉACTEURS A MEMBRANES EN FIBRES CREUSES  
SÉPARENT LES MÉLANGES RACÉMIQUES EN CONTINU



Source : Sepracor, dans *Chemical & Engineering News*, 28 septembre 1992, p. 56.

FIGURE 8  
NAVETTES MOLÉCULAIRES



Navettes moléculaires : (à gauche) Dans le système [2]rotaxane, l'anneau va et vient entre deux positions sur le fil. (à droite) Dans le système [2]caténane, l'anneau se déplace d'une station à l'autre en dessinant un cercle comme un train moléculaire.

Source : (à gauche) D. Bradley, How to make a molecular shuttle, *New Scientist*, 27 juillet 1991 p. 20 ; (à droite) F. Stoddart, Making molecules to order, Scheme 6, *Chemistry in Britain*, août 1991, p. 717.

sible dans toutes sortes de systèmes chimiques de synthèse et donné des indications sur la manière dont la physique et la chimie interagissaient dans les systèmes d'évolution prébiotiques à l'œuvre voici environ 4 milliards d'années. Ce travail peut aussi représenter une étape en vue de reconstituer, par voie de synthèse, les systèmes biologiques primitifs. L'intérêt accru pour la réplication moléculaire découle de travaux antérieurs sur la structure en double hélice de l'acide désoxyribonucléique (ADN) et sur les mécanismes de réplication des acides nucléiques. On a commencé maintenant à axer les recherches de chimie prébiotique sur le rôle éventuel de polymères autorépliquables plus simples qui ont peut-être été les précurseurs des acides nucléiques.

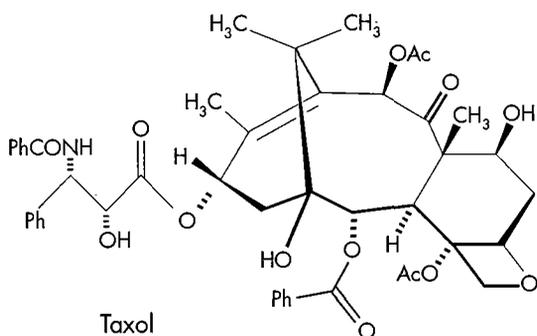
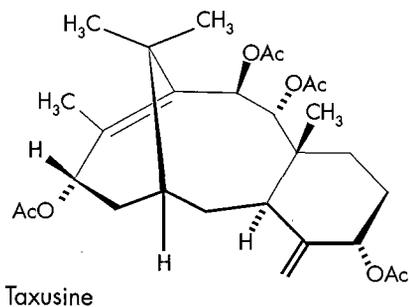
Il est possible que l'auto-assemblage et l'autoréplication soient les secrets que les spécialistes de la synthèse chimique ont à apprendre de la nature pour être en mesure de construire des dispositifs électroniques moléculaires. La forma-

tion d'une architecture et de machines supramoléculaires capables de mener à bien diverses tâches mécaniques et électroniques dépendra de la compréhension et de l'application du phénomène de reconnaissance moléculaire. Cela implique une interaction spontanée entre deux molécules complémentaires (hôte et invitée) débouchant sur l'auto-organisation et l'auto-assemblage de structures supramoléculaires. Des efforts de recherche considérables sont consentis dans le domaine de la chimie supramoléculaire, que certains conseils nationaux de la recherche ont même identifié comme méritant une attention et un soutien particuliers.

Dans le cadre d'une réalisation remarquable de la synthèse organique, Fraser Stoddart et ses collaborateurs<sup>22</sup> ont conçu une navette moléculaire à auto-assemblage qui consiste en une molécule en forme d'anneau entourant un fil moléculaire, un peu comme une perle, et commutant entre deux positions sur le fil. Ce travail pourrait constituer

22. Université de Sheffield, Royaume-Uni.

LE TAXOL : UN MÉDICAMENT ANTICANCÉREUX NATUREL



Source : *Chemistry International*, 1993, 15 (1) p. 9.

Depuis quelques années, de nombreux travaux de recherche sont consacrés à la synthèse de médicaments anticancéreux tels que le taxol. Les essais cliniques de ce produit naturel ont donné des résultats prometteurs dans le traitement de divers cancers, notamment ceux de l'ovaire, du sein et du poumon. Toutefois, des essais parrainés par l'Institut national du cancer des États-Unis ont été freinés par le manque de taxol, de sorte que des chimistes et d'autres scientifiques ont été incités à intensifier les recherches pour faire en sorte que les médecins puissent disposer de plus grandes quantités de ce médicament.

Actuellement, le taxol ne peut être obtenu que par extraction à partir de l'écorce de l'if du Pacifique — une ressource limitée présente dans les vieilles forêts du nord-ouest des États-Unis, qui constituent également l'habitat d'une espèce menacée, la chouette tachetée. On s'efforce aujourd'hui de trouver le moyen de répondre à la demande croissante dont ce médicament fait l'objet par synthèse totale ou partielle, extraction des feuilles, culture de tissus et culture de l'arbre.

Les taxanes biologiquement actifs, de structure complexe, se répartissent en deux classes définissables à grands traits : les taxusines et les taxols (voir figure). Les taxols diffèrent des taxusines par la présence d'un substituant hydroxyle (-OH) caractéristique.

Robert A. Holton et ses collaborateurs ont mis au point à la Florida State University une version à plus grande échelle de semi-synthèse du taxol en laboratoire, couverte par un brevet. Le procédé a pour point de départ un précurseur du taxol, le 10-déacétylbaccatin III (10-DAB III), que l'on trouve dans les aiguilles et les rameaux d'if — deux sources renouvelables. Il est prévu que la production par ce procédé commencera en 1993. En 1994, l'entreprise qui produit du taxol par cette méthode espère obtenir du 10-DAB III et même du taxol directement par extraction à partir de plantes cultivées issues de sujets sélectionnés génétiquement.

une première étape en direction du traitement de l'information à l'échelle moléculaire, le but éventuel étant la synthèse d'ordinateurs contrôlables d'échelle moléculaire pouvant recevoir, stocker et transmettre l'information.

La perle de la navette moléculaire consiste en un anneau de cyclophane chargé constitué par deux résidus de bipyridinium (fig. 8). Elle se déplace entre deux positions hydroquinol symétriques le long d'un fil de polyéther. La structure est appelée [2]rotaxane ; elle est préparée par auto-assemblage à partir de deux constituants moléculaires — le fil et la perle. Par un processus d'auto-assemblage, un produit complexe est réalisé en une seule étape alors que la synthèse normale en nécessite beaucoup.

En faisant appel à la spectroscopie RMN, on a pu éta-

blir que l'anneau de cyclophane effectue un va-et-vient entre deux positions plusieurs centaines de fois par seconde à la température ambiante et que ce mouvement de navette nécessite environ 13 kilojoules par mole — beaucoup moins que la quantité d'énergie requise par la plupart des réactions chimiques.

Un autre type de navette moléculaire, surnommée « train moléculaire », dessine des cercles. Ce dispositif se compose de deux anneaux imbriqués et est appelé [2]catenane. Un anneau, correspondant à la perle, se déplace autour de l'autre anneau, qui a quatre positions hydroquinol.

Un des principaux objectifs de la chimie est, aujourd'hui, de synthétiser et de mettre au point des molécules actives et des systèmes moléculaires pouvant fonctionner

électroniquement du point de vue de la commutation, du stockage d'informations et de la logique. La navette moléculaire est un exemple de système de communication moléculaire susceptible d'applications en électronique.

**MICHAEL FREEMANTLE** est responsable de l'information à l'Union internationale de chimie pure et appliquée (UICPA), dont le siège est à Oxford. Chargé du programme destiné aux membres de l'UICPA qui y adhèrent à titre individuel, il est également rédacteur en chef de *Chemistry International*, le bulletin de liaison de l'UICPA. Michael Freemantle a été maître-assistant de chimie physique à l'Institut universitaire de technologie de South Bank, à Londres, et professeur associé de chimie physique à l'Université de Jordanie, à Amman. Il a travaillé comme consultant éditorial en matière d'enseignement scientifique pour l'UNESCO, et est l'auteur de huit livres sur la chimie et la science, dont *Chemistry in Action*.

## LECTURES COMPLÉMENTAIRES

- Adrian, F. J. et Cowan, D. O. 1992. The new superconductors — chemistry and physics converge to pin down mechanisms, *Chemical & Engineering News*, 21 décembre, p. 24-41.
- Bruce, D. W. et O'Hare, D. (dir. publ.). 1992. *Inorganic materials*, Chichester, John Wiley & Sons.
- Freemantle, M. 1990. CFC et leurs produits de substitution, *Impact : science et société*, n° 157, p. 59-69.
- Goh, M. C. et Markiewicz, P. 1992. The atomic force microscope, *Chemistry & Industry*, 21 septembre, p. 687-691.
- Smart L. et Moore, E. 1992. *Solid state chemistry : an introduction*, Londres, Chapman & Hall.
- Stinson, S. C. 1992. Chiral drugs, *Chemical & Engineering News*, 28 septembre, p. 46-79.

## BIOLOGIE

Peter Newmark

Les retombées inattendues que les recherches menées dans un domaine peuvent avoir dans un autre constituent peut-être l'aspect le plus passionnant de la biologie moderne. Ainsi est-il de plus en plus fréquent qu'une substance isolée en raison de son activité dans un système donné se révèle par la suite avoir une activité différente dans un tout autre système. L'explication en est peut-être qu'un nombre croissant de composants cellulaires et tissulaires se trouvent identifiés et que les chances d'en découvrir d'entièrement nouveaux diminuent d'autant, ou bien que l'évolution est un processus beaucoup plus adaptatif que révolutionnaire. Quoi qu'il en soit, cette évolution a fait éclater une bonne partie des cloisonnements traditionnels de la recherche biologique. Ce qui n'a pas changé, en revanche, c'est que les découvertes sont souvent mues par l'invention de techniques nouvelles ou l'accélération de procédés anciens.

Les cinq domaines d'étude examinés dans le présent chapitre doivent tous la rapidité de leur développement au progrès des techniques, mais c'est pour d'autres raisons que nous les avons retenus ici. Les structures protéiques se situent à l'interface entre la physique, la chimie et la biologie : la physique fournit des techniques cruciales pour leur étude et la chimie explique comment elles se maintiennent dans leur forme tridimensionnelle et éclaire les fonctions biologiques des protéines. La transduction de signaux n'est pas seulement un domaine de recherche particulièrement actif ; elle est la clé qui permet de comprendre comment des phénomènes intracellulaires, notamment l'intensité de l'activité génique dans le noyau de la cellule, peuvent être régis par des facteurs extérieurs à celle-ci. Les deux sujets traités ensuite illustrent la puissance de plus en plus grande des techniques de manipulation génétique. La disruption génique est une technique nouvelle qui se révèle extrêmement efficace pour comprendre les fonctions des gènes et créer des modèles de maladies génétiques humaines sur lesquels essayer d'éventuelles thérapies, y compris géniques. Les « greffes » ou insertions de gènes sont des techniques beaucoup moins nouvelles mais, appliquées aux végétaux, elles en arrivent maintenant au stade de l'exploitation commerciale. Enfin, une petite place a été faite à un domaine de l'immunologie qui vient de livrer plusieurs secrets jusque-là bien gardés, jetant une vive lumière sur l'une des principales activités du système immunitaire : la

reconnaissance par les lymphocytes de cellules infectées par des agents pathogènes.

## STRUCTURES PROTÉIQUES

Très difficile à réaliser techniquement, la détermination de la structure tridimensionnelle de protéines ou d'autres macromolécules biologiques est pourtant d'une grande importance scientifique. Tant que l'on ne connaît pas la structure d'une protéine, son mode d'action peut donner lieu à toutes sortes de conjectures et de controverses ; la connaissance de cette structure élimine la plupart des premières et met souvent fin aux secondes. Environ 500 structures ont été décrites entre l'année 1957 — où l'on est parvenu pour la première fois à élucider la structure tridimensionnelle d'une protéine — et l'année 1989, mais les technologies chimiques, physiques et informatiques sur lesquelles s'appuient de tels travaux progressent à un rythme tel que 500 autres ont pu l'être rien qu'au cours des trois dernières années. Les spécialistes estiment que le nombre des structures ainsi déterminées atteindra 20 000 à l'orée du XXI<sup>e</sup> siècle. Cette connaissance est importante dans de nombreux domaines : elle est utile, par exemple, pour comprendre le mécanisme de régulation des gènes, l'action des enzymes, la manière dont les hormones transmettent des messages aux cellules et le fonctionnement du système immunitaire, mais aussi, et de plus en plus, pour mettre au point de nouveaux médicaments.

La méthode traditionnellement utilisée pour déterminer la structure tridimensionnelle d'une protéine est la radiocristallographie. Alliant une haute technicité à des procédés sophistiqués, cette méthode exige d'abord — et c'est généralement la condition la plus difficile à satisfaire — l'obtention d'un cristal protéique de bonne qualité. Or, si les méthodes permettant de produire les importantes quantités de protéine pure nécessaires pour tenter la cristallisation ont beaucoup progressé, créer les conditions propices à la formation de cristaux demeure une entreprise encore largement empirique. Il faut souvent des mois, voire des années, pour obtenir un cristal d'assez bonne qualité pour pouvoir passer à l'étape suivante, consistant à le bombarder de rayons X sous différents angles. C'est en étudiant le spectre de diffraction des rayons X ayant traversé le cristal que l'on peut déterminer l'agencement tridimensionnel des atomes de la molécule protéique. Ce procédé rien moins que simple

a été grandement accéléré par les avancées des technologies et méthodes informatiques qu'il fait intervenir.

La détermination des structures de protéines a également fait de grands progrès par la récente introduction d'une application perfectionnée de la résonance magnétique nucléaire, en remplacement de la radiocristallographie. Malgré les contraintes qu'elle impose sur le plan technique, cette méthode d'étude, qui s'applique à la protéine en solution, permet d'éliminer les problèmes liés à l'obtention de cristaux. Toutefois, à la différence de la radiocristallographie, la résonance magnétique nucléaire n'est utilisable que pour l'étude de protéines relativement petites. Bien qu'on ait commencé par en douter, un certain nombre de comparaisons directes ont maintenant démontré que, pour l'essentiel, les protéines ont la même structure qu'elles soient en solution ou sous forme cristalline.

Un des secteurs de la recherche biologique ayant grandement bénéficié des avancées de l'étude des structures est celui de la régulation des gènes. On sait depuis des années que les protéines sont les « mains » qui actionnent les « commutateurs » activant et inactivant les gènes. Ces commutateurs sont constitués de courts segments d'ADN à proximité des gènes qu'ils commandent et l'on connaît dans bien des cas à la fois la séquence de nucléotides de l'ADN « commutateur » et la séquence d'acides aminés de la « main » de protéine qui l'actionne. Cette information unidimensionnelle ne permet pas, cependant, de comprendre avec précision comment le commutateur est actionné, car le mécanisme en jeu fait intervenir une interaction tridimensionnelle entre la double hélice de l'ADN et la protéine repliée. La structure tridimensionnelle de plusieurs complexes protéine-ADN a maintenant été élucidée, si bien qu'il est devenu possible de comprendre dans le détail comment ces éléments interagissent pour actionner les commutateurs (voir la figure I, planches en couleurs, p. vii). Ce n'est toutefois qu'un début car, dans la majorité des cas, les structures élucidées se limitent aux « doigts » de la main de protéine et au « bouton » du commutateur ; les recherches futures permettront de visualiser les structures complètes.

Il y a entre les protéines et l'ADN d'autres interactions vitales dont la compréhension est de la plus haute importance et qui commencent à être visibles en trois dimensions. Ainsi, les mécanismes très élaborés de la transcription et de la réplication de l'ADN font intervenir plusieurs protéines et enzymes qui, au fur et à mesure du déroulement de ces processus, forment divers complexes. La structure tridimen-

## LES PRIX NOBEL

Le prix Nobel est la plus prisée et la plus remarquable des nombreuses récompenses qui viennent tous les ans reconnaître et couronner les réalisations majeures de la science et de la médecine. Il est imparfait en ce que trois personnes seulement peuvent se partager, chaque année, chacun des prix accordés dans les différentes disciplines, alors que les grandes réalisations sont souvent le résultat de nombreuses contributions individuelles ; il concourt cependant, ne serait-ce que brièvement, à faire mieux connaître les travaux scientifiques au grand public, en même temps qu'à en accroître le prestige. Tout en rappelant que bien d'autres chercheurs très méritants auraient pu être les lauréats des prix Nobel décernés au cours des deux dernières années, nous signalons ci-dessous ceux dont la contribution aux sciences de la vie a été récompensée.

Deux physiologistes allemands se sont partagé en 1991 le prix Nobel de physiologie et médecine pour avoir mis au point une nouvelle technique d'étude des flux ioniques qui sont à la base de nombreux phénomènes biologiques. Les ions traversent les membranes biologiques par la voie de protéines membranaires formant des pores qui s'ouvrent et se ferment. Lorsque **Erwin Neher** et **Bert Sakmann** décidèrent d'essayer de mesurer le flux d'ions passant à travers un pore unique, les physiologistes n'étaient encore capables d'étudier que des populations de pores. Grâce à la technique qu'ils réussirent à mettre au point, le « *patch clamping* » — consistant à fixer hermétiquement un minuscule fragment de membrane à l'extrémité d'une pipette miniature reliée à des appareils de mesure électroniques —, il est devenu relativement facile de mesurer le flux d'ions qui traverse un pore.

La grande importance de la découverte des kinases — enzymes qui activent d'autres enzymes en leur ajoutant un groupe phosphate — a été reconnue par l'attribution du prix Nobel de physiologie et médecine de 1992 aux biochimistes américains **Edwin Krebs** et **Edmond Fisher**, qui avaient identifié une kinase intervenant dans le fonctionnement des muscles. Depuis lors, des centaines de kinases impliquées dans une foule de phénomènes métaboliques différents ont été découvertes.

sionnelle de certains de leurs composants actifs a été récemment élucidée. L'une des sous-unités d'une enzyme qui joue un rôle essentiel dans la réplication de l'ADN bactérien s'est par exemple révélée être une protéine de forme annulaire. La partie centrale évidée de l'anneau est juste de la bonne taille pour que la double hélice de l'ADN puisse s'y

loger — ce qui corrobore l'idée, issue de l'expérimentation biochimique, que l'enzyme fait fonction de collier de fixation ajustable de l'ADN.

### *La transcription de l'ARN et le SIDA*

La transcriptase inverse est une autre enzyme largement étudiée qui interagit avec les acides nucléiques. Alors que le mécanisme de transcription normal produit de l'ARN messager à partir d'une matrice d'ADN, cette enzyme synthétise de l'ADN à partir d'une matrice d'ARN. La transcriptase inverse fait l'objet d'études intensives, car c'est par ce mécanisme que le virus de l'immunodéficience humaine (VIH) se fixe dans les cellules humaines. Constitué d'ARN, le génome du VIH ne peut être intégré directement à l'ADN humain ; il faut d'abord qu'il soit converti en ADN viral équivalent. La transcriptase inverse qui se charge de cette tâche est une enzyme du VIH et non de l'être humain : elle constitue donc une cible idéale pour les traitements du SIDA. L'AZT, le premier médicament anti-SIDA, est du reste, comme la plupart des autres médications à l'étude, un inhibiteur de la transcriptase inverse.

Il n'est donc pas surprenant que l'on se soit mis en devoir d'élucider la structure tridimensionnelle de la transcriptase inverse. Après plusieurs essais infructueux d'obtention de cristaux suffisamment parfaits, cette structure a finalement été mise en évidence en 1992 par le professeur Tom Steitz et son équipe<sup>1</sup>. Cette découverte a été éclairante tant pour ceux qui s'intéressaient principalement au mode d'action de l'enzyme — celle-ci synthétise l'ADN le long de la matrice d'ARN en même temps qu'elle dégrade cette dernière — que pour ceux dont le souci majeur était de produire des substances anti-SIDA plus actives. A partir du moment où l'on connaît avec précision les interactions tridimensionnelles en jeu dans les fonctions de la transcriptase inverse, il devrait, en théorie, être possible de concevoir et de synthétiser des médicaments capables de bloquer très efficacement ces fonctions, et la mise en pratique de la théorie devrait permettre de produire des moyens de traitement plus efficaces et ayant moins d'effets secondaires que l'AZT par exemple.

Un raisonnement analogue sous-tend le vif intérêt porté à la structure d'autres protéines du VIH et en particulier à la protéase, enzyme utilisée par le virus pour produire certains de ses composants à partir de précurseurs de plus grande taille. L'élucidation de la structure tridimensionnelle de la protéase du VIH par radiocristallographie a été suivie de

fiévreuses tentatives d'exploitation de cette information pour mettre au point des substances inhibitrices de l'enzyme. On estime qu'à l'heure actuelle il a été défini au moins 100 structures tridimensionnelles de complexes où des substances médicamenteuses pourraient interagir avec la protéase, même si beaucoup n'ont pas encore vu le jour parce qu'elles ont été conçues par des sociétés pharmaceutiques qui entendent les dissimuler au moins temporairement à leurs concurrents. Cependant, aucun médicament réellement prometteur n'est encore apparu.

### *Les récepteurs cellulaires*

Un autre secteur important où les recherches structurales ont abouti récemment à des réalisations décisives concerne les récepteurs insérés dans les membranes de la surface des cellules qui servent de capteurs des ligands chimiques de l'environnement. Dans le cas d'organismes unicellulaires, les ligands sont, par exemple, les substances nutritives vers lesquelles ces organismes se déplacent ; dans le cas d'organismes pluricellulaires, les ligands sont généralement des hormones ou facteurs de croissance qui sont transportés par le sang ou d'autres liquides organiques, jusqu'aux cellules ou organes auxquels ils sont destinés. Les chercheurs en pharmacologie s'intéressent également à ces structures parce qu'elles constituent des cibles de choix pour les médicaments. Mais, sur un plan plus fondamental, les chercheurs s'intéressent aussi beaucoup à la détermination des mécanismes par lesquels l'interaction entre les récepteurs — qui sont en général des protéines — et leurs ligands — dont certains sont également des protéines — induit des modifications biochimiques et comportementales dans les cellules porteuses des récepteurs. Les transformations intracellulaires induites par ce phénomène de transduction de signaux sont amplement documentées. Cependant, on ne pourra comprendre le mécanisme qui les déclenche tant qu'on ne disposera pas d'informations structurales qui commencent tout juste à être mises au jour.

Un obstacle de taille à l'élucidation de la structure tridimensionnelle des récepteurs tient à ce que, à l'état naturel, ils sont partiellement incrustés dans une membrane à forte teneur lipidique. Il est très difficile de les extraire sans les endommager pour les placer dans une solution en vue de leur étude par résonance magnétique nucléaire ou cristallisation. Fort heureusement, les parties des récepteurs qui s'attachent aux ligands ne sont pas situées à l'intérieur de la membrane, mais font saillie à sa surface extérieure et semblent se

1. Université Yale, États-Unis d'Amérique.

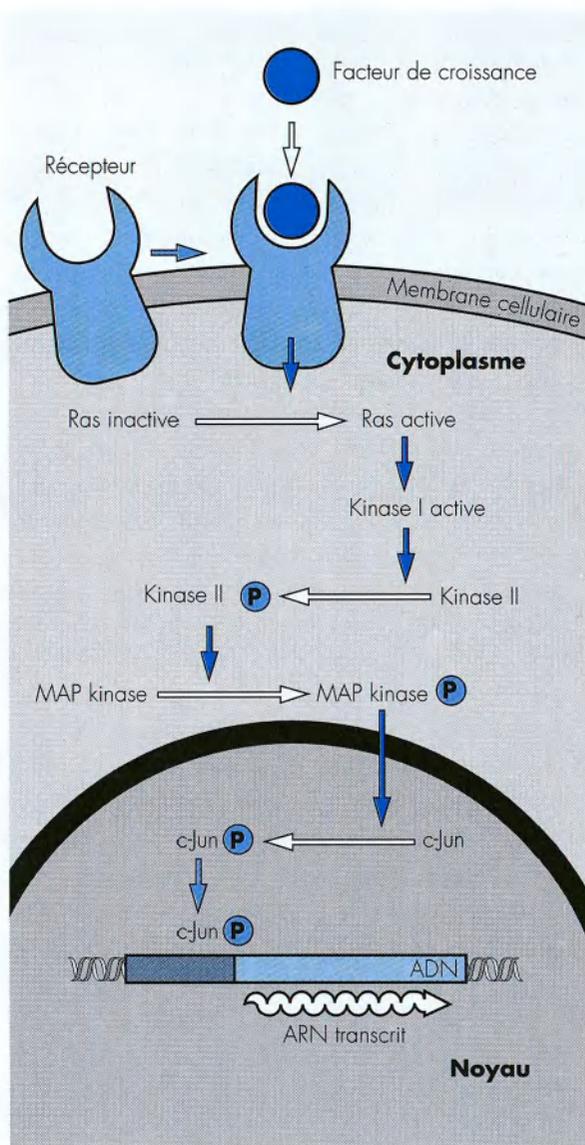
comporter dans une grande mesure comme des protéines solubles. Les structures des régions fixatrices de ligands de deux récepteurs ont été déterminées en 1992. Il s'agit dans le premier cas du récepteur qui, à la surface de certaines bactéries, se lie avec un acide aminé, l'aspartate, et permet ainsi le déplacement de la bactérie vers la source de cet acide aminé. La structure en question a été élucidée par le professeur Sung-Hou Kim et ses collègues<sup>2</sup>. Quant au deuxième récepteur, c'est celui de l'hormone de croissance humaine : la structure en a été dévoilée par une équipe de chercheurs dirigée par le docteur Tony Kossiakoff<sup>3</sup>. Dans chaque cas, les structures mises au jour concernent d'une part le récepteur isolé et, d'autre part, le récepteur attaché à son ligand. On possède ainsi la première information concrète sur la nature des changements induits dans la structure de récepteurs par la fixation de ligands.

