

Les technologies du XXI^e siècle

Promesses et périls
d'un futur dynamique

LES TECHNOLOGIES DU XXI^e SIÈCLE

PROMESSES ET PÉRILS
D'UN FUTUR DYNAMIQUE

ORGANISATION DE COOPÉRATION ET DE DÉVELOPPEMENT ÉCONOMIQUES

En vertu de l'article 1^{er} de la Convention signée le 14 décembre 1960, à Paris, et entrée en vigueur le 30 septembre 1961, l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE) a pour objectif de promouvoir des politiques visant :

- à réaliser la plus forte expansion de l'économie et de l'emploi et une progression du niveau de vie dans les pays Membres, tout en maintenant la stabilité financière, et à contribuer ainsi au développement de l'économie mondiale;
- à contribuer à une saine expansion économique dans les pays Membres, ainsi que les pays non membres, en voie de développement économique;
- à contribuer à l'expansion du commerce mondial sur une base multilatérale et non discriminatoire conformément aux obligations internationales.

Les pays Membres originaires de l'OCDE sont : l'Allemagne, l'Autriche, la Belgique, le Canada, le Danemark, l'Espagne, les États-Unis, la France, la Grèce, l'Irlande, l'Islande, l'Italie, le Luxembourg, la Norvège, les Pays-Bas, le Portugal, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse et la Turquie. Les pays suivants sont ultérieurement devenus Membres par adhésion aux dates indiquées ci-après : le Japon (28 avril 1964), la Finlande (28 janvier 1969), l'Australie (7 juin 1971), la Nouvelle-Zélande (29 mai 1973), le Mexique (18 mai 1994), la République tchèque (21 décembre 1995), la Hongrie (7 mai 1996), la Pologne (22 novembre 1996) et la Corée (12 décembre 1996). La Commission des Communautés européennes participe aux travaux de l'OCDE (article 13 de la Convention de l'OCDE).

Also available in English under the title:

21st CENTURY TECHNOLOGIES:
PROMISES AND PERILS OF A DYNAMIC FUTURE

© OCDE 1998

Les permissions de reproduction partielle à usage non commercial ou destinée à une formation doivent être adressées au Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC), 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris, France, Tél. (33-1) 44 07 47 70, Fax (33-1) 46 34 67 19, pour tous les pays à l'exception des États-Unis. Aux États-Unis, l'autorisation doit être obtenue du Copyright Clearance Center, Service Client, (508)750-8400, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923 USA, or CCC Online: <http://www.copyright.com/>. Toute autre demande d'autorisation de reproduction ou de traduction totale ou partielle de cette publication doit être adressée aux Éditions de l'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16, France.

AVANT-PROPOS

Le Forum de l'OCDE sur l'avenir participe aux préparatifs d'EXPO 2000 – l'exposition universelle qui se déroulera à Hanovre, en Allemagne – à travers une série de quatre conférences sur le thème « L'homme, la nature et la technologie : des sociétés durables au XXI^e siècle ». Ces conférences aborderont tour à tour les aspects essentiels de l'activité humaine que sont la technologie, l'économie, la société et le gouvernement. L'objectif est d'étudier l'évolution possible des variables clés et d'analyser différentes hypothèses d'évolution afin de mettre en évidence les principales conséquences et les moyens d'action envisageables. Chaque conférence offrira une analyse des tendances et des lignes d'action sous-jacentes. Toutefois, l'ambition de cette série de conférences est plus large : elle entend jeter les fondations nécessaires à l'évaluation des choix cruciaux auxquels seront vraisemblablement confrontés les citoyens et les décideurs au siècle prochain.

L'ensemble de ces conférences sera spécialement parrainé par EXPO 2000 et quatre banques allemandes : Bankgesellschaft Berlin, DG BANK Deutsche Genossenschaftsbank, NORD/LB Norddeutsche Landesbank et Westdeutsche Landesbank Girozentrale (WestLB). Des contributions financières supplémentaires seront apportées par de nombreux partenaires asiatiques, européens et nord-américains du Forum de l'OCDE sur l'avenir.

La première de ces conférences, accueillie par la Westdeutsche Landesbank (WestLB), s'est déroulée les 7 et 8 décembre 1997 au Schloss Krickenbeck, près de Düsseldorf en Allemagne. Elle avait pour thème « Les technologies du XXI^e siècle : équilibre entre les objectifs économiques, sociaux et environnementaux ».

Peser sur l'avenir afin de réaliser des objectifs économiques et sociaux constitue un défi fondamental pour l'humanité. La technologie a dans le passé été déterminante pour le relever, et son rôle semble devoir être au moins aussi important à l'avenir. Transformer le potentiel technologique en résultats économiques et sociaux positifs ne va pourtant pas de soi. Pour de nombreux travailleurs privés d'emploi ou désorientés par des produits nouveaux et peu familiers, le progrès technologique semble même être plus une calamité qu'un bienfait. Cette première conférence s'est penchée sur les avantages et les inconvénients,

ainsi que les perspectives et les facteurs de risque, qui peuvent accompagner l'évolution de la technologie au cours des vingt-cinq prochaines années. Elle a, ce faisant, étudié l'influence réciproque qui s'exerce entre, d'une part, la technologie et, d'autre part, l'économie et la société.

La conférence comprenait trois sessions. La première a évalué les tendances générales des technologies à vocation universelle, notamment les technologies de l'information et la biotechnologie, afin de déterminer les domaines d'application techniquement envisageables pour l'avenir. La deuxième session a examiné l'impact de différents contextes économiques, sociaux et politiques sur la concrétisation des opportunités technologiques et la réduction des risques. La troisième session s'est focalisée sur les choix stratégiques les plus susceptibles de renforcer la contribution de la technologie à la réalisation d'objectifs économiques, sociaux et environnementaux durables.

Cet ouvrage réunit l'ensemble des contributions à la conférence, ainsi qu'une introduction et une synthèse des principaux points du débat rédigées par le Secrétariat de l'OCDE. Ce livre est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE.

TABLE DES MATIÈRES

<i>Chapitre 1 :</i>	Promesses et risques des technologies du xxi ^e siècle : exposé de la problématique par Riel Miller, Wolfgang Michalski et Barrie Stevens	7
<i>Chapitre 2 :</i>	La technologie dans les 25 années à venir : perspectives et facteurs de risque par Joseph Coates	37
<i>Chapitre 3 :</i>	Rapidité, connexion, intelligence : toujours plus par Hervé Gallaire	53
<i>Chapitre 4 :</i>	Biotechnologie et génie génétique au xxi ^e siècle par Werner Arber et Mathis Brauchbar	87
<i>Chapitre 5 :</i>	Évolution technique et changement organisationnel : des structures d'innovation divergentes par Meinolf Dierkes, Jeanette Hofmann et Lutz Marz	109
<i>Chapitre 6 :</i>	Conditions macro-économiques permettant de réaliser le potentiel technologique par Emilio Fontela	139
<i>Chapitre 7 :</i>	Perspectives mondiales : la technologie face aux défis planétaires par Luc Soete	167
<i>Annexe :</i>	Liste des participants	195

PROMESSES ET RISQUES DES TECHNOLOGIES DU XXI^e SIÈCLE : EXPOSÉ DE LA PROBLÉMATIQUE

par

Riel Miller, Wolfgang Michalski et Barrie Stevens
Secrétariat de l'OCDE, Unité consultative auprès du Secrétaire général

Le siècle qui s'achève a été le théâtre de nombreuses transformations profondes sur le plan technologique, économique et social. Dans les pays de l'OCDE, le développement et la diffusion généralisés d'innovations comme l'électricité, le téléphone et l'automobile ont accompagné l'apparition de phénomènes de production, de consommation et de gouvernement de masse. Beaucoup, au seuil du siècle prochain, se demandent s'il sera possible et souhaitable de poursuivre sur la voie d'une mutation aussi prodigieuse. Certains s'interrogent sur la capacité, tant technologique que sociale, de continuer d'avancer et d'inventer de nouveaux outils, de nouveaux produits et de nouvelles façons d'organiser le travail quotidien et la vie familiale. D'autres craignent que les coûts de la transition en cours ne soient trop élevés, ou que les risques pour les traditions ancestrales, ou pour la viabilité environnementale, ne soient, séparément ou globalement, trop lourds à porter. Préservation ou dynamisme, évolution progressive ou radicale, telles sont les alternatives qui, en cette fin de siècle, ne manquent pas de hanter nombre de débats sur l'avenir du millénaire.

La conférence sur les technologies du XXI^e siècle, organisée dans le cadre du Forum de l'OCDE sur l'avenir, n'a pas fait exception : tous ces points de vue y ont été exprimés et débattus. Toutefois, le plus frappant est peut-être que pour la grande majorité des participants, les perspectives de prospérité – économique, sociale et environnementale – pour les vingt-cinq années à venir dépendront probablement des efforts qui seront déployés pour encourager des changements d'une ampleur équivalente, sinon supérieure, à celle des transformations déjà opérées au XX^e siècle. Ainsi, la capacité d'adhésion au changement dynamique a été désignée comme une condition essentielle pour réaliser le plein potentiel des technologies de demain afin de contribuer au bien-être de l'humanité. Mal-

gré quelques réserves, l'analyse a fait ressortir les avantages de la poursuite du dynamisme sociotechnique par rapport à une stratégie de préservation. Elle a aussi montré qu'il était urgent de dépasser les approches évolutives consistant à réagir en fonction des circonstances, pour élaborer et mettre en œuvre des stratégies axées sur le changement, intégrant des mesures économiques, sociales et technologiques.

Ce chapitre d'introduction se compose de trois parties. La première présente les perspectives liées aux technologies du XXI^e siècle – abstraction faite en grande partie des facteurs économiques et sociaux – qui se dégagent du bilan actuel de la situation dans les laboratoires de recherche-développement. La deuxième partie a trait aux conditions économiques et sociales – à l'échelle micro-économique, macro-économique et planétaire – qui sont susceptibles de jouer un rôle décisif dans l'orientation du développement technologique et sa diffusion. Enfin, la troisième partie propose un bilan des initiatives susceptibles d'étayer les trajectoires les plus salutaires du développement technologique et de la diffusion dans ce domaine.

I. ÉVALUATION DU POTENTIEL TECHNOLOGIQUE : PERSPECTIVES ET FACTEURS DE RISQUE

Pour imaginer les applications possibles de la technologie durant les deux ou trois décennies à venir, il importe de mieux cerner les liens entre l'évolution des performances et la volonté des collectivités d'adhérer au progrès économique, social et technique. Si l'on adopte une vision prospective des possibilités technologiques sans se contenter de prolonger des courbes linéaires ou exponentielles, une réflexion s'impose non seulement sur la manière dont les améliorations techniques conduisent au remplacement des moyens existants par une autre génération d'outils, mais aussi sur l'apparition éventuelle d'utilisations entièrement nouvelles, et même de besoins inédits.

D'importants progrès sont à prévoir pour un large éventail de technologies, examinées dans la contribution de Joseph Coates au présent ouvrage : informatique, génétique, technologies du cerveau, nouveaux matériaux (passant notamment par la miniaturisation et l'utilisation de composites intelligents), énergie, transports, et instruments et systèmes environnementaux. Les conditions techniques (à distinguer des conditions économiques et sociales) propices à cette innovation permanente viendront, dans une large mesure, de progrès fulgurants dans les domaines de l'information numérique et de l'information génétique. L'étude et la mise en œuvre de ces deux éléments de base – du calcul pour l'un et de la nature pour l'autre – sont susceptibles de mettre au jour des trésors considérables à la fois pour les concepteurs et pour les utilisateurs. De fait, un véritable cercle vertueux semble avoir happé l'amélioration des outils d'informa-

tion et des performances correspondantes, du fait que chaque éclaircissement apporté par le calcul numérique ou la cartographie génétique (encore balbutiante) contribue à susciter de nouvelles idées sur la manière de concevoir et d'utiliser la technologie.

Cette complémentarité est particulièrement marquée pour ce qui est de la numérisation. L'amélioration quantitative et qualitative des informations converties en chaînes de 0 et de 1 favorise des progrès rapides dans bien d'autres domaines scientifiques et techniques.

Évolution des performances et des applications de l'information numérique

Performances

Pour suivre les progrès technologiques passés (et à venir), on peut notamment se référer à la vitesse, à la taille ou au coût. Sous cet angle, l'évolution est facile à apprécier. Il y a 25 ans, une mémoire à semi-conducteur d'un méga-octet coûtait approximativement 550 000 dollars des États-Unis, contre environ 4 dollars aujourd'hui. Les microprocesseurs de 1997 étaient 100 000 fois plus rapides que leurs ancêtres de 1950. Si ces tendances se confirment – comme le pensent de nombreux experts – d'ici à 2020 un ordinateur de bureau pourra être aussi puissant que l'ensemble des ordinateurs qui se trouvent aujourd'hui dans la Silicon Valley.

La course à la rapidité, à la baisse des coûts et à la miniaturisation ne se limite pas à des slogans dans le secteur très concurrentiel des technologies de l'information, comme le montrera clairement le chapitre rédigé par Hervé Gallaire. Sont à l'étude plusieurs perfectionnements qui pourraient accélérer encore le rythme déjà rapide de l'amélioration du rapport coûts/performances. Par exemple, il est fort probable que les ordinateurs hybrides optique/silicium vont se généraliser. Le laser pourra alors transmettre les données sur une puce, ce qui permettra de surmonter certains des blocages – tels que la production excessive de chaleur – liés à la miniaturisation des circuits sur les semi-conducteurs. Les progrès de la supraconduction à basse température et les nouvelles méthodes de réfrigération permettront aussi d'améliorer la capacité de traitement. Le calcul quantique est également en vue, et pourrait apporter un gain de vitesse appréciable. Tout bien considéré, les perspectives sont très prometteuses pour l'élément clé de la technologie informatique – le microprocesseur.

La technologie des réseaux évoluera elle aussi dans le sens d'une plus grande diversité et d'une largeur de bande considérablement accrue. Les infrastructures de transmission s'appuieront sur des réseaux de fibres optiques toujours plus rapides tandis que les communications mobiles seront assurées par de nombreux satellites placés en orbite basse et moyenne. On saura mieux exploiter une plus grande partie du spectre des fréquences grâce à la transmission numéri-

que et à des méthodes de compression permettant aux flux de données de haute densité d'atteindre un large éventail d'utilisateurs situés en des lieux et employant des dispositifs très divers. L'installation d'un réseau personnel à domicile deviendra abordable. Pour les utilisateurs, le coût des services de communication ne sera pas tout à fait ramené à zéro, mais s'en approchera d'ici à la troisième décennie du siècle prochain.

