

2586

LA SCIENCE VUE DU FUTUR...

Le métier de prophète, suivant le bon mot, est très ingrat, surtout en ce qui concerne l'avenir. Il l'est d'autant plus quand on s'aventure dans le domaine de la recherche scientifique et technique, où se préparent et mûrissent les découvertes et les inventions de demain. Dans les années 60, la vogue de la prévision technologique, avec ses « usines à penser » dans le style de la Rand Corporation ou du Hudson Institute, a débouché sur plus de déceptions et de mythes que de résultats convaincants. En particulier du point de vue des méthodes — qui doivent, dans les différentes disciplines, s'appuyer sur les avis inévitablement subjectifs des spécialistes — dont la pondération, comme dans la « méthode Delphi » (1), n'anticipe jamais le probable que sous bénéfice d'inventaire. Ces méthodes indiquent au mieux des lignes de force, des trajectoires possibles, des transformations concevables, entre science-fiction et utopie. Car l'avenir n'est jamais déterminé, et quand il y va de la science ou de la technologie les promesses doivent tenir compte, pour être tenues, de l'environnement économique, social ou politique où se joue, à plus ou moins long terme, le succès des innovations de demain.

Une terre entièrement inconnue

Pour la science, les percées nouvelles, les découvertes au sens propre du terme, à plus forte raison les changements de paradigmes au sens de Thomas Kuhn (2), sont terres entièrement

* Directeur du Centre « Science, Technologie et Société » au Conservatoire national des arts et métiers. Ancien directeur de la Division de la politique scientifique et technologique de l'OCDE. Auteur, entre autres publications, de: *L'Écrivain public et l'ordinateur: mirages du développement* (en collaboration avec André Lebeau), Hachette, 1988; *Science et politique*, Economica, 1989; *Science, guerre et paix*, Economica, 1989; *Le Destin technologique*, Balland, 1992 et Gallimard Folio, 1993.

inconnues. Il suffit de se rappeler que le monde physique, à la fin du XIX^e siècle, semblait le résultat d'une vaste synthèse à laquelle la science ne paraissait pas, aux yeux des meilleurs spécialistes, devoir apporter de grands bouleversements. Dans l'illusion d'un édifice achevé que les grandes disciplines classiques (mécanique, chimie, optique) avaient apparemment construit sur des bases inébranlables, le champ des instruments intellectuels que l'on pouvait cultiver pour comprendre la nature et le cosmos semblait épuisé. C'est précisément à ce moment qu'apparurent les fissures de l'édifice (par exemple l'expérience de Michelson (3)) que Planck et Einstein allaient reconstruire sur des bases entièrement nouvelles. Personne, en 1900, ne pouvait imaginer que la mécanique classique se réduirait, deux décennies plus tard, à une simple approximation de la mécanique relativiste, avec une méthode de calcul fondée sur l'indéterminisme (4).

Il n'est pas nécessaire de remonter si loin. Daniel Kleppner, directeur du laboratoire d'électronique au Massachusetts Institute of Technology (MIT), a raconté avec humour comment la prévision lui a infligé une leçon d'humilité (5). Tous les dix ans, les physiciens américains constituent une commission pour évaluer l'état de la discipline et imaginer l'avenir. Nommé en 1985 membre de la commission Brinkman (du nom de son président cette année-là), il se prépara à sa tâche en consultant le rapport de la commission précédente en physique atomique, discipline qui est la sienne. Lecture tout à fait déprimante: personne ne semblait avoir perçu que le laser était sur le point de bouleverser la physique atomique et de projeter l'optique à l'avant-garde des recherches. Bien d'autres évolutions n'avaient pas été anticipées. «Ma gorge s'est serrée, écrit-il, à l'idée des rustres qui rendaient si peu justice à mon domaine». Il parcourut la liste des membres du sous-groupe qui avaient été consultés et, au beau milieu, trouva son nom!

La commission Brinkman n'obtint pas un meilleur score. Cinq ans seulement après la publication de son rapport, les avancées dont aucun de ses membres n'eut l'idée ont prodigieusement élargi le champ de la physique: théorie de la complexité et du chaos, dynamique non linéaire, renaissance de la mécanique classique, physique mésoscopique, etc. La plus légendaire des découvertes absentes de la liste est celle de la superconductivité à très basse température, démontrée par deux chercheurs du laboratoire IBM de Zurich. Le sujet auquel ils s'intéressaient y était aussi excentrique que le matériau sur lequel ils expérimentaient (6). Voilà qui conforte — malgré les développements d'une science de

plus en plus organisée, intensive en capital, en équipement et en personnel — la grande tradition des chercheurs individuels poursuivant leurs propres objectifs, avec des moyens modestes et qui trouvent...loin de la mode. Daniel Kleppner souligne que ces exemples n'épuisent pas les surprises qui résultent des travaux menés en physique depuis cinq ans. «Les découvertes scientifiques excèdent invariablement tout ce que nous pouvons imaginer», dit-il avant de conclure: «Quand on y regarde de près, la seule chose que les scientifiques puissent prévoir avec beaucoup de précision, c'est une éclipse».

Quant à la technologie, on aura au moins appris au cours de ce dernier quart de siècle, grâce aux travaux des historiens, économistes et sociologues (Braudel, Rosenberg, Nelson, Freeman, Kransberg, etc.), qu'il n'y a jamais de processus linéaire dans le passage des découvertes aux innovations. La logique du découvreur ou de l'inventeur est souvent très différente de celle qui préside aux applications sur le marché, et le temps de diffusion des innovations est toujours plus long et incertain que ne l'anticipent les chercheurs et les promoteurs. Pour s'imposer, une technologie nouvelle ne doit pas seulement être fonctionnelle. Elle doit encore être compétitive. On nous parle depuis plus d'un demi-siècle de la généralisation des robots, mais les investissements qu'ils exigent excluent qu'ils se répandent dans les petites et moyennes entreprises. La moissonneuse-faucheuse existait dès les années 1830 aux États-Unis; il ne fallut pas moins d'une quarantaine d'années avant de la voir l'emporter sur le labeur humain: le coût de la main-d'œuvre demeurait inférieur à celui des investissements qu'elle nécessitait.

En comparant l'histoire des robots contemporains de l'électronique à celle de la moissonneuse-faucheuse de McCormick, Paul A. David a fort bien montré tous les problèmes que soulève leur diffusion: le salaire de la main-d'œuvre, le risque lié à l'investissement, celui de la transformation des ateliers et de la réorganisation du travail, le réaménagement des équipements auxiliaires, sans parler des incertitudes liées à l'environnement économique. De sorte que, «dans le choix entre la construction d'une nouvelle usine équipée de robots et la poursuite de l'exploitation d'une usine existante avec un moindre degré d'automatisation, *c'est le robot qui est désavantagé*». En somme, il demeure en situation de sous-emploi (7). Le jour où, dans un XXI^e siècle qui généralisera l'automatisation de l'industrie et des services, les robots deviendront effectivement les machines-esclaves de tout le système de production et de consommation, les questions que nous

nous posons aujourd'hui sur le temps ou l'aménagement du travail apparaîtront aussi dépassées que celles des corporations menacées par l'essor de l'industrialisation. On saura alors, avec l'extinction du travail salarié, si les « robots au pouvoir » sont voués à mettre la plus grande partie de l'humanité au chômage ou en vacances...