Entre autres résultats essentiels, ces études ont fourni la première représentation claire de la manière dont une molécule du ligand peut s'attacher à deux molécules de son récepteur (voir la figure J, planches en couleurs, p. viii). Deux faces distinctes du ligand — en l'occurrence l'hormone de croissance humaine — sont à l'évidence impliquées, mais, chose surprenante, la différence entre les sites auxquels elles se fixent sur les deux molécules réceptrices est apparemment minime. Alors que les paires de molécules réceptrices s'associent faiblement en l'absence de l'hormone, leur appariement est fortement favorisé par sa présence. C'est cet appariement qui provoque la transduction du signal hormonal à l'intérieur de la cellule. Il entraîne très probablement des altérations structurales des parties des deux molécules réceptrices qui sont situées soit à l'intérieur de la membrane soit, surtout, à l'intérieur de la cellule. Ce point reste toutefois à élucider car, pour les raisons déjà exposées, la structure mise en évidence ne concerne que la région du récepteur qui est extérieure à la cellule.

### LES SIGNAUX

Quelle que soit la nature exacte des modifications structurales de la partie intracellulaire des récepteurs induites par la fixation de ligands sur la partie extracellulaire, elles ont pour résultat immédiat de déclencher plusieurs phénomènes à l'intérieur de la cellule. La connaissance de ces phénomènes, désignés collectivement par l'expression « transduction de signaux », s'est enrichie au cours des dernières années de nouvelles découvertes accompagnées de progrès conceptuels.

FIGURE 1  
CASCADE DE KINASES



La liaison d'un facteur de croissance à son récepteur à la surface d'une membrane cellulaire peut déclencher toute une série de phénomènes à l'intérieur du cytoplasme cellulaire, et notamment une succession de phosphorylations par des enzymes kinases, aboutissant à la transcription d'un gène dans le noyau de la cellule.

Ⓟ représente un groupe phosphate.

2. Université de Californie à Berkeley, États-Unis d'Amérique.  
3. Genentech, Californie, États-Unis d'Amérique.

Le vif intérêt porté depuis peu à la transduction de signaux tient en grande partie à ce que la perturbation de l'une quelconque de ses phases peut contribuer à la formation de tumeurs malignes. Des données toujours plus nombreuses montrent que l'apparition de cancers est souvent associée à des mutations des gènes qui codent les protéines participant à la transduction de signaux. Il est probable que des mutations de plusieurs gènes sont nécessaires.

En fait, les phénomènes associés à la transduction de signaux comportent souvent l'addition ou la soustraction de groupes phosphates aux protéines, modification qui en active ou inactive les fonctions. Ce mécanisme est connu de longue date et on a depuis longtemps des preuves de l'existence et de la fonction des enzymes kinases qui ajoutent des phosphates aux protéines au cours de la transduction de signaux. Les parties des récepteurs qui se trouvent à l'intérieur des cellules elles-mêmes manifestent d'ailleurs souvent une activité kinase qui se déclenche lorsqu'un ligand se fixe à la position extracellulaire du récepteur. On a également identifié plus récemment beaucoup d'enzymes phosphatases, qui enlèvent des phosphates aux protéines.

L'exploration de deux autres pistes de recherche voisines s'est révélée particulièrement éclairante. Premièrement, on a appris récemment beaucoup de choses sur un certain type de protéine qui assure la liaison entre la partie interne des récepteurs activés et d'autres protéines dans le cadre du mécanisme de transduction de signaux. Ces protéines de liaison sont à bien des égards très variables, mais possèdent toutes une caractéristique commune : la présence de ce que l'on a appelé un domaine SH2, indispensable pour que la liaison s'accomplisse. Les récepteurs qui sont liés à leurs partenaires par les protéines contenant du SH2 sont invariablement ceux dont la région intracellulaire possède une fonction kinase ; quant aux partenaires, ils font partie d'une gamme d'enzymes qui servent à la transmission du signal vers sa destination finale.

La seconde voie de recherche a révélé l'existence de toute une cascade d'enzymes de phosphorylation qui, d'après ce que l'on sait actuellement, assureraient les relais entre la fixation du ligand à la surface de la cellule jusqu'à l'aboutissement de nombreuses formes de transduction de signaux, à savoir l'interruption ou l'activation de la transcription génique. Un exemple relativement bien caractérisé en est la cascade de trois kinases qui se trouvent mises en œuvre lorsqu'un facteur de croissance se lie à son récepteur à la surface de la cellule (fig. 1). Le récepteur est lui-même

une kinase dont l'activation entraîne très vite à son tour celle d'une protéine appelée Ras. Il semble que cela amène, d'une manière ou d'une autre, la première des kinases de la cascade à déclencher une phosphorylation et, par là même, à activer la seconde kinase qui fait de même pour la troisième kinase ou MAP kinase. Enfin, la MAP kinase entraîne la phosphorylation d'une protéine appelée c-Jun, laquelle fait partie d'un complexe qui se lie à certains gènes pour les activer. Une contribution majeure a été apportée à ce domaine de recherche par le professeur Edwin Krebs<sup>4</sup>, qui a reçu en 1992 le prix Nobel pour avoir fait œuvre de pionnier dans l'étude de la phosphorylation des protéines (voir p. 229). Il existe des indices croissants de l'intervention de cascades très comparables dans les cellules d'autres organismes, allant de levures à des mammifères. A l'heure actuelle, il ne fait guère de doute que ce type de mécanisme a été préservé tout au long de l'évolution et s'est adapté de manière à opérer la transduction de toute une gamme de signaux vers des points de destination finale également très divers.

## DISRUPTIONS GÉNIQUES

L'étude des organismes mutants a toujours été la source de nombreuses découvertes biologiques. Ces organismes sont le résultat de mutations aléatoires qui se sont produites soit spontanément — en dehors de toute intervention humaine — soit en présence d'agents mutagènes. Des techniques récentes permettent désormais d'éliminer pour l'essentiel le rôle du hasard et de faire muter n'importe quel gène sélectionné. Ces techniques, appelées « disruptions géniques », ont d'abord été mises au point sur des organismes simples, mais peuvent maintenant être pratiquées sur des animaux de laboratoire communs et des végétaux. La technique standard (fig. 2) élaborée pour la souris consiste d'abord à réaliser la disruption d'un gène dans une cellule prélevée sur un très jeune embryon et à introduire cette cellule dans un autre très jeune embryon murin, à partir duquel se développera une souris chimérique. Chez cette chimère, de nombreuses cellules, y compris certaines cellules germinales (spermatozoïdes ou ovules selon le sexe de la souris), seront dépourvues du gène en question. Cela n'aura généralement pas d'effets graves chez la souris en question, mais l'accouplement de chimères peut produire des descendants dont tous les tissus seront dépourvus des deux exemplaires du gène et qui manifesteront tous les effets de la disruption génique.

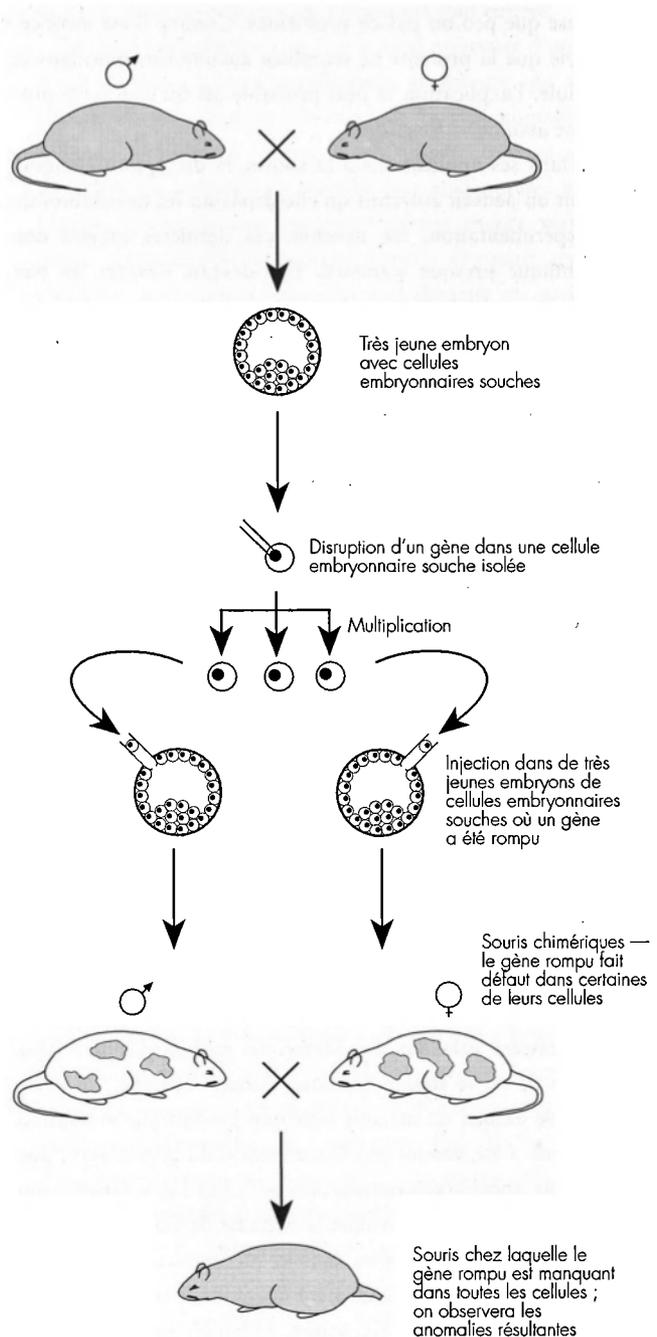
4. Washington University, Seattle, États-Unis d'Amérique.

La technique de la disruption génique a deux grandes applications : la première consiste à créer des modèles animaux de pathologies humaines provoquées par une mutation génétique héritée, et la seconde à déterminer la fonction d'un gène.

Un exemple récent de recherche de la fonction d'un gène par disruption génique illustre l'utilité de cette technique et le type d'information qu'elle permet d'obtenir. Des études de la mouche du vinaigre ou drosophile ont abouti à l'identification d'un certain nombre de gènes qui jouent un rôle dans la segmentation très marquée du corps de cet insecte. L'un de ces gènes est appelé « *wingless* » car, en son absence, les mouches se développent sans ailes. Un gène analogue à *wingless* ayant été ultérieurement isolé chez la souris sur la base d'une similitude des séquences d'ADN, on s'est demandé ce qu'il faisait dans cet organisme. Les premiers éléments de réponse ont été fournis par l'étude des tissus murins et des étapes où ce gène, dit *Wnt-1*, était activé. Il est apparu clairement que le gène n'était actif que dans des régions spécifiques du système nerveux central, pendant le développement de celui-ci. Malheureusement, cela n'éclairait guère la fonction effective de la protéine *Wnt-1* fabriquée sous l'action du gène.

L'analyse — effectuée par le Dr Andy MacMahon et ses collègues<sup>5</sup> — du développement du système nerveux central chez des souris privées du gène *Wnt-1* par disruption génique allait être beaucoup plus fructueuse. Cette étude a montré que, chez les embryons issus de souris chimeriques qui sont dépourvus des deux gènes *Wnt-1*, certaines régions du système nerveux central présentent de graves anomalies du développement, et que les adultes manifestent des symptômes suggérant un fonctionnement cérébelleux déficient. L'absence du gène ne semblant pas produire d'anomalies dans la totalité des régions où le gène normal participe au développement du système nerveux central, on en déduit que d'autres gènes peuvent, dans certaines régions, se substituer au *Wnt-1* manquant. Les efforts faits pour déterminer la fonction d'un gène se trouvent parfois mis en échec, soit parce que le gène manquant joue un rôle si important que les organismes qui en sont privés meurent au stade embryonnaire, rendant difficile l'étude détaillée de sa fonction, soit parce que, comme nous venons de l'expliquer, d'autres gènes sont aptes à remplacer celui qui fait défaut. La raison en est, entre autres, que de nombreux systèmes de sauvegarde se sont développés au cours de l'évolution précisément pour protéger l'organisme contre la perte d'un gène

FIGURE 2  
ILLUSTRATION SCHEMATIQUE DE LA PRODUCTION  
D'ANIMAUX PRIVÉS D'UN GÈNE PAR DISRUPTION GÉNIQUE



5. Roche Institute of Molecular Biology, Nutley, New Jersey, États-Unis d'Amérique.

d'une importance vitale. C'est ce qui ressort de plus en plus des expériences où un gène codant une protéine importante est inactivé expérimentalement, ou même éliminé d'une cellule. Alors que l'on pourrait s'attendre à ce que la cellule ne puisse survivre, on constate parfois qu'en fait cela ne lui cause que peu ou pas de problèmes. Comme il est inconcevable que la protéine ne remplisse aucune fonction dans la cellule, l'explication la plus probable est qu'une autre protéine assume sa fonction.

Dans ses applications à la souris, la disruption génique, dont on pensait autrefois qu'elle dépassait les possibilités de l'expérimentation, est devenue ces dernières années une technique presque standard. Elle devrait s'avérer un très puissant moyen d'éclairer quelque peu la nature de la fonction des gènes dont un nombre croissant est identifié par le simple séquençage de l'ADN. On notera toutefois que cette technique ne fournit pas encore d'informations précises sur la fonction des gènes. Le fait que les souris dépourvues du gène *Wnt-1* présentent des anomalies du système nerveux central ne permet guère, en soi, que de réduire le champ des hypothèses. D'autres données laissent penser que la protéine est une espèce de molécule signalisatrice qui est sécrétée par les cellules qui la produisent et fournie à d'autres cellules. Mais les expériences de disruption génique ne permettent pas de vérifier aisément ces suppositions.

L'utilité de ces expériences apparaît plus clairement lorsqu'elles sont appliquées à la production de modèles animaux de maladies et permettent l'essai de thérapies éventuelles. C'est ainsi que l'identification précise du gène mutant chez les personnes atteintes de mucoviscidose a permis de provoquer la disruption du gène équivalent chez des souris. Les animaux présentent alors beaucoup, mais non la totalité, des caractéristiques des jeunes patients souffrant de mucoviscidose : leurs intestins sont obstrués, leur appareil respiratoire présente des altérations pathologiques et leur durée de vie se trouve considérablement abrégée. Un autre modèle animal de maladie humaine produit par disruption génique a été obtenu par l'inactivation du gène codant une enzyme appelée glucocérébrosidase. Chez l'être humain, un défaut de ce gène provoque la maladie de Gaucher, la plus fréquente des pathologies dans lesquelles certaines substances, au lieu d'être normalement dégradées par des enzymes, s'accumulent dans les lysosomes. Parmi les enfants qui héritent de gènes de la glucocérébrosidase défectueux, les plus gravement touchés meurent de troubles neurologiques peu après la naissance ; les souriceaux chez lesquels ces gènes

sont inactivés présentent un certain nombre de symptômes suggérant un dysfonctionnement du système nerveux et meurent dans les vingt-quatre heures suivant leur naissance.

Le traitement expérimental le plus radical que l'on puisse tenter chez des animaux présentant un gène défectueux est la thérapie génique, qui consiste à pourvoir ces animaux d'une version pleinement fonctionnelle du gène en question. L'objectif visé est généralement d'introduire cette version du gène dans les cellules ou les tissus les plus affectés par son absence — par exemple le muscle en cas de myopathie ou les cellules épithéliales en cas de mucoviscidose. Le docteur Christopher Higgins<sup>6</sup> et plusieurs chercheurs d'Oxford et d'ailleurs au Royaume-Uni ont montré tout dernièrement que la thérapie génique guérissait au moins quelques-uns des symptômes manifestés par des souris chez lesquelles une disruption génique avait provoqué une maladie analogue à la mucoviscidose. La thérapie a consisté à introduire dans la trachée des souris une version du gène humain construite spécialement pour en favoriser l'intégration dans les cellules des voies respiratoires et des poumons. Les données obtenues ont montré que le gène avait été intégré et fonctionnait. Plus important encore, le transport anormal de chlorures observé dans les cellules épithéliales des souris était redevenu normal. Les anomalies constatées étant très semblables à celles qui sont la principale cause du décès précoce des patients atteints de mucoviscidose, on a très bon espoir de pouvoir appliquer utilement la thérapie génique à ces malades. De telles expériences ont déjà été autorisées et sont en cours. Mais les premières tentatives, encore hautement expérimentales, de traitement génique d'une maladie frappant les enfants ont été faites chez quelques patients présentant une carence en adénosine désaminase. Ce déficit enzymatique, incompatible avec la vie mais très rare, résulte de défauts héréditaires du gène codant l'adénosine désaminase, entraînant chez ces malades de graves déficiences du système immunitaire. Les essais en cours tendent à vérifier si l'introduction d'une version fonctionnelle du gène dans les cellules du sang de ces malades se traduira par la production d'enzymes en quantité suffisante pour rendre à leur système immunitaire une efficacité raisonnable.

#### *La cartographie des gènes*

Pour pouvoir mettre en œuvre une thérapie génique, quelle qu'elle soit, il faut évidemment disposer du gène en cause. Or, dans beaucoup de maladies qui résultent entièrement ou en partie de défauts ou de variations géniques, le ou les

6. Institut de médecine moléculaire, Université d'Oxford, Royaume-Uni.

gènes dont il s'agit n'ont pas encore été isolés. Même lorsqu'on souhaite simplement déterminer la cause d'une maladie d'origine génétique, sans envisager de thérapie génique, l'identification du ou des gènes défectueux reste la voie de recherche la plus directe. C'est ce qui a conduit, entre autres besoins, à lancer le très ambitieux plan de séquençage intégral du génome humain, qui doit permettre de recenser tous les gènes, alors même qu'ils ne constituent qu'une faible fraction de l'ensemble de l'ADN.

Un projet complémentaire mais beaucoup plus modeste est celui qui consiste à dresser la carte de l'ensemble du génome humain. La possession d'une carte génétique complète rendrait relativement simple l'identification des gènes associés à telle ou telle maladie, grâce à une série de marqueurs de référence qui pourraient guider avec précision la recherche d'un gène inconnu. Les marqueurs devront être disposés dans un ordre précis sur chacun des chromosomes, dont l'ADN constitue le génome complet, la distance entre deux marqueurs successifs étant bien définie. Plus cette distance est courte, plus le domaine où le gène doit être recherché est délimité avec précision.

L'identification d'une nouvelle et puissante série de marqueurs en 1989 a grandement amélioré la qualité des cartes génétiques, permettant à Jean Weissenbach et à ses collaborateurs<sup>7</sup> d'établir en 1992 la carte de 800 marqueurs du génome humain. La distance entre ces marqueurs représente encore l'équivalent de 5 à 10 millions de bases d'ADN, de sorte qu'isoler un gène particulier demeure une formidable tâche. Toutefois, des cartes où les marqueurs ne seront distants que de 1 à 2 millions de bases sont déjà en vue. Lorsqu'elles seront disponibles, l'étude des maladies humaines qui, tels le diabète et l'hypertension, sont régies par plusieurs gènes devrait être grandement facilitée.

## ADDITION DE GÈNES AUX VÉGÉTAUX

La cartographie et la manipulation des gènes sont poursuivies de façon aussi active par les phytogénéticiens que par les chercheurs qui étudient l'être humain et d'autres mammifères. La principale forme de manipulation appliquée aux végétaux est l'« addition » ou insertion de gènes, technique plus ancienne et plus simple que la disruption génique. Alors que pour extraire un gène il faut pouvoir le cibler précisément — autant dire trouver une aiguille dans une botte de foin —, l'addition d'un gène supplémentaire aux chromosomes d'une plante (ou d'un animal) est une tâche beaucoup

moins ardue, car elle n'exige aucun ciblage précis. Cette technique est utilisée aussi bien pour étudier les fonctions de certains gènes que pour en créer des variants « utiles ». Depuis quelques années, elle sert principalement à modifier des végétaux au service de la bio-industrie, des sélectionneurs et, dans certains cas, de l'humanité tout entière.

De toutes les plantes que l'on a ainsi pourvues d'un gène supplémentaire, c'est probablement la tomate qui a fait l'objet de l'exploitation commerciale la plus poussée. Les tomates mûres sont molles et s'abîment aisément. C'est pourquoi les tomates qui doivent être transportées sur de longues distances sont souvent récoltées encore vertes et dures : bien qu'elles continuent à mûrir et rougir après la cueillette, ces tomates sont alors loin d'égaliser en qualité et en saveur celles qui ont mûri sur pied. De plus, les tomates mûres ne tardent pas à devenir trop mûres et à acquérir un goût désagréable ; autrement dit, leur durée de conservation en magasin est trop brève.

Les biotechniciens ont donc cherché les moyens de modifier les plants de tomates de telle sorte qu'il soit possible de laisser aux fruits plus de temps pour mûrir avant la récolte et qu'une fois mûrs ils conservent plus longtemps leurs qualités gustatives. Leur but était de déterminer quelles enzymes interviennent dans les mécanismes du mûrissement et de doter les plants de gènes supplémentaires propres à modifier ces mécanismes. Plusieurs approches différentes ont été suivies : la plus sophistiquée devait aboutir à la mise sur le marché des États-Unis d'Amérique, au cours de l'année 1993, de la tomate à la saveur préservée « Flavr-Savr ».

L'une des enzymes qui agissent sur le mûrissement de la tomate est la polygalacturonase. Comme toutes les autres enzymes ou protéines, la polygalacturonase est synthétisée conformément aux instructions transportées du gène au ribosome par l'ARN messager. On peut, en théorie du moins, inhiber ce processus en « détournant » le messager, la méthode scientifique la plus efficace pour ce faire consistant à provoquer l'appariement de l'ARN messager avec un ARN complémentaire ou « antisens » (fig. 3). Sur le plan fonctionnel, le résultat équivaut — en moins absolu — à celui de la disruption génique. Les biotechniciens ont appris à synthétiser des gènes producteurs d'ARN antisens et à les faire fonctionner chez des végétaux. Les plants de tomate « Flavr-Savr » contiennent un gène ajouté, codant l'ARN antisens qui s'associe à l'ARN polygalacturonase pour bloquer la production de cette enzyme. D'après la société américaine de biotechnologie qui a mis au point ces tomates,

7. Généthon, Paris, France.

## THÉRAPIE GÉNÉRIQUE ET BIOÉTHIQUE

Toutes les procédures cliniques qui sont des innovations radicales tendent à soulever des problèmes éthiques, mais c'est plus particulièrement le cas de la thérapie génique. Si cela s'explique en partie par le fait qu'elle diffère fondamentalement d'autres procédures, cela tient aussi à ce que ses buts ne peuvent être entièrement dissociés de ceux de l'eugénisme — étude des moyens d'améliorer l'espèce humaine en favorisant la sélection des individus qui possèdent des gènes considérés comme désirables. Cette entreprise, menée par les apôtres de l'eugénisme, s'est aussi traduite par la suppression ou l'extermination d'individus présumés dotés de gènes indésirables.

Pour considérer les aspects éthiques de la thérapie génique telle qu'on la conçoit actuellement, il est bon de faire une distinction selon que la thérapie est appliquée aux cellules somatiques ou aux cellules germinales. La grande différence tient à ce que dans le premier cas on se limite à essayer de corriger le défaut responsable d'une maladie génétique chez le sujet lui-même, tandis que dans le second on agit non seulement sur le sujet mais aussi sur sa descendance.

Seule la thérapie somatique a été tentée à ce jour, le consensus étant qu'elle est en général moralement acceptable. Les premiers essais sont effectués chez des sujets gravement atteints d'une maladie mortelle contre laquelle il n'existe aucun autre traitement efficace. Cela en soi rend les choix éthiques relativement aisés. Toutefois, les thérapies géniques sont sans doute appelées à être étendues à des pathologies moins menaçantes. Leur objet se limitera cependant à améliorer l'espérance et la qualité de vie des malades, comme c'est le cas de n'importe quelle autre forme de traitement. Tant qu'elles demeurent sans risques ni effets secondaires graves, elles ne susciteront pas d'objection éthique sérieuse. Cependant, des objections sont parfois élevées en ce qui concerne les cas où, pour des raisons techniques, on est conduit à introduire dans l'organisme, en même temps que le gène ayant une fonction thérapeutique, un gène induisant une résistance à certains antibiotiques. L'emploi de cette procédure risque en effet de contribuer à la propagation de la résistance aux antibiotiques en général. Il s'agit bien là d'un problème éthique, mais mineur, eu égard aux nombreuses voies beaucoup plus certaines d'extension de la résistance aux antibiotiques qui existent par ailleurs, et qui sera réglé dès que la technique en question pourra être remplacée par une autre.

Appliquée à la lignée germinale, la thérapie génique soulève des problèmes éthiques beaucoup plus délicats. Son but médical n'est pas tant de traiter la maladie génétique dont serait atteint le sujet que de la prévenir, en corrigeant ou en palliant les défauts génétiques des spermatozoïdes, des ovules et des embryons. En théorie, ce procédé présente l'avantage supplémentaire d'empêcher la transmission de ces défauts aux générations futures. Mais il soulève aussi de graves problèmes moraux,

du fait que, au lieu de concerner un seul individu, la thérapie germinale influe sur les générations à venir et ce de manière en principe irréversible.