Des progrès considérables sont à prévoir pour l'interface entre l'homme et l'ordinateur, surtout grâce au perfectionnement de la reconnaissance vocale et gestuelle. La traduction instantanée en temps réel pourrait aussi être quasiment opérationnelle d'ici à 2025. Toutes les sources de données audio, vidéo et textuelles seront numérisées et se prêteront à toutes les formes de recherche. La plupart des problèmes actuels de sécurité, de confidentialité et d'interopérabilité informatiques auront été résolus, si bien que le degré de confiance sera le même (et parfois plus grand, grâce à une vérification instantanée) que celui qui prévaut aujourd'hui dans les transactions et échanges face à face. Les capteurs à semi-conducteur, certains au niveau de la molécule ou de l'atome et intégrés à de l'ADN, permettront de recueillir à peu de frais d'énormes quantités d'informations environnementales et biologiques très précises, et commenceront à ouvrir de nouvelles perspectives en matière d'interconnexion directe homme-machine.

L'amélioration des performances dans le domaine des technologies de l'information (TI) pourrait cependant être freinée par les logiciels. De nombreux analystes n'entrevoient, pour les deux décennies à venir, que des progrès secondaires en matière d'« intelligence artificielle ». La mise au point de logiciels parfaitement capables de réflexion autonome et aptes à réagir par inférence et de façon créative à la parole humaine, se prolongera probablement bien au-delà de 2050. Toutefois, des agents intelligents capables d'accumuler des données sur les goûts et les schémas de comportement d'un individu devraient apparaître au cours de cette période. Des progrès considérables sont également attendus quant à l'élaboration du VRML (Virtual Reality mark-up language), version tridimensionnelle du langage HTML pour le texte qui prévaut actuellement sur les pages Web de l'Internet.

Applications

D'ici à 25 ans, après plus de cinq décennies d'évolution, le microprocesseur, les technologies de l'information en général et les réseaux interviendront probablement dans le moindre aspect de l'activité humaine. De nombreuses régions du monde seront câblées, à l'écoute et interactives. Au-delà d'une simple accélération du changement ou d'une réduction du coût de bon nombre d'activités, l'utilisation de ces outils numériques hautement performants ouvre la voie à de profondes transformations.

Tout indique que les progrès réalisés en matière de puissance de calcul permettront aux gens de rester dans leur localité ou de créer de nouvelles collectivités, virtuelles et réelles. Dans certaines régions du monde, ils pourraient se traduire par un retour vers les villages et un cadre de vie moins urbain. Dans d'autres, peut-être en raison d'une infrastructure plus satisfaisante ou d'autres aspects intéressants, les gens demeureront attachés à leur « petite rue branchée ». Quoi qu'il en soit, l'exploitation de la puissance de calcul offrira de nouveaux choix quant au lieu de résidence, au mode de vie et à la façon de travailler. La distance n'imposera plus les mêmes compromis dans le monde en réseau de 2025. L'isolement physique ne se traduira plus nécessairement par un handicap économique et social aussi important.

L'exploitation de la puissance de calcul augmentera considérablement les possibilités dans les domaines de la production, des transports, de l'énergie, du commerce, de l'éducation et de la santé. Par exemple, les robots industriels deviendront selon toute vraisemblance omniprésents du fait que l'amélioration des logiciels et du matériel leur permet d'accomplir des tâches pénibles, dangereuses, de haute précision ou à très petite échelle dans de nombreux secteurs économiques. Ils seront également utilisés pour des opérations dans les grands fonds marins ou dans l'espace. Les ordinateurs influenceront probablement sur les coûts environnementaux des transports en améliorant à la fois la conception technique des véhicules (voitures hybrides, moteurs à pile à combustible utilisant l'hydrogène, etc.) et la gestion de la circulation. S'agissant de la production d'énergie et des économies en la matière, de nouveaux horizons apparaîtront du fait que les ordinateurs et les réseaux réduiront les coûts et les risques de la cogénération et permettront de développer la gestion locale de la production et de l'utilisation de l'énergie. Grâce à la puissance des ordinateurs, il sera plus facile de mettre au point des produits plus viables du point de vue écologique car les procédés de production réduiront le gaspillage et le produit final pourra être recyclé, réutilisé ou reconditionné.

De manière plus générale, le développement du commerce électronique devrait modifier profondément le déroulement des transactions. Il suffira de posséder un ordinateur et d'avoir accès à l'Internet pour se transformer en négociant relié à des clients sur toute la planète, et le moindre consommateur pourra se procurer des biens et services dans le monde entier. Par conséquent, des produits et des services inédits, ainsi que de nouveaux marchés, devraient se faire jour, tandis que de nombreux intermédiaires pourraient disparaître, et des relations plus directes s'établiront probablement entre les entreprises et les consommateurs. De fait, le processus d'invention et de vente des produits pourrait s'inverser si les consommateurs en viennent à déterminer les caractéristiques précises répondant à leurs besoins et à trouver des producteurs compétents, voire d'autres acheteurs intéressés.

En ce qui concerne la curiosité et la collaboration indispensables à l'apprentissage et à la recherche scientifique de base, la puissance des technologies de l'information à venir ouvrira de nouvelles perspectives en améliorant radicalement la capacité de communication et de simulation. La réalité virtuelle permettant d'imiter des situations historiques et physiques, l'apprentissage par la « pratique », la recherche expérimentale en commun et la possibilité de progresser à son propre rythme sont à la portée de chaque personne raccordée au réseau. La disparition d'une partie des contraintes de coût, de temps et d'espace pourrait même permettre de dépasser les méthodes d'apprentissage de la vie en société correspondant à l'enseignement de l'ère industrielle, pour créer un système qui favorise la créativité personnelle.

Pour éviter de se noyer dans un océan d'informations, on recourra probablement à des « agents intelligents » (« knowbots ») afin de naviguer efficacement. Les robots virtuels capables d'accomplir des tâches relativement bien circonscrites, à l'instar d'un système expert, seront suffisamment perfectionnés pour repérer et satisfaire de nombreux besoins des êtres humains, depuis la capacité banale d'un grille-pain relié à un réseau d'identifier les utilisateurs et de mémoriser leurs préférences, jusqu'à des fonctionnalités plus poussées telles que le filtrage du courrier électronique, la recherche des biens et services les plus avantageux, sans oublier la reconstitution et le suivi des parcours d'apprentissage individuels. Dans le domaine de la santé, les équipements portables autonomes de détection et de diagnostic reliés à des systèmes experts à distance pourraient apporter des améliorations appréciables en termes de mobilité des patients et d'efficience des ressources hospitalières.

Évolution des performances et des applications de l'information génétique

Performances

L'inventaire des informations génétiques et les applications du génie génétique font déjà sentir leurs effets dans de multiples domaines de l'activité humaine. S'ils sont peu susceptibles d'influer de façon aussi universelle que les technologies de l'information sur l'organisation économique et sociale, ils affecteront néanmoins profondément bien des aspects de la vie quotidienne. Sont plus particulièrement visés, autant qu'on puisse en juger aujourd'hui, la santé humaine, la production alimentaire (animale et végétale) et la transformation des denrées, ainsi que les activités qui se situent au croisement de la génétique et d'autres technologies.

L'étude du génome humain, sujet abordé dans le chapitre de Werner Arber et Mathis Brauchbar, est en bonne voie. D'ici à 2005, après 15 ans de travaux approfondis, les spécialistes devraient connaître la totalité de la séquence d'ADN d'un homme ou d'une femme. Bien que l'on n'ait pour l'instant cartographié qu'un

très faible pourcentage de cette information, le rythme d'acquisition devrait s'accélérer considérablement. Compte tenu de la diminution rapide du coût moyen du séquençage de chacune des millions de paires de bases constituant l'ADN – de cinq dollars en 1990 à moins de cinquante cents d'ici au début du siècle prochain – le nombre de paires de bases séquencées chaque année augmente de façon exponentielle, puisqu'il est passé de 40 millions environ en 1990 à plus de 400 millions en 1997. Parallèlement, les vingt-cinq années à venir pourraient marquer une étape déterminante dans l'élucidation des voies biochimiques complexes du corps humain par lesquelles circulent les informations génétiques, et dans l'explication des interactions entre certains gènes et les facteurs environnementaux, dont les effets diffèrent d'une personne à l'autre.

Les 25 années à venir laissent entrevoir le repérage et la cartographie du génome de milliers d'organismes modèles – mammifères, poissons, insectes, micro-organismes et plantes. Des initiatives de grande ampleur devraient être menées à bien prochainement. Aux États-Unis, par exemple, la National Science Foundation a lancé une initiative ambitieuse de 40 millions de dollars sur le génome végétal (Plant Genome Initiative), et le ministère de l'Agriculture (USDA) élabore une stratégie nationale sur le génome dans le domaine de l'alimentation (National Food Genome Strategy) d'un coût de 200 millions de dollars. Parallèlement, la compréhension des voies biochimiques du transfert de gènes pour les formes de vie animales et végétales pourrait offrir d'innombrables possibilités de perfectionnement de la gestion, du contrôle et de la modification de l'état sanitaire de ces organismes, de leur propagation ou de leur élimination. Des programmes génétiques pourraient devenir monnaie courante pour l'amélioration animale et végétale, et déboucher sur des cycles de sélection plus rapides, une accélération de l'évolution des végétaux et la mise au point de variétés brevetables toujours plus nombreuses. Dans 20 ans, toutes les semences vendues ou presque pourraient avoir été touchées d'une manière ou d'une autre (fécondation croisée ou modification génétique) par le génie génétique.

Toutefois, les nouvelles conquêtes les plus spectaculaires dans un avenir relativement proche interviendront peut-être grâce à la synthèse de diverses disciplines scientifiques. Par exemple, les travaux recoupant la biochimie, la physique, la biologie moléculaire, les neurosciences, les biotechnologies, les nanotechnologies et la micro-électronique sont appelés à susciter d'importantes innovations dans les domaines de la bio-électronique (mise au point de biocapteurs, par exemple) et de la neuro-informatique (couplage des microprocesseurs avec le système nerveux humain). Compte tenu de l'évolution prévisible vers une diversification accrue des dépenses de R-D dans le domaine de la génétique, au profit des produits chimiques, des matériaux et des technologies énergétiques, par exemple, les principaux progrès accomplis dans d'autres domaines pluridisciplinaires pourraient prendre des proportions non négligeables – on peut citer,

dans le domaine du génie chimique, la création de catalyseurs enzymatiques artificiels à partir de gènes, qui n'existent pas dans la nature; des processus biologiques permettant d'obtenir des structures moléculaires et des matériaux plus complexes; des plantes modifiées dont on peut tirer des produits pharmaceutiques et des matières premières pour la fabrication de matières plastiques.

Applications

Il est probable que les applications de la biotechnologie investiront la plupart des domaines d'activité dans les 25 prochaines années. Déjà bien implantées et en expansion constante dans des domaines tels que la santé humaine, la production animale et végétale ainsi que la transformation des denrées alimentaires, elles pourraient s'étendre progressivement à la gestion de l'environnement, aux procédés de fabrication, aux nouveaux matériaux et aux ordinateurs.

C'est dans le domaine de la santé que les plus grands progrès sont généralement attendus pour les décennies à venir. Grâce à la cartographie du génome humain et à la détermination des voies de transmission biochimique et des prédispositions génétiques, les tests génétiques pourraient se banaliser. Les thérapies visant des affections monogéniques, voire polygéniques, pourraient être largement répandues d'ici à 2025, de même que les thérapies par substitution de gènes. Parallèlement, la prescription de produits pharmaceutiques à caractère génique pourrait devenir courante, ces produits utilisant, par exemple, de l'ADN antisens pour bloquer la transmission par le corps d'instructions génétiques qui déclenchent un processus pathologique. Concrètement, il se pourrait qu'en 2025, des troubles transmis par un seul gène comme la chorée de Huntington et la mucoviscidose, ainsi que certaines formes de la maladie d'Alzheimer, d'arthrite ou de cancer, puissent être à la fois soignables et éventuellement réversibles. Les progrès des travaux de recherche interdisciplinaires pourraient encore allonger l'espérance de vie et accroître la mobilité physique – compte tenu de l'application de plus en plus systématique des biocapteurs à des fins de diagnostic et, en chirurgie, de l'utilisation de capteurs implantés et de prothèses neuronales (pour simuler l'ouïe ou restaurer les fonctions de membres paralysés), voire du clonage d'organes.

Des répercussions considérables pourraient s'ensuivre sur l'offre de soins. Il ne s'agit pas seulement du fait que les traitements deviendront bien plus individualisés. Le saut quantitatif, dans le domaine génétique, des connaissances, de l'information, du diagnostic, de la prévention et de la thérapie, conjugué aux progrès soutenus d'autres technologies (notamment des TI), devrait se traduire – du moins dans les sociétés modernes – par davantage de possibilités pour chacun de maîtriser sa propre santé et de déterminer son traitement, et donc par un plus grand choix de modes de vie envisageables. L'offre de soins pourrait

ainsi être beaucoup plus décentralisée. De fait, la pratique de la médecine, qui perd de plus en plus de terrain au profit de la recherche, ainsi que de l'autodiagnostic et de l'automédication, pourrait être progressivement reléguée au second plan.

La cartographie du génome et la connaissance des systèmes de transfert de gènes de nombreux organismes modèles – animaux, végétaux, insectes et micro-organismes – devraient déboucher sur d'importantes applications dans le domaine agro-alimentaire. Les végétaux génétiquement modifiés sont de plus en plus courants – en 1997, les agriculteurs américains ont utilisé des semences génétiquement modifiées sur quelque 10 millions d'hectares, et environ deux douzaines de variétés de plantes transgéniques sont utilisées dans le monde. La production régulière d'animaux, de fruits et de légumes transgéniques « sur mesure », correspondant à la consommation généralisée d'aliments, de nouvelles variétés et de produits inédits « étudiés », n'est pas difficile à imaginer. Des ovins, des porcins et des vaches transgéniques pourraient être exploités à la manière d'usines vivantes pour produire des protéines et d'autres composés très recherchés, contenus par exemple dans leur lait, ou être modifiés pour résister à des climats particulièrement pénibles. L'aquaculture disposerait des techniques de génie génétique voulues pour affiner la saveur et la texture des aliments produits dans ce secteur. On pourrait modifier les plantes cultivées et le patrimoine forestier dans le monde entier pour leur conférer une résistance aux pesticides, des propriétés insecticides ou chimiques, une meilleure aptitude au stockage et une plus grande adaptabilité aux caractéristiques précises du milieu.