La fonctionnalité, comme le coût, n'est pas le seul préalable à la diffusion d'une technologie nouvelle. Il faut en outre que l'environnement institutionnel, social et même culturel n'y fasse pas obstacle, et donc qu'il soit préparé à l'accueillir. Songeons aux réticences qu'a soulevées la pilule contraceptive dans les pays de tradition catholique par rapport aux États à forte empreinte protestante. À la résistance que rencontre l'énergie nucléaire depuis plus d'une décennie aux États-Unis et dans nombre de pays européens. Ou aux déboires que connaît la télévision haute diffusion dont les perfectionnements ne suffisent pas à assurer le succès sur le marché, non seulement en raison de son coût (pourquoi acheter de nouveaux postes de télévision après être passé du noir à la couleur?), mais aussi de la rareté des programmes spécifiquement adaptés à ses performances techniques.

Même les efforts gouvernementaux — tout récemment, la loi adoptée par le Congrès américain — pour stimuler l'essor du multimédia (mariage de l'image, du son et de l'ordinateur à la faveur des algorithmes du numérique), ne sont pas assurés, dans le court terme, de gagner le grand public aux réseaux planétaires d'Internet. La loi américaine à peine signée par le président Clinton fait déjà l'objet de recours auprès de la Cour suprême en raison de la censure qu'elle entend exercer sur les messages tenus pour « immoraux » (qui vont des informations sur l'avortement aux échanges pornographiques). Sur le plan international, il faudra, avec le *forcing* des déréglementations à l'échelle mondiale, qu'on s'entende sur de nouvelles normes et, surtout, que les consommateurs privés se laissent séduire par des abonnements au coût plus attrayant.

Il y a d'ailleurs un autre aspect qu'il importe de prendre en compte quand on se lance dans la prévision technologique : sommes-nous bien armés pour identifier ce qui passera demain pour important? Une enquête récente menée par une équipe du MIT sous la direction de Lester Thurow montre que le grand public et les spécialistes perçoivent de façon très différente le poids et l'intérêt relatifs de certaines inventions (8). Sur 1 000 adultes interrogés, 34 % ont répondu que l'automobile était l'invention la plus importante et qu'ils ne pourraient pas vivre sans

elle. 8 % seulement estimaient qu'ils ne pourraient pas se passer d'un ordinateur — soit le même pourcentage que pour le sèche-cheveux! Ils étaient 5 % à considérer que la télévision était une invention très importante et 22 % à ne pas pouvoir vivre sans elle. Après l'automobile, champion toutes catégories dans l'appréciation des merveilles du xx^e siècle, l'ampoule électrique vient en second, puis le téléphone. Mais l'ordinateur personnel est en quatrième position, ex-æquo avec... l'aspirine! Voilà qui relativise, conclut Lester Thurow, l'importance que la majorité des consommateurs prête aux inventions dans notre vie de tous les jours.

Les fantasmes de la prévision technologique

« L'homme sait souvent ce qu'il a fait, dit Paul Valéry, mais il ne sait jamais ce que fait ce qu'il a fait ». Comment saurait-il ce qu'a fait ce qu'il fera? C'est bien pourquoi la prévision technologique est un art aventureux auquel l'épreuve de l'histoire impose très souvent son démenti. Quand on relit le best-seller que fut *L'an 2000* de Herman Kahn, publié en 1967 comme « un canevas de spéculations pour les 32 prochaines années », on peut mesurer tout le chemin qui n'a pas été parcouru. Passons sur les nombreux scénarios de guerre nucléaire entre les États-Unis et l'ex-Union soviétique. Ces scénarios ont fait la gloire de Herman Kahn. Or aucun, bien entendu, n'a imaginé que la fin de la Guerre froide et la chute du mur de Berlin auraient lieu, sans le moindre coup de fusil, par implosion du système communiste. Faut-il s'étonner que, dans le chapitre consacré à l'électronique et à l'informatique, l'idée du CD-Rom et du multimédia n'apparaisse pas? Mieux, Herman Kahn est de ceux qui annonçaient pour l'an 2000 la généralisation des robots dans les usines et dans tous les foyers, sous forme « d'aides ménagères » entraînées « dans le but d'accomplir un travail particulier à chaque maison ». Ces robots-esclaves, « pas plus capables d'émotion qu'une voiture », posséderaient « une mémoire pour enregistrer les ordres » et pourraient « bien diriger d'autres machines plus spécialisées comme l'aspirateur ou la machine à laver » (9).

Ce qui révèle le plus combien la prévision technologique est liée aux fantasmes de ceux qui la font passer pour une méthode rigoureuse, à la manière des augures et des haruspices de l'Antiquité, c'est le caractère *essentiellement* apocalyptique (le mot est de Kahn) des usages et des effets sociaux qu'on attend de la diffusion de l'informatique. Obsédé de stratégie et de relations

de pouvoir, incapable de concevoir le monde autrement qu'en termes de violence, de délinquance et donc de police, le fondateur du Hudson Institute a surtout retenu dans le traitement de l'information les menaces qu'il ferait peser sur la vie privée: centralisation des dossiers individuels, écoutes des conversations téléphoniques par les individus et les gouvernements, traque des automobilistes en excès de vitesse ou des criminels en puissance, etc. En somme, il n'a pas prévu d'autre monde que celui imaginé par Orwell, à ceci près que le système généralisé de surveillance s'appuierait, nous dit-il, sur des « calculateurs simples », dont « les critères pourraient être soit certains mots: argot, obscénités, ou course de chevaux, tuer, subversion, révolution, infiltrer, pouvoir Noir, organiser, opposer; soit des combinaisons plus complexes (...), des informations non verbales telles que le ton menaçant ou coléreux d'une voix ».