L'un de ces problèmes est de savoir si nous avons ainsi le « droit » d'altérer le patrimoine génétique des générations futures. Un autre tient à ce que cette thérapie sera nécessairement appliquée sans le consentement éclairé du malade, en violation de l'un des principes fondamentaux de la pratique médicale. Il est vrai que, dans le cas d'un enfant, le consentement éclairé des parents peut se substituer à celui du malade lui-même, mais, en l'occurrence, la décision devra être prise avant ou très peu de temps après la conception et s'appliquera bien entendu non seulement à l'enfant à naître mais aussi à tous ses descendants.

L'application de la thérapie germinale à des pathologies potentiellement graves susciterait sans doute beaucoup moins de préoccupations d'ordre éthique si l'on pouvait être sûr qu'elle n'ait pas à terme d'effets secondaires imprévus ou d'autres conséquences indésirables. Mais le risque d'effets secondaires à terme existe incontestablement dès lors que la thérapie génique consiste à ajouter un « bon » gène pour pallier le problème posé par le gène défectueux, car l'addition de gènes est un procédé imprécis. Cependant, quand on aura mis au point des techniques fiables permettant de remplacer le gène défectueux par une « bonne » copie de celui-ci, les risques seront considérablement réduits.

Toute tentative éventuelle de recours à la thérapie germinale pour obtenir chez l'être humain certaines caractéristiques « désirables », et non pour prévenir la maladie, poserait un problème éthique plus fondamental. On peut imaginer, par exemple, que des parents de petite taille souhaitent ajouter à leurs cellules germinales un gène supplémentaire codant l'hormone de croissance afin que leurs enfants et petits-enfants aient une stature plus proche de la normale, ou encore que, dans l'hypothèse où l'on aurait identifié un gène accroissant l'intelligence, il y ait une demande générale d'introduction de copies de ce gène dans la lignée germinale. Il est compréhensible que la plupart des futurs parents souhaitent que leurs enfants et descendants à venir soient à tout le moins « normaux », ou même à certains égards supérieurs à la moyenne ; cependant, de nombreuses voix s'élèvent pour souligner que la définition de la « normale » est arbitraire et que la diversité est très importante pour l'espèce humaine. D'ailleurs, la taille et, *a fortiori*, l'intelligence sont la résultante complexe de facteurs à la fois génétiques et environnementaux, de sorte qu'il est très difficile de prédire l'effet final de l'application d'une thérapie génique à la lignée germinale. Essayer de modifier le patrimoine génétique naturel de l'humanité pour des raisons autres que la prévention de maladies graves est donc extrêmement discutable du point de vue éthique.

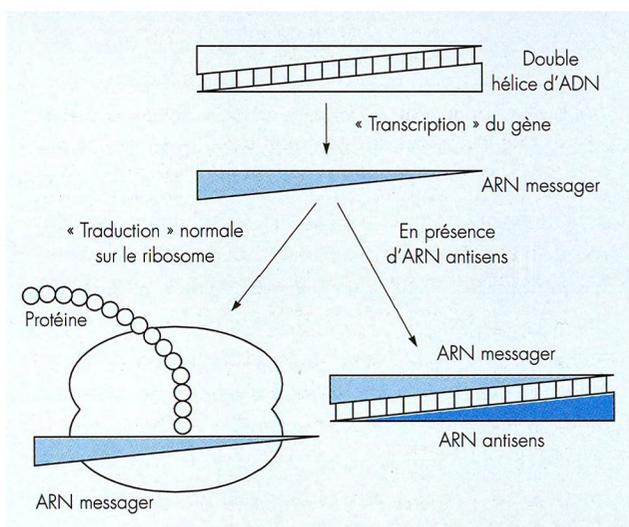
celles-ci peuvent mûrir plus longtemps sur pied et ont meilleur goût que les autres.

La deuxième cible assignée à l'ARN antisens chez la tomate est l'ARN messenger qui code une enzyme intervenant dans la synthèse de l'éthylène, substance dont le rôle est important dans le processus naturel de maturation du fruit. L'équipe de chercheurs du laboratoire du professeur Don Grierson<sup>8</sup> a montré que cette approche retardait sensiblement le mûrissement. Une autre méthode utilisée avec succès pour inhiber la production d'éthylène consiste à introduire dans les plants de tomates un gène bactérien qui code une enzyme détruisant l'un des composés précurseurs de l'éthylène. Les tomates qui proviennent de ces plants restent plus fermes que les tomates ordinaires pendant six semaines au moins.

Améliorer la fermeté et le goût des tomates de supermarché peut paraître, de la part des phytogénéticiens, un exploit quelque peu dérisoire ; mais d'autres plants n'ont pas tardé à emboîter le pas aux tomates. La résistance des végétaux aux insectes, aux virus et aux microbes pathogènes est une autre propriété d'intérêt plus général que les biotechniciens s'efforcent d'obtenir par addition génétique. Une des techniques consiste à ajouter à la plante un gène de la bactérie *Bacillus thuringiensis*, de manière à lui faire produire un composé bactérien dont la toxicité pour les insectes est connue de longue date. La toxine du *Bacillus* est d'ailleurs déjà largement utilisée comme insecticide agricole. L'utilisation de cet insecticide ne serait plus nécessaire si les plantes cultivées produisaient elles-mêmes la toxine en quantité suffisante pour être efficace. Cela pourrait présenter des difficultés, mais on a heureusement découvert récemment qu'une légère modification du gène bactérien accroissait fortement la quantité de toxine produite par les plants porteurs du gène en question. Quelques essais en plein champ ont déjà démontré que les végétaux contenant la toxine bactérienne présentaient la résistance espérée aux insectes prédateurs, et le coton sera vraisemblablement la première des plantes de culture dotées de cette résistance intrinsèque à être commercialisée.

Dans ce domaine, la technique la plus étudiée d'amélioration de la résistance des végétaux aux infections virales est celle qui consiste à incorporer aux plantes un gène provenant du virus lui-même. En effet, les végétaux qui produisent eux-mêmes la protéine de la coque du virus sont moins aisément infectés par celui-ci. Cette technique, essayée d'abord sur des plants de tabac qui ont acquis ainsi une

FIGURE 3  
MODIFICATION DE LA FONCTION D'UN GÈNE



Comment l'ARN antisens bloque l'expression de la fonction d'un gène : l'ARN messenger qui transporte les instructions du gène jusqu'au site de synthèse de la protéine dans la cellule est « détourné » par l'ARN antisens.

résistance au virus de la mosaïque, s'est révélée très largement efficace et a permis, par exemple, tout récemment encore, d'obtenir des papayes plus résistantes au virus de la maladie des taches annulaires.

Une autre procédure d'addition de gènes tend à modifier les plantes de manière à les rendre résistantes à des pathogènes microbiens multiples. Son principe est de commencer par déterminer quels sont les gènes de la plante qui sont naturellement activés pour défendre celle-ci contre la présence d'agents pathogènes, puis d'introduire dans la plante des exemplaires supplémentaires modifiés de ces gènes. La modification consistera par exemple à faire en sorte que la protéine protectrice soit produite en continu et non pas simplement lorsque la plante est attaquée, ou à augmenter considérablement la quantité de protéine protectrice produite en réponse à une agression. Ce type de technique commence tout juste actuellement à passer du stade de l'expérimentation en laboratoire à celui des essais en champ.

8. Université de Nottingham, Royaume-Uni.

Si les techniques d'addition génique ont pour la plupart été expérimentées d'abord sur la tomate, le tabac et la pomme de terre, les cibles visées sont surtout les céréales de base de l'alimentation telles que le riz, le blé et le maïs. Le succès a tardé à venir car, chez ces plantes de grande culture, les techniques d'addition de gènes déjà mises au point se sont révélées peu performantes et il a fallu en élaborer d'autres. La méthode la plus efficace à ce jour consiste à introduire directement les gènes dans le tissu végétal embryonnaire, soit en bombardant les cellules embryonnaires de microprojectiles contenant l'ADN, soit en soumettant les protoplastes à un « choc » électrique ou osmotique pour les rendre perméables à l'ADN. Dans l'un et l'autre cas, le nouveau gène est incorporé à certaines des cellules et sera conservé dans les plantes régénérées à partir de celles-ci. La mise en œuvre de ce type de technique a été couronnée de succès en 1988 pour le riz, en 1990 pour le maïs et en 1992 pour le blé. Une fois les techniques en place, l'efficacité de l'addition de gènes potentiellement utiles est testée sans tarder. C'est ainsi que Michael Koziel et ses collègues<sup>9</sup> ont déjà publié des données prouvant que l'addition du gène de *Bacillus thuringiensis* au maïs en réduit la vulnérabilité aux attaques de la pyrale, l'un de ses principaux ravageurs en Amérique du Nord et en Europe.

Les plantes dotées de gènes ajoutés sont encore assez peu nombreuses à être cultivées hors laboratoire. L'une des raisons en est que l'on craint que les gènes ajoutés ne passent par fécondation croisée dans des plantes sauvages étroitement apparentées aux variétés domestiques, transfert qui, à divers égards, pourrait être indésirable. La plupart des pays ont donc établi des réglementations visant à empêcher que les plantes dotées de gènes supplémentaires ne soient cultivées en extérieur avant d'avoir fait l'objet d'essais minutieux en laboratoire et à n'autoriser leur plantation à grande échelle en champ qu'après réalisation et approbation d'essais à petite échelle. Il faut aussi prendre le temps de s'assurer que l'addition d'un gène à une plante n'a sur elle aucun effet préjudiciable : il n'y aurait guère d'intérêt à obtenir des plants de riz hautement résistants aux pathogènes si leur culture ne devait produire que la moitié des rendements normaux. Malgré toutes ces contraintes, on estime que plus de 400 essais en plein champ de végétaux génétiquement modifiés ont été effectués en 1992, essentiellement en Amérique du Nord, en Europe et en Chine ; certaines de ces plantes devraient donc devenir d'utilisation courante d'ici peu.

Beaucoup d'autres suivront au fur et à mesure que l'on aura recours aux techniques du génie génétique pour modifier la composition chimique des végétaux et en accroître ainsi la valeur d'une manière ou d'une autre. Les amidons végétaux, par exemple, sont utilisés aussi bien par l'industrie chimique que par l'industrie alimentaire ; leur qualité et la quantité que l'on en peut tirer des plantes ont une incidence sur leur valeur. Un certain nombre de gènes codant des enzymes qui jouent un rôle dans la biosynthèse de l'amidon ont maintenant pu être isolés et l'on a commencé à produire des plantes chez lesquelles ces gènes sont soit inhibés, soit modifiés, ou auxquelles on a ajouté des gènes provenant d'autres végétaux ou de bactéries. Des expériences menées parallèlement tendent à changer la composition oléagineuse des graines de certaines plantes. Dans un cas, l'utilisation d'un ARN antisens a permis d'accroître considérablement la teneur en stéarates de l'huile de colza. D'autres procédures d'addition de gènes, qui ouvrent la voie pour l'avenir, ont permis de transformer des plantes en « fabriques » de composés médicalement ou industriellement utiles d'origine végétale. C'est ainsi que des plantes pourvues d'une paire de gènes bactériens nécessaires à la production d'un certain matériau polymère naturel, qui présente un intérêt commercial en tant que plastique biodégradable, peuvent fabriquer elles-mêmes de faibles quantités de polymères analogues, et que des plantes contenant des gènes extraits de cellules du système immunitaire de mammifères deviennent capables de produire des anticorps.

Il convient de mentionner que si les phytogénéticiens s'efforcent depuis longtemps d'« améliorer » le patrimoine génétique des espèces les plus recherchées, le recours aux techniques du génie génétique a souvent, pour diverses raisons, soulevé un tollé.

Les premières inquiétudes concernaient l'innocuité des procédures utilisées, du fait en particulier que les gènes ajoutés à une espèce étaient le plus souvent empruntés à une autre. Les protocoles de sécurité élaborés alors ont, depuis, été assouplis, car beaucoup de ces craintes se sont révélées sans fondement.

Les préoccupations les plus récentes ont plutôt trait à la perception de la procédure et de ses résultats, comme l'illustre le cas de la tomate « Flavr-Savr » dont il est question ci-dessus. Les consommateurs devraient en principe accueillir favorablement la mise sur le marché de tomates plus savoureuses, du moment que leur prix ne dépasse pas trop celui de tomates moins bonnes. Pourtant, leur acceptabilité a suscité

9. Unité de recherche en biotechnologie agricole de la société CIBA-GEIGY, Caroline du Nord, États-Unis d'Amérique.

aux États-Unis toute une controverse. Il semble en effet que les inquiétudes réelles à l'égard de l'utilisation élargie du génie génétique soient à l'origine des réticences d'un public mal informé au sujet des aliments résultant des manipulations génétiques. Les associations de consommateurs font pression sur l'industrie et le commerce agro-alimentaires pour que ces aliments soient interdits ou du moins étiquetés, et les entreprises sont prêtes à ne pas tenir compte des réalités plutôt que de risquer de perdre leur clientèle. L'argument le plus raisonné émis contre la tomate « Flavr-Savr » est qu'elle conserve un gène marqueur ayant servi à l'incorporation du gène qui influe sur le mûrissement et que ce gène marqueur risque d'être transféré à d'autres espèces ainsi que de réduire l'efficacité d'un antibiotique utilisé chez l'homme. Même si l'on parvenait à éliminer ces risques, il est peu probable que l'opposition quelque peu irrationnelle suscitée par les aliments ayant subi des manipulations génétiques puisse être finalement surmontée.

### RÉACTION AUX ANTIGÈNES

Les anticorps sont des produits essentiels du système immunitaire, qui reconnaissent les substances étrangères à l'organisme et conduisent à leur élimination, contribuant ainsi à limiter les effets des agents pathogènes. Si efficaces qu'ils soient dans de nombreuses situations, ils ne sont guère utiles lorsqu'il s'agit d'éliminer les cellules infectées par les pathogènes. Pour se débarrasser de celles-ci, le système immunitaire produit d'autres cellules capables de reconnaître et de tuer les cellules infectées. Ce processus de reconnaissance, qui implique une interaction entre des molécules situées à la surface des cellules immunitaires et des cellules infectées, a beaucoup progressé dernièrement.

Les cellules du système immunitaire qui interviennent dans ce processus sont appelées lymphocytes T (parce qu'elles dérivent du thymus), et les molécules à leur surface qui participent le plus directement à la reconnaissance des cellules infectées sont les récepteurs des lymphocytes T. Ces récepteurs reconnaissent en fait des fragments de protéines des agents pathogènes (fig. 4). Ces fragments — des peptides constitués d'une dizaine d'acides aminés — émergent à la surface des cellules infectées, où ils sont ancrés aux protéines CMH (« complexe majeur d'histocompatibilité »). (Ce nom a été donné à ces protéines lorsqu'on a découvert qu'elles devaient être similaires, d'un individu donneur à un individu receveur, pour qu'une greffe de tissu ou d'organe ne soit pas rejetée.)

FIGURE 4  
RECONNAISSANCE D'UN PEPTIDE

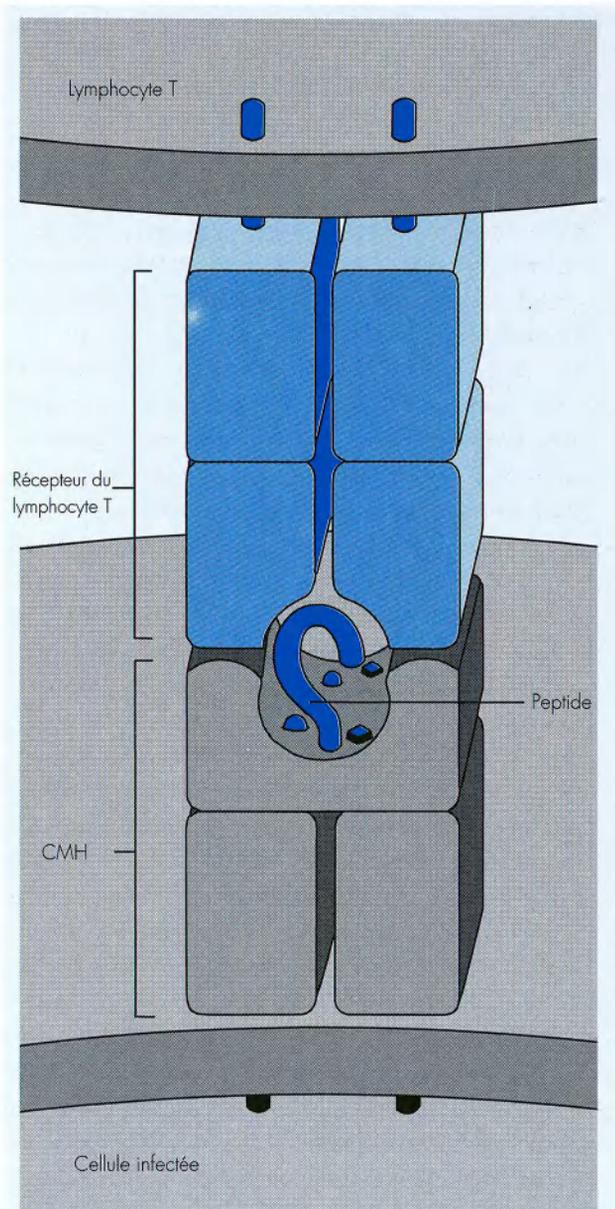


Illustration très schématique de l'interaction entre un récepteur de lymphocyte T présent à la surface du lymphocyte et un peptide ancré dans une molécule de CMH à la surface d'une cellule infectée par un pathogène.

Le Dr Hans-Georg Rammensee et ses collaborateurs<sup>10</sup> sont parvenus dernièrement, grâce à une analyse extrêmement fine des peptides pouvant être libérés chimiquement par des molécules du CMH hautement purifiées, à déterminer la taille et l'identité des peptides ancrés au CMH. Cette information a montré que certains acides aminés sont à peu près semblables dans tous les peptides — ce qui indique qu'ils interviennent dans l'ancrage des peptides au CMH — tandis que d'autres sont beaucoup plus variables. Une autre avancée importante a été réalisée lorsqu'une équipe de chercheurs dirigée par les docteurs Pamela Bjorkman et Don Wiley<sup>11</sup> a mis en évidence les premières structures tridimensionnelles claires de complexes CMH-peptide, montrant que les peptides courts s'insèrent exactement dans un sillon à la surface de la molécule du CMH. C'est ce sillon qui « fait face » au récepteur du lymphocyte T, permettant l'établissement du contact direct entre récepteur, peptide et CMH, qui joue un rôle central dans le mécanisme de reconnaissance.

Comment ces fragments de peptides du pathogène infectant une cellule se retrouvent-ils à la surface de celle-ci où ils forment un complexe avec le CMH ? Cette question a suscité bien des recherches, qui ont permis de comprendre de mieux en mieux, mais non d'élucider complètement, les multiples mécanismes en cause. La principale découverte est que les peptides atteignent la surface par deux voies différentes, correspondant à l'existence de deux types différents de molécules du CMH, dits de classe I et de classe II. Cette division est liée aux deux principaux endroits à l'intérieur de la cellule où se trouvent les protéines produites par les agents pathogènes.

Dans le cas des virus qui utilisent les mécanismes de la cellule infectée elle-même pour fabriquer davantage de protéines virales, ces protéines sont présentes dans le cytoplasme de la cellule, où elles sont fragmentées en peptides. Certains de ces peptides sont transportés dans le réticulum endoplasmique de la cellule, où ils forment un complexe avec les molécules du CMH de classe I qui sont prêtes à les recevoir. Une fois ce complexe formé, il est transféré à l'extérieur de la cellule. D'autres pathogènes, comme ceux responsables de la lèpre et de la tuberculose, soit se répliquent soit sont dégradés dans les vésicules intracellulaires. Dans un cas comme dans l'autre, certaines de leurs protéines sont fragmentées en peptides dans les vésicules et captées par les molécules du CMH de classe II qui traversent les vésicules au cours de leur migration vers la surface de la cellule.

La reconnaissance d'un complexe particulier peptide-CMH par un récepteur de lymphocyte T est hautement spécifique, en ce sens que les récepteurs revêtent des formes multiples et que seuls sont activés les lymphocytes T qui possèdent précisément la forme susceptible de reconnaître ce complexe particulier. Toutefois, un mode d'interaction très différent entre un récepteur de lymphocyte T, une molécule de CMH de classe II et une molécule d'un agent pathogène a été récemment mis en lumière. C'est en l'occurrence la protéine intacte — plutôt qu'un fragment peptidique de l'agent pathogène — qui intervient. La protéine interagit avec les surfaces du récepteur et des molécules de CMH au lieu de venir se loger dans le sillon du CMH. La plus connue des protéines de cette nature est la toxine du staphylocoque, qui est responsable du syndrome de choc endotoxinique. Ces protéines sont appelées superantigènes parce que, à la différence des fragments peptidiques, elles activent un nombre très élevé de lymphocytes T. Sur le plan fonctionnel, ces deux types d'activation ont aussi des résultats très différents : alors que l'activation des lymphocytes par les peptides conduit à la destruction des cellules infectées, leur activation par les superantigènes fait partie du mécanisme par lequel les pathogènes qui les produisent peuvent retarder ou éviter leur destruction. Les lymphocytes T activés par les superantigènes risquent ainsi de produire des composés qui suppriment la réaction immunitaire aux agents pathogènes et de devenir plus susceptibles d'être infectés par ces pathogènes.

Le progrès des connaissances sur les mécanismes qui interviennent dans la reconnaissance et l'activation de protéines et de peptides pathogènes par les lymphocytes T a ouvert de nombreuses voies de recherche sur les possibilités de moduler l'action du système immunitaire à des fins thérapeutiques. Cependant, on ne saura pas avant longtemps si elles peuvent déboucher sur des thérapies concrètes.

## PERSPECTIVES

Nous n'avons pu évoquer dans le présent article que quelques-uns des secteurs des sciences biologiques où des progrès remarquables ont été réalisés au cours des trois dernières années. D'autres domaines d'une importance considérable qui n'ont pas été traités ici sont sans doute appelés à connaître des progrès très rapides. La neurobiologie en est un exemple. On y observe un intense travail descriptif, la liste des molécules et des récepteurs identifiés qui intervien-

10. Institut Max Planck, Allemagne.

11. Université Harvard, États-Unis d'Amérique.

ment dans la transmission des messages entre les neurones ne cessant de s'allonger. Il semble maintenant qu'une bonne part de cette information puisse être mise à profit pour comprendre les mécanismes de la régulation des circuits neuronaux ainsi que les fondements neuronaux de l'acquisition des connaissances et de la mémorisation. Elle pourrait également servir à mettre au point des médicaments plus perfectionnés que ceux qui existent actuellement pour traiter les maladies mentales. La biologie du développement aborde elle aussi une phase de croissance exponentielle. Certains principes fondamentaux des tout premiers stades du développement, comme la spécification du plan structural de base, ont fait l'objet d'études approfondies chez des organismes simples tels que la drosophile. Comme il devient rapidement évident que beaucoup de ces principes sont également applicables aux vertébrés, l'information recueillie concernant tel ou tel système contribue à l'élucidation d'autres systèmes, de sorte que l'étude du développement ne tardera pas à connaître une véritable explosion.

PETER NEWMARK est rédacteur en chef de *Current Biology* et directeur général de Current Biology Ltd. Il a fait partie pendant seize ans de la rédaction de *Nature*, en qualité d'abord de chef de la rubrique biologie puis de rédacteur en chef adjoint. Titulaire d'un doctorat de l'Université d'Oxford, où il a accompli tout son cursus, il a effectué pendant plusieurs années des recherches postdoctorales à la Faculté de médecine attachée à l'hôpital St Bartholomew à Londres.

## POUR EN SAVOIR PLUS

### Structures

Wayne Hendrickson passe en revue les structures des récepteurs dans *Current Biology*, 2 (2), février 1992, p. 57-59.

### Signaux

Les mécanismes de signalisation sont partiellement analysés dans un article de Maurice Linder et Alfred G. Gilman sur les protéines G publié dans *Pour la science*, n° 179, septembre 1992, p. 60-67.

*Current Opinion in Cell Biology*, n° 5(2) (avril 1993) contient plusieurs brefs comptes rendus sur divers aspects de la signalisation cellulaire. Les articles de Beverly Errede et Daniel Levine (p. 254 à 260) et d'Alan Hall (p. 265 à 268) sont les plus pertinents.

### Disruption génique/cartographie des gènes/addition de gènes aux végétaux

Un supplément spécial de la revue *Science* (n° 256, 8 mai 1992, p. 766-813) rassemble un certain nombre d'analyses des recherches sur la disruption génique et l'addition de gènes ainsi que sur la thérapie génique.

Un article de Charles Gasser et Robert Fraley consacré aux plantes transgéniques a été publié dans *Pour la science*, n° 178, août 1992, p. 68-74.

### Réaction aux antigènes

*Current Opinion in Immunology* (n° 5(1), février 1993) contient deux bons articles d'analyse, dus l'un à Jacques Neefjes et Franck Momburg (p. 27 à 34) et l'autre à Hans-Georg Rammensee, Kirsten Falk et Olaf Rotzschke (p. 35 à 44).

## ANNEXE : TABLEAUX STATISTIQUES

---

### NOTICE EXPLICATIVE

Les notes explicatives concernant certains chiffres sont signalées par le symbole † suivant immédiatement le nom des pays ou territoires auxquels ils s'appliquent. Les textes correspondants se trouvent à la fin de chaque tableau.

Une note générale pour chaque tableau précède les notes spécifiques aux pays.