Des perspectives d'amélioration notable de l'alimentation et du choix de produits offerts aux consommateurs en résultent. Pour les producteurs, il s'agit, ni plus ni moins, d'une transformation radicale des pratiques et des structures agricoles. Les exploitants se trouveront devant un large éventail de variétés et de produits inédits, si bien que le degré de spécialisation de la production animale ou végétale sera déterminé en conséquence. On pourrait voir apparaître de nouvelles catégories de producteurs (entreprises pharmaceutiques élevant des animaux transgéniques pour en tirer des substances particulières, par exemple), et les relations entre producteurs, entreprises de transformation, détaillants et consommateurs devraient être modifiées par le développement de systèmes de commande adaptés aux besoins du client.

Risques liés aux progrès des nouvelles technologies

Néanmoins, toutes ces perspectives scientifiques prometteuses s'accompagnent d'une myriade de risques qui pourraient être engendrés ou aggravés par les innovations techniques plausibles de demain. Comme c'est le cas depuis que les technologies sont utilisées non seulement pour survivre mais aussi pour faire

la guerre, ces outils sont souvent à double tranchant. Par eux-mêmes, les progrès technologiques ne laissent pas présager l'utilisation qui en sera faite. De fait, en se plaçant uniquement du point de vue de la faisabilité technique, sans tenir compte des garanties économiques et sociales qu'il sera probablement nécessaire de mettre en place pour assurer l'éclosion rapide des découvertes techniques capitales de demain, on distingue trois grands dangers.

En premier lieu, les technologies de demain sont porteuses d'un potentiel de destruction qui sera à la fois puissant et difficile à maîtriser. Elles pourraient représenter une menace pour l'environnement naturel et humain. Par accident ou par malveillance, les progrès et la diffusion du génie génétique pourraient donner lieu de manière involontaire et inopinée à l'apparition de maladies, constituer des facteurs de vulnérabilité écologique et engendrer des armes de destruction massive. La dépendance à l'égard des ordinateurs, des réseaux et des logiciels qui les font tourner pourrait laisser des composantes essentielles des systèmes vitaux de la société, depuis les centrales nucléaires et les systèmes médicaux jusqu'aux installations de sécurité et de traitement des eaux usées, à la merci d'accidents aussi fortuits que catastrophiques et d'attaques délibérées susceptibles de les fragiliser. Des risques moins mortels mais néanmoins pernicioeux pourraient découler de la diffusion des technologies de l'information, qui facilitera la violation de la vie privée ou des droits fondamentaux, ainsi que des pratiques délictueuses allant de l'escroquerie et du vol à la collusion illicite.

Une deuxième série de risques purement technologiques résulte de l'éventualité d'une plus grande vulnérabilité d'infrastructures comme les systèmes de contrôle du trafic aérien, par exemple, qui sont susceptibles de faire l'objet de pannes généralisées. Certains craignent que la diversification et la décentralisation du monde, ainsi que sa dépendance accrue à l'égard de la technologie, n'augmentent les risques de dérèglements incontrôlables des systèmes physiques ou sociaux qui permettent la survie. Enfin, le troisième danger a trait aux critères éthiques, aux valeurs et aux mentalités. Même les premières étapes du développement à long terme et de la diffusion de technologies radicalement novatrices comme le clonage humain ou l'intelligence artificielle (voire les formes de vie artificielles) pourraient soumettre les normes éthiques et culturelles du moment à des défis d'une ampleur inhabituelle, et mettre plus lourdement à contribution la tolérance des populations à l'égard de ce qui est inconnu et étranger. Le risque est que le choc produit par certaines percées technologiques ne donne lieu à de graves désordres sociaux.

Heureusement, le rythme du progrès technique et l'ampleur des menaces qu'il représente sont fondamentalement déterminés par des facteurs autres que la faisabilité purement scientifique. L'apparition de ces risques dépendra non seulement des dangers réels et supposés des technologies nouvelles, mais aussi, et de façon déterminante, des choix sociaux et politiques opérés. Cependant, ces

questions conduisent à un débat plus large sur les conditions propices à la concrétisation du potentiel technologique.

II. CONDITIONS MICRO-ÉCONOMIQUES, MACRO-ÉCONOMIQUES ET PLANÉTAIRES PERMETTANT DE RÉALISER LE POTENTIEL TECHNOLOGIQUE

Si les risques peuvent être maîtrisés, il est vraisemblable qu'au cours des vingt-cinq années à venir, un éventail de progrès technologiques amélioreront considérablement le bien-être de l'humanité et contribueront à orienter le monde vers un développement durable. Toutefois, comme le montre l'histoire, une découverte scientifique ou une technologie innovante ne sauraient par elles-mêmes déboucher sur des applications utiles ni se diffuser largement ou auprès de ceux qui pourraient en faire l'usage le plus productif. La possibilité de tirer les avantages et de réduire les dangers des progrès technologiques dépend de liens complexes avec les conditions économiques, sociales et politiques sous-jacentes. Pour concrétiser les fruits du dynamisme sociotechnique, il importe de prendre en considération deux aspects : d'une part, la manière dont le contexte socio-économique détermine le rythme et l'orientation de l'innovation technologique et de la diffusion correspondante ; et d'autre part, les conséquences de l'application et de la diffusion des nouvelles technologies pour l'économie et pour la collectivité.

Les conditions générales influant sur le rythme et la diffusion des progrès technologiques peuvent être réparties en trois grandes catégories selon leur portée – micro-économique, macro-économique et planétaire. Au niveau micro-économique, les facteurs socio-économiques englobent, d'une part, les caractéristiques institutionnelles et organisationnelles particulières des familles, des ménages, des entreprises et des organismes publics et, d'autre part, les décisions prises par des personnes agissant en qualité de membres d'une famille, de travailleurs, de dirigeants, de fonctionnaires ou de responsables politiques. Les facteurs macro-économiques se rapportent au contexte socio-économique dans lequel évoluent les ménages et les entreprises. A ce niveau, les conditions générales et les tendances technologiques des marchés de produits, de main-d'œuvre et de capitaux sont façonnées par des politiques monétaires, fiscales et réglementaires qui peuvent modifier la prévisibilité des conditions d'emprunt (taux d'intérêt), du niveau des prix, de l'entrée de concurrents sur un marché et de l'évolution des taux de chômage. En dernier lieu, au niveau mondial, il faut examiner les modes de gestion retenus, par exemple, pour le système international d'échanges, les flux d'investissements et de technologies et l'environnement à l'échelle planétaire. On ne peut guère contester que le rythme de diffusion mondiale des idées, des technologies et des pressions liées à la concurrence – sans parler de la portée de la coopération visant à réduire les conflits et la

pollution de l'environnement – jouera un grand rôle dans l'orientation des trajectoires sociotechnologiques à venir.

Les schémas micro-économiques, macro-économiques et planétaires peuvent ainsi paraître favoriser ou freiner le dynamisme technologique. Les modèles sociotechniques sont d'autant plus susceptibles d'évoluer de façon notable que les conditions sous-jacentes sont toutes favorables. En revanche, dès lors que les conditions générales sont relativement défavorables à un tel changement, la rupture avec les structures économiques et sociales en vigueur est moins probable. La formule idéale pour favoriser le dynamisme sociotechnique n'existe pas. Il est cependant utile de distinguer les schémas susceptibles de sous-tendre plus efficacement les grandes mutations sociotechniques (et les sauts potentiellement fortement positifs qu'elles supposent dans l'aptitude de la collectivité à relever certains défis et à récolter les fruits de ses efforts) des schémas correspondant à une trajectoire plus linéaire et qui demeurent bien ancrés dans les modèles existants.

A. Dynamisme et résistance à l'évolution sociotechnique au niveau micro-économique

Au niveau micro-économique, des perspectives contrastées s'annoncent pour les technologies du XXI^e siècle. Un certain nombre de changements affectant l'organisation du travail et de la vie quotidienne pour les entreprises et les ménages semblent propices à l'innovation technologique et à la diffusion correspondante. En revanche, d'importantes contradictions pourraient se faire jour entre les solutions radicalement nouvelles offertes par le progrès technologique et les traditions, habitudes et relations consacrées par l'usage. Le passage à de nouvelles mentalités, l'acceptation d'autres conceptions de la gestion des risques et l'adaptation à des structures de décision différentes vont rarement de soi. Le chapitre rédigé par Meinolf Dierkes, Jeanette Hofmann et Lutz Marz s'attache à ces processus complexes, et parfois cycliques, en examinant les perspectives d'évolution de deux secteurs importants qui se trouvent à différents stades d'acceptation et de diffusion. Le premier est un secteur parvenu à maturité, l'industrie automobile, et le second un secteur en plein essor, à savoir l'Internet. Un troisième exemple est présenté afin de compléter le tableau, celui du secteur en transition de la santé.

Au-delà de Ford

Les perspectives d'avenir du secteur automobile offrent une bonne illustration des facteurs de dynamisme et de résistance qui coexistent au niveau micro-économique. Le rôle considérable joué par l'industrie automobile, il y a près d'un siècle, dans le dynamisme technologique – chaîne d'assemblage semi-

automatisée et assimilation de l'automobile à un objet de consommation de masse – pourrait bien être l'un des principaux obstacles à l'innovation de demain. A l'instar de la division du travail conçue par Frederick Taylor pour la sidérurgie – à savoir la décomposition chronométrée des mouvements – les techniques de production de masse de Henry Ford se sont propagées dans tous les secteurs économiques si bien qu'elles ont servi de catalyseurs pour la mise au point de nouvelles technologies de production et de nouveaux produits. L'organisation plus efficiente de la production, conjuguée au progrès technologique, a donné un élan général à l'innovation, à la concurrence et à la productivité, dont la vie économique dans son ensemble a bénéficié. Les consommateurs ont été eux aussi intégrés à cette vision de la production et de la consommation de masse. Les ménages ont pu disposer d'un large éventail de nouveaux produits et modes d'organisation des activités quotidiennes. On peut citer non seulement les déplacements en voiture pour se rendre au travail, au centre commercial et sur les lieux de vacances familiales, mais aussi l'utilisation de lave-linge, de réfrigérateurs et de téléviseurs. La recherche de solutions aux problèmes sociaux n'a pas été épargnée par les méthodes de production et de conception de produits caractéristiques de l'ère automobile, si bien que des programmes publics fondés sur la production et la consommation de masse ont même été appliqués à la santé, à l'éducation et à la protection sociale. Pendant de nombreuses années, ce modèle novateur a stimulé la productivité et sous-tendu les grandes percées technologiques.

Cette vision de la production, de la consommation et de la mobilité héritée de l'industrie automobile continuera cependant de laisser une large place à l'innovation progressive. La concurrence devrait continuer à inciter les entreprises à améliorer les produits, de même que les initiatives visant à parer aux problèmes importants qui découlent de la pollution, des encombrements et des conditions de sécurité liés à l'automobile. Les progrès les plus marquants viendront probablement des technologies utilisées pour motoriser les véhicules, coordonner la circulation et protéger les conducteurs. Le secteur évoluera encore grâce à des innovations telles que les réseaux routiers « intelligents », les véhicules électriques hybrides, le développement des méthodes de production économes en ressources et, bien entendu, la voiture informatisée équipée d'un GPS (système mondial de positionnement par satellite) pour la navigation, sans oublier un large éventail de liaisons de télécommunications, notamment pour les données, la voix et la vidéo via l'Internet. Toutefois, faute de s'affranchir du modèle automobile, on risque de laisser échapper l'occasion de modifier plus radicalement l'organisation de l'entreprise, de la famille et de la société en général. Par exemple, pour revoir concrètement où et comment les gens travaillent et vivent de manière à réduire fortement l'ensemble des coûts d'environnement, notamment ceux qui découlent des systèmes de transport en vigueur, il

faudra selon toute vraisemblance rompre de manière assez décisive avec les habitudes sociotechniques passées, par exemple les déplacements domicile-travail et l'utilisation de la voiture pour aller au centre commercial.

Perspectives d'évolution de l'Internet

En revanche, l'Internet pourrait être à l'avant-garde d'une vision très différente du travail et de la société. Cette vision repose sur une forme d'organisation naturellement appelée à se répandre, qui passe par une structure de responsabilité et d'autorité plus décentralisée. Pour saisir les nouvelles possibilités offertes par l'Internet, on peut notamment se référer à un réseau électronique de conception semblable mais techniquement différent qui est en voie d'extinction : l'échange de données informatisées. Répondant à une stratégie d'exclusivité, l'EDI visait à relier des entreprises, principalement pour l'offre de biens manufacturés et de services financiers, afin d'améliorer la coordination. Promus dans les années 70 et 80, ces systèmes exclusifs étaient incompatibles et généralement coûteux et peu souples. Dans un délai étonnamment court, l'Internet a éclipsé la plupart des systèmes exclusifs EDI.

La technologie mise en œuvre par l'Internet, perfectionnée initialement dans le cadre du secteur public, donne gratuitement et librement accès à un avantage appréciable, à savoir une norme commune. Elle permet d'appliquer pleinement une loi économique vitale, en apportant des rendements d'échelle croissants grâce à la fois aux réseaux et à un ensemble ouvert de normes universelles. Les mots d'ordre de l'Internet sont : coopération et non isolement, élargissement et non restriction. En témoigne l'empressement soudain avec lequel des concurrents normalement inconciliables unissent leurs efforts pour faire de l'Internet un espace commercial ouvert, sans hiatus. Les gouvernements nationaux et les organisations internationales, de l'OCDE au W3C (World Wide Web Consortium), veillent à ce que l'Internet devienne un terrain de jeu largement partagé et offrant des conditions équitables, dépourvu d'obstacles au commerce électronique, au courrier électronique et à la libre circulation de l'information.