Scénario plausible, assurément, puisque l'informatisation croissante de la société place de plus en plus les citoyens sous le contrôle du fichage électronique. On peut déjà suivre à la trace tous ceux qui utilisent une carte de crédit; celle-ci atteste de leur passage à telle heure, tel jour, dans tel quartier d'une ville, dans tel pays. Demain les cartes d'identité ou de sécurité sociale, pourvues de puces, accroîtront encore les capacités panoptiques du Big Brother qui surveillera la vie privée et menacera les libertés individuelles. Mais ce scénario n'est pertinent que si l'on fait abstraction des contre-pouvoirs (comme la Commission Informatique et Libertés), qu'on pourra instituer ou renforcer, au moins sous un régime démocratique, pour nous protéger contre les dérives à la Orwell. Et c'est surtout faire bon marché de toutes les ressources nouvelles que l'informatique a multipliées et promet de développer encore davantage dans tous les domaines, de l'économie à la culture, pour la production et la gestion de biens et de services comme pour la création artistique. Il suffit de « naviguer » sur le World Wide Web pour se rendre compte des outils nouveaux dont le multimédia dote, indépendamment des frivolités telles que les jeux ou les messages publicitaires, les transactions financières, la muséologie ou la recherche scientifique.

Après tant de mises en garde, on comprendra que j'hésite à m'avancer à mon tour dans l'art si incertain de la prévision technologique. Sans jouer au prophète et, surtout, en se défendant de traiter la prospective comme une prévision, on peut du moins désigner les domaines qui « bougent » — sans d'ailleurs qu'il y ait grand mérite à les identifier puisque ce sont ceux que les spécialistes conviennent le plus souvent de retenir. Mais, une fois de

plus, cela ne signifie pas qu'il n'en est pas d'autres, en gestation, qui pourront demain changer l'univers imprévisible du possible. Comparant les possibilités technologiques à « une mer dont la carte n'a pas été dressée », Schumpeter n'en soulignait pas moins en 1942, dans son dernier livre, qu'on était « dans le creux de la vague d'initiatives qui a créé les centrales électriques, l'industrie électrique, l'électrification des logements et des campagnes et l'industrie automobile » (10). Il voyait dans l'industrie chimique, non sans raisons, une terre d'avenir, tout en admettant que « les inventions qui dorment encore dans le giron des dieux peuvent être plus ou moins productives que celles qui nous ont été révélées jusqu'à ce jour ».

Sous ses yeux se préparaient les métamorphoses du nucléaire, de l'électronique, de l'informatique, de l'aérospatiale, de la biologie, des nouveaux matériaux dont les applications continueront à se répandre au siècle prochain. Mais c'est le même homme, pionnier comme Marx de l'histoire économique de l'innovation, qui n'a cessé de prophétiser la fin du capitalisme — comme Marx, certes, mais pour des raisons très différentes et, contrairement à celui-ci, dans une perspective à long terme... Ce qui dort encore dans le giron des dieux est donc exclu par nature des incursions que je m'apprete à faire sur les routes de l'avenir, tout autant que ce que l'on peut supputer de la phase finale (s'il en est une) du capitalisme. Routes très sélectives, au demeurant, sur une carte qui en comprend bien d'autres.

Technologies clés et domaines d'avenir

Les domaines d'avenir ne coïncident pas par hasard avec ce que les experts définissent comme les « technologies clés » ou « critiques » sur lesquelles les pays industrialisés orientent le plus leur recherche industrielle: technologies de l'information et de la communication, composants électriques et électroniques, biotechnologies et produits pharmaceutiques, nouveaux matériaux, transports, énergie et environnement. Cette liste résulte du couplage entre la définition des besoins en technologies tels que l'évolution des marchés la suggère (*market pull*) et la dynamique propre aux progrès scientifiques telle que les spécialistes la perçoivent (*technology push*) (11). Ce sont, bien sûr, les sciences de l'information qui occupent le devant de la scène. Elles le doivent, d'abord, à leur prodigieux essor, mais aussi au fait qu'elles conditionnent de plus en plus tous les autres secteurs de la recherche. Chacune des

technologies clés, appelée à affecter d'autres secteurs d'activités, doit d'ailleurs être considérée à son tour à la fois comme la source d'innovations qui transformeront demain les industries existantes et comme le berceau de nouvelles entreprises encore inconnues, dont le marché est par définition imprévisible.

La révolution introduite dès l'exploitation des courants faibles — du télégraphe et du téléphone à la radio, au cinéma et à la télévision — se poursuit et s'approfondit par la généralisation du langage numérique. Ce dernier permet de transmettre en osmose, en temps réel et à l'échelle planétaire, toutes les formes d'information, image, son ou algorithme. Les recherches sur l'infrastructure des systèmes de communication (la « quincaille-rie ») visent des capacités bien supérieures à celles que nous connaissons aujourd'hui. Les réseaux optiques qui fonctionnent à cent gigabits (12) par seconde et les lasers à haute vitesse capables de transmettre cent milliards d'impulsions par seconde laissent entrevoir des technologies considérablement plus performantes pour l'avenir d'Internet. Immédiateté du message, suppression de l'espace et des intermédiaires sont l'horizon le plus prévisible du multimédia. C'est là, à l'échelle de l'économie-monde, un outil de divertissement et de propagande, d'éducation et de culture dont les développements affecteront les modes de vie et de travail. À la différence de la radio et du cinéma, l'information circulera, cette fois, à partir de supports interactifs qui auront accès à toutes les banques de données et de films disponibles à travers le monde et consommables à volonté.

On voit déjà, sans céder aux mirages de la science-fiction, tout ce que l'on peut attendre, à moyen terme, de la diffusion du multimédia :

— d'une part, l'extension de l'espace par la réduction du temps, c'est-à-dire le télémessage;

— d'autre part, l'interactivité, c'est-à-dire la suppression de la distance géographique dans tous les types d'échanges : téléconférences, vidéophone, accès sur demande à toutes les formes d'émissions télévisées à travers le monde, achat direct de marchandises par la télévisite des étagères des magasins et des entrepôts, accès généralisé aux comptes bancaires et aux services financiers, services médicaux à distance allant jusqu'au diagnostic et au traitement de maladies, accès à des formes nouvelles de formation par la simulation à domicile des pratiques professionnelles ou techniques, généralisation de l'enseignement à distance, extension du télétravail qui pourra être effectué de n'importe quelle partie de la planète au bénéfice de n'importe quelle autre partie du globe.

L'exemple de la téléchirurgie est sans doute le plus frappant. La numération des images dont le monde opératoire est friand permet déjà de nombreuses applications. Les techniques d'endoscopie commandées à distance donnent lieu à des modélisations du champ opératoire qui aident le praticien lors de l'opération. L'imagerie virtuelle peut conduire à des opérations effectuées par des instruments-robots, dont les séquences préprogrammées reproduisent les gestes du chirurgien. Certains blocs comportent des caméras qui filment l'opération. Les images peuvent être transmises en temps réel à des experts éventuellement éloignés d'une rive à l'autre de l'Atlantique. Demain, elles seront liées en réseaux à des stations de visualisation où l'on concevra différents scénarios d'intervention dont les risques seront eux-mêmes modélisés.