Les symboles suivants sont également utilisés dans les tableaux :

- chiffre nul
- 0 ou 0,0 chiffre inférieur à la moitié de l'unité employée
- ∞ données non disponibles
- catégorie sans objet
- \* chiffre provisoire ou estimé
- ./ . données comprises dans une autre rubrique
- le chiffre immédiatement à gauche comprend les données de la (des) colonnes où figure ce symbole

## STATISTIQUES SUR LA SCIENCE ET LA TECHNOLOGIE

Les données présentées dans cette annexe sont extraites de l'*Annuaire statistique 1992* de l'UNESCO et illustrent les efforts déployés par l'Organisation pour rassembler des données statistiques concernant la science et la technologie à l'échelon mondial. Les données proviennent pour la plupart des réponses aux questionnaires statistiques annuels sur le personnel et les dépenses de recherche et développement expérimental (R-D) que l'UNESCO a adressés aux États membres ces dernières années. Elles ont été complétées par des renseignements recueillis dans des rapports et publications officiels ainsi que lors de précédentes enquêtes.

### DÉFINITIONS

On trouvera ci-dessous la définition des termes utilisés dans cette annexe.

#### *Catégories du personnel*

☐ **Scientifiques et ingénieurs** : personnes qui travaillent en tant que tels, c'est-à-dire comme personnel ayant reçu une formation scientifique ou technique (d'ordinaire des études complètes du troisième degré) dans n'importe quel domaine de la science cité ci-dessous, et employé à des travaux de R-D, et administrateurs et autre personnel de haut niveau dirigeant l'exécution des activités de R-D.

☐ **Techniciens** : personnes qui travaillent en tant que tels dans des activités de R-D et qui ont reçu une formation professionnelle ou technique dans n'importe quelle branche du savoir ou de la technologie d'un niveau spécifié (d'ordinaire au moins trois années d'études après l'achèvement du premier cycle de l'enseignement du second degré).

☐ **Personnel auxiliaire** : personnes dont les fonctions sont directement associées à l'exécution des activités de R-D, à savoir le personnel de bureau, de secrétariat et d'administration, les ouvriers qualifiés, semi-qualifiés et non qualifiés dans les divers métiers, et tout autre personnel auxiliaire. Il ne comprend pas le personnel de sécurité, de gardiennage et d'entretien général.

Il est à noter que, d'une manière générale, dans les catégories appropriées, tout le personnel doit être pris en considération, quels que soient la nationalité ou le pays d'origine.

#### *Potentiel humain scientifique et technique*

Une indication du potentiel des ressources humaines qualifiées est obtenue d'après le stock total du personnel ou du nombre de personnes économiquement actives qui possèdent les qualifications requises pour être classées dans les catégories de scientifiques et ingénieurs ou techniciens.

☐ **Stock de personnel qualifié (ST)** : nombre total de personnes répondant aux définitions ci-dessus, quels que soient leur activité économique, âge, sexe, nationalité ou autres caractéristiques, et qui résident sur le territoire national d'un pays à une date de référence donnée.

☐ **Effectif du personnel qualifié économiquement actif (EA)** : nombre total de personnes des deux sexes, définies ci-dessus, qui travaillent, ou cherchent activement un emploi, dans une branche quelconque de l'économie à une date de référence donnée.

#### *Personnel de R-D travaillant à plein temps et à temps partiel et équivalent plein temps*

Les données concernant le personnel, surtout dans le cas des scientifiques et ingénieurs, sont calculées en équivalent plein temps (EPT), qui correspond à une personne travaillant à plein temps pendant une période donnée. On se sert de cette unité pour convertir en nombre de personnes à plein temps le nombre de celles qui travaillent à temps partiel.

#### *Recherche et développement expérimental (R-D)*

En général, la recherche scientifique et le développement expérimental (R-D) englobent tous les travaux systématiques et créateurs entrepris afin d'accroître le stock de connaissances, y compris celles qui concernent l'homme, la culture et la société, et l'utilisation de ce stock de connaissances pour imaginer de nouvelles applications. Elle comprend la recherche fondamentale (c'est-à-dire les travaux expérimentaux ou théoriques entrepris principalement sans qu'une application ou utilisation particulière ou spécifique soit recherchée), la recherche appliquée dans des domaines tels que l'agriculture, la médecine, la chimie industrielle, etc. (c'est-à-dire la recherche originale visant principalement un but ou objectif pratique spécifique), et le développement expérimental conduisant à la mise au point de nouveaux produits, dispositifs ou procédés.

### Domaine d'études

Les grands domaines d'études de S et T utilisés dans ces tableaux sont les suivants : sciences exactes et naturelles, sciences de l'ingénieur et technologiques, sciences médicales, sciences agricoles, sciences sociales et humaines, et autres domaines.

### Dépenses de R-D

Le total des dépenses intérieures pour des activités de R-D peut être défini comme l'ensemble des dépenses effectuées à ce titre, au cours d'une année de référence, dans les institutions et installations situées sur le territoire national, y compris dans les installations qui sont géographiquement situées à l'étranger.

Les dépenses totales pour les activités de R-D, telles qu'elles sont définies ci-dessus, comprennent toutes les dépenses courantes, y compris les frais généraux et les dépenses en capital. Les dépenses courantes *intra-muros* sont subdivisées en dépenses totales de personnel et autres dépenses courantes.

### Sources de financement

Afin de pouvoir identifier l'origine du financement des activités de R-D, les catégories de sources de financement pour les dépenses de R-D se définissent comme suit :

- **Fonds publics** : fonds fournis par le gouvernement central ou par les autorités locales.
- **Fonds provenant des entreprises de production et fonds spéciaux** : fonds affectés aux activités de R-D par les institutions classées dans le secteur de la production comme des établissements ou des entreprises de production, et tous les fonds provenant des Fonds de développement technique et économique et d'autres analogues.
- **Fonds étrangers** : fonds qui ne peuvent être classés dans l'une des rubriques précédentes.

### NOTES SUR LES TABLEAUX

Le tableau 1 présente les données concernant les scientifiques et ingénieurs employés à des travaux de recherche et de développement expérimental classés selon le domaine d'études, c'est-à-dire la discipline scientifique correspondant à leur qualification et selon qu'ils sont employés à plein temps ou à temps partiel. On donne aussi leur équivalent plein temps et, si possible, séparément, des données concernant les femmes.

Le tableau 2 montre les tendances en ce qui concerne l'ensemble du personnel ainsi que les trois catégories de personnel — scientifiques et ingénieurs, techniciens et personnel auxiliaire — employés à des travaux de R-D.

Le tableau 3 concerne le personnel scientifique et technique et présente les effectifs qualifiés en S et T, c'est-à-dire les personnes ayant les qualifications requises pour être scientifique, ingénieur ou technicien, ainsi que les scientifiques, ingénieurs et techniciens employés à des travaux de R-D par rapport à la population totale. On trouvera aussi le rapport entre les scientifiques et ingénieurs potentiels et ceux employés à des travaux de R-D, ainsi que le rapport entre le nombre de techniciens et celui des scientifiques et ingénieurs employés à des travaux de R-D.

Quant à la structure du financement de la R-D, elle est présentée dans le tableau 4, où les dépenses totales (ou à défaut les dépenses courantes) sont distribuées d'après les quatre grandes catégories de sources de financement. Les données sont toujours présentées en monnaie nationale et en pourcentage, lorsque des informations complètes sont disponibles, pour permettre au lecteur de comparer les efforts réalisés dans les différents pays par ceux qui assurent le financement des activités de R-D.

Le tableau 5 montre la distribution des dépenses courantes en chiffres absolus et en pourcentage par type d'activité de R-D — recherche fondamentale, recherche appliquée ou développement expérimental — afin de faire ressortir l'importance relative des ressources financières consacrées à chacun des types d'activité.

Le tableau 6 présente des données sur les dépenses totales et courantes consacrées à des activités de R-D. On trouvera aussi en pourcentage le rapport entre les dépenses totales et courantes permettant de déceler les variations dans la structure des dépenses de R-D.

Les indicateurs présentés dans le tableau 7 concernent les ressources financières consacrées à la R-D et montrent les dépenses de R-D rapportées elles aussi à la population totale et au nombre de scientifiques et ingénieurs employés à la R-D, et exprimées en pourcentage du produit national brut (PNB).

Le tableau 8 présente les cours des changes pour des années sélectionnées dans la période récente et permet d'utiliser les données exprimées dans les tableaux 4, 5, 6 et 7 de façon comparative.

Pour des données plus détaillées, les lecteurs peuvent se reporter à *l'Annuaire statistique* publié tous les ans par l'UNESCO. Les chercheurs qui souhaiteraient obtenir d'autres détails ou des éclaircissements sur un pays particulier en ce qui concerne les définitions nationales, la portée ou les limitations des données présentées dans les tableaux, peuvent adresser leur demande à la Division des statistiques, UNESCO, 7, place de Fontenoy, 75352 Paris 07 SP.

TABLEAU 1  
Nombre de scientifiques et d'ingénieurs employés à des travaux de recherche et de développement expérimental, par domaine d'études

Pays/ territoire	Année	Sexe	Type de données	Total	Sciences exactes et naturelles	Sciences de l'ingénieur et technologiques	Sciences médicales	Sciences agricoles	Sciences sociales et humaines	Autres
<b>AFRIQUE</b>										
BURUNDI†	1989	MF	PT+TP	170	49	15	3	75	22	6
CONGO†	1984	MF	PT+TP	862	145	68	50	285	245	69
ÉGYPTE†	1982	MF	PT	9 950	1 605	2 605	2 050	3 143	547	—
		MF	TP	29 967	8 152	3 735	6 390	2 782	8 908	—
		MF	EPT	19 939	4 322	3 850	4 180	4 070	3 517	—
		F	PT+TP	11 503	3 075	1 189	3 109	1 186	2 944	—
<b>JAMAHIRIYA ARABE</b>										
LIBYENNE	1980	MF	EPT	1 100	230	198	130	221	321	—
MAURICE	1989	MF	PT	178	9	38	8	99	24	—
		MF	TP	43	10	14	7	2	10	—
		MF	EPT	193	12	43	11	100	27	—
		F	EPT	33	—	6	4	17	6	—
SEYCHELLES†	1981	MF	PT	2	2	—	—	—	—	—
		MF	TP	—	—	—	—	—	—	—
		MF	EPT	2	2	—	—	—	—	—
		F	EPT	—	—	—	—	—	—	—
<b>AMÉRIQUE DU NORD</b>										
COSTA RICA	1988	MF	PT+TP	1 528	451	110	250	378	339	—
GUATEMALA†	1988	MF	EPT	858	103	111	189	249	206	—
MEXIQUE	1984	MF	EPT	16 679	3 786	2 690	3 866	2 385	3 952	—
		F	EPT	4 319	980	697	1 001	618	1 023	—
NICARAGUA	1987	MF	PT+TP	725	200	87	78	228	132	—
<b>AMÉRIQUE DU SUD</b>										
ARGENTINE	1988	MF	PT	7 019	3 003	1 143	937	838	1 014	82
		MF	TP	16 369	5 292	2 195	2 078	2 401	4 034	371
		MF	EPT	11 088	4 543	1 689	1 407	1 487	1 793	169
		F	EPT	4 798	1 796	411	666	457	1 339	129
BRÉSIL†	1985	MF	EPT	52 863	11 768	7 765	6 107	7 607	11 007	8 609
CHILI	1984	MF	PT	466	123	218	31	66	24	4
		MF	TP	3 844	988	838	1 061	155	758	44
		MF	EPT	1 587	485	474	284	110	220	14
COLOMBIE†	1982	MF	PT	831	288	49	21	334	139	—
		MF	TP	3 938	1 238	544	1 088	358	710	—
		MF	EPT	1 083	341	150	299	98	195	—
GUYANA†	1982	MF	PT	∞	43	22	∞	21	3	—
		MF	TP	—	—	—	—	—	—	—
		MF	EPT	∞	43	22	∞	21	3	—
URUGUAY	1987	MF	PT	752	90	132	189	172	126	43
		MF	TP	1 341	161	234	336	307	225	78
		MF	PT+TP	2 093	251	366	525	479	351	121
		F	PT+TP	720	86	126	181	165	121	41
VENEZUELA†	1983	MF	PT+TP	4 568	1 457	727	558	874	802	150
		MF	EPT	2 175	786	300	204	437	388	60
		F	PT+TP	1 479	438	134	302	171	375	59
<b>ASIE</b>										
INDE†	1988	MF	EPT	*119 027	20 599	32 068	1 494	16 306	1 212	*47 348
		F	EPT	5 552	1 832	1 526	247	1 089	199	659
INDONÉSIE	1983	MF	PT+TP	18 533	5 317	3 285	1 615	4 083	4 233	—
ISRAËL	1984	MF	PT	14 173	5 900	5 000	500	500	2 200	—
		MF	TP	25 576	4 300	7 300	4 300	1 200	8 500	—
		MF	EPT	20 100	6 900	6 900	1 200	400	4 300	—
		F	PT+TP	10 400	3 300	800	1 300	300	4 600	—
JAPON†	1981	MF	PT	379 405	80 442	142 316	64 408	26 598	41 316	24 325
		F	PT	22 475	2 277	775	7 850	904	4 108	6 561
JORDANIE†	1982	MF	PT+TP	1 241	310	340	118	92	381	—

Pays/ territoire	Année	Sexe	Type de données	Total	Sciences exactes et naturelles	Sciences de l'ingénieur et technologiques	Sciences médicales	Sciences agricoles	Sciences sociales et humaines	Autres
<b>ASIE (suite)</b>										
PAKISTAN†	1982	MF	PT	ooo	—	929	821	2 149	—	606
		MF	TP	ooo	1 211	730	—	729	—	—
		MF	EPT	5 397	406	1 172	821	2 392	—	606
		F	EPT	418	152	114	80	56	—	16
PHILIPPINES	1984	MF	PT+TP	4 830	576	1 419	421	1 272	1 011	131
		F	PT+TP	2 319	322	480	344	471	630	72
QATAR†	1986	MF	PT+TP	229	160	53	2	5	—	9
		F	PT+TP	58	57	—	1	—	—	—
RÉPUBLIQUE DE CORÉE†	1983	MF	PT	30 309	4 706	16 371	3 964	3 589	—	1 679
SINGAPOUR†	1987	MF	TP	1 808	171	1 373	101	130	—	33
SRI LANKA	1985	MF	PT+TP	3 361	863	2 007	436	55	—	—
		MF	PT	2 526	1 503	229	195	—	599	—
		MF	TP	794	169	191	40	—	394	—
		MF	EPT	2 790	1 560	293	208	—	729	—
THAÏLANDE	1987	F	EPT	667	416	27	74	—	150	—
		MF	PT+TP	8 498	1 669	1 176	1 570	1 849	2 229	—
TURQUIE†	1983	MF	EPT	7 309	891	1 040	1 350	1 590	531	1 907
<b>EUROPE</b>										
<b>ALLEMAGNE†</b>										
ex Rép. démocratique allemande										
	1989	MF	EPT	127 449	15 480	88 542	9 232	8 376	5 819	→
AUTRICHE†	1985	MF	EPT	4 591	1 500	739	590	282	1 480	—
BULGARIE	1987	MF	EPT	50 585	5 162	11 861	4 653	2 551	5 919	20 439
		F	EPT	22 268	2 185	3 463	2 163	720	2 906	10 831
FINLANDE	1983	MF	EPT	10 951	2 291	5 211	890	572	1 947	40
HONGRIE†	1987	MF	PT+TP	38 232	3 983	18 155	3 735	2 935	9 130	294
		F	PT+TP	11 122	1 207	3 498	1 426	779	4 055	157
MALTE†	1987	MF	EPT	34	3	7	10	—	14	—
NORVÈGE	1985	MF	EPT	9 692	1 833	4 421	945	456	1 797	240
POLOGNE†	1989	MF	PT	15 700	3 700	6 500	1 700	1 300	2 300	200
		MF	TP	50 600	13 900	13 500	8 800	5 300	7 500	1 600
		MF	EPT	32 500	8 300	11 000	4 600	3 100	4 800	700
PORTUGAL†	1980	MF	PT	1 790	529	246	123	307	300	285
		MF	TP	2 023	561	410	304	162	293	293
		MF	EPT	2 663	808	416	251	383	430	375
EX-YOUGOSLAVIE†	1980	MF	PT+TP	27 135	4 988	8 357	2 982	3 098	5 014	2 696
<b>OCÉANIE</b>										
AUSTRALIE†	1986	MF	EPT	33 768	7 625	4 498	3 049	3 720	6 683	8 193
NOUVELLE- CALÉDONIE†	1985	MF	TP	2	—	2	—	—	—	—
		MF	EPT	77	48	8	3	14	3	1
POLYNÉSIE FRANÇAISE†	1983	MF	PT	17	8	1	7	—	1	—
		MF	TP	—	—	—	—	—	—	—
TONGA†	1981	MF	PT	9	—	—	—	9	—	—
		MF	TP	2	—	—	—	2	—	—

## TABLEAU 1

### NOTE GÉNÉRALE

PT = plein temps

TP = temps partiel

PT + TP = plein temps et temps partiel

EPT = équivalent plein temps

### † NOTES PAR PAYS

#### AFRIQUE

**Burundi** : non compris les données relatives au secteur de la production.

**Congo** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Égypte** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Seychelles** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

#### AMÉRIQUE DU NORD

**Guatemala** : non compris les données relatives au secteur de la production (activités de R-D non intégrées).

#### AMÉRIQUE DU SUD

**Brésil** : non compris les données relatives aux scientifiques et ingénieurs employés dans les entreprises privées ni les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Colombie** : non compris les données relatives au secteur de la production (activités de R-D non intégrées).

**Guyana** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale. Les données relatives au secteur de service général et les sciences médicales du secteur de l'enseignement supérieur sont également exclues.

**Venezuela** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

#### ASIE

**Inde** : le nombre total de scientifiques et d'ingénieurs dans la dernière colonne comprend 22 100 personnes (estimation pour 1982) dans le secteur de l'enseignement supérieur.

**Japan** : les données se réfèrent aux chercheurs réguliers seulement. Non compris les sciences sociales et humaines dans le secteur de la production (activités de R-D intégrées).

**Jordanie** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Pakistan** : les données se réfèrent aux activités de R-D se trouvant pour la plupart dans les établissements de recherche financés par le gouvernement; les sciences sociales et humaines dans les secteurs de l'enseignement supérieur et de service général sont exclues. Non compris les activités de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Qatar** : compte non tenu des sciences sociales et humaines dans le secteur de l'enseignement supérieur.

**République de Corée** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale ni les sciences sociales et humaines.

**Singapour** : non compris la R-D dans les sciences sociales et humaines.

**Turquie** : non compris les données relatives au secteur de la production. Compte non tenu des sciences sociales et humaines du secteur de service général.

#### EUROPE

**Allemagne, ex-République démocratique allemande** : les données de la colonne sciences sociales et humaines se réfèrent seulement aux sciences économiques et de l'informatique.

**Autriche** : non compris les données relatives au secteur de la production (activités de R-D intégrées).

**Hongrie** : compte non tenu des scientifiques et ingénieurs employés dans les services administratifs de R-D. Pour la R-D de caractère militaire, seule la partie effectuée dans les établissements civils a été considérée.

**Malte** : les données ne concernent que le secteur de l'enseignement supérieur.

**Pologne** : non compris les données relatives au secteur de la production (activités de R-D intégrées) ni les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Portugal** : les données de la dernière colonne se réfèrent aux scientifiques et ingénieurs employés dans le secteur de la production (activités de R-D intégrées) dont la répartition par domaine d'études n'est pas connue.

**ex-Yougoslavie** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

#### OCÉANIE

**Australie** : les données de la dernière colonne se réfèrent aux scientifiques et ingénieurs employés dans le secteur de la production (activités de R-D intégrées) dont la répartition par domaine d'études n'est pas connue.

**Nouvelle-Calédonie** : les données ne se rapportent qu'à six instituts de recherche sur onze.

**Polynésie française** : les données ne concernent qu'un seul institut de recherche.

**Tonga** : les données ne concernent qu'un seul institut de recherche.

**TABEAU 2**  
Personnel employé à des travaux de recherche et de développement expérimental

Pays/ territoire	Année	Total (EPT)	Scientifiques et ingénieurs	Techniciens	Personnel auxiliaire
<b>AFRIQUE</b>					
BURUNDI†#	1984	515	114	90	311
	1989	814	170	168	476
CÔTE D'IVOIRE†	1973	000	368	000	000
	1974	877	463	92	322
	1975	000	502	000	000
ÉGYPTE†	1978	000	18 350	5 254	000
	1982	46 796	19 939	6 678	20 179
	1986	51 183	20 893	7 532	22 758
GABON†#	1985	000	188	000	000
	1986	000	211	000	000
	1987	000	199	000	000
GHANA	1974	8 906	3 704	5 202	→
	1975	9 351	3 889	5 462	→
	1976	9 819	4 084	5 735	→
MADAGASCAR†#	1987	1 673	205	688	780
	1988	1 714	228	724	762
	1989	1 837	269	956	612
MAURICE	1980	1 069	152	108	809
	1985	1 113	267	191	655
	1989	1 021	193	172	656
NIGER†	1974	000	53	000	000
	1975	000	79	000	000
	1976	94	93	1	—
NIGÉRIA†	1985	13 924	1 422	6 565	5 937
	1986	12 845	1 499	6 005	5 341
	1987	12 880	1 138	6 042	5 500
RWANDA	1983	149	64	55	30
	1984	164	69	60	35
	1985	*183	71	*67	*45
SÉNÉGAL#	1971	000	416	000	000
	1972	000	609	516	000
	1976	000	522	000	000
SEYCHELLES†	1980	3	2	1	—
	1981	3	2	1	—
	1983	33	18	6	9
SOUDAN#	1971	6 378	1 299	222	4 857
	1974	16 598	3 324	1 798	11 476
	1978	22 675	4 345	3 271	15 059
ZAMBIE	1970	000	*75	*210	000
	1973	1 060	260	800	→
<b>AMÉRIQUE DU NORD</b>					
CANADA†	1980	63 190	29 320	17 460	16 410
	1985	76 985	37 853	21 497	17 635
	1988	109 330	61 130	27 080	21 120
CUBA†	1980	21 521	5 637	6 556	9 328
	1985	34 150	10 305	9 238	14 607
	1989	32 614	12 052	8 830	11 732
EL SALVADOR†#	1980	000	533	1 547	000
	1981	000	564	1 971	000

TABLEAU 2 (suite)  
Personnel employé à des travaux de recherche et de développement expérimental

Pays/ territoire	Année	Total (EPT)	Scientifiques et ingénieurs	Techniciens	Personnel auxiliaire
<b>AMÉRIQUE DU NORD (suite)</b>					
ÉTATS-UNIS†	1980	000	658 700	000	000
	1985	000	849 200	000	000
	1988	000	*949 200	000	000
GUATEMALA	1970	000	*230	*134	000
	1972	000	*267	*255	000
	1974	000	310	439	000
ÎLES TURQUES ET CAÏQUES	1975	3	3	—	—
	1976	2	2	—	—
	1984	—	—	—	—
JAMAÏQUE†	1984	100	23	21	56
	1985	121	21	31	69
	1986	104	18	15	71
MEXIQUE†	1971	*13 525	*4 064	*7 181	*2 280
	1974	000	8 446	000	000
	1984	68 972	16 679	29 467	22 826
NICARAGUA#	1985	1 803	650	212	941
	1987	2 005	725	302	978
SAINTE-LUCIE	1982	000	40	103	000
	1983	000	46	81	000
	1984	000	53	86	000
TRINITÉ-ET- TOBAGO	1982	588	174	182	232
	1983	625	187	205	233
	1984	806	275	254	277
<b>AMÉRIQUE DU SUD</b>					
ARGENTINE	1980	000	*9 500	*13 300	000
	1985	*28 900	*10 800	*7 100	*11 000
	1988	22 855	11 088	6 241	5 526
BRÉSIL†#	1983	000	38 713	000	000
	1984	000	47 870	000	000
	1985	000	52 863	000	000
CHILI†#	1981	000	3 469	000	000
	1985	000	4 907	000	000
	1988	000	5 323	000	000
ÉQUATEUR	1970	000	595	508	000
	1973	000	544	217	000
GUYANA†	1980	720	94	250	376
	1982	623	89	178	356
PÉROU†#	1970	000	1 925	000	000
	1975	000	3 750	000	000
	1980	000	9 171	5 218	000
VENEZUELA†#	1973	5 198	2 809	783	1 606
	1980	000	3 673	000	000
	1983	10 687	4 568	2 692	3 427
<b>ASIE</b>					
BRUNEI DARUSSALAM†#	1982	104	23	81	—
	1983	188	21	70	97
	1984	243	20	116	107