Au regard des modèles d'organisation hiérarchique fortement centralisée qui prévalent la plupart du temps sur les lieux de travail du secteur privé et public (et même bien souvent dans les ménages), l'Internet est un espace (virtuel) anarchique, extrêmement décentralisé et inorganisé. C'est un véritable océan d'informations que l'on parcourt de façon non linéaire par hyperliens. Il s'avère très efficace pour l'échange d'idées et l'établissement de liens spontanés indépendamment de la distance, des fuseaux horaires ou de toute idée préconçue. Il se démarque nettement du modèle industriel plus rigide de production et de consommation de masse. L'Internet se développe dans un monde où les biens immatériels revêtent plus d'importance que les biens immobilisés d'hier et où la

duplication numérique se traduit par un coût de reproduction marginal pratiquement nul. Aussi l'Internet pourrait-il bouleverser bon nombre des dispositifs institutionnels et des modes de comportement caractéristiques, au niveau micro-économique, de l'offre et de la demande dans les économies de la zone OCDE. Du côté de l'offre, de nouvelles formes d'organisation du travail, de mise au point et de distribution des produits, d'entrée sur le marché et de coopération se font jour. Du côté de la demande, la consommation, jusqu'alors passive, est en passe de devenir plus active. Des modèles d'entreprise entièrement nouveaux sont inventés afin d'exploiter de façon rentable ces nouvelles conditions. Les particuliers et les entreprises recourent à l'Internet non seulement pour trouver des produits existants, mais aussi pour mettre en route la production d'articles qu'ils ont conçus. Le consommateur assume peu à peu le rôle déterminant réservé auparavant au producteur. Si ce changement de paradigme se confirme, la chaîne de la valeur ajoutée pourrait bien être complètement transformée pour toute une série d'activités.

L'adoption et la propagation d'une culture si radicalement différente nécessitent un certain délai et pourraient même échouer. Une véritable décentralisation de la prise de décision et des tâches de coordination, dépassant le télétravail qui revient à réduire les superficies consacrées aux bureaux et les déplacements domicile-travail, suppose que les individus prennent des responsabilités en permanence, depuis le moment où ils choisissent (en qualité de producteur/consommateur) leur mélange de céréales favori pour le petit déjeuner jusqu'au moment où ils imaginent (en qualité de travailleur/dirigeant d'entreprise) une solution novatrice en coopération avec un client l'après-midi. Le défi est de taille. Nous hésitons naturellement à renoncer aux stratégies connues pour obtenir des résultats économiques et sociaux, pour gérer les risques et pour assurer la continuité des activités. Bien qu'il s'agisse parfois d'une simple question de perception, de manière d'envisager le changement – « est-ce une menace ou une condition favorable ? » – un nouveau modèle peut être très perturbant. Les demandes de « réciprocité dynamique » en réseau vont bien au-delà des rôles auxquels notre formation nous a préparés et des formes d'apprentissage privilégiées par les établissements d'enseignement, les bureaux et la plupart des familles. En dépit des possibilités offertes par l'Internet, il faut tenir compte de nombreux obstacles, parmi lesquels figure en bonne place la propension à réintroduire les méthodes traditionnelles en se contentant de greffer les anciennes habitudes sur les nouvelles. Ces tendances contraires sont perceptibles dans le moindre domaine, depuis l'entreprise privée ou l'organisme public qui se contente d'utiliser l'Internet à des fins de dégraissage sans modifier ses habitudes d'organisation, jusqu'à des initiatives gouvernementales mal conçues qui imposent l'application de solutions datant de l'ère industrielle pour résoudre des problèmes liés à l'économie du savoir.

Perspectives en matière de santé

La transition est déjà amorcée dans le secteur de la santé. Dans la plupart des pays de l'OCDE, la conception de la santé humaine s'est longtemps grandement inspirée du modèle industriel de production et de consommation de masse, l'hôpital étant assimilé à l'usine et le patient au consommateur passif. Ce modèle a permis de réduire dans de formidables proportions la mortalité et la morbidité liées aux maladies et aux accidents. Toutefois, des problèmes préoccupants se font jour depuis peu, en termes de coût comme en termes d'efficacité. Une réforme est en cours, si bien que des progrès en cascade appréciables ont déjà été accomplis en matière de technologie et d'organisation, et devraient s'étendre à la maîtrise des coûts et à l'amélioration de l'offre. On ne saurait dire avec autant de certitude dans quelle mesure l'association des technologies de l'information et des biotechnologies fera véritablement du secteur des services médicaux un moyen de prévention décentralisé et dynamique dépassant le bien-être physiologique. Comme indiqué précédemment, le développement attendu des connaissances sur les processus génétiques et biologiques, parallèlement à la puissance de calcul permettant de suivre, de stocker et d'évaluer des quantités considérables de données sur le vivant, pourrait aboutir à un progrès marquant de l'identification des facteurs héréditaires et environnementaux susceptibles d'affecter la santé. Ces perspectives d'accroissement notable de la maîtrise et de la prévention individuelles des risques sanitaires pourraient s'accompagner d'un rééquilibrage des pouvoirs et d'une transformation des institutions et des comportements correspondants. Cependant, les obstacles à cette transition ne manquent pas au niveau micro-économique.

Tout d'abord, il faut peut-être citer la crainte et l'ignorance persistantes de la plupart des gens concernant leur santé. L'idée que chacun prenne en charge la prévention des maladies, le diagnostic et l'essentiel des traitements n'est pas encore largement partagée dans la société actuelle. Aux obstacles éthiques et au manque de connaissances s'ajoutent des intérêts institutionnels et des avantages acquis très divers qui s'opposent normalement à la modification des sources d'information et des centres de décision sur la santé. Or les technologies de diagnostic et de traitement à domicile en temps réel, en assurant une plus grande transparence des résultats médicaux, pourraient contribuer de façon déterminante à réduire les risques, à créer des débouchés et à modifier les institutions et les comportements. Dans un monde où les informations sur la santé sont beaucoup plus compréhensibles et fiables, il y a tout lieu de penser que les individus commenceront à faire leurs propres choix. Cette évolution devrait alors susciter l'ouverture de nouveaux marchés et la mise au point de nouveaux produits permettant de tirer parti des progrès des technologies de l'information et des biotechnologies. Compte tenu par ailleurs de l'évolution des systèmes réglementaires qui pour l'instant protègent et réservent à quelques-uns la mainmise sur

les informations en matière de santé, les patients pourraient renoncer à leurs habitudes de consommation passive au profit d'une attitude volontariste. De même, les pratiques médicales monopolistiques pourraient laisser place à une concurrence ouverte, et les médecins eux-mêmes devenir un nouveau genre de praticiens.

Risques et résistances au niveau micro-économique

Globalement, ces sortes de changements radicaux induits par la technologie et affectant l'organisation du travail au niveau micro-économique ou le modèle familial de consommation passive de masse pourraient gravement perturber, voire détruire, un ensemble de mécanismes mis en place pour gérer ou réduire les coûts et les risques liés à l'activité organisée. Certaines des hypothèses les plus élémentaires qui sous-tendent les certitudes et les attentes des individus sur les lieux de travail et dans les foyers pourraient s'en trouver remises en question. Par exemple, avec l'explosion de technologies comme Internet, il est probable que l'on verra disparaître de plus en plus vite les réconforts et les subtils mécanismes de partage de l'information et de planification qu'offraient autrefois les plans de carrière stables, les pyramides hiérarchiques fixes, les magasins de quartier familiers, et les rencontres directes au bureau, dans la cour de l'école ou dans le cabinet du médecin. Le phénomène continu de « désintermédiation » – terme qui évoque la transformation radicale du rôle d'intermédiaire joué par le commerçant ou l'université lorsqu'ils sont court-circuités par l'instauration de liens directs entre le producteur et le consommateur, l'étudiant et l'enseignant – amplifiera selon toute probabilité la perturbation des structures organisationnelles mises en place au niveau micro-économique.

Abandonner les habitudes de l'ère de la production et de la consommation de masse aura non seulement pour effet de renverser de nombreuses traditions rassurantes au niveau des entreprises et des ménages, mais exigera aussi l'introduction de nouveaux mécanismes qui seront au moins aussi capables de fournir des informations fiables et peu coûteuses et de répondre aux attentes que ceux du monde d'hier, celui des ordres venus d'en haut et des choix standardisés. Faute de nouvelles méthodes permettant de réduire le risque, la perception du risque et les coûts nécessaires pour acquérir des informations sûres, le dynamisme sociotechnique se trouvera probablement ralenti. L'inventivité, la spontanéité et l'ouverture d'esprit des travailleurs et des consommateurs sont des conditions indispensables à un développement et à une diffusion rapides des technologies. La réussite des efforts menés pour répondre à ces défis dépendra en grande partie de la nature des changements qui affecteront les conditions macro-économiques et globales environnantes. Ces aspects seront traités dans la section qui suit.

B. Dynamisme et résistance à l'évolution sociotechnique au niveau macro-économique et planétaire

De manière générale, le «sens commun» veut qu'un certain nombre de grandes tendances macro-économiques et planétaires marquées continuent d'offrir un cadre relativement favorable au progrès technologique dans les décennies à venir :

- premièrement, la persistance de l'adhésion dont bénéficient largement les politiques économiques axées sur une croissance non inflationniste, l'ajustement structurel et la réduction des déficits et de la dette publics;
- deuxièmement, la poursuite d'une croissance régulière de la productivité, à mesure que la concurrence dynamisera l'innovation, et l'accumulation de capital immatériel (technique, humain et organisationnel), en particulier dans les secteurs des services des pays développés et dans les secteurs industriels des pays en développement;
- troisièmement, la diminution constante des contraintes qui s'exercent sur le fonctionnement du marché à l'échelle nationale, grâce à la déréglementation et à la privatisation de secteurs tels que les transports et les communications;
- quatrième, la libéralisation accrue des échanges internationaux (y compris pour les services), de l'investissement étranger direct et des flux transfrontières de technologies;
- enfin, l'intégration continue à l'économie mondiale d'un nombre toujours plus grand de pays, dont certains disposent d'un marché intérieur considérable.

Tenir pour acquis que ces schémas généralement favorables prévaudront pour l'essentiel ne résout pas la question de savoir dans quelle mesure les conditions macro-économiques et planétaires sous-tendront le maintien ou le dynamisme des dispositifs sociotechniques. La réponse dépend largement de la manière dont seront relevés deux autres défis. Le premier renvoie à la capacité de pérenniser les bienfaits des «retombées du savoir», autrement dit d'encourager ou de décourager l'échange d'informations de haut niveau nécessaire pour susciter des progrès décisifs de l'organisation sociotechnique. Le deuxième défi consiste à mettre en place des conditions qui facilitent l'apparition de nouvelles formes d'organisation de la production, de revenu, d'emploi, de consommation et d'interaction entre secteur public et secteur privé. Ces conditions, qui non seulement permettent mais favorisent un degré plus important de souplesse et d'innovation dans l'ensemble de la société, contribueront aussi de façon déterminante à la concrétisation et au rythme du dynamisme sociotechnique. Les différentes solutions retenues pour faire face à ces deux défis constitueront un facteur décisif qui accélérera ou ralentira l'apparition de changements technologiques, organisa-

tionnels et structurels susceptibles, par exemple, de quitter l'ère de l'automobile pour inaugurer une nouvelle ère, celle de l'Internet.

Niveau macro-économique

On peut expliciter la façon dont différentes mesures macro-économiques se traduisent par des cheminements différents vers le dynamisme sociotechnique en examinant deux scénarios concernant l'évolution possible des économies nationales et régionales des pays de l'OCDE au cours des deux prochaines décennies; ces scénarios sont présentés dans le chapitre rédigé par Emilio Fontela. L'un reprend la vision, poussée à l'extrême, d'une société soumise presque exclusivement aux lois du marché et l'autre, une variante tout aussi extrême du modèle de « société nouvelle ». Aucun des deux scénarios n'a le monopole du dynamisme sociotechnique. Il ressort en fait que différentes manières de relever les défis au niveau macro-économique peuvent se traduire par des ensembles distincts de facteurs favorables et défavorables au changement sociotechnique.

Scénario axé sur le « marché »

Le scénario axé sur le marché a pour principale caractéristique de ramener les activités publiques à un rôle de surveillance qui ne dépasse pas les questions militaires, judiciaires, administratives et réglementaires. Tous les services d'intérêt collectif, notamment l'enseignement, la santé, les diverses formes de protection sociale, ainsi que les transports et les communications, entre autres exemples, sont transférés à la sphère marchande du secteur privé. L'introduction des règles du marché dans ces services d'intérêt collectif devrait en principe accélérer le rythme de l'innovation, et par conséquent celui de la croissance économique. Il en résultera probablement l'apparition d'un cercle vertueux grâce auquel des services collectifs entièrement privatisés pourront répondre à la demande de façon plus efficace pour un prix relativement moins élevé, ce qui donnera alors une nouvelle impulsion à la demande. Les secteurs en plein essor de la santé, de l'enseignement et de l'assurance étant aux mains d'entreprises privées, les contraintes budgétaires du secteur public devraient diminuer, d'où une baisse des taux d'intérêt et, de ce fait, des charges financières moindres pour les investisseurs privés. Le progrès technologique dynamisé par la concurrence, conjugué à la baisse du coût du capital, pourrait aboutir à d'importantes suppressions d'emplois, en particulier dans des services à forte intensité de main-d'œuvre comme le secteur bancaire. Toutefois, les conditions ne devraient pas se dégrader sur le marché du travail car selon ce scénario, les salaires sont suffisamment modulés pour assurer le plein emploi. Parmi les inconvénients, il est fort probable que le fossé se creusera rapidement entre les revenus, entraînant des problèmes d'exclusion et de coûts pour la collectivité. Les externalités

défavorables pour la collectivité, éléments qui échappent à l'intervention minimaliste de l'État, pourraient aussi s'accumuler au point d'entraîner une détérioration de l'état de l'environnement et des indicateurs généraux de qualité de la vie, notamment ceux qui rendent compte de la mortalité infantile dans les catégories très défavorisées.