Dans ce domaine, c'est la vision d'une nuée d'informations et d'accès multiformes à une infinité de banques de données qui prédomine, dans une convergence des services téléphoniques, par câble ou par satellite, liés aux images circulant à travers les écrans de télévision et d'ordinateurs. Le progrès des composants promet de faire de chaque « puce » un système en soi. Grâce aux techniques de compression, on accumulera les données à un coût de moins en moins élevé. Les protocoles actuels d'Internet supportent 32 bits d'adresses (13). Ils en supporteront bientôt quatre fois plus, et davantage à moyen terme. Encore faut-il maîtriser les problèmes d'interférences que soulève cette multiplication prodigieuse des informations circulant sur un éventail de bandes mobilisées à outrance; car si les premières croissent à l'infini, les secondes restent limitées. On s'inquiète de l'interférence avec les accélérateurs cardiaques, voire avec les air-bags des automobiles. Sans parler de leur influence sur les bandes protégées pour les recherches en astronomie.

On s'interroge plus encore sur les problèmes de sécurité que soulèvent les transactions dont le *cyberspace* est le théâtre. Les algorithmes les plus savants mis au point dans les plus grands ordinateurs pour cadenasser la confidentialité des informations ne sont pas à l'abri des *hackers*. Ces casseurs de logiciels — certains sont de jeunes amateurs — se jouent des clés qui donnent accès aux informations. On pressent un grand avenir pour les spécialistes de la cryptologie qui s'efforcent de parer au déchiffrement des données confidentielles ou à la falsification des signatures et des documents.

Du côté des ordinateurs, on travaille sur des architectures massivement parallèles, avec des composants quantiques, optiques et magnétiques (14). Les recherches menées sur les poly-

mères — on a découvert qu'ils sont conducteurs d'électricité — promettent de substituer des matériaux plastiques aux matériaux cristallins coûteux, le silicone en particulier, dont le prix, pourtant, n'a cessé de décroître. Le laboratoire Philips d'Eindhoven a déjà mis au point des « puces organiques » de dix transistors, après les succès remportés au laboratoire CNRS de Thiais et à l'École Supérieure d'Électricité de Gif-sur-Yvette dans la mise au point des premiers polymères semi-conducteurs.

La révolution des biotechnologies, esquissée dès les premiers acquis de la biologie moléculaire, reste, pour l'instant, dans l'enfance de ses applications. Tout a été dit sur les possibilités qu'elle entrouvre. On peut prévoir qu'elles vont bouleverser non seulement les conditions de la prévention et du traitement des maladies, mais aussi l'équilibre mondial (ou les déséquilibres) de la production agricole et alimentaire (15). Je n'y insisterai pas, même si le passage des découvertes à la diffusion des pratiques et des agents de l'ingénierie du vivant prend, là aussi, plus de temps que ne le fait espérer la presse spécialisée et que ne l'ont anticipé la foison d'entreprises nouvelles créées sur la base de capitaux à risques, dont beaucoup ont déjà disparu.

En associant la microbiologie, la biochimie, la génétique, l'ingénierie biochimique et chimique dans la production d'agents de catalyse, les recherches bio-médicales se développent dans deux domaines. « L'ingénierie des tissus » vise à remplacer, plutôt qu'à guérir, les organes malades (par exemple, la cornée). La thérapie génique, quant à elle, permet d'agir sur des maladies spécifiques, grâce aux micro-organismes obtenus par manipulations génétiques. On peut anticiper une maîtrise plus grande de nombreuses pathologies par des vaccins ou des traitements liés aux biotechnologies et à la bio-ingénierie. Mais on se gardera de prédire une victoire sur le cancer, le sida ou la maladie d'Alzheimer, sur lesquels tant de laboratoires travaillent actuellement.

Les répercussions de ces mutations dans la pharmacopée, les méthodes de diagnostic, le traitement des maladies et toutes les formes d'intervention sur le capital génétique auront la même étendue dans la durée que celles de la révolution pastorienne. Le bouleversement touchera non seulement les conditions de la santé, mais affectera aussi la vie et le milieu. Les problèmes posés, aux plans démographique et éthique, seront néanmoins d'une tout autre portée. Il suffit de penser aux conséquences que peuvent entraîner le choix du sexe de l'enfant ou l'identification des sujets « à risques ». Or les techniques de reproduction assistée, la génétique et le décodage du génome humain permettront tout cela dans

un avenir pas si lointain. Les fantasmes de l'eugénisme sont à l'horizon des pratiques embryologiques et des contrats d'assurance. Et les accidents possibles à la faveur d'une diffusion des virus ou rétrovirus manipulés dans les laboratoires ne sont pas à exclure. De ce point de vue, on peut parier que la révolution biotechnologique donnera lieu, au ^{xxi}^e siècle, à des débats aussi importants que ceux soulevés par l'énergie nucléaire dans ses aspects les plus controversés, de l'armement atomique aux déchets radioactifs à vie longue. Dans l'agro-industrie, les techniques de recombinaison de l'ADN vont trouver de plus en plus d'applications. L'accroissement de la production dépendra plus des progrès des recherches que de l'extension des terres cultivées. Clonages, culture des tissus, procédés nouveaux de fermentation, vaccins et hormones de croissance, toutes ces prothèses ou substituts organiques assureront une meilleure résistance aux maladies des plantes et des animaux. De plus, les conditions de sélection et de reproduction seront à la fois plus efficaces et moins coûteuses — encore qu'on s'interroge déjà sur les menaces d'une réduction de la diversité des espèces par « érosion génétique » et sur l'altération de la composition des organismes. Dans cette corne d'abondance pleine de promesses, on a toute raison de s'inquiéter des effets négatifs qui en résulteront pour la plupart des pays en développement. Leurs produits primaires seront en concurrence avec ceux des pays qui sauront accroître leur productivité par le recours aux biotechnologies. Les termes de l'échange, que la mécanisation du travail a bouleversés depuis la fin du ^{xix}^e siècle, sont exposés à de nouveaux déséquilibres par la « biologisation » croissante de la production agroalimentaire.

En chimie, en dehors des polymères où se joue l'avenir des transistors, c'est sur les catalyseurs, substances qui accélèrent les réactions sans en consommer elles-mêmes, que les recherches s'orientent plus particulièrement. La connaissance des principes fondamentaux qui commandent leurs processus est au cœur de la plupart des procédés utilisés par les industries de la chimie, du pétrole, de la pharmacie, des engrais, de l'énergie, de l'environnement. L'enjeu économique est considérable. Les recherches en physique se mobilisent sur la « matière cohérente », un phénomène prévu dès 1925 par Einstein et par le physicien indien Satyendra Bose que le progrès des techniques de laser a permis récemment de reproduire. De même que les électrons peuvent se comporter comme des ondes, les atomes ont des propriétés ondulatoires à des températures proches du zéro. Certains y voient des applications en métrologie (16).