Pays/ territoire	Année	Total (EPT)	Scientifiques et ingénieurs	Techniciens	Personnel auxiliaire
<b>ASIE (suite)</b>					
CHYPRE†	1982	125	47	78	→
	1983	129	49	80	→
	1984	131	51	80	→
INDE†	1984	*244 049	*100 136	72 233	71 680
	1986	*262 797	*107 409	70 233	79 093
	1988	*289 716	*119 027	80 956	86 398
INDONÉSIE#	1985	ooo	21 160	3 888	ooo
	1987	ooo	30 486	ooo	ooo
	1988	ooo	32 038	ooo	ooo
IRAN (Rép. islamique d')	1970	6 432	3 007	482	2 943
	1972	9 865	4 896	857	4 112
	1985	ooo	3 194	1 854	ooo
IRAQ†	1972	248	170	78	→
	1973	316	205	111	→
	1974	365	240	125	→
ISRAËL†	1974	ooo	12 200	ooo	ooo
	1978	ooo	14 722	ooo	ooo
	1984	ooo	14 173	ooo	ooo
JAPON†	1980	601 192	441 186	86 970	73 036
	1985	730 432	548 249	99 280	82 903
	1989	830 855	636 817	105 430	88 608
JORDANIE†	1975	ooo	235	213	ooo
	1985	ooo	400	29	ooo
	1989	463	422	41	ooo
KOWEÏT†#	1982	1 864	1 013	443	408
	1983	2 064	1 157	470	437
	1984	2 539	1 511	561	467
LIBAN†	1978	160	160	—	—
	1979	175	170	5	→
	1980	206	180	6	20
PAKISTAN†	1981	22 922	5 144	6 476	11 302
	1982	24 723	5 397	7 138	12 188
	1988	28 990	6 641	9 286	13 063
PHILIPPINES#	1982	17 992	7 884	3 500	6 608
	1983	9 949	4 394	1 867	3 688
	1984	10 185	4 830	1 855	3 500
RÉPUBLIQUE DE CORÉE†#	1980	30 473	18 434	7 417	4 622
	1985	73 516	41 473	24 152	7 891
	1988	104 737	56 545	35 720	12 472
SINGAPOUR†#	1981	2 741	1 193	807	741
	1984	4 886	2 401	1 359	1 126
	1987	5 876	3 361	1 526	989
SRI LANKA	1983	ooo	1 939	*480	ooo
	1984	ooo	2 619	592	ooo
	1985	ooo	2 790	693	ooo
TURQUIE	1984	27 007	9 914	6 284	10 809
	1985	29 241	11 276	7 367	10 598

**TABLEAU 2 (suite)**  
**Personnel employé à des travaux de recherche et de développement expérimental**

Pays/ territoire	Année	Total (EPT)	Scientifiques et ingénieurs	Techniciens	Personnel auxiliaire
<b>ASIE (suite)</b>					
VIET NAM†	1976	24 560	11 230	13 330	→
	1978	25 050	13 050	6 040	5 960
	1985	ooo	20 000	ooo	ooo
<b>EUROPE</b>					
<b>ALLEMAGNE†</b>					
ex-Rép. démocratique allemande	1980	191 429	120 473	70 956	→
	1985	191 262	122 292	68 970	→
	1989	195 073	127 449	67 624	→
ex-Rép. féd. d'Allemagne	1981	359 419	124 678	103 214	131 527
	1985	398 328	143 627	118 080	136 621
	1987	419 206	165 614	122 458	131 133
<b>AUTRICHE</b>					
	1975	15 392	5 387	4 944	5 061
	1981	18 599	6 712	6 145	5 742
	1984	20 161	7 609	6 817	5 735
<b>BELGIQUE</b>					
	1975	30 131	13 883	6 570	9 677
	1986	36 203	15 705	20 498	→
	1988	36 770	16 646	20 124	→
<b>BULGARIE†</b>					
	1980	72 335	38 706	10 483	23 146
	1985	90 308	48 008	13 099	29 201
	1987	96 471	50 585	11 662	34 224
<b>DANEMARK</b>					
	1981	16 476	6 785	9 691	→
	1985	19 914	8 567	11 347	→
	1989	25 448	10 662	14 786	→
<b>ESPAGNE†</b>					
	1980	30 905	13 732	4 710	12 463
	1985	40 653	21 455	7 024	12 174
	1988	54 337	31 170	9 914	13 253
<b>FINLANDE</b>					
	1981	18 004	9 722	8 282	→
	1985	*23 551	ooo	ooo	ooo
	1989	*28 925	ooo	ooo	ooo
<b>FRANCE</b>					
	1980	236 200	74 900	161 300	→
	1985	273 000	102 300	170 700	→
	1988	283 099	115 163	167 936	→
<b>GRÈCE†</b>					
	1979	4 308	2 634	984	690
	1983	4 873	2 441	1 067	1 365
<b>HONGRIE†</b>					
	1980	62 866	25 589	23 707	13 570
	1985	48 745	22 479	17 869	8 397
	1989	42 276	20 431	14 113	7 732
<b>IRLANDE</b>					
	1981	5 474	2 635	1 408	1 431
	1985	6 264	3 741	1 340	1 183
	1988	8 590	6 351	1 291	948
<b>ISLANDE</b>					
	1981	744	398	346	→
	1985	818	512	306	→
	1989	1 177	773	404	→
<b>ITALIE</b>					
	1980	95 803	46 999	27 605	21 199
	1985	117 887	63 759	33 058	21 070
	1988	135 665	74 833	38 287	22 545

Pays/ territoire	Année	Total (EPT)	Scientifiques et ingénieurs	Techniciens	Personnel auxiliaire
<b>EUROPE (suite)</b>					
MALTE†	1983	46	34	5	7
	1985	46	34	5	7
	1988	46	34	5	7
NORVÈGE†	1980	15 005	7 427	7 578	→
	1985	18 781	9 692	9 089	→
	1989	*20 700	*12 100	*8 600	→
PAYS-BAS†	1980	53 560	26 430	27 130	→
	1985	61 400	33 620	27 780	→
	1988	64 420	37 520	26 900	→
POLOGNE†	1980	240 000	93 000	57 000	90 000
	1985	181 000	57 000	54 000	70 000
	1989	∞	32 500	∞	∞
PORTUGAL	1980	7 711	2 663	2 867	2 181
	1984	9 267	3 475	3 059	2 733
	1988	10 883	5 004	3 571	2 308
ROUMANIE	1987	167 049	58 647	42 195	66 207
	1988	167 711	58 879	42 362	66 470
	1989	169 964	59 670	42 931	67 363
ROYAUME-UNI†	1972	258 746	77 086	80 220	101 440
	1975	259 100	79 300	75 800	104 000
	1978	261 400	86 500	76 600	98 300
SUÈDE†	1981	42 214	17 696	24 518	→
	1985	49 599	21 899	27 700	→
	1987	51 811	22 725	29 086	→
SUISSE	1977	*36 920	*16 000	*20 920	→
	1979	37 945	16 410	15 840	5 695
	1986	45 200	14 910	10 710	19 580
EX-TCHÉCOSLOVAQUIE†	1980	171 789	53 659	60 552	57 578
	1985	180 439	61 046	47 337	72 056
	1989	185 492	65 475	42 876	77 141
EX-YOUGOSLAVIE†	1980	53 699	22 951	13 431	17 317
	1985	68 591	30 564	16 363	21 664
	1989	78 704	34 770	18 780	25 154
<b>OCÉANIE</b>					
AUSTRALIE	1981	45 211	24 486	12 284	8 441
	1985	53 258	30 406	14 848	8 544
	1988	64 820	38 568	16 535	9 717
FIDJI†#	1984	140	28	82	30
	1985	146	30	86	30
	1986	156	36	90	30
GUAM†	1979	52	21	19	12
	1985	*46	19	*11	*16
	1989	*52	*21	*11	*20
ÎLES DU PACIFIQUE	1973	66	23	24	19
	1978	22	5	11	6
	1979	23	4	11	8

**TABLEAU 2 (suite)**  
**Personnel employé à des travaux de recherche et de développement expérimental**

Pays/ territoire	Année	Total (EPT)	Scientifiques et ingénieurs	Techniciens	Personnel auxiliaire
<b>OCÉANIE (suite)</b>					
KIRIBATI	1980	3	2	1	—
	1981	3	2	1	—
NOUVELLE-CALÉDONIE†	1983	17	7	5	5
	1984	82	12	33	37
	1985	334	77	71	186
NOUVELLE-ZÉLANDE†	1973	ooo	*2 950	ooo	ooo
	1975	8 003	3 659	3 164	1 180
	1979	8 080	ooo	ooo	ooo
PAPOUASIE- NOUVELLE-GUINÉE	1971	ooo	*110	ooo	ooo
	1972	ooo	*115	ooo	ooo
	1973	ooo	131	ooo	ooo
POLYNÉSIE FRANÇAISE†	1980	101	19	13	69
	1982	101	21	14	66
	1983	97	17	16	64
SAMOA†	1976	254	135	82	37
	1977	266	140	87	39
	1978	280	140	92	48
SAMOA AMÉRICAIN†	1970	14	2	12	→
	1971	15	3	2	10
TONGA†#	1979	ooo	9	1	ooo
	1980	ooo	10	4	ooo
	1981	ooo	11	4	ooo
VANUATU	1973	29	2	1	26
	1974	39	4	1	34
	1975	39	3	1	35
<b>EX-URSS</b>					
EX-URSS†	1980	ooo	1 373 300	ooo	ooo
	1985	ooo	1 491 300	ooo	ooo
	1990	ooo	1 694 400	ooo	ooo
BÉLARUS†	1980	ooo	38 130	ooo	ooo
	1985	ooo	42 500	ooo	ooo
	1988	ooo	44 100	ooo	ooo
UKRAINE†	1980	ooo	195 782	ooo	ooo
	1985	ooo	210 300	ooo	ooo
	1989	ooo	348 600	ooo	ooo

**TABLEAU 2**  
**NOTE GÉNÉRALE**

Les données sont exprimées en équivalent plein temps (EPT) sauf pour certain pays où le symbole # indique le nombre de personnel de R-D à plein temps et à temps partiel.

† NOTES PAR PAYS

**AFRIQUE**

**Burundi** : non compris les données relatives au secteur de la production.

**Côte d'Ivoire** : les données relatives aux scientifiques et ingénieurs sont à plein temps seulement.

**Égypte** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Gabon** : non compris les données relatives au secteur de la production.

**Madagascar** : non compris les données relatives au secteur de l'enseignement supérieur.

**Niger** : les données ne concernent que le secteur de l'enseignement supérieur.

**Nigéria** : les données concernent seulement vingt-trois des vingt-six instituts de recherche nationaux sous tutelle du Ministère fédéral de la science et de la technologie.

**Seychelles** : non compris les activités de RD de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

## AMÉRIQUE DU NORD

**Canada** : suite à des changements de méthodologie, à partir de 1986 les données ne sont pas comparables avec celles des années précédentes.

**Cuba** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**El Salvador** : les données se réfèrent aux scientifiques et ingénieurs et techniciens employés dans les entreprises publiques.

**États-Unis** : non compris les données pour le droit, les sciences humaines et l'éducation.

**Jamaïque** : les données se réfèrent au Scientific Research Council seulement.

**Mexique** : les données de 1970 à 1974 se réfèrent au personnel à plein temps et à temps partiel.

## AMÉRIQUE DU SUD

**Brésil** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale. Non compris les scientifiques et ingénieurs employés dans les entreprises privées de production.

**Chili** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Guyana** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale. Les données relatives au secteur de service général et les sciences médicales du secteur de l'enseignement supérieur sont aussi exclues.

**Pérou** : les données comprennent en plus les services scientifiques et techniques.

**Venezuela** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

## ASIE

**Brunei Darussalam** : les données ne concernent que deux instituts de recherche seulement.

**Chypre** : non compris les données relatives au secteur de la production.

**Inde** : les données relatives aux techniciens et au personnel auxiliaire dans le secteur de l'enseignement supérieur sont exclues. Le nombre de scientifiques et d'ingénieurs dans le secteur de l'enseignement supérieur en 1984, 1986 et 1988 est de 22 100 (estimation 1982). En 1986 et 1988, la colonne Total comprend respectivement 6 062 et 3 335 personnes dont la catégorie de personnel est inconnue.

**Iraq** : les données ne concernent que la Foundation of Scientific Research. Il y avait, en 1974, 1 862 personnes (dont 1 486 scientifiques et ingénieurs) employées dans les départements gouvernementaux concernés par les activités scientifiques.

**Israël** : les données concernent les scientifiques et ingénieurs à plein temps dans le secteur civil seulement et ne comprennent pas les sciences sociales et humaines.

**Japon** : les données se réfèrent au personnel à plein temps. Non compris les données relatives aux sciences sociales et humaines dans le secteur de la production (activités de R-D intégrées).

**Jordanie** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Koweït** : les données se réfèrent aux activités scientifiques et techniques.

**Liban** : données partielles pour la Faculté des sciences de l'Université du Liban seulement.

**Pakistan** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale. Les données se réfèrent aux activités de R-D se trouvant pour la plupart dans les établissements de recherche financés par le gouvernement. Les sciences sociales et humaines dans les secteurs de l'enseignement supérieur et de service général sont exclues.

**République de Corée** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale ni les sciences sociales et humaines.

**Singapour** : non compris les sciences sociales et humaines.

**Viet Nam** : les données de 1976 à 1978 ne comprennent pas les techniciens ni le personnel auxiliaire du secteur de l'enseignement supérieur. En 1985, le secteur de service général est exclu.

## EUROPE

**Allemagne, ex-République démocratique allemande** : en 1985 et 1989, à l'exception des sciences économiques et de l'informatique, la R-D dans les sciences sociales et humaines est exclue; **ex-République fédérale d'Allemagne** : non compris les données relatives aux sciences sociales et humaines dans le secteur de la production.

**Bulgarie** : les données ne comprennent pas les techniciens ni le personnel auxiliaire dans le secteur de l'enseignement supérieur.

**Espagne** : suite à des changements de méthodologie en 1984, les données ne sont pas comparables à celles des années précédentes. Non compris les organisations privées à but non lucratif. Les données ne comprennent pas les techniciens et le personnel auxiliaire du secteur de l'enseignement supérieur.

**Grèce** : les données se réfèrent aux activités gouvernementales seulement.

**Hongrie** : suite à des changements de méthodologie en 1981, les données ne sont pas comparables à celles des années précédentes. Non compris le personnel employé dans les services administratifs de R-D. Les ouvriers qualifiés sont comptés avec les techniciens plutôt qu'avec le personnel auxiliaire. Celui-ci comprend aussi le personnel de sécurité et d'entretien. Pour la R-D de caractère militaire, seule la partie effectuée dans les établissements civils a été considérée.

**Malte** : les données ne concernent que le secteur de l'enseignement supérieur.

**Norvège** : les données pour 1980 ne comprennent pas les entreprises privées dans le secteur de la production.

**Pays-Bas** : suite à des changements de méthodologie en 1981, les données ne sont pas strictement comparables à celles des années précédentes. Non compris les données pour les sciences sociales et humaines dans le secteur de la production (activités de R-D intégrées).

**Pologne** : suite à des changements de méthodologie en 1985, les données ne sont pas comparables à celles des années précédentes. Non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale. En 1985, les données ne comprennent pas les techniciens et le personnel auxiliaire du secteur de l'enseignement supérieur. En 1989, les données relatives au secteur de l'enseignement supérieur sont exclues.

**Royaume-Uni** : non compris les données relatives au secteur de l'enseignement supérieur.

**Suède** : les sciences sociales et humaines sont exclues pour les secteurs de la production et de service général à partir de 1981.

**ex-Tchécoslovaquie** : suite à des changements de méthodologie en 1981, les données ne sont pas strictement comparables à celles des années précédentes. Les scientifiques et ingénieurs employés dans les services administratifs de R-D sont compris avec le personnel auxiliaire; pour la R-D de caractère militaire, seule la partie effectuée dans les établissements civils a été considérée.

**ex-Yougoslavie** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

## OCÉANIE

**Fidji** : les données ne concernent qu'un institut de recherche.

**Guam** : les données ne concernent que le secteur de l'enseignement supérieur.

**Nouvelle-Calédonie** : les données se réfèrent au nombre d'instituts de recherche suivant : en 1983, 2; en 1984, 3; et en 1985, 6.

**Nouvelle-Zélande** : les données ne comprennent pas le personnel auxiliaire du secteur de l'enseignement supérieur.

**Polynésie française** : les données concernent le personnel à plein temps dans un seul institut de recherche.

**Samoa** : les données pour les scientifiques et ingénieurs sont à plein temps seulement.

**Samoa américain** : les données ne concernent qu'un institut de recherche.

**Tonga** : les données ne concernent qu'un institut de recherche.

## EX-URSS

**ex-URSS, Bélarus et Ukraine** : les données se réfèrent aux travailleurs scientifiques, c'est-à-dire à toutes les personnes ayant un diplôme scientifique supérieur ou un titre scientifique, sans considération de la nature de leur travail, aux personnes qui effectuent un travail de recherche dans des institutions scientifiques et au personnel scientifique enseignant dans des établissements d'enseignement supérieur; sont incluses aussi les personnes qui effectuent des travaux scientifiques dans les entreprises industrielles.

TABLEAU 3

Potentiel scientifique et technique et personnel employé à des travaux de recherche et de développement expérimental

Pays/ territoire	Année	Type de données	Effectifs qualifiés		Personnel employé à des travaux de R-D			S et I en R-D en % des S et I potentiels
			Scientifiques et ingénieurs potentiels par million d'habitants	Techniciens potentiels par million d'habitants	Scientifiques et ingénieurs par million d'habitants	Techniciens par million d'habitants	Nombre de techniciens par scientifique ou ingénieur	
<b>AFRIQUE</b>								
BÉNIN	1989	EA	299	000	177	54	0,3	59,2
BURUNDI	1989	□	000	000	32	32	1,0	000
CONGO	1984	□	000	000	458	783	1,7	000
ÉGYPTE	1986	□	000	000	439	158	0,4	000
GABON	1987	□	000	000	192	17	0,1	000
GUINÉE	1984	□	000	000	263	125	0,5	000
JAMAHIRIYA								
ARABE LIBYENNE	1980	EA	14 373	2 964	361	493	1,4	2,5
KENYA	1982	EA	906	989	000	000	000	000
MADAGASCAR	1989	□	000	000	23	82	3,6	000
MAURICE†	1989	ST	7 662	10 825	180	160	0,9	2,3
NIGÉRIA†	1987	ST	281	1 014	14	61	4,5	5,0
RÉPUBLIQUE								
CENTRAFRICAINE	1984	□	000	000	76	149	2,0	000
RWANDA	1985	□	000	000	12	*11	*0,9	000
SÉNÉGAL	1981	□	000	000	342	468	1,4	000
SEYCHELLES	1983	□	000	000	281	94	0,3	000
<b>AMÉRIQUE DU NORD</b>								
CANADA†	1988	EA	63 440	119 752	2 347	1 040	0,4	3,7
COSTA RICA†	1988	EA	21 029	000	534	000	000	2,5
CUBA†	1989	ST	14 233	000	1 146	839	0,7	8,0
EL SALVADOR	1989	□	000	000	27	316	11,5	000
ÉTATS-UNIS	1988	EA	21 576	000	*3 874	000	000	*18,0
GUATEMALA†	1990	□	2 967	000	99	106	1,1	3,3
HAÏTI	1982	EA	2 538	3 224	000	000	000	000
JAMAÏQUE	1986	□	000	000	8	6	0,8	000
MEXIQUE	1984	□	000	000	215	379	1,8	000
NICARAGUA	1987	□	000	000	207	86	0,4	000
SAINTE-LUCIE	1984	□	000	000	396	642	1,6	000
TRINITÉ-ET-								
TOBAGO	1984	□	000	000	237	219	0,9	000
<b>AMÉRIQUE DU SUD</b>								
ARGENTINE	1988	EA	22 044	7 771	*352	*198	*0,6	*1,6
BRÉSIL†	1985	ST	11 231	000	390	000	000	3,5
CHILI	1988	□	000	000	363	231	0,6	000
COLOMBIE	1982	□	000	000	39	36	0,9	000
GUYANA†	1982	EA	1 990	443	115	230	2,0	5,8
PARAGUAY	1981	□	000	000	248	→	000	000
PÉROU	1981	ST	16 465	9 348	274	000	000	1,7
URUGUAY†	1987	ST	*19 166	000	686	000	000	3,6
VENEZUELA†	1983	EA	21 820	000	279	165	0,6	1,3

Pays/ territoire	Année	Type de données	Effectifs qualifiés		Personnel employé à des travaux de R-D			S et I en R-D en % des S et I potentiels
			Scientifiques et ingénieurs potentiels par million d'habitants	Techniciens potentiels par million d'habitants	Scientifiques et ingénieurs par million d'habitants	Techniciens par million d'habitants	Nombre de techniciens par scientifique ou ingénieur	
<b>ASIE</b>								
BAHREÏN	1981	ST	30 359	32 811	∞	∞	∞	∞
BRUNEI								
DARUSSALAM†	1984	EA	11 531	22 401	93	540	5,8	0,9
CHINE	1988	EA	8 157	→	∞	∞	∞	∞
CHYPRE†	1987	EA	*34 200	*28 931	77	121	1,6	0,2
HONG KONG	1986	EA	32 617	21 487	∞	∞	∞	∞
INDE†	1990	EA	2 897	749	*145	*99	*0,7	5,0
INDONÉSE†	1988	ST	1 280	11 026	181	∞	∞	14,1
IRAN (Rép. islamique d'†)	1985	ST	6 992	4 056	67	39	0,6	1,0
ISRAËL	1984	EA	41 992	42 058	4 836	1 035	0,2	11,5
JAPON†	1989	EA	71 223	40 695	5 183	858	0,2	7,8
JORDANIE	1986	EA	8 564	∞	119	8	0,1	1,4
KOWEÏT†	1985	ST	35 115	41 269	925	344	0,4	2,6
LIBAN	1980	□	∞	∞	67	2	0,0	∞
MALAISIE†	1988	ST	1 792	∞	327	69	0,2	18,2
NÉPAL	1980	EA	247	*494	22	5	0,2	9,1
PAKISTAN†	1990	EA	2 340	1 713	58	81	1,4	2,5
PHILIPPINES†	1984	ST	36 649	∞	90	35	0,4	0,2
QATAR†	1986	EA	23 781	13 208	746	199	0,3	3,1
RÉPUBLIQUE DE CORÉE†	1988	EA	*2 428	*49 790	1 343	849	0,6	55,3
SINGAPOUR†	1987	EA	15 849	10 737	1 283	583	0,5	8,1
SRI LANKA	1985	EA	1 337	∞	173	43	0,2	13,0
THAÏLANDE	1987	□	∞	∞	104	52	0,5	∞
TURQUIE†	1985	ST	15 932	18 678	224	146	0,7	1,4
VIET NAM	1985	□	∞	∞	334	∞	∞	∞
<b>EUROPE</b>								
ALLEMAGNE†								
ex-Rép. démocratique allemande	1989	EA	38 270	66 913	7 819	4 149	0,5	20,4
ex-Rép. féd. d'Allemagne	1987	EA	45 571	32 466	2 713	2 006	0,7	6,0
AUTRICHE†	1984	EA	17 781	3 768	1 007	903	0,9	5,7
BELGIQUE	1988	□	∞	∞	1 691	2 045	1,2	∞
BULGARIE†	1987	EA	36 101	77 039	5 641	1 301	0,2	15,6
DANEMARK†	1989	ST	22 740	62 304	2 074	2 877	1,4	9,1
ESPAGNE	1988	EA	39 602	→	799	254	0,3	2,0
FINLANDE†	1989	ST	55 416	49 315	2 283	1 993	0,9	4,1
FRANCE†	1988	□	∞	∞	2 071	3 020	1,5	∞
GRÈCE†	1986	ST	33 905	16 049	54	49	0,9	0,2
HONGRIE†	1988	EA	45 786	→	1 936	1 337	0,7	4,2
IRLANDE†	1988	EA	40 618	201 252	1 737	353	0,2	∞
ISLANDE†	1989	□	∞	∞	3 080	1 610	0,5	4,3
ITALIE†	1988	EA	20 784	62 381	1 310	670	0,5	6,3

TABLEAU 3 (suite)

Potential scientifique et technique et personnel employé à des travaux de recherche et de développement expérimental

Pays/ territoire	Année	Type de données	Effectifs qualifiés		Personnel employé à des travaux de R-D			S et I en R-D en % des S et I potentiels
			Scientifiques et ingénieurs potentiels par million d'habitants	Techniciens potentiels par million d'habitants	Scientifiques et ingénieurs par million d'habitants	Techniciens par million d'habitants	Nombre de techniciens par scientifique ou ingénieur	
<b>EUROPE (suite)</b>								
MALTE	1988	□	∞	∞	97	14	0,1	∞
NORVÈGE†	1989	ST	28 915	∞	*2 882	*2 048	*0,7	10,0
PAYS-BAS†	1988	EA	67 129	→	2 543	1 823	0,7	3,8
POLOGNE†	1988	EA	38 658	131 513	854	∞	∞	2,2
PORTUGAL	1988	□	∞	∞	488	348	0,7	∞
ROUMANIE	1989	□	∞	∞	2 582	1 858	0,7	∞
SAINTE-MARIN	1989	EA	22 783	80 565	—	—	—	—
SUÈDE†	1987	□	∞	∞	*2 712	3 472	1,3	∞
SUISSE†	1986	EA	55 081	∞	2 299	1 652	0,7	4,2
EX-TCHÉCO- SLOVAQUIE†	1989	EA	35 443	∞	4 195	2 747	0,7	11,8
EX-YOUGOSLAVIE†	1989	EA	23 995	18 418	1 471	795	0,5	6,1
<b>OCÉANIE</b>								
AUSTRALIE†	1988	EA	32 638	19 864	2 115	1 004	0,5	6,5
FIDJI	1986	□	∞	∞	50	126	2,5	∞
POLYNÉSIE								
FRANÇAISE	1983	□	∞	∞	104	98	0,9	∞
GUAM	1989	□	∞	∞	*179	94	*0,5	∞
KIRIBATI	1980	□	∞	∞	34	17	0,5	∞
NOUVELLE-								
CALÉDONIE	1985	□	∞	∞	507	467	0,9	∞
TONGA	1981	□	∞	∞	113	41	0,4	∞
<b>EX-URSS</b>								
EX-URSS†	1990	EA	55 275	71 756	5 871	∞	∞	10,6
BÉLARUS†	1988	EA	58 000	73 000	4 345	∞	∞	7,5
UKRAINE†	1989	EA	56 850	74 976	6 736	∞	∞	11,8

### TABLEAU 3

#### NOTE GÉNÉRALE

Pour le personnel employé à des travaux de R-D, les données sont en équivalent plein temps.