Le dynamisme technologique du scénario axé sur le marché tient avant tout à la vigueur des forces concurrentielles qui peuvent s'exercer en toute liberté pour transformer la nature et les méthodes de production des biens et services. La réduction draconienne des contraintes susceptibles de faire obstacle au progrès technologique conduit à des innovations notables dans tous les secteurs économiques. Toutefois, dans le même temps, d'importantes forces contraires devraient se faire jour à mesure que l'incertitude et l'insécurité augmentent. Le rythme et l'offre de mise au point et de diffusion des technologies pourraient être surtout freinés par la crainte des conséquences pénibles à supporter en cas d'échec. Dans un monde caractérisé par des services collectifs privatisés, des prescriptions réglementaires peu nombreuses, et des disparités de revenus très marquées, beaucoup de gens peuvent opter, au travail et chez eux, pour des stratégies qui réduisent le risque au minimum, en s'en remettant à des pratiques connues dont les effets sont plus prévisibles. Des perturbations macro-économiques pourraient provoquer une aversion accrue à l'égard du risque au niveau micro-économique, non sans ralentir sensiblement certains changements de comportement qui sont généralement indispensables pour pleinement développer et exploiter le potentiel technologique. Par ailleurs, le dynamisme général de ce scénario pourrait être fortement compromis si les retombées du savoir, à partir du secteur public et du secteur privé, sont moins importantes. S'agissant du secteur privé, l'accumulation d'informations et l'excès de confidentialité pourraient se conjuguer à un traitement fortement restrictif de la propriété intellectuelle pour interrompre ou limiter strictement le partage des idées qui est un facteur essentiel d'apprentissage et de créativité. Du point de vue du secteur public, il est possible qu'une réduction des aides de l'État aux activités de R-D et à la fourniture de services d'intérêt collectif puisse finir par supprimer ou réduire sensiblement la libre circulation de l'information, condition indispensable à la plupart des progrès technologiques. Un tel renforcement global du caractère exclusif de la propriété intellectuelle au niveau macro-économique pourrait finir par handicaper à la fois la mise au point et la diffusion des nouvelles technologies, et avoir des conséquences sérieusement négatives au niveau macro-économique.

Scénario de la «nouvelle société»

Le scénario de la «nouvelle société» dépend, dans une large mesure, des initiatives prises par le secteur public pour tirer le meilleur parti du développe-

ment technologique et de la diffusion dans ce domaine. Les achats systématiques de l'État pour l'ensemble des services publics, conjugués à un soutien énergétique de la R-D, stimulent l'innovation et la diffusion à grande échelle de technologies répondant à des objectifs collectifs. L'amélioration de la qualité de la vie et les mesures favorables à la mise en place d'une société écologiquement viable figurent au premier rang des priorités technologiques. La croissance relativement rapide de la productivité devrait en principe se maintenir dans les secteurs exposés à la concurrence, mais faute de règles du marché pour dynamiser l'évolution technologique dans les services d'intérêt collectif – les conditions financières étant par ailleurs plus contraignantes dans le secteur public – ce scénario indique des taux de croissance économique moins élevés dans l'ensemble. Compte tenu de la croissance plus lente et de la souplesse relativement moins grande des marchés du travail et des capitaux, les solutions fondées sur le marché seront sans doute beaucoup moins efficaces pour résoudre les problèmes de chômage. Il faudrait plutôt s'efforcer d'élaborer des mesures réglementaires et institutionnelles afin de répartir les heures de travail plus équitablement entre les actifs, et même aller jusqu'à redéfinir, voire supprimer, le lien entre le revenu et le travail rémunéré (revenu minimum garanti). Dans ce scénario, les difficultés tiennent au souci de repenser les systèmes incitatifs, régime fiscal compris, sans pousser trop loin la dépendance, le « risque moral », le protectionnisme et l'avarision à l'égard du risque. Le manque d'efficacité des activités du secteur public et de l'allocation des ressources pourrait grandement compromettre les performances macro-économiques dans ce scénario.

Toutefois, le dynamisme technologique bénéficie largement de la motivation et de l'ouverture que supposent l'acquisition et la mise en commun de connaissances. Les priorités des pouvoirs publics étant clairement énoncées pour les secteurs de la santé, de l'enseignement, de l'énergie, des transports et des communications, une réorganisation et des innovations techniques appréciables s'ensuivent. Les technologies de l'information et les biotechnologies sont mises plus explicitement au service d'un programme d'ensemble, et le marché offre au secteur privé davantage de certitudes quant à ses efforts d'innovation dans de nombreux domaines comme l'apprentissage, la médecine, la production d'électricité, les transports publics, etc. Les objectifs fixés en termes d'accès, dans le sens de l'égalité des chances, semblent de nature à exercer un effet plus ou moins incitatif en faveur d'innovations techniques axées sur la réduction des coûts et la facilité d'utilisation. Néanmoins, ces mesures incitatives n'auraient probablement pas le pouvoir créateur ou destructeur du libre jeu des mécanismes du marché. Par conséquent, on risque de laisser passer des possibilités technologiques, tandis que la continuité institutionnelle en matière d'enseignement, de protection sociale et de réglementation du marché du travail peut se traduire par un manque de souplesse et un excès d'optimisme. Si pour certaines catégories

d'entreprises et d'individus, les risques micro-économiques liés à l'innovation technologique sont réduits, pour beaucoup d'autres la tentation existe de laisser les activités suivre leur cours, ce qui pourrait paralyser aussi bien l'élaboration que l'adoption de nouvelles techniques et l'organisation de la vie quotidienne. Ces rigidités accroissent le coût de la réalisation d'objectifs importants des politiques publiques, tels que la viabilité écologique, qui pourrait passer par une restructuration notable des méthodes fondamentales de production et de consommation, actuellement grandes consommatrices de ressources. D'un point de vue macro-économique, le modèle de la « nouvelle société » présente les avantages et les inconvénients d'un cadre trop stable, prévisible et centralisé pour la mise au point et la diffusion de technologies.

Risques et résistances au niveau macro-économique

La réalité sera sans doute moins tranchée que l'un ou l'autre de ces deux scénarios. Au niveau macro-économique des stratégies nationales, il pourrait être plus réaliste d'envisager deux types d'évolution. Dans le premier cas, on s'orientera vers un modèle de compromis plaidant pour la modération, qu'il s'agisse d'encourager l'extension des marchés privés ou de s'efforcer de donner un rôle exemplaire au secteur public. Cette solution intermédiaire pourrait finalement cumuler les inconvénients des deux scénarios, en freinant l'innovation dans le secteur privé comme dans le secteur public. Dans le second cas, on assistera au niveau national à un mouvement inverse d'élargissement de la concurrence partout où la situation s'y prête, parallèlement à la défense des initiatives publiques là où elles favorisent l'adaptabilité, le dynamisme sociotechnique et le bien-être. Cette solution aurait pour avantage de favoriser le changement au niveau national, mais pourrait finir par engendrer des frictions importantes au niveau international si différents pays adoptent des politiques divergentes et fondamentalement incompatibles.

Quoi qu'il en soit, le dynamisme sociotechnique pourrait être sérieusement retardé ou orienté dans la mauvaise direction par des obstacles d'ordre macro-économique découlant de l'inadéquation des conditions nécessaires au bon fonctionnement des marchés du travail et des capitaux, comme des systèmes de droits de propriété intellectuelle et de recherche scientifique fondamentale. Les exemples abondent déjà où l'expansion de l'économie créative et adaptable a surpassé la capacité des règles établies en matière d'emploi, de concurrence ou d'opérations de bourse, celle des programmes d'incitation en faveur du partage des connaissances (par exemple, répartition du financement des universités), et même celle des organismes chargés d'administrer les droits d'auteur et les brevets. Sans aucun doute, la nature et l'étendue de ces problèmes varieront d'un pays à l'autre en fonction des conditions-cadres à l'échelle macro-économique et de la capacité profonde du pays à assurer le dynamisme sociotechnique. Dans

certains pays ou régions, les problèmes les plus critiques sont posés par les pratiques anticoncurrentielles et par le risque de voir la collusion et/ou l'acceptation tacite des normes technologiques finir par imposer des solutions inférieures. Ailleurs, les principales difficultés consistent à adapter les réglementations et coutumes relatives aux marchés du travail et des capitaux en fonction des changements de direction aussi divers qu'inattendus qui caractérisent une économie axée sur l'innovation.

Enfin, quel que soit le scénario, le risque existe que dans un monde technologiquement plus complexe et interdépendant, la persistance des inégalités actuelles en matière d'accès au savoir et de répartition des connaissances n'accentue les clivages déjà graves qui existent au sein des sociétés et entre les régions. La polarisation entre les initiés et les exclus de la technologie, que ce soit dans une ville, dans une région comme l'Europe ou de part et d'autre des océans, pourrait à la longue imposer un ensemble de contraintes au dynamisme sociotechnique. Le protectionnisme, les luttes sociales, l'intolérance et même la haine ou les conflits ouverts pourraient être attisés par des écarts croissants et apparemment impossibles à combler entre les « riches » et les « pauvres » en matière de savoir, à l'intérieur d'un même pays ou entre différents pays. La prolifération de tels phénomènes de fragmentation, d'isolement et d'exclusion serait de nature à ralentir considérablement le rythme du dynamisme sociotechnique, ce qui pourrait finir par aggraver encore, selon une spirale non pas vertueuse mais vicieuse, des problèmes comme l'inégalité, la dégradation de l'environnement et la tension au niveau mondial.

Niveau planétaire

Au niveau planétaire, on entrevoit un monde hétérogène dans lequel certains pays ou régions s'inspirent du modèle de « marché » pur et d'autres de celui de la « nouvelle société ». A cet égard, il pourrait exister une formule optimale dans laquelle les avantages d'un modèle viennent combler les lacunes de l'autre. Des tensions systémiques liées aux difficultés de coexistence des différents modèles sont tout aussi plausibles. Toutefois, avant de passer aux principaux enjeux, il importe d'examiner la question plus générale de l'articulation des schémas planétaires avec le dynamisme et la résistance sociotechniques. Encore une fois, l'accent est mis sur la difficulté de mettre en place les conditions dans lesquelles les « retombées du savoir » et le changement organisationnel sont susceptibles d'encourager une transformation sociotechnique. Comme le fait observer Luc Soete dans sa contribution au présent ouvrage, l'instauration de conditions générales efficaces à cette échelle jouera probablement un rôle décisif dans l'avènement et la diffusion d'un bon nombre de progrès technologiques dans les 25 années à venir.

Perspectives et facteurs de risque

Les conditions-cadres à l'échelle planétaire devraient revêtir une importance cruciale pour quatre raisons. Premièrement, la poursuite de l'évolution vers un système économique mondial sans hiatus, caractérisé par des stratégies harmonisées à l'égard, par exemple, des droits de propriété intellectuelle, sera probablement la condition d'une répartition satisfaisante des investissements sous-tendant à la fois les progrès technologiques et l'infrastructure nécessaire au changement socio-économique. Deuxièmement, l'innovation scientifique et technique pourra difficilement mettre à profit l'effet multiplicateur du perfectionnement des technologies de l'information et des communications en l'absence de systèmes efficaces assurant la liberté d'accès au savoir et l'échange de connaissances à l'échelle mondiale. Troisièmement, dans le domaine commercial, les pressions concurrentielles comme la capacité d'innovation seront étroitement liées au degré de transparence des informations dans le monde, depuis les prix et les normes de qualité jusqu'aux ententes sur les marchés, sans oublier les différences entre les régimes fiscaux. Quatrièmement, la possibilité de consacrer des ressources à l'amélioration générale de la technologie et de la condition humaine dépendra sans doute de la réussite ou de l'échec des mesures prises pour instaurer une coopération internationale face à des problèmes d'ampleur planétaire tels que la pollution de l'environnement, la maladie, la faim et la pauvreté. En résumé, pour se rapprocher, et tirer avantage, du monde « plus petit » de demain, il faudra imposer des conditions générales d'ouverture, de transparence et de coopération à ce niveau.

Indépendamment des aspects géopolitiques de ces schémas mondiaux, plusieurs éléments de complexité devraient aller de pair avec les nouvelles perspectives technologiques. En particulier, quatre facteurs de division peuvent réduire les possibilités d'instaurer des conditions optimales au niveau planétaire. Le premier fait intervenir les valeurs ou les hypothèses culturelles qui sont soit posées au préalable, soit inhérentes à des technologies particulières, comme dans le cas de l'Internet ou du génie génétique. Dans ce cas, les précurseurs sociotechniques risquent de négliger les incompatibilités culturelles et de revendiquer l'accès à un marché jugé neutre du point de vue des valeurs. Cela pourrait entraîner des manifestations légitimes mais déroutantes de préférences sociales, exprimées démocratiquement, en faveur du protectionnisme, ce qui risquerait d'engendrer des tensions internationales potentiellement dangereuses. Le deuxième facteur tient aux nouvelles contraintes que font peser les capacités de destruction apportées par certaines possibilités sociotechniques – notamment l'acquisition plus facile des connaissances requises pour disposer de moyens meurtriers, à des fins militaires ou terroristes, et la vulnérabilité accrue d'infrastructures essentielles par le biais de l'Internet. Plus que jamais, il faudra évaluer et détecter les dangers, même fortuits, qui pourraient se manifester dans un

contexte propre à accompagner le dynamisme sociotechnique. Le troisième facteur tient au risque particulier de morcellement des dispositifs internationaux existants, du fait que les progrès sociotechniques permettent au processus de décision d'aller simultanément du niveau mondial au niveau local et inversement. Dans ce contexte, les différences pourraient être accentuées, et les accords d'une importance décisive conclus à l'échelle mondiale pourraient se désagréger ou ne pas voir le jour. Enfin, l'influence de la technologie et des nouvelles formes d'organisation pourrait finir par compromettre l'efficacité et la légitimité d'institutions collectives importantes, de l'entreprise centralisée et du gouvernement à la famille et aux organisations religieuses. La base actuelle de la pyramide, dont dépendent les schémas mondiaux, pourrait commencer à s'effriter lorsque le dynamisme sociotechnique bouleversera les habitudes assurant la cohésion sociale.

Toutes ces tensions sont abondamment illustrées par le défi que constitueront les enjeux de la viabilité écologique durant le siècle prochain.

L'exemple de la viabilité écologique

La viabilité écologique offre l'un des meilleurs exemples des prolongements divergents qu'entraîne (ou non) la mise en place de conditions propices au changement sociotechnique. La première raison à cela est que le progrès sociotechnique a probablement un rôle indispensable à jouer pour améliorer des performances écologiques, sans entraîner de contreparties inacceptables en termes de richesse ou de liberté individuelle. D'autre part, la viabilité écologique est l'exemple le plus en vue parmi deux ensembles d'externalités : la pollution ne connaît pas les limites territoriales, et la rentabilité globale pour la collectivité des investissements consacrés au changement sociotechnique dans une optique d'amélioration de l'environnement est probablement plus grande au niveau mondial qu'au niveau national.