Dans un autre domaine, la création récente de neuf atomes d'« antimatière » laisse entrevoir des sources d'énergie encore plus concentrées que celles du nucléaire. Cette première démonstration de l'antimatière, qui n'a duré que trente nanosecondes (trente milliardièmes de seconde), peut permettre de tester des lois chimiques fondamentales et de mieux comprendre l'origine de l'univers (ce qui s'est passé lors du « big bang »). On pressent la possibilité d'un type d'armement nouveau, mille fois plus puissant que celui auquel donne lieu une réaction thermonucléaire.

On arrive ici aux frontières de la science-fiction : le passage de l'expérimentation à des applications réelles soulèverait des difficultés autrement plus sérieuses que celles de la maîtrise de la fusion qui a donné lieu, de dix ans en dix ans depuis les années 60, à des prédictions non tenues malgré certaines percées et les investissements effectués. Ici encore, les résultats de la recherche fondamentale ne conduisent par aucun processus linéaire à des applications prévisibles, sinon dans la perspective du très long terme. Et il faudrait que le contexte économique, social et politique s'y prête. Comme l'illustre Superphénix, le destin des sur-générateurs, machines conçues pour produire plus de combustible qu'elles n'en consomment, montre combien le succès d'un système technique est suspendu aux modifications de ce contexte tout autant qu'aux problèmes non résolus de la technologie.

Le domaine de l'énergie voit précisément se développer les recherches liées aux préoccupations que suscite la dégradation de l'environnement : traitement des hydrocarbures non conventionnels (17), conversion photovoltaïque (18), sources d'énergie durables. À la globalisation des économies répond celle des effets de l'industrialisation : les externalités cumulées peuvent contraindre les gouvernements du prochain siècle à des accords dont « l'Agenda 21 » de la conférence de Rio ne constitue qu'une très timide esquisse (19). Les normes du paradigme de « l'écopolitique », encore balbutiantes, peuvent affecter tout à la fois les orientations de la recherche et les conditions de l'économie. L'effet de serre apparaît de plus en plus établi, après les travaux de Mario Molina et de Paul Crutzen, prix Nobel en 1995 pour leur démonstration des liens entre les effluents industriels chimiques et la réduction de la couche d'ozone qui protège la terre. Les recherches dans ce domaine se concentrent sur la « transition énergétique », la réduction du CO₂, l'amélioration de la combustion du charbon et du gaz.

Un des grands problèmes posés par le foisonnement des ordinateurs et l'explosion de la production des semi-conducteurs est

celui des solvants et des dopants utilisés (des gaz extrêmement toxiques, parfois inflammables) pour la fabrication des « gaufres » (20). Sans parler des quantités d'eau énormes utilisées pour nettoyer les puces (de 5 000 à 15 000 litres par gaufre!). L'industrie électronique, dont l'image *high tech* s'accompagnait, à ses débuts, d'une réputation d'industrie « propre », ne peut plus ignorer le volume des déchets nocifs qu'elle produit; elle est la première à prendre en compte la notion du développement durable, qui condamne les industries polluantes à récupérer et à recycler leurs produits usés. L'avenir est sans aucun doute aux « industries écologiques ». Les recherches associent une stratégie de retour et de recyclage des produits aux enjeux techniques d'une production à la fois moins polluante et moins consommatrice de ressources naturelles non renouvelables.

L'avenir des politiques de la science

Les défis, comme les incertitudes, que soulève l'enjeu mondial de l'environnement incitent à prendre encore plus de précautions dans cette prospective, si partielle qu'elle soit, des activités de recherche scientifique et technique. Dire de cette fin de siècle, post-guerre froide et « post-moderniste », qu'elle est une période de transition ne nous apprend rien sur les formes que prendra la modernité nouvelle. Il est clair pourtant que, dans cette transition, le soutien public dont la recherche-développement a bénéficié depuis 1945 (guerre froide oblige) ne peut plus être tenu pour acquis. Les mouvements d'anti-science, comme ceux de l'anti-culture de 1968, peuvent trouver dans l'écopolitique la source d'une contestation qui entraînerait la société civile à s'opposer à certains programmes de recherche. Mais, surtout, les difficultés budgétaires des gouvernements et les conditions nouvelles de la concurrence internationale modifient les priorités dans l'allocation des ressources publiques à la recherche-développement.

La rivalité entre superpuissances et l'escalade des armements ont rapproché la sphère des intérêts publics de celle des intérêts privés jusqu'à « socialiser », y compris dans les pays qui se réclamaient le plus des doctrines libérales, les systèmes de recherche et d'éducation. Tout ce qui était bon pour la science était alors bon pour la société. C'est cet article de foi que le rapport de Vannevar Bush, conseiller scientifique du président des États-Unis, a développé dès 1945 (*Science, the Endless Frontier* — la science, « frontière sans limites », dernière frontière après la conquête de

l'Ouest et l'industrialisation) et qui a fondé la légitimité de l'intervention du pouvoir fédéral dans le système privé des industries et des universités. Il a été aussi à la source des idées reçues sur le processus linéaire de l'innovation en professant que la science est, *par elle-même*, l'accélérateur du progrès technique et qu'elle décide de l'accomplissement des objectifs nationaux dans tous les domaines de compétence gouvernementale. La mobilisation des savants et des laboratoires, qui avait si bien fait ses preuves lors de la Deuxième Guerre mondiale, devait donc se perpétuer en temps de paix — au point qu'un scientifique et un ingénieur sur trois ont travaillé aux États-Unis sur des problèmes et des contrats intéressant la défense. À la suite des États-Unis, les plus grands pays industrialisés (Allemagne et Japon mis à part) ont affiché les mêmes priorités : défense, atome, espace, électronique.

La fin de la guerre froide et le creusement des déficits budgétaires ont conduit tous les pays industrialisés à réduire les investissements publics de recherche-développement et à remettre en question le soutien sans réserve dont la recherche fondamentale a tiré parti à l'ombre des scénarios d'apocalypse nucléaire. Déjà l'Association américaine pour l'avancement des sciences a calculé que le budget de la R&D américaine diminuerait de plus d'un tiers dans les sept ans à venir. Ce qui débouchera sur une réduction drastique du recrutement des étudiants et des professeurs dans les meilleures universités. (Les professeurs américains n'étaient pas tenus de prendre leur retraite; désormais, les universités mettent au point des incitations pour qu'ils cessent d'exercer dès l'âge de 60 ans).