EA = personnes qualifiées économiquement actives

ST = nombre de personnes qualifiées

S et I = scientifiques et ingénieurs

#### † NOTES PAR PAYS

##### AFRIQUE

**Maurice** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1983.

**Nigéria** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1980.

##### AMÉRIQUE DU NORD

**Canada** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1986.

**Costa Rica** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1980.

**Cuba** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1981.

**Guatemala** : les données relatives au personnel employé à des travaux de R-D se réfèrent à 1988.

##### AMÉRIQUE DU SUD

**Brésil** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1980.

**Guyana** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1980.

**Uruguay** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1985.

**Venezuela** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1982.

##### ASIE

**Brunei Darussalam** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1981.

**Chypre** : les données relatives au personnel employé à des travaux de R-D se réfèrent à 1984. Le nombre de techniciens employés à des travaux de R-D comprend le personnel auxiliaire.

**Inde** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1988.

**Indonésie** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1980.

**Iran (République islamique d')** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1982.

**Japon** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1987.

**Koweït** : les données relatives au personnel employé à des travaux de R-D se réfèrent à 1984.

**Malaisie** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1982.

**Pakistan** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1988.

**Philippines** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1980.

**Qatar** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1983.

**République de Corée** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1981.

**Singapour** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1980.

**Turquie** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1980.

##### EUROPE

**Allemagne, ex-République démocratique allemande** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1988. Le nombre de techniciens employés à des travaux de R-D comprend le personnel auxiliaire.

**Autriche** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1981.

**Bulgarie** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1986.

**Danemark** : le nombre de techniciens employés à des travaux de R-D comprend le personnel auxiliaire.

**Finlande** : le nombre de techniciens employés à des travaux de R-D comprend le personnel auxiliaire.

**France** : le nombre de techniciens employés à des travaux de R-D comprend le personnel auxiliaire.

**Grèce** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1981.

**Hongrie** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1984. Le nombre de techniciens employés à des travaux de R-D comprend les ouvriers qualifiés.

**Irlande** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1981.

**Islande** : le nombre de techniciens employés à des travaux de R-D comprend le personnel auxiliaire.

**Italie** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1981.

**Norvège** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1987. Le nombre de techniciens employés à des travaux de R-D comprend le personnel auxiliaire.

**Pays-Bas** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1985. Le nombre de techniciens employés à des travaux de R-D comprend le personnel auxiliaire.

**Pologne** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1984.

**Suède** : le nombre de techniciens employés à des travaux de R-D comprend le personnel auxiliaire.

**Suisse** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1980.

**ex-Tchécoslovaquie** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1980.

**ex-Yougoslavie** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1988.

##### OCÉANIE

**Australie** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1986.

##### EX-URSS

**ex-URSS** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1987.

**Bélarus** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1986.

**Ukraine** : les données pour les effectifs qualifiés se réfèrent à 1986.



TABLEAU 4

Dépenses totales consacrées à la recherche et au développement expérimental, selon la source de financement (en milliers)

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Total	Fonds publics	Fonds des entreprises de production et fonds spéciaux	Fonds étrangers	Divers
<b>AFRIQUE</b>							
BURUNDI†	1989	FRANC	536 187	211 064	—	325 123	—
			% 100	39,4	—	60,6	—
CONGO†	1984	FRANC CFA	25 530	17 575	6 500	1 455	—
			% 100	68,8	25,5	5,7	—
MAURICE†	1989	ROUPIE	54 300	19 000	1 300	—	34 000
			% 100	35,0	2,4	—	62,6
NIGÉRIA†	1987	NAIRA	∞	86 270	∞	∞	∞
<b>RÉPUBLIQUE CENTRAFRICAINE†</b>							
	1984	FRANC CFA	680 791	406 684	144 515	75 592	54 000
			% 100	59,7	21,2	11,1	7,9
RWANDA†	1984	FRANC	235 540	189 040	—	46 500	—
			% 100	80,3	—	19,7	—
SEYCHELLES†	1983	ROUPIE	12 854	6 274	—	6 580	—
			% 100	48,8	—	51,2	—
<b>AMÉRIQUE DU NORD</b>							
CANADA†	1989	DOLLAR	*8 568 000	*3 170 000	*3 583 000	*907 000	*908 000
			% 100	*37,0	*41,8	*10,6	*10,6
COSTA RICA	1986	COLÓN	612 000	562 000	./.	50 000	—
			% 100	91,8	./.	8,2	—
CUBA†	1985	PESO	182 478	176 791	—	5 687	—
			% 100	96,9	—	3,1	—
EL SALVADOR†	1989	COLÓN	∞	290 881	—	∞	—
ÉTATS-UNIS†	1988	DOLLAR	135 231 000	62 136 000	67 855 000	—	5 240 000
			% 100	45,9	50,2	—	3,9
GUATEMALA†	1988	QUETZAL	31 859	11 692	170	5 430	14 567
			% 100	36,7	0,5	17,0	45,7
MEXIQUE†	1989	PESO	1 050 283	997 720	52 563	→	→
			% 100	95,0	5,0	→	→
NICARAGUA†	1987	CÓRDOBA	*988 970	*799 470	—	*189 500	—
			% 100	*80,8	—	*19,2	—
PANAMA	1986	BALBOA	173	173	—	—	—
			% 100	100,0	—	—	—
TRINITÉ-ET-TOBAGO	1984	DOLLAR	143 257	131 005	6 276	4 090	1 886
			% 100	91,4	4,4	2,9	1,3

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Total	Fonds publics	Fonds des entreprises de production et fonds spéciaux	Fonds étrangers	Divers
<b>AMÉRIQUE DU SUD</b>							
ARGENTINE	1988	AUSTRAL	3 466 700	2 946 700	277 300	69 300	173 400
		%	100	85,0	8,0	2,0	5,0
BRÉSIL	1982	CRUZEIRO	*305 500 000	*204 300 000	*60 500 000	16 100 000	24 600 000
		%	100	*66,9	*19,8	*5,3	*8,1
CHILI†	1988	PESO	23 161 300	16 308 900	4 218 200	757 500	1 876 700
		%	100	70,4	18,2	3,3	8,1
PÉROU†	1984	SOL	159 024 000	76 289 000	43 255 000	33 367 000	6 113 000
		%	100	48,0	27,2	21,0	3,8
<b>ASIE</b>							
CHYPRE†	1984	LIVRE	1 173	1 159	—	14	—
		%	100	98,8	—	1,2	—
INDE	1988	ROUPIE	34 718 100	31 080 240	3 637 860	./.	./.
		%	100	89,5	10,5	./.	./.
ISRAËL†	1983	SHEKEL	56 300	35 934	12 223	./.	8 143
		%	100	63,8	21,7	./.	14,5
JAPON†	1988	YEN	10 627 572	2 117 781	8 501 469	8 323	—
		%	100	19,9	80,0	0,1	—
KOWEÏT†	1984	DINAR	71 163	24 437	45 736	—	990
		%	100	34,3	64,3	—	1,4
PAKISTAN†	1987	ROUPIE	5 582 081	5 582 081	—	—	—
		%	100	100,0	—	—	—
PHILIPPINES†	1984	PESO	612 750	373 290	144 860	79 740	14 860
		%	100	60,9	23,6	13,0	2,4
QATAR	1986	RIYAL	6 650	6 650	—	—	—
		%	100	100,0	—	—	—
RÉPUBLIQUE DE CORÉE†	1988	WON	2 347 000	416 000	1 922 000	—	9 000
		%	100	17,7	81,9	—	0,4
SINGAPOUR†	1987	DOLLAR	∞	145 448	223 389	∞	5 907
		%	100	100,0	100,0	100,0	100,0
SRI LANKA	1984	ROUPIE	256 799	214 960	→	41 839	—
		%	100	83,7	→	16,3	—
THAÏLANDE	1987	BAHT	2 664 380	1 825 780	259 450	387 550	191 600
		%	100	68,5	9,7	14,5	7,2

TABLEAU 4 (suite)

Dépenses totales consacrées à la recherche et au développement expérimental, selon la source de financement (en milliers)

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Total	Fonds publics	Fonds des entreprises de production et fonds spéciaux	Fonds étrangers	Divers
<b>EUROPE</b>							
<b>ALLEMAGNE†</b>							
ex-Rép. démocratique allemande	1989	MARK	11 880 000	3 204 000	8 676 000	—	/.
		%	100	27,0	73,0	—	/.
ex-Rép. féd. d'Allemagne	1987	DEUTSCHE MARK	57 241 000	19 861 000	36 404 000	738 000	238 000
		%	100	34,7	63,6	1,3	0,4
AUTRICHE	1990	SCHILLING	*24 281 600	*11 293 400	*12 361 200	*561 500	*65 500
		%	100	*46,5	*50,9	*2,3	*0,3
BELGIQUE†	1988	FRANC	91 265 100	24 377 200	65 327 800	931 000	629 100
		%	100	26,7	71,6	1,0	0,7
BULGARIE	1989	LEV	1 042 400	433 600	608 800	—	—
		%	100	41,6	58,4	—	—
DANEMARK	1989	COURONNE	11 892 000	5 408 000	5 573 000	368 000	543 000
		%	100	45,5	46,9	3,1	4,6
ESPAGNE	1988	PESETA	287 688 658	140 444 476	136 714 972	7 267 720	3 261 490
		%	100	48,8	47,5	2,5	1,1
FINLANDE†	1989	MARK	7 207 800	1 800 800	5 322 300	58 400	26 300
		%	100	25,0	73,8	0,8	0,4
FRANCE	1987	FRANC	121 364 000	63 021 000	50 785 000	7 171 000	387 000
		%	100	51,9	41,8	5,9	0,3
GRÈCE	1986	DRACHME	18 331 000	13 646 000	4 248 000	437 000	—
		%	100	74,4	23,2	2,4	—
HONGRIE†	1989	FORINT	33 441 000	8 477 000	24 252 000	226 000	486 000
		%	100	25,3	72,5	0,7	1,5
IRLANDE	1988	LIVRE	185 800	85 600	100 200	→	→
		%	100	46,1	53,9	→	→
ISLANDE	1989	COURONNE	3 123 000	2 186 100	718 290	93 690	124 920
		%	100	70,0	23,0	3,0	4,0
ITALIE†	1988	LIRE	13 281 284	6 883 493	5 834 146	563 645	—
		%	100	51,8	43,9	4,2	—
MALTE†	1988	LIRE	10	10	—	—	—
		%	100	100,0	—	—	—
NORVÈGE	1989	COURONNE	*12 000 000	*5 800 000	*5 700 000	*200 000	*300 000
		%	100	*48,3	*47,5	*1,7	*2,5

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Total	Fonds publics	Fonds des entreprises de production et fonds spéciaux	Fonds étrangers	Divers
<b>EUROPE (suite)</b>							
PAYS-BAS†	1988	FLORIN	10 163 000	4 328 000	5 431 000	232 000	172 000
		%	100	42,6	53,4	2,3	1,7
PORTUGAL	1988	ESCUDO	29 910 800	19 006 000	8 185 300	795 900	1 923 600
		%	100	63,5	27,4	2,7	6,4
ROUMANIE	1989	LEU	20 866 000	1 100 000	19 766 000	—	—
		%	100	5,3	94,7	—	—
ROYAUME-UNI†	1989	LIVRE	11 531 700	4 213 800	5 809 400	1 138 400	370 200
		STERLING %	100	36,5	50,4	9,9	3,2
SUÈDE†	1987	COURONNE	30 554 000	11 297 000	18 662 000	481 000	114 000
		%	100	37,0	61,1	1,6	0,4
SUISSE	1986	FRANC	∞	1 481 000	5 534 000	∞	∞
EX-TCHÉCOSLOVAQUIE†	1987	COURONNE	24 684 000	9 505 000	15 179 000	—	—
		%	100	38,5	61,5	—	—
EX-YOUGOSLAVIE†	1989	DINAR	2 152 032	772 324	1 153 094	76 073	150 541
		%	100	35,9	53,6	3,5	7,0
<b>OCÉANIE</b>							
AUSTRALIE	1988	DOLLAR	4 187 100	2 314 700	1 722 200	56 400	93 900
		%	100	55,3	41,1	1,4	2,2
FIDJI†	1986	DOLLAR	3 800	2 800	—	1 000	—
		%	100	73,7	—	26,3	—
GUAM†	1989	DOLLAR DES ÉTATS-UNIS	∞	*1 706	∞	∞	*220
NOUVELLE-CALÉDONIE†	1983	FRANC CFP	83 000	61 500	21 500	—	—
		%	100	74,1	25,9	—	—
POLYNÉSIE FRANÇAISE†	1983	FRANC CFP	324 720	269 950	3 820	—	50 950
		%	100	83,1	1,2	—	15,7
TONGA†	1980	PA'ANGA	426	106	—	320	—
		%	100	24,9	—	75,1	—

#### TABLEAU 4

##### † NOTES PAR PAYS

###### AFRIQUE

**Burundi** : non compris les données relatives au secteur de la production ni les dépenses de personnel au Ministère de la santé publique.

**Congo** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Maurice** : les données se réfèrent aux dépenses courantes seulement.

**Nigéria** : les données ne concernent que vingt-trois des vingt-six instituts de recherche nationaux sous tutelle du Ministère fédéral de la science et de la technologie.

**République centrafricaine** : non compris les données pour le secteur de service général.

**Rwanda** : compte non tenu des données pour le secteur de la production.

**Seychelles** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

###### AMÉRIQUE DU NORD

**Canada** : non compris les données pour les sciences sociales et humaines dans le secteur de la production (activités de R-D intégrées).

**Cuba** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**El Salvador** : non compris les données relatives au secteur de l'enseignement supérieur.

**États-Unis** : les données se réfèrent aux dépenses courantes seulement. Non compris les données pour le droit, les sciences humaines et l'éducation.

**Guatemala** : les données ne concernent que le secteur de la production (activités de R-D intégrées) et le secteur de l'enseignement supérieur.

**Mexique** : chiffres en millions.

**Nicaragua** : les données se réfèrent aux dépenses courantes seulement. Non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

###### AMÉRIQUE DU SUD

**Chili** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Pérou** : les données se réfèrent aux crédits budgétaires relatifs à la science et à la technologie.

###### ASIE

**Chypre** : non compris les données pour le secteur de la production.

**Israël** : compte non tenu des données relatives aux sciences humaines et au droit, financés par les budgets courants des universités.

**Japon** : chiffres en millions. Non compris les données pour les sciences sociales et humaines dans le secteur de la production (activités de R-D intégrées).

**Koweït** : les données se réfèrent aux activités scientifiques et techniques.

**Pakistan** : les données se réfèrent aux activités de R-D se trouvant pour la plupart dans les établissements de recherche financés par le gouvernement ; les sciences sociales et humaines dans les secteurs de l'enseignement supérieur et de service général sont exclues. Compte non tenu des activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Philippines** : non compris 670 000 pesos dont la ventilation par source de financement n'est pas disponible.

**République de Corée** : chiffres en millions. Non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale ni les sciences sociales et humaines.

**Singapour** : non compris les sciences sociales et humaines.

###### EUROPE

**Allemagne, ex-République démocratique allemande** : les données se réfèrent aux dépenses courantes relatives à la science et à la technologie ; **ex-République fédérale d'Allemagne** : suite à des changements de méthodologie, les données ne sont pas strictement comparables à celles des années précédentes. Non compris les données relatives aux sciences sociales et humaines dans le secteur de la production.

**Belgique** : non compris les données provenant des communautés et régions.

**Finlande** : non compris 1 680 millions de marks du secteur de l'enseignement supérieur dont la répartition par source de financement n'est pas disponible.

**Hongrie** : pour la R-D de caractère militaire, seule la partie effectuée dans les établissements civils a été considérée.

**Italie** : chiffres en millions.

**Malte** : les données ne concernent que le secteur de l'enseignement supérieur.

**Pays-Bas** : non compris les données pour les sciences sociales et humaines du secteur de la production (activités de R-D intégrées).

**Royaume-Uni** : non compris les fonds de R-D exécutés à l'étranger.

**Suède** : non compris les données pour les sciences sociales et humaines dans les secteurs de la production et de service général.

**ex-Tchécoslovaquie** : pour la R-D de caractère militaire, seule la partie effectuée dans les établissements civils a été considérée.

**ex-Yougoslavie** : chiffres en millions. Non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

###### OCÉANIE

**Fidji** : les données ne concernent qu'un institut de recherche.

**Guam** : les données ne concernent que les dépenses courantes dans le secteur de l'enseignement supérieur.

**Nouvelle-Calédonie** : les données ne concernent que deux instituts de recherche.

**Polynésie française** : les données ne concernent qu'un institut de recherche.

**Tonga** : les données ne concernent qu'un institut de recherche.

TABLEAU 5

Dépenses courantes consacrées à la recherche et au développement expérimental, par type d'activité de R-D (en milliers)

Pays/territoire	Année	Monnaie	Total	Recherche fondamentale	Recherche appliquée	Développement expérimental
<b>AFRIQUE</b>						
BURUNDI†	1989	FRANC	536 187	42 883	493 304	→
		%	100	8,0	92,0	→
SEYCHELLES†	1983	ROUPIE	6 083	—	5 400	683
		%	100	—	88,8	11,2
<b>AMÉRIQUE DU NORD</b>						
CUBA†	1985	PESO	182 478	29 197	140 508	12 773
		%	100	16,0	77,0	7,0
ÉTATS-UNIS†	1988	DOLLAR	135 231 000	18 460 000	30 897 000	85 874 000
		%	100	13,7	22,8	63,5
MEXIQUE†	1989	PESO	1 050 283	216 319	475 408	358 556
		%	100	20,6	45,3	34,1
<b>AMÉRIQUE DU SUD</b>						
ARGENTINE	1988	AUSTRAL	2 724 800	940 100	1 618 500	166 200
		%	100	34,5	59,4	6,1
<b>ASIE</b>						
JAPON†	1988	YEN	9 759 566	1 347 078	2 361 349	6 051 139
		%	100	13,8	24,2	62,0
JORDANIE†	1986	DINAR	5 587	1 388	2 701	1 498
		%	100	24,8	48,3	26,8
PHILIPPINES†	1984	PESO	612 740	88 950	322 770	201 020
		%	100	14,5	52,7	32,8
RÉPUBLIQUE DE CORÉE†	1981	WON	293 131 000	70 367 000	84 283 000	138 481 000
		%	100	24,0	28,8	47,2
SINGAPOUR†	1984	DOLLAR	144 700	4 900	37 900	101 900
		%	100	3,4	26,2	70,4
SRI LANKA	1984	ROUPIE	174 335	17 685	128 535	28 115
		%	100	10,1	73,7	16,1
<b>EUROPE</b>						
ALLEMAGNE†						
ex-Rép. féd. d'Allemagne	1987	DEUTSCHE MARK	49 578 000	9 576 000	40 002 000	→
		%	100	19,3	80,7	→
AUTRICHE†	1985	SCHILLING	13 468 647	2 938 181	6 411 946	4 118 520
		%	100	21,8	47,6	30,6

TABLEAU 5 (suite)

Dépenses courantes consacrées à la recherche et au développement expérimental, par type d'activité de R-D (en milliers)

Pays	Année	Monnaie	Total	Recherche fondamentale	Recherche appliquée	Développement expérimental
<b>EUROPE (suite)</b>						
BULGARIE	1989	LEV	932 900	132 700	800 200	→
		%	100	14,2	85,8	→
DANEMARK†	1989	COURONNE	4 872 000	2 068 000	1 994 000	810 000
		%	100	42,4	40,9	16,6
ESPAGNE†	1988	PESETA	224 435 577	39 946 760	92 875 676	91 613 141
		%	100	17,8	41,4	40,8
HONGRIE†	1989	FORINT	20 993 000	3 555 000	7 906 000	9 532 000
		%	100	16,9	37,7	45,4
IRLANDE	1986	LIVRE	143 252	21 206	61 093	60 953
		%	100	14,8	42,6	42,6
ITALIE†	1988	LIRE	13 281 284	2 374 191	5 864 928	5 042 165
		%	100	17,9	44,1	38,0
MALTE†	1983	LIRE	10	—	10	—
		%	100	—	100,0	—
NORVÈGE	1987	COURONNE	9 104 400	1 251 500	3 259 800	4 593 100
		%	100	13,7	35,8	50,5
PAYS-BAS†	1989	FLORIN	6 025 000	872 000	1 775 000	3 378 000
		%	100	14,5	29,4	56,1
POLOGNE†	1985	ZLOTY	83 801 000	13 857 900	27 826 500	42 116 600
		%	100	16,5	33,2	50,3
PORTUGAL†	1986	ESCUDO	19 867 700	3 734 600	7 777 600	8 355 500
		%	100	18,8	39,1	42,1
ROYAUME-UNI†	1989	LIVRE STERLING	6 762 400	323 400	1 877 500	4 561 500
		%	100	4,8	27,8	67,4
SUÈDE†	1981	COURONNE	12 240 000	3 016 000	2 131 000	7 093 000
		%	100	24,6	17,4	58,0
SUISSE	1986	FRANC	7 015 000	2 850 000	→	4 165 000
		%	100	40,6	→	59,4
EX-TCHÉCOSLOVAQUIE†	1989	COURONNE	22 100 000	1 402 000	20 698 000	→
		%	100	6,3	93,7	→
EX-YOUGOSLAVIE†	1989	DINAR	1 336 951	329 149	547 063	460 739
		%	100	24,6	40,9	34,5

Pays	Année	Monnaie	Total	Recherche fondamentale	Recherche appliquée	Développement expérimental
<b>OCÉANIE</b>						
AUSTRALIE†	1988	DOLLAR	4 187 200	1 149 800	1 671 900	1 365 500
		%	100	27,5	39,9	32,6
GUAM†	1989	DOLLAR DES ÉTATS-UNIS	*1 926	*1 356	*570	—
		%	100	*70,4	*29,6	—
NOUVELLE-CALÉDONIE†	1983	FRANC CFP	83 000	1 500	—	81 500
		%	100	1,8	—	98,2
POLYNÉSIE FRANÇAISE†	1983	FRANC CFP	324 720	—	324 720	—
		%	100	—	100,0	—
TONGA†	1980	PA'ANGA	279	—	279	—
		%	100	—	100,0	—

TABLEAU 5

† NOTES PAR PAYS

**AFRIQUE**

**Burundi** : les données correspondent aux dépenses totales réparties par type d'activité de R-D dans les secteurs de l'enseignement supérieur et de service général seulement, et ne comprennent pas les dépenses de personnel au Ministère de la santé publique.

**Seychelles** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**AMÉRIQUE DU NORD**

**Cuba** : les données correspondent aux dépenses totales réparties par type d'activité de R-D. Non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**États-Unis** : non compris les données pour le droit, les sciences humaines et l'éducation.

**Mexique** : chiffres en millions. Les données correspondent aux dépenses totales réparties par type d'activité de R-D.

**ASIE**

**Japon** : chiffres en millions. Les données correspondent aux dépenses totales pour les activités de R-D exécutées dans les instituts de sciences exactes et naturelles et de l'ingénieur, réparties par type d'activité de R-D.

**Jordanie** : les données correspondent aux dépenses totales réparties par type d'activité de R-D. Non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Philippines** : les données correspondent aux dépenses totales réparties par type d'activité de R-D. Non compris 670 000 pesos dont la ventilation par type d'activité de R-D n'a pas été précisée.

**République de Corée** : les données correspondent aux dépenses totales réparties par type d'activité de R-D. Non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale ni les sciences sociales et humaines.

**Singapour** : les données correspondent aux dépenses totales réparties par type d'activité de R-D dans les secteurs de la production et de service général et ne comprennent pas les sciences sociales et humaines.

**EUROPE**

**Allemagne, ex-République fédérale d'Allemagne** : non compris la partie de la somme de 644 millions de deutsche marks dont la ventilation entre dépenses courantes et dépenses en capital n'a pas été précisée. Non compris les sciences sociales et humaines dans le secteur de la production.

**Autriche** : non compris 429 418 000 schillings dépensés par les hôpitaux provinciaux dont la ventilation par type d'activité de R-D n'a pas été précisée.

**Danemark** : non compris les données relatives au secteur de la production.

**Espagne** : non compris la partie de la somme de 2 267 589 000 de pesetas dont la ventilation entre dépenses courantes et dépenses en capital n'a pas été précisée.

**Hongrie** : le total ne comprend pas 8 417 millions de forints dont la répartition par type d'activité de R-D n'est pas disponible. Pour la R-D de caractère militaire, seule la partie effectuée dans les établissements civils a été considérée.

**Italie** : chiffres en millions. Les données correspondent aux dépenses totales réparties par type d'activité de R-D.

**Malte** : les données ne concernent que le secteur de l'enseignement supérieur.

**Pays-Bas** : les données correspondent aux dépenses totales réparties par type d'activité dans le secteur de la production (activités de R-D intégrées) seulement. Non compris les sciences sociales et humaines.

**Pologne** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Portugal** : les données correspondent aux dépenses totales réparties par type d'activité de R-D.

**Royaume-Uni** : les données ne concernent que le secteur de la production. Non compris les fonds de R-D exécutés à l'étranger.

**Suède** : non compris les données pour les sciences sociales et humaines dans les secteurs de la production et de service général.

**Suisse** : les données correspondent aux dépenses totales réparties par type d'activité de R-D.

**ex-Tchécoslovaquie** : pour la R-D de caractère militaire, seule la partie effectuée dans les établissements civils a été considérée.