A la différence de certains défis technologiques antérieurs – tels que le projet Manhattan, qui visait résolument des progrès scientifiques et techniques de grande ampleur pour construire une bombe atomique dans le plus grand secret et indépendamment de tout autre projet – les mesures prises en faveur de la viabilité écologique seront plus ou moins fructueuses selon l'aptitude à partager ouvertement et à mettre en place conjointement des changements d'ordre socio-économique et technologique. Dans le même ordre d'idées, il faudra, comme indiqué ci-dessus, concevoir des schémas mondiaux adaptables aux différences de culture, d'éducation et de revenu qui peuvent paralyser la promotion et la diffusion planétaires des mutations sociotechniques. Ce défi ne doit pas être relevé par les seuls pays en développement. Ainsi, le passage à des modes de production et de consommation d'énergie plus économes et plus locaux ne

pourra probablement s'opérer que moyennant une rupture relativement radicale avec les façons actuelles de travailler et de vivre, et avec les approches passives et grandes consommatrices de ressources qui prédominent largement à l'heure actuelle dans la plupart des pays de l'OCDE.

Les externalités liées à l'environnement planétaire font clairement ressortir la nécessité de porter la coopération mondiale à un autre niveau. Tel est le cas, par exemple, de la transition vers un recours beaucoup plus grand aux sources d'énergie renouvelables locales : les progrès en la matière passeront sans doute par toutes sortes d'initiatives souvent déstabilisantes, coûteuses et interdépendantes. Ainsi, la décentralisation de la production et de la gestion de l'électricité au niveau des ménages et des entreprises, à l'encontre des habitudes centralisatrices ancrées depuis un siècle, supposerait probablement une importante réorientation des activités de R-D consacrées aux produits énergétiques, une profonde réforme réglementaire, des efforts d'enseignement de grande ampleur, de nouvelles structures des prix et des coûts énergétiques, des considérations d'équité complexes et, selon toute vraisemblance, une adaptation des modes de vie. Attendre qu'une instance donnée prenne en charge l'ensemble des coûts de formation liés à cette transition radicale aboutirait sans doute à retarder excessivement le moment où la diffusion de la technologie apporterait des bienfaits à la collectivité à l'échelle mondiale. Les pressions concurrentielles, qui par exemple s'exercent librement en Californie et poussent les compagnies d'électricité privées à proposer la fourniture d'énergie solaire, sont appelées à jouer un rôle important et constructif. Cependant, compte tenu des difficultés techniques et des problèmes d'équité qui accompagnent la conversion à des structures énergétiques renouvelables, il sera sans doute nécessaire de partager les coûts et les avantages au niveau mondial. Faute d'un tel partage, il est fort probable que les mutations sociales et technologiques indispensables à la viabilité de la planète ne se produiront pas ou apparaîtront très lentement.

Vers une stratégie globale d'accompagnement du dynamisme sociotechnique

En dernière analyse, compte tenu de l'interdépendance croissante à l'échelle internationale, il semble que les stratégies globales plutôt que nationales sont appelées à devenir le moyen le plus efficace de s'attaquer aux problèmes macro-économiques, par exemple de faire en sorte que les valeurs et obligations puissent être échangées en toute liberté dans le monde entier, ou que les producteurs de propriété intellectuelle soient indemnisés de façon juste et rationnelle lorsque quelqu'un utilise leur production. De fait, l'un des principaux obstacles macro-économiques au dynamisme sociotechnique réside dans le fait que les institutions existantes sont nationales ou internationales, alors que bon nombre des enjeux nouveaux semblent exiger une réflexion plus globale. Comme l'ont souligné de nombreux analystes, notamment à propos de la viabilité

écologique future, la tendance à privilégier des initiatives plus intégrées, prises à l'échelle de la planète, va probablement s'accélérer à mesure que l'on prendra conscience des avantages que procurent, au niveau tant individuel que collectif, les actions menées à l'échelle mondiale.

Enfin, sous l'effet de la convergence de facteurs économiques, sociaux et technologiques, la gestion globale semble sur le point de connaître un développement spectaculaire, du point de vue aussi bien de son importance que de sa faisabilité. A cet égard, les mesures prises pour surmonter les obstacles au dynamisme sociotechnique constituent à la fois un catalyseur pour relever les défis susceptibles de découler d'une plus grande interdépendance, et un moyen de mettre au point les outils nécessaires pour faire face à ces problèmes d'ampleur mondiale. Ces interactions amènent naturellement à envisager les orientations les plus favorables pour les politiques visant à stimuler le dynamisme sociotechnique tout en limitant au maximum les risques qu'il représente et en surmontant les obstacles divers et souvent complexes qui s'y opposent.

III. TIRER LE MEILLEUR PARTI DES TECHNOLOGIES DU XXI^e SIÈCLE : STRATÉGIES PROPRES A ENCOURAGER LE DYNAMISME SOCIOTECHNIQUE

Beaucoup se réjouissent de la perspective des nombreux bienfaits qui semblent pouvoir découler de l'innovation technologique pour le XXI^e siècle. Toutefois, cet optimisme s'accompagne aussi d'une profonde conviction du fait que l'opportunité et la faisabilité des évolutions techniques dépendront avant tout de la mise en place et de la diffusion de nombreuses conditions favorables d'ordre économique, social et gouvernemental. A l'inverse, l'orientation, le rythme et la diffusion de l'innovation scientifique sont considérés comme exerçant une influence fondamentale sur les structures sous-jacentes du savoir, des incitations économiques et des contraintes sociales. Ainsi, il est largement admis que pour réaliser le potentiel de la technologie, il importera de favoriser une interaction complexe des progrès sociaux et techniques, amenant une synergie que l'on peut désigner par l'expression de « dynamisme sociotechnique ».

Quatre facteurs particulièrement puissants et universels ont été désignés comme essentiels pour stimuler le dynamisme sociotechnique au cours des décennies à venir. Premièrement, la diffusion et l'intensification de la concurrence sur les marchés existants et émergents à l'échelle locale, régionale et mondiale, semblent exercer un effet d'entraînement important sur toutes les formes d'innovation technologique et organisationnelle. Deuxièmement, le passage à une économie fondée sur le savoir promet à la fois de rompre certaines relations solidement enracinées de l'ère industrielle et d'ouvrir de nouvelles perspectives d'activités immatérielles à valeur ajoutée, non fondées sur l'entre-

prise. Dans l'économie du savoir de demain, qui fonctionnera en réseau, faire preuve d'imagination – et même de talent artistique – pourra devenir aussi important qu'acquérir l'avantage concurrentiel de plus en plus vital conféré au premier à lancer un nouveau produit sur le marché. Troisièmement, l'interdépendance croissante des facteurs économiques, sociaux et environnementaux, notamment au niveau mondial, contraindra probablement à modifier profondément la façon dont sont gérées les connaissances, les ressources et la souveraineté. Quatrièmement, la permanence des aspirations individuelles et collectives – l'espoir en une vie meilleure – est aussi de nature à jouer un rôle majeur en modifiant les paramètres de l'action publique et en amenant les individus à prendre le risque d'adopter de nouvelles habitudes pour structurer le « où, quand et comment » de nombreuses activités humaines de base.

Pris séparément, chacun de ces forts courants pourrait se traduire par d'importantes mutations économiques et sociales; combinés, ils sont susceptibles d'engendrer une vague puissante sur laquelle le dynamisme sociotechnique entrera dans le XXI^e siècle. De même que la transition entre l'agriculture et l'industrie a placé les entreprises, les individus et les gouvernements devant un large éventail de choix nouveaux, il pourrait en être de même du dynamisme sociotechnique et de la transition vers une économie et une société fondées sur le savoir. De l'avis quasi général, à moins d'un effondrement politique ou de catastrophes naturelles susceptibles d'empêcher toute évolution, on peut prévoir une trajectoire sociotechnique dynamique propre à modifier les conditions de vie de base de la plupart des gens. Pour les entreprises et les consommateurs dans les pays de l'OCDE, suivre une trajectoire sociotechnique dynamique signifiera probablement rompre avec toute une série d'habitudes et de pratiques profondément ancrées, afin de s'acheminer vers des niveaux jamais atteints d'innovation anticipative et de personnalisation dans tous les aspects du commerce et de la vie. Dans une bonne partie du reste du monde, les changements pourraient être tout aussi spectaculaires, avec la diffusion de nouvelles formes d'organisation industrielle et de nouvelles technologies. Il y a tout lieu de penser que les prochaines décennies verront une transformation majeure des schémas établis de longue date, concernant les lieux où nous travaillons, ce que nous produisons, les moments où nous nous engageons dans une activité d'apprentissage, la façon dont nous structurons les différentes phases de notre vie et de notre journée, ce que nous consommons, auprès de qui nous nous fournissons et la façon dont nous dialoguons avec nos contemporains.

Pour encourager un tel dynamisme sociotechnique au cours des décennies à venir, il faudra privilégier deux grands objectifs. Premièrement, les décideurs des secteurs tant public que privé devront déployer des efforts considérables pour encourager la créativité individuelle et organisationnelle, c'est-à-dire la capacité et la liberté d'introduire des innovations et des changements dans nos façons de

travailler et de vivre. Deuxièmement, dans le domaine public et privé, il faudra mettre fortement l'accent sur les moyens d'améliorer la prise de décision collective aux niveaux local, national et (peut-être avant tout) mondial, afin de faire progresser le dynamisme sociotechnique, d'en récolter les bienfaits et de les partager. Une bonne partie de l'analyse souligne la forte interdépendance qui existe entre, d'une part, les efforts concertés visant à assurer l'accessibilité et la fiabilité de l'information dans l'économie du savoir et, d'autre part, la capacité individuelle d'affronter la concurrence, d'évaluer les risques et d'apprendre. Tout aussi interdépendantes sont la recherche concertée d'ouverture, la tolérance et l'aptitude des individus à trouver une inspiration créatrice dans le libre partage des idées et des points de vue opposés.

Mettre en relief ces deux objectifs de l'action future des pouvoirs publics ne suppose en aucun cas un abandon des objectifs plus classiques de celle-ci, qui consistent par exemple à mettre en place un cadre macro-économique stable, à encourager l'ajustement structurel par un fonctionnement souple des marchés des produits, du travail et des capitaux, à améliorer la capacité d'apprentissage des individus, et à prévenir l'exclusion sociale. Bien au contraire, loin de passer au second plan, ces priorités bien connues de l'action des pouvoirs publics sont considérées par la plupart des analystes comme cruciales pour mettre en œuvre la créativité et la coopération nécessaires dans un contexte économique et social novateur et adaptable. Un cadre macro-économique stable – constitué de politiques visant un faible taux d'inflation et de solides finances publiques – contribuera de façon déterminante à réduire en partie l'instabilité qui peut décourager la prise de risque et l'innovation. Des marchés du travail plus souples, des marchés des capitaux transparents et ouverts, et des marchés concurrentiels des biens et services, sont autant de facteurs indispensables à la redistribution fluide des ressources et à l'expérimentation qui sont susceptibles de caractériser un dynamisme sociotechnique robuste. Une autre priorité constante de l'action des pouvoirs publics sera de modifier l'infrastructure d'apprentissage – y compris mais pas uniquement la priorité donnée par l'ère industrielle aux projets éducatifs axés sur l'offre et aux grands projets de R-D – afin de répondre aux exigences d'une économie du savoir novatrice. Des efforts continus devront aussi être déployés pour veiller à ce que les systèmes d'aides sociales, les régimes de retraite et les systèmes de soins de santé soient adaptés aux besoins de la société très diversifiée et, peut-être, moins prévisible de demain. Globalement, les réformes déjà engagées dans ces domaines traditionnels de l'action des pouvoirs publics seront probablement nécessaires mais non suffisantes pour favoriser le dynamisme sociotechnique au XXI^e siècle.

Relever le défi consistant à faire prospérer une économie et une société dont le moteur est l'innovation exigera probablement des initiatives tout aussi inventives. Pour de nombreux spécialistes, il sera probablement nécessaire de procé-

der à une refonte majeure des dispositions réglementaires et administratives ayant trait à la concurrence et à la propriété intellectuelle, afin de prendre en compte l'importance accrue des actifs incorporels et des marchés mondiaux. Les caractéristiques extra-nationales d'Internet appelleront aussi des mesures inédites. De nouvelles voies devront être ouvertes afin de mettre en place les cadres d'action permettant aux technologies existantes de définir pour chacun l'identité dont il a besoin dans le cyberspace afin de voter ou de partager des données médicales. Des progrès décisifs seront aussi probablement nécessaires pour gérer des problèmes d'ampleur mondiale comme le changement climatique et pour poursuivre le développement et la diffusion de technologies qui atténuent certains des arbitrages défavorables entre la croissance économique et la viabilité écologique, tout en tirant parti des éventuelles synergies. A mesure que la décentralisation au niveau micro-économique modifiera le paradigme de la production et de la consommation de masse, de nouvelles formes de partage des risques, de vérification de l'information et de coopération spontanée devront apparaître. Il sera probablement essentiel de mettre en place des règles applicables au commerce électronique – dans certains cas des initiatives réglementaires créatives – afin d'encourager à la fois le fonctionnement global de marchés existants comme le marché boursier ou celui de l'assurance, et le développement de transactions entièrement nouvelles comme la vente d'informations personnelles à caractère privé aux services de bases de données destinés aux entreprises (par exemple, préférences individuelles, revenu, intentions d'achats, évaluations de produits ou de marques).

La panoplie de mesures devra aussi intégrer des aspects moins ordinaires. Dans nombre de cas, déclencher des transformations dans les domaines des valeurs et de la culture contribuera de façon déterminante à faire mieux accepter les idées nouvelles et les modes de vies différents, ainsi que l'esprit d'entreprise et l'expérimentation. Pour atteindre ces objectifs, il faudra mettre en œuvre un large éventail de mesures inventives particulièrement réceptives aux différences locales, nationales et régionales. Trouver le dosage approprié de stratégies publiques et privées, locales et globales, novatrices et traditionnelles, représentera non seulement un défi permanent mais aussi un objectif difficile à cerner. Car si la créativité doit être la source du progrès, alors les conditions propres à assurer un tel dynamisme sociotechnique vont probablement évoluer sans cesse.