Mais, surtout, les conditions nouvelles de la concurrence mondiale, les batailles pour la compétitivité et les succès technologiques de l'Asie du Sud-Est — du Japon aux « petits dragons », sans parler des nouveaux venus dans la course, Chine, Inde, Indonésie ou Malaisie — incitent à concentrer les efforts de R&D sur des politiques industrielles plutôt que scientifiques. Le modèle du MITI, qui associe depuis l'origine les enjeux technologiques à ceux du commerce extérieur, prend partout le dessus sur le modèle américain issu du « rapport Bush » qui donnait, lui, la préséance à la production de connaissances nouvelles.

Si la sécurité nationale a été l'objectif prioritaire de la politique de la science et de la technologie des États-Unis, le Japon a très exactement fait l'inverse : la politique de la science et de la technologie a été l'objectif prioritaire de sa sécurité. Pendant longtemps, les États-Unis — et les pays européens qui ont adopté le modèle de leurs priorités, France et Royaume-Uni — ont pu se

prévaloir des « retombées » de la recherche militaire dans le domaine de l'économie civile (*spin-off*). Certains observateurs, toutefois, avaient depuis longtemps souligné que les pays qui investissent le plus dans ce type de recherche étaient ceux dont le taux d'accroissement de la productivité était le moins élevé (21). De plus, l'évolution de la recherche militaire conduit à la mise au point de produits aux performances extrêmes, « ésotériques », dont le volume de production est par définition très limité, le coût très élevé et, par conséquent, les retombées de moins en moins exploitables sur le marché civil.

En dépit des centaines de milliards de dollars investis dans la recherche militaire, Washington a perdu son *leadership* technologique dans de nombreux domaines. Malgré ses dépenses limitées dans le domaine de la défense, le Japon marque de plus en plus de points dans la production d'innovations « duales », accessibles à la fois au marché civil et au marché militaire. La formule japonaise du *spin-on* prend le dessus sur celle du *spin-off* pour désigner le transfert des applications civiles aux applications militaires de produits et de processus technologiques « tout faits ». Par exemple, le Pentagone admet que deux des systèmes d'armes les plus critiques, fondés sur la furtivité (des structures permettant d'échapper aux radars) et sur les techniques multispectrales, dépendent de procédés de conception et de fabrication qui existent dans le secteur commercial. Pis encore pour l'ambition américaine d'autonomie en matière de défense, plusieurs systèmes d'armes (la fusée *Patriot*, par exemple, utilisée pendant la guerre du Golfe) ont recours à des composants avancés produits par des sous-traitants japonais, qui les avaient d'abord exploités sur le marché civil (22).

Rien ne dit, pourtant, que la « guerre économique » conduit inéluctablement les laboratoires et les industries privées à prendre le relais des investissements publics qui n'ont cessé de croître dans le contexte de la guerre froide. La course-concours pour la puissance et le prestige n'avait pas trouvé meilleur stimulant que la crainte de chacun des Supergrands d'être technologiquement supplanté par l'autre. Le stimulant du commerce et de la compétitivité internationale n'exercera jamais la même pression avec la même urgence, à plus forte raison dans les pays qui se réclament le plus de l'orthodoxie libérale. En outre, la conversion des industries et des laboratoires orientés sur les recherches militaires est rien moins qu'acquise; il leur faudrait une culture d'entreprise toute différente, orientée sur le marché, à l'écoute des clients. Aux États-Unis, comme dans les autres pays dont l'effort technolo-

gique était suspendu aux options stratégiques, il reste à voir si l'ordre donné aux agences gouvernementales d'imiter le modèle du *spin-on* aura le même succès qu'au Japon, où l'on a su acquérir des technologies duales auprès du secteur privé et exploiter les technologies militaires sur des marchés commerciaux (23).

À moins de nouvelles crises mondiales à la mesure de celles que ce siècle a connues (et comment les exclure du prochain?), le système de la recherche ne bénéficiera plus de la même faveur de la part des gouvernements. Et il n'est pas évident que la communauté scientifique se prêtera, dans l'avenir, aux orientations, donc aux servitudes, de « l'alliance » contractée au lendemain de la Deuxième Guerre mondiale entre la science et les pouvoirs politiques. S'il est vrai, comme le disait McNamara, que les bons cerveaux vont là où il y a de l'argent, la démobilisation des chercheurs risque néanmoins d'avoir cette conséquence : le passage de la découverte aux applications et la production même des innovations pourraient ne plus connaître *le même rythme ni la même échelle* que du temps des urgences déterminées par les surenchères de la guerre froide.

On le voit bien dans le domaine de l'espace : le succès de l'opération Apollo laissait entrevoir d'autres vols habités sur la lune ou sur d'autres planètes. Dans les rêves les plus fous de la NASA, on allait jusqu'à imaginer, au XXI^e siècle, des croisières pour Clubs Méditerranée ! C'est au contraire sur le perfectionnement des vols non habités, la récupération des lanceurs et la mise au point de satellites à usages multiples que les recherches s'orientent désormais. Nécessité faisant loi, « plus petit, plus vite, moins cher » devient le slogan de l'industrie aérospatiale. En l'an 2000, la NASA doit supprimer près de 4 000 postes et plus de 25 000 emplois liés à ses contrats (31 % de sa main-d'œuvre). De nouveaux vols habités supposent des accords de coopération avec l'Agence spatiale européenne (European Space Agency ou ESA). Or il n'est pas du tout établi que l'intérêt de l'ESA soit de jouer cette carte plutôt que celle de vecteurs et de satellites orientés sur le marché civil.

Les autres secteurs liés à la défense ou au prestige — objectifs que les surenchères de la guerre froide avaient associés comme des frères siamois — ne sont pas en reste d'ambition rabattues : la nouvelle génération des porte-avions ne sera plus nécessairement nucléaire; la marine américaine étudie déjà un modèle propulsé par des moteurs à combustion fossile, puisque l'inconvénient des porte-avions nucléaires est de devoir s'entourer d'escorteurs aussi nombreux que dispendieux. Même dans le

domaine de la recherche fondamentale, les États-Unis qui, hier, étaient peu demandeurs de coopération internationale, sont aujourd'hui attentifs aux projets discutés au sein du « Forum Megascience » de l'OCDE.

Une chose est sûre en tout cas : ces changements dans les orientations des politiques de la science et de la technologie affecteront l'avenir de la recherche universitaire, qui dépendra de plus en plus de son association avec l'industrie privée. Le système universitaire de la recherche est condamné à se développer dans un contexte dominé par 1) l'impératif des applications, 2) un éventail de programmes transcendant les frontières disciplinaires, 3) un « marché des connaissances » conditionné par la demande sociale et les collaborations internationales. Il lui faudra tisser des liens plus étroits entre les sciences « dures » et les sciences humaines en fonction même des problèmes d'ordre social — de l'environnement à la gestion des mégapoles et des quartiers déshérités — que toutes les sociétés, industrialisées ou en développement, devront affronter au XXI^e siècle.