**ex-Yougoslavie** : chiffres en millions. Non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**OCÉANIE**

**Australie** : les données correspondent aux dépenses totales réparties par type d'activité de R-D.

**Guam** : les données ne concernent que le secteur de l'enseignement supérieur.

**Nouvelle-Calédonie** : les données correspondent aux dépenses totales réparties par type d'activité de R-D dans deux instituts de recherche.

**Polynésie française** : les données correspondent aux dépenses totales réparties par type d'activité de R-D dans un institut de recherche.

**Tonga** : les données ne concernent qu'un seul institut de recherche.

TABLEAU 6

Dépenses consacrées à la recherche et au développement expérimental (en milliers)

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Total	Dépenses courantes	
				Total	% du total
<b>AFRIQUE</b>					
ALGÉRIE†	1971	DINAR	77 500	67 500	87,1
	1972		78 000	68 000	87,2
BURUNDI†	1984	FRANC	173 197	∞	∞
	1989		∞	536 187	∞
ÉGYPTÉ†	1976	LIVRE	33 440	26 686	79,8
	1982		40 378	34 242	84,8
GABON†	1984	FRANC CFA	415 000	265 000	63,9
	1985		424 000	274 000	64,6
	1986		380 000	250 000	65,8
MADAGASCAR	1986	FRANC	7 046 815	603 815	8,6
	1987		6 478 136	962 638	14,9
	1988		14 371 515	993 515	6,9
MAURICE	1980	ROUPIE	36 500	29 700	81,4
	1985		26 000	17 700	68,1
	1989		104 300	54 300	52,1
NIGER†	1974	FRANC CFA	40 140	40 140	100,0
	1975		92 794	92 794	100,0
	1976		141 703	141 703	100,0
NIGÉRIA†	1985	NAIRA	82 952	72 941	87,9
	1986		80 319	69 965	87,1
	1987		86 270	69 615	80,7
RWANDA	1983	FRANC	283 920	96 400	34,0
	1984		260 750	92 760	35,6
	1985		918 560	99 280	10,8
SEYCHELLES†	1973	ROUPIE	402	290	72,1
	1981		1 037	337	32,5
	1983		12 854	6 083	47,3
SOUDAN	1972	LIVRE	2 291	∞	∞
	1973		3 012	2 444	81,1
	1978		5 115	4 294	83,9
ZAMBIE	1970	KWACHA	∞	*1 980	∞
	1972		6 261	4 726	75,5

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Total	Dépenses courantes	
				Total	% du total
<b>AMÉRIQUE DU NORD</b>					
CANADA†	1980	DOLLAR	3 491 000	000	000
	1985		6 709 000	000	000
	1989		*8 568 000	000	000
COSTA RICA	1983	COLÓN	300 000	000	000
	1985		693 000	000	000
	1986		612 000	000	000
CUBA†	1980	PESO	95 889	76 796	80,1
	1985		182 478	138 294	75,8
	1989		222 000	158 691	71,5
EL SALVADOR†	1986	COLÓN	226 275	000	000
	1987		258 125	000	000
	1989		290 881	195 964	67,4
ÉTATS-UNIS†	1980	DOLLAR	63 810 000	62 214 000	97,5
	1985		116 796 000	113 745 000	97,4
	1988		139 255 000	135 231 000	97,1
GUATEMALA	1974	QUETZAL	*5 139	*3 721	*72,4
	1978		13 526	000	000
	1983		44 797	000	000
ÎLES TURQUES ET CAÏQUES	1973	DOLLAR DES	51	000	000
	1974	ÉTATS-UNIS	8	000	000
	1984		—	—	—
JAMAÏQUE†	1984	DOLLAR	5 033	3 390	67,4
	1985		3 605	3 297	91,5
	1986		4 016	3 886	96,8
MEXIQUE†	1985	PESO	194 842	000	000
	1988		875 236	000	000
	1989		1 050 283	000	000
PANAMA	1974	BALBOA	2 908	2 707	93,1
	1975		3 296	000	000
SAINTE-LUCIE	1982	DOLLAR DES	15 137	000	000
	1983	CARAÏBES ORIENTALES	13 157	000	000
	1984		12 150	000	000
TRINITÉ-ET-TOBAGO†	1970	DOLLAR	5 171	4 371	84,5
	1984		143 257	109 921	76,7

TABLEAU 6 (suite)

Dépenses consacrées à la recherche et au développement expérimental (en milliers)

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Total	Dépenses courantes	
				Total	% du total
<b>AMÉRIQUE DU SUD</b>					
ARGENTINE†	1978	PESO	195 278	136 550	69,9
	1980		1 480 800	1 006 900	68,0
	1981		2 321 932	000	000
BRÉSIL†	1983	CRUZEIRO	673 919	000	000
	1984		1 482 604	000	000
	1985		5 390 540	000	000
CHILI†	1983	PESO	7 104 314	000	000
	1985		11 403 365	000	000
	1988		22 205 438	000	000
ÉQUATEUR	1970	SUCRE	90 515	000	000
	1973		142 310	000	000
GUYANA†	1980	DOLLAR	824	000	000
	1982		2 800	000	000
PÉROU†	1981	SOL	29 508 000	000	000
	1983		83 742 000	000	000
	1984		159 024 000	000	000
URUGUAY	1971	PESO	*1 673	*1 401	*83,7
	1972		1 858	000	000
VENEZUELA†	1980	BOÍVAR	851 280	000	000
	1985		1 411 720	000	000
	1986		1 294 930	000	000
<b>ASIE</b>					
BRUNEI DARUSSALAM†	1980	DOLLAR	4 300	2 900	67,4
	1983		7 560	4 560	60,3
	1984		10 880	8 220	75,6
CHYPRE†	1982	LIVRE	937	000	000
	1983		1 044	000	000
	1984		1 159	000	000
INDE†	1980	ROUPIE	7 605 200	000	000
	1985		20 687 800	15 585 950	76,2
	1988		34 718 100	29 318 170	84,4
INDONÉSIE†	1984	RUPIAH	279 000 000	217 980 000	78,1
	1985		242 120 000	203 488 000	84,0
	1988		259 283 000	194 638 000	75,1

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Total	Dépenses courantes	
				Total	% du total
<b>ASIE (suite)</b>					
IRAN (Rép. islamique d'†)	1972	RIAL	3 531 807	2 246 789	63,6
	1984		21 527 000	11 584 000	53,8
	1985		22 010 713	12 546 398	57,0
IRAQ†	1972	DINAR	2 361	1 794	76,0
	1973		2 310	1 791	77,5
	1974		3 471	2 743	79,0
ISRAËL†	1981	SHEKEL	7 485	∞	∞
	1982		19 217	∞	∞
	1983		56 300	∞	∞
JAPON†	1980	YEN	5 246 248	4 312 249	82,2
	1985		8 890 299	7 304 291	82,2
	1988		10 627 572	8 943 096	84,2
JORDANIE†	1985	DINAR	*5 501	∞	∞
	1988		*5 592	∞	∞
	1989		*5 583	∞	∞
KOWEÏT†	1982	DINAR	43 746	40 500	92,6
	1983		67 250	60 616	90,1
	1984		71 163	63 016	88,6
LIBAN†	1978	LIVRE	∞	9 400	∞
	1979		∞	11 500	∞
	1980		22 000	∞	∞
MALAISIE†	1988	RINGGIT	87 100	∞	∞
	1989		97 200	∞	∞
PAKISTAN†	1984	ROUPIE	3 834 287	2 293 617	59,8
	1985		4 200 325	2 788 753	66,4
	1987		5 582 081	∞	∞
PHILIPPINES†	1980	PESO	623 000	474 030	76,1
	1983		514 590	439 680	85,4
	1984		613 410	514 800	83,9
QATAR	1984	RIYAL	13 910	8 300	59,7
	1985		7 120	6 520	91,6
	1986		6 650	6 650	100,0
RÉPUBLIQUE DE CORÉE†	1980	WON	211 727	162 594	76,8
	1985		1 155 156	642 259	55,6
	1988		2 347 000	1 422 000	60,6

TABLEAU 6 (suite)

Dépenses consacrées à la recherche et au développement expérimental (en milliers)

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Total	Dépenses courantes	
				Total	% du total
<b>ASIE (suite)</b>					
SINGAPOUR†	1981	DOLLAR	81 900	59 350	72,5
	1984		214 300	160 000	74,7
	1987		374 700	223 700	59,7
SRI LANKA†	1975	ROUPIE	45 097	32 662	72,4
	1983		217 608	148 971	68,5
	1984		256 799	174 335	67,9
THAÏLANDE	1983	BAHT	2 126 000	ooo	ooo
	1985		3 473 000	ooo	ooo
	1987		2 664 380	2 120 700	79,6
TURQUIE	1984	LIRE	128 885 000	ooo	ooo
	1985		192 465 000	143 315 000	74,5
VIET NAM†	1983	DÔNG	331 000	ooo	ooo
	1984		516 000	ooo	ooo
	1985		498 000	ooo	ooo
<b>EUROPE</b>					
<b>ALLEMAGNE†</b>					
ex-Rép.	1987	MARK	ooo	11 476 000	ooo
démocratique	1988		ooo	11 892 000	ooo
allemande	1989		ooo	11 880 000	ooo
ex-Rép. féd. d'Allemagne	1979	DEUTSCHE MARK	32 869 000	28 523 000	88,4
	1985		49 519 000	43 096 000	87,6
	1987		57 240 000	49 578 000	87,6
AUTRICHE	1981	SCHILLING	12 331 026	10 201 527	82,7
	1985		17 182 272	13 898 065	80,9
	1990		*24 281 600	ooo	ooo
BELGIQUE†	1985	FRANC	79 831 700	ooo	ooo
	1987		87 788 600	ooo	ooo
	1988		91 265 100	ooo	ooo
BULGARIE	1980	LEV	470 800	407 800	86,6
	1985		812 300	716 500	88,2
	1989		1 042 400	932 900	89,5
DANEMARK	1981	COURONNE	4 484 000	4 038 000	90,1
	1985		7 692 000	6 513 000	84,7
	1989		11 892 000	10 517 000	88,4

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Total	Dépenses courantes	
				Total	% du total
<b>EUROPE (suite)</b>					
ESPAGNE†	1980	PESETA	61 110 462	52 316 874	85,6
	1985		155 340 938	126 450 000	81,4
	1988		287 688 658	224 435 577	78,6
FINLANDE†	1981	MARK	2 595 000	2 310 000	89,0
	1985		*5 214 000	∞	∞
	1989		*8 887 800	6 114 400	84,8
FRANCE	1981	FRANC	62 472 000	56 858 000	91,0
	1985		105 917 000	95 152 000	89,8
	1988		130 631 000	117 729 000	89,4
GRÈCE†	1981	DRACHME	4 039 000	∞	∞
	1982		5 019 000	∞	∞
	1983		6 067 000	∞	∞
HONGRIE†	1980	FORINT	21 258 000	18 211 000	85,7
	1985		24 077 000	20 767 000	86,3
	1989		33 441 000	29 410 000	87,9
IRLANDE	1981	LIVRE	83 332	73 003	87,6
	1985		146 702	125 335	85,4
	1988		185 800	∞	∞
ISLANDE	1981	COURONNE	160 000	∞	∞
	1985		845 000	∞	∞
	1989		3 123 000	∞	∞
ITALIE†	1980	LIRE	2 897 274	2 442 501	84,3
	1985		9 132 902	7 373 662	80,7
	1988		13 281 284	11 423 405	86,0
MALTE†	1983	LIRE	10	9	90,0
	1985		10	9	90,0
	1988		10	9	90,0
NORVÈGE	1980	COURONNE	3 629 800	3 307 200	91,1
	1985		8 109 900	7 276 700	89,7
	1989		*12 000 000	*10 700 000	*89,2
PAYS-BAS†	1980	FLORIN	6 348 000	5 731 000	90,3
	1985		8 748 000	7 801 000	89,2
	1989		10 283 000	9 105 000	88,5
POLOGNE†	1980	ZLOTY	42 400 000	37 400 000	88,2
	1985		100 396 900	83 801 000	83,5
	1987		257 321 000	220 704 300	85,8

TABLEAU 6 (suite)

Dépenses consacrées à la recherche et au développement expérimental (en milliers)

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Total	Dépenses courantes	
				Total	% du total
<b>EUROPE (suite)</b>					
PORTUGAL	1980	ESCUDO	4 118 500	3 160 600	76,7
	1984		11 307 600	9 328 800	82,5
	1988		29 910 800	23 520 300	78,6
ROUMANIE	1987	LEU	19 848 000	17 468 000	88,0
	1988		20 415 000	18 010 000	88,2
	1989		20 866 000	18 449 000	88,4
ROYAUME-UNI†	1981	LIVRE STERLING	5 921 200	ooo	ooo
	1985		7 919 200	ooo	ooo
	1989		11 531 700	ooo	ooo
SUÈDE†	1981	COURONNE	13 320 000	12 240 000	91,9
	1985		24 989 000	22 365 000	89,5
	1991		36 410 000	ooo	ooo
SUISSE	1977	FRANC	*3 430 000	*3 110 000	*90,7
	1980		ooo	3 611 100	ooo
	1983		ooo	4 643 000	ooo
EX-TCHÉCOSLOVAQUIE†	1980	COURONNE	18 302 000	15 979 000	87,3
	1985		21 298 000	18 477 000	86,8
	1989		24 721 000	22 100 000	89,4
EX-YOUGOSLAVIE†	1980	DINAR	14 105	ooo	ooo
	1985		94 688	ooo	ooo
	1989		2 152 032	1 336 950	62,1
<b>OCÉANIE</b>					
AUSTRALIE	1981	DOLLAR	1 561 800	1 365 800	87,5
	1985		2 747 400	2 422 700	88,2
	1988		4 187 100	3 596 900	85,9
FIDJI†	1984	DOLLAR	2 260	2 000	88,5
	1985		2 750	2 250	81,8
	1986		3 800	3 000	78,9
GUAM†	1984	DOLLAR DES	431	ooo	ooo
	1985	ÉTATS-UNIS	418	ooo	ooo
	1986		502	ooo	ooo
ÎLES DU PACIFIQUE	1978	DOLLAR DES	185	185	100,0
	1979	ÉTATS-UNIS	185	185	100,0
NOUVELLE-CALÉDONIE†	1983	FRANC CFP	184 224	154 924	84,1
	1984		484 741	456 485	94,2
	1985		800 820	707 547	88,4

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Total	Dépenses courantes	
				Total	% du total
<b>OCÉANIE (suite)</b>					
NOUVELLE-ZÉLANDE†	1975	DOLLAR	*99 776	*91 449	*91,7
	1977		117 322	110 936	94,6
	1979		175 373	157 768	90,0
POLYNÉSIE FRANÇAISE†	1980	FRANC CFP	236 990	230 970	97,5
	1982		304 320	301 650	99,1
	1983		324 720	308 440	95,0
SAMOA	1976	TALA	1 385	380	27,4
	1977		2 341	341	14,6
	1978		2 500	500	20,0
SAMOA AMÉRICAIN†	1970	DOLLAR DES	100	80	80,0
	1971	ÉTATS-UNIS	120	100	83,3
TONGA†	1978	PA'ANGA	240	226	94,2
	1979		475	256	53,9
	1980		426	279	65,5
VANUATU	1973	FRANC	13 119	13 119	100,0
	1974		20 925	20 925	100,0
	1975		21 603	21 603	100,0
<b>EX-URSS</b>					
EX-URSS†	1980	ROUBLE	21 300 000	000	000
	1985		28 600 000	000	000
	1988		37 800 000	000	000

#### † NOTES PAR PAYS

##### AFRIQUE

**Algérie** : les données ne concernent que le secteur de l'enseignement supérieur.

**Burundi** : non compris les données pour le secteur de la production. En 1989, les dépenses de personnel au Ministère de la santé publique sont aussi exclues.

**Égypte** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Gabon** : non compris les données pour le secteur de la production.

**Niger** : les données ne concernent que le secteur de l'enseignement supérieur.

**Nigéria** : les données ne concernent que vingt-trois des vingt-six instituts de

recherche nationaux sous tutelle du Ministère fédéral de la science et de la technologie.

**Seychelles** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

##### AMÉRIQUE DU NORD

**Canada** : non compris les sciences sociales et humaines dans le secteur de la production (activités de R-D intégrées).

**Cuba** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale. Les données pour 1989 se réfèrent aux fonds publics seulement.

**El Salvador** : les données concernent les activités de R-D exercées dans les entreprises publiques et ne comprennent pas le secteur de l'enseignement supérieur ni les fonds étrangers.

**États-Unis** : non compris les données pour le droit, les sciences humaines et l'éducation. Les dépenses totales ne comprennent pas les dépenses en capital du secteur de la production. En 1980, les dépenses en capital de R-D des organisations à but non lucratif sont aussi exclues.

**Jamaïque** : les données se réfèrent au Scientific Research Council seulement. **Mexique** : chiffres en millions.

**Trinité-et-Tobago** : les données pour 1970 ne comprennent pas le droit, l'éducation et les arts.

#### AMÉRIQUE DU SUD

**Argentine** : chiffres en millions.

**Bésil** : chiffres en millions. Non compris les entreprises privées de production.

**Chili** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Guyana** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale. Les données relatives au secteur de service général et les sciences médicales du secteur de l'enseignement supérieur sont aussi exclues.

**Pérou** : les données se réfèrent aux crédits budgétaires relatifs à la science et à la technologie.

**Venezuela** : les données de se réfèrent aux dépenses publiques seulement et ne comprennent pas les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

#### ASIE

**Brunei Darussalam** : les données se réfèrent à deux instituts de recherche seulement.

**Chypre** : les données ne comprennent pas le secteur de la production et ne concernent que les dépenses du gouvernement.

**Inde** : en 1985, les dépenses totales comprennent 243 700 000 roupies dans le secteur de l'enseignement supérieur, dont la répartition entre dépenses courantes et dépenses en capital n'a pas été précisée. On n'a pas tenu compte de ces chiffres pour calculer le pourcentage.

**Indonésie** : dépenses du gouvernement seulement. Les données pour 1984 et 1985 ne se réfèrent qu'au secteur de service général.

**Iran (République islamique d')** : les données ne se réfèrent qu'aux fonds publics.

**Iraq** : données partielles. En 1974, les dépenses consacrées à la R-D dans les départements gouvernementaux concernés par les activités scientifiques s'élevaient à 7 409 000 de dinars, dont 4 909 000 correspondaient aux dépenses courantes.

**Israël** : compte non tenu des données relatives aux sciences humaines et au droit, financés par les budgets courants des universités.

**Japon** : chiffres en millions. Non compris les données pour les sciences sociales et humaines dans le secteur de la production (activités de R-D intégrées).

**Jordanie** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Koweït** : les données se réfèrent aux activités scientifiques et technologiques.

**Liban** : données partielles pour la Faculté des sciences de l'Université du Liban seulement.

**Malaisie** : les données ne concernent que les dépenses du gouvernement.

**Pakistan** : les données se réfèrent aux activités de R-D se trouvant pour la plupart dans les établissements de recherche financés par le gouvernement. Les sciences sociales et humaines dans les secteurs de l'enseignement supérieur et de service général sont exclues. Compte non tenu des activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Philippines** : non compris les organisations privées à but non lucratif en 1980.

**République de Corée** : chiffres en millions. Non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale. Les données pour 1980 ne comprennent pas le droit, les sciences humaines et l'éducation ; à partir de 1981, les sciences sociales et humaines sont exclues.

**Singapour** : en 1987, non compris les fonds étrangers ni les sciences sociales et humaines.

**Sri Lanka** : pour 1975, les données ne comprennent pas les dépenses en capital du secteur de l'enseignement supérieur.

**Viet Nam** : les données ne concernent que les dépenses du gouvernement.

#### EUROPE

**Allemagne, ex-République démocratique allemande** : les données se réfèrent aux dépenses relatives à la science et à la technologie ; **ex-République fédérale d'Allemagne** : suite à des changements de méthodologie en 1979, les données ne sont pas strictement comparables à celles des années antérieures. Pour 1979, 1985 et 1987, les dépenses totales comprennent respectivement 615, 350 et 644 millions de deutsche marks, dont la répartition entre dépenses courantes et dépenses en capital n'a pas été précisée. On n'a pas tenu compte de ces chiffres pour calculer le pourcentage. Non compris les sciences sociales et humaines dans le secteur de la production.

**Belgique** : non compris les communautés et les régions.

**Espagne** : pour 1988, les dépenses totales comprennent 2 267 589 000 pesetas (dépensées par les organisations privées à but non lucratif), dont la répartition entre dépenses courantes et dépenses en capital n'a pas été précisée. On n'a pas tenu compte de ces chiffres pour calculer les pourcentages.

**Finlande** : pour 1989, les dépenses totales comprennent 1 680 millions de markkas du secteur de l'enseignement supérieur, dont la répartition entre dépenses courantes et dépenses en capital n'a pas été précisée. On n'a pas tenu compte de ce chiffre pour calculer le pourcentage.

**Grèce** : les données se réfèrent aux activités gouvernementales seulement.

**Hongrie** : suite à des changements de méthodologie en 1981, les données ne sont pas comparables à celles des années précédentes. Pour la R-D de caractère militaire, seule la partie effectuée dans les établissements civils a été considérée.

**Italie** : chiffres en millions.

**Malte** : les données ne concernent que le secteur de l'enseignement supérieur.

**Pays-Bas** : non compris les données pour les sciences sociales et humaines du secteur de la production (activités de R-D intégrées).

**Pologne** : non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

**Royaume-Uni** : les données ne comprennent pas les fonds de R-D exécutés à l'étranger. Non compris les données pour les sciences sociales et humaines, sauf pour 1989.

**Suède** : les données ne comprennent pas les sciences sociales et humaines pour les secteurs de la production et de service général.

**ex-Tchécoslovaquie** : pour la R-D de caractère militaire, seule la partie effectuée dans les établissements civils a été considérée.

**ex-Yougoslavie** : chiffres en millions. Non compris les activités de R-D de caractère militaire ou relevant de la défense nationale.