LA TECHNOLOGIE DANS LES 25 ANNÉES A VENIR : PERSPECTIVES ET FACTEURS DE RISQUE

par

Joseph Coates
Coates & Jarratt, Inc.
États-Unis

Les perfectionnements et les applications technologiques ne sont pas aussi difficiles à prévoir un quart de siècle à l'avance qu'on tend à le croire. Des années, voire des décennies, s'écouleront avant qu'un grand nombre de technologies tout juste opérationnelles aujourd'hui fassent véritablement sentir leurs effets. Par ailleurs, l'histoire des technologies à l'ère industrielle indique que le délai séparant une découverte scientifique fondamentale et sa mise en pratique va de 15 à 40 ans. L'observation des nouveautés et des progrès déterminants de la science peut donner une idée du paysage technologique à venir. Avant d'aborder des cas précis, il importe de rappeler quelques notions liées au choix et à l'approfondissement de telle ou telle innovation.

Premièrement, le risque le plus important serait de passer à côté de la possibilité qu'offrent les nouvelles technologies d'améliorer la situation des êtres humains et des nations.

Deuxièmement, dans un domaine très voisin, s'ajoute le risque d'une réglementation trop rigoureuse ou trop souple, et d'une exploitation outrancière ou insuffisante des innovations. Ces excès peuvent contrecarrer l'évolution souhaitable ou laisser libre cours à des phénomènes indésirables.

Troisièmement, l'erreur de prospective la plus courante consiste à pêcher par optimisme, en négligeant les contraintes sociales, économiques et politiques, et à prévoir l'arrivée rapide d'une nouvelle technologie alors que les conditions ne s'y prêtent pas encore.

Quatrièmement, l'omission des effets secondaires aggrave l'erreur qui précède. Ces effets supplantent souvent les problèmes que l'on entend résoudre

grâce aux nouvelles technologies. La plupart du temps, les nouvelles technologies viennent se substituer à d'autres. Elles permettent d'accomplir une fonction de façon plus satisfaisante, moins onéreuse, plus rapide ou plus fiable, ou comportent un avantage micro-économique quelconque. Dans les sociétés capitalistes, leur mise en œuvre procède essentiellement d'une relation vendeur-client dans laquelle la prise en compte des conséquences ou des retombées à long terme des technologies en jeu n'occupe que peu de place. Par exemple, lorsque le traitement de textes a fait son entrée au bureau, les intéressés n'y voyaient guère plus que l'introduction d'un outil de secrétariat perfectionné. Personne n'imaginait qu'il en résulterait, premièrement, une forte diminution des effectifs de secrétariat et, deuxièmement, une appropriation de cet outil par les spécialistes eux-mêmes, non sans réduire la nécessité d'un concours extérieur.

Cinquièmement, la corne d'abondance des technologies engendre un excès de choix pour les entreprises, les gouvernements et les consommateurs. Ces choix vont de la nouvelle version d'un lecteur de cassettes portable à l'adoption de nouvelles sources d'énergie dans une province d'un pays en développement. Le risque est alors de fonder les décisions non sur une prise en compte de leurs résultats futurs, mais sur les forces de court terme, locales, et trop souvent intéressées qui reflètent les enjeux immédiats.

Sixièmement, le monde est trop complexe pour être aggrégé en un seul ensemble de pays. Il est plus judicieux de distinguer trois grands groupes. Le premier englobe les nations industrialisées, à savoir les pays d'Europe, les États-Unis, le Canada, l'Australie, la Nouvelle-Zélande et le Japon. Le second renvoie aux nations qui parviennent plus ou moins à équilibrer les besoins et les ressources et où prévaut actuellement un développement économique rapide. Le troisième comprend des pays, tels que le Bangladesh et le Nigeria, qui sont confrontés à de graves difficultés sans entrevoir de perspectives favorables. Par conséquent, les effets des technologies ne sauraient être uniformes. Dans la plupart des cas, les technologies devraient se propager du premier groupe au deuxième puis au troisième. Par ailleurs, bon nombre de choix opérés dans le troisième groupe de pays correspondront non pas au revenus élevés et aux tendances de consommation du premier groupe mais, plus vraisemblablement, à la nécessité pour les gouvernements de faire face aux besoins élémentaires dans les domaines suivants : alimentation, habillement, logement, hygiène et transports.

En examinant les données technologiques ci-après, le lecteur est invité à prendre en compte les six notions évoquées pour chaque innovation.

Les technologies n'ont jamais été aussi riches de promesses pour l'humanité depuis la révolution industrielle. L'ensemble de la population des pays développés vit dans un environnement entièrement aménagé. Tous les dispositifs, artefacts, matériaux et systèmes au service de la collectivité sont le fruit d'initia-

tives techniques. Dans les endroits les plus reculés, nous n'échappons pas à la vigilance d'instances officielles secondées par un système d'assistance et de sauvetage de pointe. Le reste du monde progresse régulièrement dans le même sens.

La mondialisation de l'économie, en favorisant les échanges et le commerce, entraîne une division du travail entre toutes les nations. A terme, le commerce portera sur des denrées brutes et des matières premières cultivées ou extraites grâce à des technologies très élaborées, sur des produits manufacturés ou sur des services évolués tributaires de systèmes techniques. Les activités humaines les plus proches de la nature, à savoir l'agriculture et l'élevage, font elles-mêmes de plus en plus appel aux technologies. Leur productivité en augmentation constante dépend de systèmes fondés sur des technologies. L'exemple de l'agriculture et des rendements élevés de ce secteur dans le premier groupe de pays est édifiant. Pour ce qui est de la production animale, le poulet et le porc sont issus de méthodes industrielles de gestion et de sélection ; le bœuf devrait suivre sous peu.

Les grands phénomènes naturels – intempéries, marées, séismes et éruptions volcaniques – sont mieux connus grâce aux systèmes techniques complexes conçus pour la collecte de données, l'analyse, l'interprétation et la prévision. Nous sommes en passe de disposer des moyens voulus pour canaliser, voire maîtriser, les forces fondamentales de la nature.

Alors que nous allons vers une complexité sans précédent, que ne laissait guère entrevoir la première moitié de l'ère industrielle, les technologies elles-mêmes deviennent de plus en plus complexes. A l'avenir, le scientifique ou l'ingénieur soucieux de réussir devra probablement se diversifier, en se formant dans plusieurs domaines dont la synthèse lui donnera une compétence particulière. Dans cette optique, la fin de la scolarité et le début de la vie professionnelle ne sont qu'une étape dans toute une vie de perfectionnement intellectuel et d'acquisition de nouvelles qualifications. Tandis que les catégories traditionnelles de l'ingénierie dans le monde des applications pratiques tendent à disparaître, l'université prend du retard en restant attachée à ces catégories – génie civil, électricité, électronique, chimie, mécanique et scientifiques (chimie, physique, biologie, etc.).

Les sciences appliquées sont une forme de technologie ou d'ingénierie parmi d'autres, l'ingénierie s'appuyant sur l'innovation scientifique. C'est ainsi que l'ordinateur – issu de progrès de la recherche fondamentale traduits dans la pratique par des ingénieurs et constamment amélioré grâce aux travaux effectués à ces deux niveaux – est un exemple représentatif d'outil de mutation dans le monde contemporain. Il offre en retour dans tous les domaines techniques des possibilités inespérées en matière de planification, de conception, d'exécution, de suivi, de vérification et d'évaluation.

Des domaines d'ingénierie se développeront certainement au début du prochain millénaire. A la faveur d'un projet triennal, Coates & Jarrett, Inc. a rassemblé les prévisions effectuées dans le monde entier dans toutes les disciplines scientifiques et techniques possibles. L'analyse systématique de ces prévisions a donné lieu à 41 rapports, soit environ 4 000 pages. Dans un deuxième temps, nous avons réalisé nos propres prévisions pour 2025, qui font l'objet d'une publication*. Ce tour d'horizon des perspectives scientifiques et techniques montre que les progrès accomplis dans six domaines, énumérés ci-dessous, devraient déterminer les prochaines étapes de l'activité humaine :

- technologies génétiques;
- technologies énergétiques;
- technologies des matériaux;
- technologies du cerveau;
- technologies de l'information.

Le sixième domaine, la protection de l'environnement, ne peut être véritablement qualifié de technologique mais se répercute sur tous les autres.

Le processus de maturation qui suit chaque innovation scientifique affine cette dernière en différentes applications techniques. La génétique, par exemple, se traduira au moment de l'achèvement du projet sur le génome humain par des techniques de diagnostic et d'évaluation personnalisés des maladies ou handicaps. Chacun pourra disposer, à peu de frais, d'un tracé implicite de son développement ou de son évolution probable, ainsi que pour ses enfants. Il en résultera un nouvel essor des technologies médicales, axées sur les moyens susceptibles de corriger, de neutraliser ou de modifier des syndromes indésirables et, tôt ou tard, d'améliorer nos caractéristiques génétiques. Les technologies permettant de recueillir, d'organiser, d'interpréter et d'exploiter les connaissances en la matière donneront naissance à des réseaux d'information et révolutionneront l'épidémiologie.

Les technologies de traitement des données, associées à des cartes de santé à puce (à microprocesseur) ou à des réseaux universels d'informations sanitaires et médicales, déboucheront sur de nouveaux moyens de mettre en évidence les causes internes et externes des maladies et des troubles dont souffre l'être humain.

Les technologies agissant sur d'autres organismes vivants seront plus spectaculaires et à bien des égards plus efficaces. En permettant de lutter contre les ennemis des cultures, d'améliorer les ressources alimentaires, d'accroître et de

* Joseph F. Coates, John B. Mahaffle et Andy Hines (1997), *2025: Scenarios of US and Global Society Reshaped by Science and Technology*, Oak Hill Press, Greensboro, North Carolina.

modifier le milieu biologique, de créer rapidement de nouvelles variétés végétales et espèces transgéniques, elles multiplieront les chances de vivre en bonne santé sur une planète de plus en plus encombrée et unifiée.

TECHNOLOGIE GÉNÉTIQUE

Durant les cinquante années écoulées, la transmission des caractéristiques innées de tous les êtres vivants par une catégorie particulière de substances chimiques, l'acide désoxyribonucléique ou ADN, a été établie de manière incontestable. L'ADN comprend quatre constituants disposés de différentes manières qui forment un code. Ce code permet alors au programme génétique de produire, à partir du matériel présent dans le milieu cellulaire, une classe particulière de protéines – les enzymes – qui peuvent à leur tour construire tous les autres éléments constitutifs de l'organisme, qu'il s'agisse d'un micro-organisme ou d'un être humain, d'un papillon ou d'un pin. Pendant un demi-siècle, nous avons appris à décoder l'ADN, à le recomposer et à le synthétiser, et même à combiner l'ADN de différentes sources ou espèces. Nous savons que les caractéristiques ou les comportements codés par l'ADN vont s'exprimer – c'est-à-dire apparaître dans l'organisme – dès lors que les conditions voulues sont réunies. Il existe dans l'univers peu d'exemples de fonctionnement plus démocratique : transposé d'une partie quelconque du règne vivant dans une autre, l'ADN est voué à exprimer ses caractéristiques si le milieu s'y prête.

Les techniques de contraception élaborées au début du siècle ont dissocié la procréation from recreation. Les progrès de la génétique laissent entrevoir une nouvelle distinction entre fécondation et reproduction de caractéristiques indésirables. Il existe environ 4 000 maladies et affections humaines héréditaires. Certaines font partie intégrante de la destinée individuelle de la personne qui les porte, d'autres ne sont qu'affaire de probabilités, laissant les individus sensibles à l'exposition à certains facteurs défavorables. A mesure que les connaissances évoluent sur l'origine génétique de telle ou telle maladie, des pressions seront exercées en faveur de l'approfondissement des recherches correspondantes. On verra se multiplier les méthodes visant à prévenir, à corriger ou à atténuer les effets des gènes nocifs. Les associations de personnes souffrant de troubles particuliers influenceront non seulement sur les choix du secteur public en matière de recherche, mais aussi sur les travaux réalisés par le secteur privé. S'il s'avère que les entreprises ne consacrent pas suffisamment de fonds à une maladie donnée, les moyens d'action privilégiés par les groupes de défense des intérêts publics – notamment le boycott et les campagnes de sensibilisation – les forceront à modifier leur ligne de conduite.

Le rôle de la génétique dans les décisions humaines sera particulièrement évident pour quiconque porte le gène d'une maladie potentiellement mortelle.

La présence, ou l'absence, de ce gène sera établie par le diagnostic. Si elle est confirmée, le choix de fonder une famille s'effectuera en connaissance de cause. Tout d'abord, le fœtus sera examiné *in utero*. S'il est porteur du gène incriminé, les solutions possibles, par ordre décroissant, seront les suivantes : recourir à l'avortement, accepter la situation en se préparant à la naissance d'un enfant atteint d'une anomalie, s'abstenir de toute intervention en attribuant la maladie à la volonté divine. La fécondation *in vitro* va plus loin. L'ovule fécondé examiné après deux ou trois divisions en quatre ou huit cellules qui ne présente aucune affection pourra être implanté et l'enfant naîtra indemne. Le coût correspondant, extrêmement élevé aujourd'hui, sera progressivement ramené à des niveaux acceptables par l'évolution technologique.

La recherche de solutions aux maladies et troubles actuellement privilégiée par les programmes publics du monde entier débouche inéluctablement sur l'eugénisme. Nous sommes la première génération capable d'intervenir dans notre propre évolution.

Depuis plus d'une décennie, nous avons dit que les mastodontes réapparaîtront sur terre, que le ciel sera parcouru par les tourtes voyageuses et que les dodos reviendront sur l'île Maurice. Chaque musée est un conservatoire d'espèces qui ne demandent qu'à être ranimées par de nouvelles techniques de génie génétique. La naissance de Dolly vient d'ouvrir la voie à l'utilisation de cellules somatiques, par opposition aux cellules germinales, pour la production d'animaux complets. La chair de mastodonte trouvée en Sibérie est encore comestible. Sans doute reste-t-il une partie intacte qui permettra bientôt de prélever un ovule d'éléphante, pour en remplacer le noyau par l'ADN activé du mastodonte, et de le réimplanter chez l'éléphante. Au bout de 18 à 22 mois, le monde verra le premier mastodonte vivant depuis 10 000 ans.