Alors même que la vocation traditionnelle des universités est bouleversée par l'enseignement de masse, voué à délivrer des formations à court terme de plus en plus professionnalisées, une dynamique nouvelle tend à transformer la conception, le recrutement, les pratiques et les orientations de la recherche universitaire. Le livre préparé sous la direction de Michael Gibbons, passé inaperçu en France, pourrait bien faire école : on y voit comment les « nouveaux modes de production des connaissances » affectent déjà le fonctionnement des institutions de recherche (24). C'est bien au-delà d'une génération de chercheurs que ces changements dans le cadre institutionnel, le financement et les pratiques de la recherche universitaire diffuseront leurs effets.

La prospective de la science et de la technologie n'est pas seulement sous bénéfice d'inventaire en raison des inconnues qui pèsent sur les développements de la recherche. Elle doit aussi prendre en compte, comme dans tout autre domaine de prévision, les scénarios de rupture qui modifient la donne des conditions économiques, sociales, voire culturelles. À plus forte raison si elle porte sur le long terme... « Comment une histoire *a priori* est-elle possible ? » demandait Kant. Réponse : « si le devin *fait et organise* lui-même les événements qu'il annonce à l'avance » (25). Une réponse dont le bon sens peut passer pour une malice de rationaliste.

De ce point de vue, pourtant, il y a quelques exceptions — très rares — en histoire des techniques, dont témoignent de grands

innovateurs qui sont, simultanément, de grands entrepreneurs. Ce fut le cas, assurément, d'Edison lorsqu'il convoqua banquiers et journalistes à New York, avant même de s'être attaqué au problème du filament de l'ampoule électrique, pour défier publiquement les compagnies du gaz : le « magicien de Menlo Park » ne mit pas plus de dix ans pour créer de toutes pièces et imposer son système d'éclairage. C'est — peut-être — le cas aujourd'hui de Bill Gates, symbole de la jeune génération des capitaines d'industrie née avec les ordinateurs, comme Edison fut celui de la génération du télégraphe. Bill Gates investit désormais toutes ses forces et les ressources de Microsoft dans les « autoroutes de l'information » (26).

Quand il s'agit de recherche fondamentale, il n'y a bien entendu aucun équivalent à ces entrepreneurs-augures, champions de la self-fulfilling prophecy. Tout au contraire, on peut dresser la liste, comme l'a fait récemment Charles Vest, président du MIT, de tout ce que nous ignorons ou ne savons pas faire. Mais une telle liste, inévitablement partielle et partielle, ne peut signaler qu'une poignée d'îles dans une mer où des continents entiers « dorment encore dans le giron des dieux » : elle va de la physico-chimie associée aux sciences cognitives (nature du stockage de l'information dans le cerveau, liens entre le langage et la pensée) à la biologie (mécanismes des gènes et des virus qui provoquent ou inhibent certaines tumeurs), en passant par l'énergie (comment conserver l'énergie solaire ou brûler un combustible sans perdre une bonne partie de l'énergie émise), la cosmologie (l'existence d'autres étoiles que notre soleil, avec ou non des planètes semblables à la terre), la climatologie (les éléments chaotiques qui interdisent toute prévision à moyen terme), l'économie (les facteurs qui conditionnent la croissance, dont la connaissance pourrait mieux inspirer les politiques économiques) et, plus prosaïquement, la sociologie (comment la quantité massive d'informations stockées et immédiatement disponibles sera comprise, utilisée ou rejetée par les générations à venir) (27).

Nombre de chercheurs et de laboratoires à travers le monde se consacrent à ces problèmes. Il n'est pas évident que le prochain siècle, ni même les suivants, leur trouvera une solution. Dans ces domaines comme dans d'autres, l'imagination, pour reprendre la formule de Pascal, « se lassera plus tôt de concevoir que la nature de fournir ».

(1) La méthode Delphi, mise au point par Olaf Helmer dans le cadre d'une étude de prévision à long terme de la RAND Corporation (institut créé par le Pentagone),

consiste en une série de séances où des spécialistes sont invités à répondre à une suite de questions, d'abord par correspondance, puis dans des réunions de *brainstorming* où l'on s'efforce de réduire l'intervention des biais liés aux facteurs psychologiques. (2) Thomas S. Kuhn, qui est mort récemment, était professeur à Harvard University et au MIT. Il a renouvelé l'histoire et la sociologie des sciences avec sa thèse *La Structure des révolutions scientifiques* (Flammarion, 1970) : la « science normale » se développe par rapport à un « paradigme », c'est-à-dire à un modèle conceptuel adopté par la communauté scientifique, en fait par les membres spécialisés de cette communauté au sein d'une ou de plusieurs disciplines. Quand des anomalies se présentent entre théorie et expérimentation et que les contradictions deviennent insurmontables, on sort de la « science normale » pour passer à un paradigme nouveau (ainsi du passage du système céleste de Ptolémée à celui de Copernic, de la conception de la chute des corps selon Aristote à celle de Galilée, ou du système newtonien au système einsteinien).

(3) Albert Abraham Michelson, né en Prusse en 1852, mort en Californie en 1931, est devenu le premier Américain couronné d'un prix Nobel « pour la précision de ses expérimentations optiques ». Ses travaux sur la mesure de la vitesse de la lumière rendaient contradictoire la théorie de l'éther dans l'espace. L'un des trois articles fameux d'Einstein, inaugurant en 1905 la théorie spéciale de la relativité, a fait de cette vitesse une constante et, traitant de l'espace-temps, rendu inutile la conception de l'éther. (4) Les quanta de Max Planck, prix Nobel en 1918, introduisent d'emblée une part d'indéterminisme dans l'étude des processus physiques. Après l'observation d'une dualité de comportements « corpusculaires » et « ondulatoires » dans les phénomènes microphysiques (diffraction des électrons, effet photoélectrique, etc.), les « relations d'incertitude » formulées par Werner Heisenberg, prix Nobel en 1932, impliquent que l'on ne peut pas déterminer simultanément la position et la vitesse d'une particule ; à la limite, une précision absolue dans la localisation de la particule correspondrait à une quantité de mouvement complètement indéterminée, et réciproquement.

(5) D. Kleppers, « A Lesson of Humility », *Physics Today*, décembre 1991, pp. 9-10.

(6) Le suisse K. Alexandre Muller, né en 1927, et l'allemand J. Georg Bednorz, né en 1950, ont reçu conjointement le prix Nobel de physique en 1987 pour leur découverte de la supraconductivité dans les matériaux céramiques. Muller était pratiquement à la retraite et l'Institut IBM de recherche de Zurich lui concédait un coin de laboratoire où il s'obstinait à travailler — avec Bednorz, son expérimentateur — sur des oxydes pour vérifier la possibilité d'une supraconductivité à de très basses températures.