#### Océanie

**Fidji** : les données ne concernent qu'un institut de recherche.

**Guam** : les données ne concernent que le secteur de l'enseignement supérieur.

**Nouvelle-Calédonie** : les données se réfèrent à trois instituts de recherche en 1983, quatre en 1984 et six en 1985.

**Nouvelle-Zélande** : en 1977, les dépenses totales ne comprennent pas les dépenses en capital destinées aux bâtiments.

**Polynésie française** : les données ne concernent qu'un institut de recherche.

**Samoa américain** : les données ne concernent qu'un institut de recherche.

**Tonga** : les données ne concernent qu'un institut de recherche.

**Ex-URSS** : montant total des sommes dépensées pour la science d'après le budget national et autres sources.

**TABLEAU 7**  
Indicateurs sélectionnés pour les dépenses de recherche et de développement expérimental

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Dépense en % du produit national brut	Dépense par habitant	Moyenne annuelle par scientifique ou ingénieur de R-D
<b>AFRIQUE</b>					
BÉNIN	1989	FRANC CFA	0,7	745,3	4 216 200
BURUNDI	1989	FRANC	0,3	101,0	3 154 000
CONGO	1984	FRANC CFA	0,0	13,6	29 600
ÉGYPTE	1982	LIVRE	0,2	0,9	∞
GABON	1986	FRANC CFA	0,0	380,0	1 900
JAMAHIRIYA ARABE LIBYENNE	1980	DINAR	0,2	7,5	20 800
MADAGASCAR	1988	FRANC	0,4	1 276,3	*53 425 700
MAURICE	1989	ROUPIE	0,3	97,3	540 400
NIGÉRIA	1987	NAIRA	0,1	0,9	64 500
<b>RÉPUBLIQUE</b>					
CENTRAFRICAINE	1984	FRANC CFA	0,2	264,4	3 473 400
RWANDA	1985	FRANC	0,5	150,5	12 937 500
SEYCHELLES	1983	ROUPIE	1,3	200,8	714 100
<b>AMÉRIQUE DU NORD</b>					
CANADA	1989	DOLLAR	*1,4	*326,0	*140 200
COSTA RICA	1986	COLÓN	0,3	225,5	∞
CUBA	1989	PESO	0,8	21,1	18 400
EL SALVADOR	1989	COLÓN	0,9	56,3	2 048 500
ÉTATS-UNIS	1988	DOLLAR	2,9	568,4	*146 700
GUATEMALA	1988	QUETZAL	0,2	3,7	37 100
JAMAÏQUE	1986	DOLLAR	0,0	1,7	223 100
MEXIQUE	1989	PESO	0,2	12 107,6	∞
NICARAGUA	1987	CORDOBA	0,0	282,5	1 364 100
PANAMA	1986	BALBOA	0,0	0,1	∞
SAINTE-LUCIE	1984	DOLLAR DES CARAÏBES ORIENTALES	2,9	90,7	229 200
TRINITÉ-ET-TOBAGO	1984	DOLLAR	0,8	123,5	520 900
<b>AMÉRIQUE DU SUD</b>					
ARGENTINE	1988	AUSTRAL	0,4	110,0	312 700
BRÉSIL	1985	CRUZEIRO	0,4	39 763,8	101 971 900
CHILI	1988	PESO	0,5	1 757,6	4 838 800
COLOMBIE	1982	PESO	0,1	98,0	2 543 200
GUYANA	1982	DOLLAR	0,2	3,6	31 500
PÉROU	1984	SOL	0,2	8 373,7	∞
VENEZUELA	1985	BOLIVAR	0,3	81,5	∞
<b>ASIE</b>					
BRUNEI DARUSSALAM	1984	DOLLAR	0,1	50,6	544 000
CHYPRE	1984	LIVRE	0,1	1,8	23 000
INDE	1988	ROUPIE	0,9	42,4	*291 700
INDONÉSIE	1988	ROUPIE	0,2	1 461,0	8 093 000
IRAN (Rép. islamique d')	1985	RIAL	∞	462,2	6 891 300
ISRAËL	1985	SHEKEL	3,1	215,2	*45 300

TABLEAU 7 (suite)

Indicateurs sélectionnés pour les dépenses de recherche et de développement expérimental

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Dépense en % du produit national brut	Dépense par habitant	Moyenne annuelle par scientifique ou ingénieur de R-D
<b>ASIE (suite)</b>					
JAPON	1988	YEN	2,8	86 901,8	17 284 700
JORDANIE	1986	DINAR	0,3	1,6	13 400
KOWEÏT	1984	DINAR	0,9	43,6	47 100
LIBAN	1980	LIVRE	∞	8,2	122 200
MALAISIE	1989	RINGGIT	0,1	5,6	*17 600
PAKISTAN	1987	ROUPIE	1,0	50,6	*840 500
PHILIPPINES	1984	PESO	0,1	11,4	127 000
QATAR	1986	RIYAL	0,0	21,7	29 000
RÉPUBLIQUE DE CORÉE	1988	WON	1,9	55 756,2	41 506 800
SINGAPOUR	1987	DOLLAR	0,9	143,1	111 500
SRI LANKA	1984	ROUPIE	0,2*	16,2	*92 000
THAÏLANDE	1987	BAHT	0,2	50,0	481 000
TURQUIE	1985	LIRE	0,7	3 822,9	17 068 600
VIET NAM	1985	DÔNG	∞	8,3	24 900
<b>EUROPE</b>					
<b>ALLEMAGNE</b>					
ex-Rép. démocratique allemande	1989	MARK	4,3	728,8	93 200
ex-Rép. féd. d'Allemagne	1987	DEUTSCHE MARK	2,9	937,6	345 600
AUTRICHE	1985	SCHILLING	1,3	2 273,4	*2 258 200
BELGIQUE	1988	FRANC	1,7	9 273,0	5 482 700
BULGARIE	1989	LEV	2,7	115,9	∞
DANEMARK	1989	COURONNE	1,6	2 316,6	1 115 400
ESPAGNE	1988	PESETA	0,7	7 376,1	9 229 700
FINLANDE	1989	MARK	*1,8	*1 793,3	*785 300
FRANCE	1988	FRANC	2,3	2 348,8	1 134 300
GRÈCE	1986	DRACHME	0,3	1 841,2	∞
HONGRIE	1989	FORINT	2,0	3 168,3	1 636 800
IRLANDE	1986	LIVRE	1,1	50,8	29 300
ITALIE	1988	LIRE	1,1	232 414,8	177 479 000
MALTE	1988	LIRE	0,0	0,0	300
NORVÈGE	1989	COURONNE	*2,0	*2 857,8	*991 700
PAYS-BAS	1989	FLORIN	2,2	692,5	∞
POLOGNE	1989	ZLOTY	1,2	32 222,0	37 752 700
PORTUGAL	1988	ESCUDO	0,5	2 917,0	5 977 400
ROUMANIE	1989	LEU	2,6	902,9	349 700
ROYAUME-UNI	1989	LIVRE STERLING	2,3	201,9	∞
SUÈDE	1991	COURONNE	2,8	4 308,3	∞
SUISSE	1989	FRANC	1,8	834,2	582 700
EX-TCHÉCOSLOVAQUIE	1989	COURONNE	3,3	1 583,9	377 600
EX-YOUGOSLAVIE	1988	DINAR	1,4	91 060,5	61 893 400

Pays/ territoire	Année	Monnaie	Dépense en % du produit national brut	Dépense par habitant	Moyenne annuelle par scientifique ou ingénieur de R-D
<b>OCÉANIE</b>					
AUSTRALIE	1988	DOLLAR	1,3	255,2	108 600
FIDJI	1986	DOLLAR	0,3	5,3	105 600
GUAM	1989	DOLLAR DES ÉTATS-UNIS	∞	*16,5	*91 714
NOUVELLE-CALÉDONIE	1985	FRANC CFP	0,6	5 268,6	10 400 300
POLYNÉSIE FRANÇAISE	1983	FRANC CFP	0,2	1 980,0	19 101 200
TONGA	1980	PA'ANGA	0,9	4,4	*38 700
<b>EX-URSS</b>					
EX-URSS	1988	ROUBLE	6,5	133,5	24 800

#### NOTE GÉNÉRALE

En l'absence de taux de change applicables aux activités de R-D pour comparer d'un pays à l'autre les données établies en monnaie nationale, il faudra nécessairement se baser sur les taux de change officiels de conversion des monnaies nationales en dollars des États-Unis, tels qu'ils figurent dans le tableau 8. Il va sans dire que ces taux de change ne reflètent pas toujours le coût réel des activités de R-D. Pour l'ex-République démocratique allemande et l'ex-URSS, les chiffres indiqués dans la première colonne sont exprimés en pourcentage du produit matériel net; pour Cuba, le chiffre a été calculé en pourcentage du produit social global.

**TABLEAU 8**  
**Cours des changes**

Pays/ territoire	Monnaie nationale	Valeur du dollar des États-Unis en monnaie nationale					
		1980	1982	1984	1986	1988	1989
<b>AFRIQUE</b>							
AFRIQUE DU SUD	RAND	0,779	1,086	1,475	2,285	2,273	2,623
ALGÉRIE	DINAR	3,838	4,592	4,983	4,702	5,915	7,609
ANGOLA	KWANSA	29,918	29,918	29,918	29,918	29,918	29,918
BÉNIN	FRANC CFA	211,28	328,61	436,96	346,3	297,85	319,01
BOTSWANA	PULA	0,777	1,030	1,298	1,879	1,829	2,015
BURKINA FASO	FRANC CFA	211,28	328,61	436,96	346,3	297,85	319,01
BURUNDI	FRANC	90,00	90,00	119,709	114,171	140,395	158,667
CAMEROUN	FRANC CFA	211,28	328,61	436,96	346,3	297,85	319,01
CAP-VERT	ESCUDO	40,175	58,293	84,878	80,145	72,068	77,978
COMORES	FRANC CFA	211,28	328,61	436,96	346,3	297,85	319,01
CONGO	FRANC CFA	211,28	328,61	436,96	346,3	297,85	319,01
CÔTE D'IVOIRE	FRANC CFA	211,28	328,61	436,96	346,3	297,85	319,01
DJIBOUTI	FRANC	177,721	177,721	177,721	177,721	177,721	177,721
ÉGYPTÉ	LIVRE	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,852
ÉTHIOPIE	BIRR	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07	2,07
GABON	FRANC CFA	211,28	328,61	436,96	346,3	297,85	319,01
GAMBIE	DALASI	1,721	2,29	3,584	6,938	6,709	7,585
GHANA	CEDI	2,75	2,75	35,986	89,204	202,346	270,00
GUINÉE	SYLI	18,969	22,366	24,09	333,453	474,396	591,646
GUINÉE-BISSAU	PESO	33,81	39,87	105,29	203,95	1 111,06	1 811,42
GUINÉE ÉQUATORIALE†	FRANC CFA	110,63	219,72	321,52	346,3	297,85	319,01
JAMAHIRIYA ARABE LIBYENNE	DINAR	0,296	0,296	0,296	0,315	0,286	0,299
KENYA	SHILLING	7,42	10,922	14,414	16,226	17,747	20,573
LESOTHO	MALOTI	0,779	1,086	1,475	2,285	2,273	2,623
LIBÉRIA	DOLLAR	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
MADAGASCAR	FRANC	211,28	349,74	576,64	676,34	1 407,11	1 603,44
MALAWI	KWACHA	0,812	1,056	1,413	1,861	2,561	2,76
MALI	FRANC CFA	211,28	328,61	436,96	346,3	297,85	319,01
MAURITANIE	OUGUIYA	45,914	51,769	63,803	74,375	75,261	83,051
MAURICE	ROUPIE	7,684	10,873	13,80	13,466	13,438	15,25
MAROC	DIRHAM	3,937	6,023	8,811	9,104	8,209	8,488
MOZAMBIQUE	METICAL	32,40	37,77	42,44	40,43	524,64	744,92
NIGER	FRANC CFA	211,28	328,61	436,96	346,3	297,85	319,01
NIGÉRIA	NAIRA	0,547	0,674	0,767	1,755	4,537	7,365
OUGANDA	SHILLING	0,07	0,94	3,60	14,00	106,14	223,09
<b>RÉPUBLIQUE</b>							
CENTRAFRICAINE	FRANC CFA	211,28	328,61	436,96	346,3	297,85	319,01
RÉPUBLIQUE-UNIE DE							
TANZANIE	SHILLING	8,197	9,283	15,292	32,698	99,292	143,377
RWANDA	FRANC	92,84	92,84	100,172	87,64	76,445	79,977
SAO TOMÉ-ET-							
PRINCIPE	DOBRA	34,771	40,999	44,159	38,589	86,343	124,672
SÉNÉGAL	FRANC CFA	211,28	328,61	436,96	346,3	297,85	319,01
SEYCHELLES	ROUPIE	6,392	6,553	7,059	6,177	5,384	5,646
SIERRA LEONE	LEONE	1,05	1,239	2,51	16,092	32,514	59,813
SOMALIE	SHILLING	6,295	10,75	20,019	72,00	170,453	490,675
SOUDAN	LIVRE	0,500	0,952	1,30	2,50	4,50	4,50



## Valeur du dollar des États-Unis en monnaie nationale

Pays/ territoire	Monnaie nationale	Valeur du dollar des États-Unis en monnaie nationale					
		1980	1982	1984	1986	1988	1989
<b>AFRIQUE (suite)</b>							
SWAZILAND	LILANGENI	0,779	1,085	1,475	2,285	2,273	2,623
TCHAD	FRANC CFA	211,28	328,61	436,96	346,3	297,85	319,01
TOGO	FRANC CFA	211,28	328,61	436,96	346,3	297,85	319,01
TUNISIE	DINAR	0,405	0,591	0,777	0,794	0,858	0,949
ZAÏRE	ZAÏRE	2,80	5,75	36,13	59,63	187,07	381,45
ZAMBIE	KVACHA	0,789	0,929	1,813	7,788	8,266	13,814
ZIMBABWE	DOLLAR	0,643	0,759	1,258	1,667	1,806	2,119
<b>AMÉRIQUE DU NORD</b>							
ANTIGUA-ET-BARBUDA	DOLLAR DES						
	CARAÏBES ORIENTALES	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
ANTILLES NÉERLANDAISES	FLORIN	1,80	1,80	1,80	1,80	1,80	1,793
BAHAMAS	DOLLAR	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
BARBADE	DOLLAR	2,011	2,011	2,011	2,011	2,011	2,011
BÉLIZE	DOLLAR	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
BERMUDES	DOLLAR	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CANADA	DOLLAR	1,169	1,234	1,295	1,39	1,231	1,184
COSTA RICA	COLÓN	8,57	37,407	44,533	55,986	75,805	81,504
CUBA§	PESO	0,71	0,85	0,90	0,793	0,776	0,791
DOMINIQUE	DOLLAR DES						
	CARAÏBES ORIENTALES	2,7	2,7	2,70	2,70	2,70	2,70
EL SALVADOR	COLÓN	2,50	2,50	2,50	4,852	5,00	5,00
ÉTATS-UNIS	DOLLAR	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
GRENADE	DOLLAR DES						
	CARAÏBES ORIENTALES	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
GUATEMALA	QUETZAL	1,00	1,00	1,00	1,875	2,62	2,816
HAÏTI	GOURDE	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
HONDURAS	LEMPIRA	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
JAMAÏQUE	DOLLAR	1,781	1,781	3,943	5,478	5,489	5,745
MEXIQUE	PESO	22,95	56,4	167,83	611,77	2 273,11	2 461,47
MONTSERRAT	DOLLAR DES						
	CARAÏBES ORIENTALES	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
NICARAGUA	CORDOBA	∞	∞	∞	∞	∞	∞
PANAMA	BALBOA	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
RÉPUBLIQUE DOMINICAINE	PESO	1,00	1,00	1,00	2,904	6,113	6,34
SAINT-CHRISTOPHE-ET-NEVIS	DOLLAR DES						
	CARAÏBES ORIENTALES	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
SAINTE-LUCIE	DOLLAR DES						
	CARAÏBES ORIENTALES	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
SAINT-VINCENT-ET- GRENADINES	DOLLAR DES						
	CARAÏBES ORIENTALES	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70	2,70
TRINITÉ-ET-TOBAGO	DOLLAR	2,40	2,40	2,40	3,60	3,844	4,25
<b>AMÉRIQUE DU SUD</b>							
ARGENTINE†	AUSTRAL	184,00	2592,0	0,068	0,943	8,753	423,340
BOLIVIE†	BOLIVIANO	24,52	64,07	3 135,91	1,922	2,350	2,692
BRÉSIL	CRUZEIRO	0,053	0,180	1,848	13,654	263,00	2 833,92
CHILI	PESO	39,00	50,909	98,656	193,016	245,048	267,155

**TABLEAU 8 (suite)**  
**Cours des changes**

Pays/ territoire	Monnaie nationale	Valeur du dollar des États-Unis en monnaie nationale					
		1980	1982	1984	1986	1988	1989
<b>AMÉRIQUE DU SUD (suite)</b>							
COLOMBIE	PESO	47,28	64,085	100,817	194,261	299,174	382,568
ÉQUATEUR	SUCRE	25,00	30,03	62,54	122,78	301,61	526,35
GUYANA	DOLLAR	2,55	3,00	3,832	4,272	10,00	27,159
PARAGUAY	GUARANI	126,00	126,00	201,00	339,17	550,00	1 056,22
PÉROU	INTI	0,289	0,698	3,467	13,948	128,83	2 666,19
SURINAME	FLORIN	1,785	1,785	1,785	1,785	1,785	1,785
URUGUAY	PESO	9,10	13,91	56,12	151,99	359,44	605,51
VENEZUELA	BOLIVAR	4,293	4,293	7,018	8,083	14,5	34,681
<b>ASIE</b>							
AFGHANISTAN	AFGHANI	44,129	50,6	50,60	50,60	50,60	50,60
ARABIE SAOUDITE	RIYAL	3,327	3,428	3,524	3,703	3,745	3,745
BAHRÉÏN	DINAR	0,377	0,376	0,376	0,376	0,376	0,376
BANGLADESH	TAKA	15,454	22,118	25,354	30,407	31,733	32,27
BHOUTAN	NGULTRUM	7,863	9,455	11,363	12,611	13,917	16,226
BRUNEI DARUSSALAM	DOLLAR	2,151	2,149	2,141	2,22	2,013	1,951
CHINE	YUAN	1,498	1,893	2,32	3,453	3,722	3,765
CHYPRE	LIVRE	0,353	0,475	0,588	0,518	0,467	0,494
ÉMIRATS ARABES UNIS	DIRHAM	3,707	3,671	3,671	3,671	3,671	3,671
HONG KONG	DOLLAR	4,976	6,07	7,818	7,803	7,806	7,807
INDE	ROUPIE	7,863	9,455	11,363	12,611	13,917	16,226
INDONÉSIE	RUPIAH	626,99	661,42	1 025,94	1 282,56	1 685,7	1 770,06
IRAN (Rép. islamique d')	RIAL	70,615	83,603	90,297	78,76	68,683	72,015
IRAQ	DINAR	0,295	0,299	0,311	0,311	0,311	0,311
ISRAËL	SHEKEL	0,005	0,024	0,293	1,488	1,599	1,916
JAPON	YEN	226,74	249,08	237,52	168,52	128,15	137,96
JORDANIE	DINAR	0,298	0,353	0,384	0,35	0,374	0,575
KOWEÏT	DINAR	0,27	0,288	0,296	0,291	0,279	0,294
LIBAN	LIVRE	3,44	4,74	6,51	38,37	409,23	496,69
MACAU	PATACA	5,095	6,226	8,045	8,357	8,05	8,05
MALAISIE	RINGGIT	2,177	2,335	2,344	2,581	2,619	2,709
MALDIVES	RUFYAA	7,55	7,174	7,05	7,151	8,785	9,041
MONGOLIE†	TUGRIK	2,85	3,27	3,79	3,18	2,95	2,99
MYANMAR	KYAT	6,599	7,79	8,386	7,33	6,395	6,705
NÉPAL	ROUPIE	12,00	13,244	16,459	21,23	23,289	27,189
OMAN	RIAL	0,345	0,345	0,345	0,382	0,385	0,385
PAKISTAN	ROUPIE	9,90	11,848	14,046	16,648	18,003	20,542
PHIIPPINES	PESO	7,511	8,54	16,699	20,386	21,095	21,737
QATAR	RIYAL	3,657	3,64	3,64	3,64	3,64	3,64
RÉPUBLIQUE ARABE SYRIENNE	LIVRE	3,925	3,925	3,925	3,925	11,225	11,225
RÉPUBLIQUE DE CORÉE	WON	607,43	731,08	805,98	881,45	731,47	671,46
RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE POPULAIRE LAO	KIP	10,128	35,00	35,00	95,00	392,012	583,015
SINGAPOUR	DOLLAR	2,141	2,14	2,133	2,177	2,012	1,95
SRI LANKA	ROUPIE	16,534	20,812	25,438	28,017	31,807	36,047
THAÏLANDE	BAHT	20,476	23,00	23,639	26,299	25,294	25,702
TURQUIE	LIRE	76,04	162,55	366,68	674,51	1 422,35	2 121,68
VIET NAM	DÔNG	0,21	0,94	1,03	18,00	480,00	3 532,78

## Valeur du dollar des États-Unis en monnaie nationale

Pays/ territoire	Monnaie nationale	1980	1982	1984	1986	1988	1989
<b>ASIE (suite)</b>							
<b>YÉMEN</b>							
ex-Yémen démocratique	DINAR	0,345	0,345	0,345	0,345	0,345	0,345
ex-République arabe du Yémen	RIAL	4,563	4,563	5,353	9,639	9,772	9,76
<b>EUROPE</b>							
ALBANIE§	LEK	7,00	7,00	7,00	7,00	6,00	6,40
<b>ALLEMAGNE</b>							
ex-Rép. démocratique allemande§	MARK	1,95	2,50	3,05	2,00	1,87	1,79
ex-Rép. féd. d'Allemagne	DEUTSCHE MARK	1,818	2,427	2,846	2,171	1,756	1,880
AUTRICHE	SCHILLING	12,938	17,059	20,009	15,267	12,348	13,231
BELGIQUE	FRANC	29,242	45,691	57,783	44,672	36,768	39,404
BULGARIE†	LEV	0,85	0,85	0,98	0,94	0,83	0,84
DANEMARK	COURONNE	5,636	8,332	10,357	8,091	6,732	7,31
ESPAGNE	PESETA	71,702	109,859	160,761	140,048	116,487	118,378
FINLANDE	MARK	3,73	4,82	6,01	5,07	4,183	4,291
FRANCE	FRANC	4,226	6,572	8,739	6,926	5,957	6,380
GRÈCE	DRACHME	42,617	66,803	112,717	139,981	141,861	162,417
HONGRIE	FORINT	32,532	36,631	48,042	45,832	50,413	59,066
IRLANDE	LIVRE	0,487	0,705	0,923	0,743	0,656	0,706
ISLANDE	COURONNE	4,798	12,352	31,694	41,104	43,014	57,042
ITALIE	LIRE	856,45	1 352,51	1 756,96	1 490,81	1 301,63	1 372,09
LIECHTENSTEIN	FRANC SUISSE	1,676	2,03	23,50	1,799	1,463	1,636
LUXEMBOURG	FRANC	29,242	45,691	57,784	44,672	36,768	39,404
MALTE	LIRE	0,345	0,412	0,461	0,393	0,331	0,348
MONACO	FRANC FRANÇAIS	4,226	6,572	8,739	6,926	5,957	6,380
NORVÈGE	COURONNE	4,939	6,454	8,161	7,395	6,517	6,905
PAYS-BAS	FLORIN	1,988	2,67	3,209	2,45	1,977	2,121
POLOGNE	ZLOTY	44,2	84,8	113,20	175,30	430,50	1 439,20
PORTUGAL	ESCUDO	50,062	79,473	146,39	149,587	143,954	157,458
ROUMANIE	LEU	60,35	50,292	71,348	54,159	47,867	50,029
ROYAUME-UNI	LIVRE STERLING	0,43	0,573	0,752	0,682	0,562	0,611
SAINT-MARIN	LIRE	856,45	1 352,51	1 756,96	1 490,81	1 301,63	1 372,09
SUÈDE	COURONNE	4,230	6,283	8,272	7,124	6,127	6,447
SUISSE	FRANC	1,676	2,03	2,35	1,799	1,463	1,636
EX-TCHÉCOSLOVAQUIE†	COURONNE	14,27	13,71	16,61	14,99	14,36	15,05
EX-YOUGOSLAVIE	DINAR	0,003	0,005	0,015	0,038	0,252	2,876
<b>OCÉANIE</b>							
AUSTRALIE	DOLLAR	0,878	0,986	1,14	1,496	1,28	1,265
FIDJI	DOLLAR	0,818	0,932	1,083	1,133	1,43	1,483
ÎLES SALOMON	DOLLAR	0,830	0,971	1,274	1,742	2,083	2,293
NOUVELLE-CALÉDONIE	FRANC CFP	76,829	119,49	158,902	125,935	108,31	116,003

**TABLEAU 8 (suite)**  
Cours des changes

Pays/ territoire	Monnaie nationale	Valeur du dollar des États-Unis en monnaie nationale					
		1980	1982	1984	1986	1988	1989
<b>OCÉANIE (suite)</b>							
NOUVELLE-ZÉLANDE	DOLLAR	1,027	1,333	1,764	1,913	1,526	1,672
<b>PAPOUASIE-</b>							
NOUVELLE-GUINÉE	KINA	0,671	0,738	0,899	0,971	0,867	0,859
POLYNÉSIE FRANÇAISE	FRANC CFP	76,829	119,49	158,902	125,935	108,31	116,003
SAMOA	TALA	0,919	1,207	1,862	2,236	2,08	2,27
TONGA	PA'ANGA	0,878	0,986	1,14	1,496	1,28	1,264
VANUATU	VATU	68,292	96,208	99,233	106,076	104,426	116,042
<b>EX-URSS</b>							
EX-URSS§	ROUBLE	0,66	0,73	0,85	0,684	0,612	0,633
BÉLARUS§	ROUBLE	0,66	0,73	0,85	0,684	0,612	0,633
UKRAINE§	ROUBLE	0,66	0,73	0,85	0,684	0,612	0,633

**TABLEAU 8**

**NOTE GÉNÉRALE**

Ce tableau présente les cours des changes applicables aux données relatives aux dépenses ou aux ressources financières qui sont exprimées en monnaie nationale dans les tableaux 4, 5, 6 et 7. Les cours des changes sont exprimés en nombre d'unités de monnaie nationale pour un dollar des États-Unis.

Pour la plupart des pays, les données nous ont été fournies par le Fonds monétaire international et se réfèrent au cours moyen de l'année. Pour les autres pays (signalés par le symbole §), les cours des changes ont été tirés du *Bulletin mensuel de statistiques* des Nations Unies.

**† NOTES PAR PAYS**

**AFRIQUE**

**Guinée équatoriale** : avant 1986, la monnaie nationale est le birkwélé.

**AMÉRIQUE DU SUD**

**Argentine** : avant 1984, les cours des changes sont exprimés en australes par million de dollars des États-Unis.

**Bolivie** : avant 1986, les cours des changes sont exprimés en bolivianos par million de dollars des États-Unis.

**ASIE**

**Mongolie** : avant 1986, les données se réfèrent aux taux non commerciaux appliqués au tourisme et aux envois de fonds provenant des pays extérieurs à la zone rouble, et ont été extraites du *Bulletin mensuel de statistiques* publié par les Nations Unies.

**EUROPE**

**Bulgarie** : avant 1986, les données se réfèrent aux taux non commerciaux appliqués au tourisme et aux envois de fonds provenant des pays extérieurs à la zone rouble, et ont été extraites du *Bulletin mensuel de statistiques* publié par les Nations Unies.

**ex-Tchécoslovaquie** : avant 1980, les données se réfèrent aux taux non commerciaux appliqués au tourisme et aux envois de fonds provenant des pays extérieurs à la zone rouble, et ont été extraites du *Bulletin mensuel de statistiques* publié par les Nations Unies.

Connaître l'état de la science dans le monde, comprendre l'organisation et le fonctionnement de la recherche scientifique, tel est le but du *Rapport mondial sur la science* dont la publication, par l'UNESCO, est prévue tous les deux ans.

Ce premier *Rapport* comprend quatre parties principales. La première réunit des articles qui présentent l'état de la science et de la technologie dans les différentes régions du monde. L'organisation de la recherche, les indicateurs de la science et de la technologie, les sources de financement sont décrits dans la deuxième partie, tandis que la partie suivante est consacrée à l'importance du partenariat et de la coopération scientifique sur le plan international. La dernière partie donne une vue d'ensemble sur les progrès récents réalisés dans le domaine des sciences fondamentales. Le *Rapport* est complété par une annexe qui comprend des tableaux statistiques sur les activités et les effectifs scientifiques aux niveaux national et régional.

Ouvrage faisant autorité, le *Rapport mondial sur la science* est d'une lecture aisée. Rédigé par des auteurs reconnus dans leurs spécialités respectives, le texte est enrichi de faits, de figures, d'illustrations et de débats sur la science contemporaine. Il constitue une source d'information précieuse pour tous ceux — décideurs, scientifiques, chercheurs ou observateurs scientifiques — qui sont intéressés par l'évolution de la science et de la technologie dans le monde.

92-3-202938-3



9 789232 029386