(7) P.-A. David, « La moissonneuse et le robot », *Les Enjeux du changement technologique* (sous la direction de J.-J. Salomon et G. Schmédér), Economica, 1986, p. 123.

(8) Rapport du Lemelson-MIT Prize Program présidé par Lester Thurow, *MIT Tech Talk*, vol. 45, n° 18, 31 janvier 1996.

(9) H. Kahn et A. J. Wiener, *L'an 2000 : Un canevas de spéculations pour les 32 prochaines années*, Robert Laffont, 1967, p. 143 et pp. 144-148.

(10) J. Schumpeter, *Capitalisme, socialisme et démocratie*, Petite bibliothèque Payot, 1969, p. 167.

(11) Voir, en particulier, « Les cent technologies clés pour l'industrie française à l'horizon 2000 », Ministère de l'Industrie, Direction générale des stratégies industrielles, Paris, 1995 ; « La prospective aux États-Unis », *Technologies internationales*, ADIT, Strasbourg, n° 19, novembre 1995 ; l'enquête qui prépare la troisième conférence des directeurs américains de recherche : *A Gateway to Technologies for the 21st Century* (18-19 avril 1996, Cambridge), dont des résultats préliminaires ont paru dans « What's the Hottest Research? », *The MIT Report*, vol. XXIV, n° 2, février 1996 et dans « Technology 1996 : Analysis and Forecast Issue », *Spectrum* (revue de l'Institute of Electrical Engineers), New York, janvier 1996.

(12) Le bit (Binary Digit) est l'unité de numérotation binaire (une information représentée par un symbole à deux valeurs généralement notées 0 et 1, associées aux deux états d'un dispositif). Le bit par seconde est l'unité de mesure de débit. Le gigabit correspond à un milliard de bits par seconde. Ces réseaux fonctionnent donc à cent milliards de bits par seconde.

(13) L'adresse est la destination d'un élément de communication indiquée dans un paquet ou trame.

(14) Les nouveaux composants, dispositifs élémentaires d'un circuit électronique, peuvent fonctionner sur une base corpusculaire, ondulatoire ou magnétique.

(15) Voir A. Sasson, *Biotechnologies in perspective*, Unesco, Paris, 1991; et P. R. Pereira, «Opportunités et menaces technologiques», *La quête incertaine: science et technologie pour le développement* (J.-J. Salomon, F. Sagasti et C. Sachs-Jeantet édit.), Economica, 1995.

La diffusion des biotechnologies peut avoir pour effet pervers d'introduire dans les pays en développement de nouvelles lignes d'industries et de produits agroalimentaires en concurrence avec leurs propres produits; elle peuvent y substituer de nouveaux produits capables de s'imposer sur le marché international. L'exemple de l'isoglucose, sucre-sirop du maïs, montre les dégâts qui peuvent en résulter pour les pays producteurs de sucre: déplacement des pôles de production, accroissement du chômage, déséquilibre accru de la balance des paiements et, finalement, accroissement du déséquilibre alimentaire.

(16) Grâce à un faisceau laser, on peut isoler un atome et, à très basse température, sa fréquence peut être parfaitement mesurable, donc utilisable en métrologie pour des prévisions. L'approche du zéro absolu en cryologie a permis de descendre à des températures de plus en plus basses sur des isotopes d'hélium ou de césium ou par les techniques de désaimantation.

(17) Les hydrocarbures non conventionnels sont des produits de synthèse dont les chaînes chimiques sont éloignées de celles du pétrole ou du gaz naturel.

(18) La conversion photovoltaïque permet l'exploitation de l'énergie solaire en énergie électrique.

(19) Voir en particulier Nazli Choucri (édit.), *Global Accord: Environment, Challenges and International Responses*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1993.

Le «sommet de la planète Terre» a réuni, en juin 1992, à Rio de Janeiro, cent dix chefs d'État ou de gouvernement dans le cadre de l'Organisation des Nations unies. Cette conférence, vingt ans après celle de Stockholm, a marqué une prise de conscience des liens entre environnement et développement; elle avait été préparée par une commission, présidée par M^{me} Gro Harlem Brundtland, premier ministre de Norvège, qui a lancé la notion de «développement durable» (*sustainable development*). Le sommet de Rio a adopté une déclaration de principes, parmi lesquels ceux de responsabilité, de précaution, de pollueur-payeur, ainsi qu'un programme d'action appelé «Agenda 21». Deux Conventions ont été signées, l'une pour lutter contre l'augmentation des émissions de gaz et prévenir l'effet de serre, l'autre pour assurer la sauvegarde de la biodiversité (espèces animales ou végétales en voie de disparition).

(20) Gaufre: ensemble de circuits intégrés («puces») encapsulés dans un moule connectant un très grand nombre de transistors et d'autres composants (diodes, condensateurs, etc.) sur un substrat particulier, en général de silicium.

(21) C'est Robert A. Solo qui a attiré le premier l'attention sur l'absence de lien entre les investissements de R&D pour la défense et l'accélération de la croissance économique: «Gearing Military R&D to Economic Growth», *Harvard Business Review*, novembre-décembre 1962. Sur le même thème, voir en particulier N. Rosenberg, «Civilian Spillovers from Military R&D Spending: The US Experience since World War II», dans *Strategy, Defense and the Western Alliance*, (S. Lakoff et R. Willoughby édit.; Lexington Books, Lexington, Mass., 1987). Dans le cas de la

France, voir Jean-Jacques Salomon, *Le Gaulois, le Cow Boy et le Samouraï: la politique française de la technologie*, Economica, 1986, et Elie Cohen, *Le Colbertisme High Tech*, Hachette, 1992.

(22) Voir en particulier R. J. Samuels, *Rich Nation, Strong Army: National Security and the Technological Transformation of Japan*, Cornell University Press, 1994; et D. C. Mowery, *Science and Technology Policy in Interdependent Economies*, Kluwers, Boston-Amsterdam, 1994.

(23) Voir *National Security Science and Technology Strategy*, OSTP, Washington DC, 1995, et *Second to None: Preserving America's Military Advantage* (rapport conjoint du Conseil national pour l'économie, du Conseil national de sécurité, du Bureau de la science et de la technologie et du Bureau exécutif du Président), Doc. ADA 286-779, Defense Technical Information Center, Fort Belvoir, Virginie, 1995.

(24) M. Gibbons et alii, *The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies*, Sage, Londres, 1994. Michael Gibbons a dirigé le Science Policy Research Unit (SPRU) à l'Université du Sussex.

(25) E. Kant, «Le conflit des facultés», *La Philosophie de l'histoire*, Aubier-Montaigne, 1947, p. 216.

(26) B. Gates, *La Route du futur*, Robert Laffont, 1995.

(27) Reproduit dans «Deux ou trois choses qui restent à connaître», *Courrier International*, 9-14 février 1996.