Les effets de la génétique en agriculture sont pratiquement illimités. Il existe approximativement 3 500 plantes comestibles. Environ 300 sont mangées par des êtres vivants, 60 sont commercialisées, 30 sont largement consommées et six couvrent 90 pour cent des besoins alimentaires des êtres humains. La plupart des plantes n'entrant pas dans l'alimentation humaine sont négligées pour les raisons suivantes : défauts, cuisson nécessitant trop d'énergie, part excessive des enveloppes ou écorces, odeur ou saveur désagréable, etc. L'intervention génétique directe devrait modifier notre alimentation en élargissant l'éventail des produits propres à la consommation. Les plantes transgéniques – qui résultent de l'association d'ADN d'espèces distinctes – sont pratiquement à notre portée. La génétique est d'ores et déjà appliquée, avant tout pour accroître la productivité, objectif incontestablement souhaitable à court terme. L'étape suivante consistera à modifier les plantes pour en améliorer les qualités nutritives. L'alimentation mexicaine, par exemple, est à base de riz et de haricots. Les deux aliments fournissent des protéines ; aucun ne constitue seul un régime équilibré de pro-

téines; mais ensemble, elles le font. Dans un avenir très proche, le riz et les haricots seront génétiquement modifiés de manière à constituer un mélange protéiné parfaitement équilibré lorsqu'ils sont consommés séparément. Or la génétique ira encore au-delà en nous permettant de modifier les plantes existantes ou d'en concevoir de nouvelles, de créer des espèces transgéniques capables de vivre dans des zones arides, dans des climats secs, voire en eau saumâtre ou dans des conditions normalement jugées médiocres ou inadaptées.

L'application de la génétique à des micro-organismes devrait revêtir une grande importance à bien des égards. Du fait qu'ils admettent démocratiquement l'ADN d'autres espèces, les micro-organismes sont déjà capables de produire de grandes quantités de molécules très complexes, trop coûteuses ou même trop difficiles à produire par des moyens classiques. Outre ces produits chimiques spéciaux, les micro-organismes pourraient bien devenir des concurrents intéressants pour la fabrication de produits chimiques de base. Toutes les espèces se caractérisent par le fait qu'elles peuvent seulement produire ce qui est prévu par leur ADN. Les micro-organismes, dans la plupart des cas, sont génétiquement programmés pour vivre à des températures et des pressions peu élevées et ne peuvent qu'accomplir des tâches bien précises. A la différence d'une usine chimique dans laquelle l'élévation de température se traduit par des produits dérivés indésirables et souvent toxiques, les micro-organismes arrêtent simplement de produire lorsque les conditions sont défavorables. L'obtention de produits chimiques de base à l'aide de micro-organismes se substituera avantageusement, au plan technico-économique, aux autres formes de production, mais laisse entrevoir un degré de pureté sans précédent pour la chimie lourde, et par conséquent de moindres problèmes d'environnement.

TECHNOLOGIE DE L'ÉNERGIE

Le progrès technique a entraîné une dépendance, dont la collectivité a tiré parti de façon très efficace et économiquement productive, à l'égard de vagues énergétiques successives : après l'eau, puis le charbon et plus tardivement le pétrole, les formes d'énergie prépondérantes sont actuellement le gaz naturel et, dans une large mesure, le nucléaire. A l'avenir, la dépendance à l'égard de sources d'énergie isolées diminuera au profit de sources multiples. Il est extrêmement difficile de se prononcer sur la réalité et l'ampleur du réchauffement que peut provoquer l'effet de serre résultant des activités technologiques. Alors qu'il est probable que le réchauffement est réel et d'ampleur significative, cela n'a pas encore été établi avec une certitude suffisante. Si c'est le cas dans l'avenir, on fera appel dans un premier temps et à court terme aux technologies pour réaliser des économies d'énergie de grande envergure. Des améliorations seront apportées, rapidement et simultanément, dans les domaines suivants : structures, bâtiments, conception et isolation, efficacité du transport du courant électrique

(probablement grâce aux applications des matériaux supraconducteurs) et mise au point de nouveaux moteurs à essence et à gaz naturel offrant un meilleur rendement. Elles ne seront pas suffisantes.

A l'avenir, notre infrastructure énergétique globale sera probablement structurée autour de deux ressources primaires non carboniques. L'une est l'énergie nucléaire, essentiellement à partir du modèle français caractérisé par une conception uniforme, des économies d'échelle, ainsi que des éléments et des effectifs interchangeables. L'autre est l'énergie solaire, qui servira principalement soit à produire directement de l'électricité (photovoltaïque), soit à stocker de l'énergie sous forme d'eau chaude. Une autre source probable est d'origine éolienne : la technologie a été grandement perfectionnée durant les cinq années écoulées.

La reconfiguration de l'infrastructure énergétique mondiale est inéluctable, si le réchauffement lié à l'effet de serre s'avère, comme dit plus haut, à la fois réel et significatif. Si le réchauffement s'avère négligeable, l'exploitation plus satisfaisante des combustibles fossiles sera néanmoins un défi technologique. De nouvelles formes d'extraction du pétrole – appelées, faute de mieux, techniques de quatrième génération – accompagneront l'amélioration de la cartographie souterraine, des techniques de forage plus adaptées et des techniques encore insoupçonnées. D'importantes réserves de gaz naturel sont fréquemment découvertes. Enfin, en plus grandes quantités encore que le pétrole et le gaz naturel, on trouve des hydrates de gaz, complexes à l'échelle moléculaire de cages de glace renfermant des molécules de méthane. Grâce aux moyens techniques, des ressources énergétiques pourront être découvertes ou récupérées, mises en valeur et utilisées de façon optimale.

Il est peu probable, vu d'aujourd'hui, que l'effet de serre provoque une crise des politiques de régulation. Le problème central est bien davantage lié à l'incrédulité des sphères de décision mondiales, si tant est que les certitudes se mesurent par l'empressement à prendre des mesures concrètes. Cette incrédulité annihile des choix nécessaires et délaisse des alternatives viables.

La parade la plus évidente à l'éventuel réchauffement – étant donné que l'effet de serre évolue plus ou moins dans le même cadre temporel que la nouvelle infrastructure énergétique, sur une période de 30 à 40 ans – consisterait à promouvoir toutes les technologies qui présentent un avantage par elles-mêmes pour un coût faible ou nul. Il peut s'agir d'une automobile en consommant guère plus de 2 litres aux cent kilomètres, d'une isolation plus efficace des bâtiments, d'investissements à long terme dans des ressources non classiques, telles que l'énergie géothermique, ou d'initiatives visant réellement à dynamiser la photovoltaïque.

L'Europe se situe au premier rang pour les économies d'énergie. Les États-Unis et le Canada se laissent manifestement distancer, mais le véritable problème se trouve ailleurs, en Chine, en Inde et en Indonésie, où se dessine un développement économique de grande ampleur. Or ce développement économique, autant qu'on puisse en juger aujourd'hui, demeurera fondé sur les combustibles fossiles. La difficulté fondamentale, à l'échelle planétaire, consiste à opter pour d'autres sources sans carbone.

TECHNOLOGIE DES MATÉRIAUX

Les matériaux sont au cœur d'une révolution technologique latente. Nous avons toujours été tributaires des limites inhérentes aux matériaux de construction, ceux du calcaire ou du granit pour les structures anciennes, du bois au cours des siècles ou encore des caractéristiques propres aux différents types de béton, sans oublier les alliages à base d'acier, de cuivre et d'aluminium. Les possibilités d'utilisation ont donc été limitées, qu'il s'agisse d'implanter de grandes structures ou d'élaborer de nouveaux produits pour les entreprises commerciales et industrielles ou pour les habitations. De nouvelles connaissances fondamentales nous permettent à présent d'envisager de façon réaliste la conception de matériaux complètement inédits dotés de l'ensemble de caractéristiques de notre choix. Un type de verre thermosensible, photosensible, voire conducteur électrique, est parfaitement envisageable. Sauf s'il s'agit de réconcilier des contraires – humide et sec à la fois, par exemple – toutes les caractéristiques souhaitées peuvent être au minimum mises à l'étude. Une fois obtenues, ces caractéristiques deviennent de nouvelles sources de créativité et d'inspiration techniques.

L'intérêt collectif tend vers une résistance accrue et une durée de vie plus longue, et plaide pour un plus grand recours au recyclage, à la récupération et au reconditionnement pour bon nombre de créations humaines. Les pressions écologiques, le manque de ressources et les moyens techniques contribueront à imposer systématiquement la résistance et les trois autres critères évoqués dans le monde entier.

Les matériaux évoluent par ailleurs vers la miniaturisation et les structures modulaires. Les petits modules utilisent moins de matériaux et d'énergie et sont faciles à remplacer, la réparation et la récupération pouvant par ailleurs être centralisées. La miniaturisation va quant à elle bien au-delà de la conception d'appareils qui tiennent dans la main ou au bout du doigt. Des dispositifs microscopiques plus petits que le diamètre d'un cheveu sont déjà commercialisés. Ils pourront servir de détecteurs, de commandes ou trouver d'innombrables applications dans des machines et dans des êtres vivants (y compris des personnes) comme instruments de mesure et de contrôle. Les micro-machines ouvrent la voie à un monde hypothétique mille fois plus petit que le domaine microscopi-

que. On arrive ainsi au niveau de la molécule et de l'atome. La nature sait agir à ce niveau. Elle est capable de convertir des matières premières en protoplasme qui se transforme ensuite en végétal ou en animal. L'objectif des nanotechnologies, poussé à l'extrême, est de procéder par analogie avec la nature. S'il est difficilement concevable de ramener une évolution qui s'est étendue sur 3 milliards d'années à quelques décennies, nous disposons déjà de moyens techniques permettant de couper, d'usiner et de préparer des sandwiches au niveau nanotechnologique. Ces moyens joueront un rôle toujours plus important dans le monde aménagé par l'être humain durant les années à venir.

La nature produit des matériaux beaucoup plus complexes et, à bien des égards, beaucoup plus efficaces que tout ce que nous puissions produire techniquement. Les plumes assurent chaleur et imperméabilité et constituent les structures indispensables pour le vol, du fait des différents modes de formation naturelle de ce matériau chez les oiseaux. Il arrive que la sensibilité des végétaux et des animaux dépasse nos possibilités actuelles. Certains animaux emploient des adhésifs avec lesquels les procédés industriels ne peuvent rivaliser. L'élaboration de matériaux biomimétiques, imitant des produits naturels ou analogues à ceux-ci, offre une autre piste à la révolution des matériaux.

TECHNOLOGIES DU CERVEAU

Les années 90 sont marquées par les travaux sur le cerveau aux États-Unis. Les connaissances acquises sur la structure, la fonction, l'organisation et l'activité du cerveau sont plus nombreuses depuis le début de la décennie que durant la centaine d'années de recherches scientifiques qui a précédé. Alors que les spécialistes s'efforcent encore de cartographier le cerveau et d'en percer les mystères, il serait absurde de chercher à évaluer le chemin parcouru, mais on peut dire que chaque jour apporte de nouveaux résultats. Il est désormais évident que de nombreuses fonctions intellectuelles ou mentales sont localisées dans des zones précises du *cerveau* et ont une cause essentiellement biochimique. Au cours de l'étude de ces processus, il y a des questions évidentes – Quelle est l'explication chimique? Lorsqu'un problème survient, quelle en est la cause? S'agit-il d'une cause endogène? Faut-il la rechercher dans un facteur extérieur transmis par l'alimentation, la peau ou les voies respiratoires? Dans l'affirmative, comment peut-on intervenir pour neutraliser les effets nocifs ou favoriser les effets bénéfiques? – Les technologies du cerveau apporteront des réponses à ces grandes questions durant les décennies à venir. En associant les connaissances disponibles sur l'ensemble du corps et les données les plus récentes sur le cerveau, on pourrait entrevoir de façon réaliste non pas simplement une médecine corrective, mais une situation dans laquelle le corps et l'esprit forment le champ d'intervention unique d'une médecine de nature radicalement différente. Aucun aspect de l'être humain – physique, mental, intellectuel, social, physiologique ou psycholo-

gique – n'échappera aux manipulations et aux changements, que la technologie rendra possibles et réalisables.

Prenons l'exemple de la kleptomanie, l'envie irrésistible de voler même ce que l'on serait en mesure d'acheter; jusqu'à présent, nous avons considéré qu'il s'agissait surtout d'un problème moral appelant une aide psychologique, une sanction ou un changement de comportement. Or on vient de localiser le centre de la kleptomanie dans le cerveau. Celle-ci provient incontestablement d'un dysfonctionnement biochimique. La détermination de ce centre lié à une altération modifie notre point de vue sur ce qui apparaissait précédemment comme un trait de personnalité. Les nouvelles notions offrent des perspectives d'intervention directe pour remédier à cette pathologie. La moindre caractéristique, qu'il s'agisse de la personnalité, des aptitudes cognitives ou de l'affectivité, sera en bout de course associée à un processus biochimique lui-même, pour une large part, génétiquement déterminé, et pourra par conséquent se prêter à une intervention. L'intervention peut être de type pharmaceutique, génétique, acoustique ou visuelle, ou prendre d'autres formes qui restent à développer. Le succès actuel du Prozac, médicament conçu pour lutter contre la dépression, marque une étape importante dans le domaine des technologies du cerveau. C'est l'exemple le plus proche jusqu'à présent du soma d'Aldous Huxley, du médicament de « l'humeur ». En quelques années, c'est devenu l'un des produits pharmaceutiques les plus vendus aux États-Unis.

Il existe une demande en faveur de la modification et de l'amélioration de l'état mental, et les technologies correspondantes n'en sont qu'à leur début. Dans dix ans, la schizophrénie et la psychose appartiendront au passé dans les pays développés du premier groupe, car les mécanismes physiologiques, génétiques et biochimiques fondamentaux auront été élucidés si bien qu'on pourra concevoir des remèdes adaptés et, surtout, des stratégies de prévention. Les technologies du cerveau iront bien au-delà de la maladie, apportant un soulagement aux personnes irritables, dépourvues de sens de l'humour ou trop dominées par leurs sentiments. Et les remèdes ne manqueront pas de débouchés. Viendront ensuite la possibilité et les moyens concrets d'améliorer les facultés cognitives, permettant aux gens de réfléchir plus lucidement, de mieux comprendre l'arithmétique, d'avoir une meilleure mémoire des visages, d'être plus généreux et plus affectueux, ou encore d'être moins orgueilleux ou moins paresseux.

TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

Les technologies de l'information ont déjà provoqué des changements profonds de société dans le monde, mais les transformations résultant des dernières innovations sont encore à peine perceptibles. Les fibres optiques réduiront les coûts dans des proportions telles que les télécommunications deviendront quasi-

ment gratuites. Pour les entreprises comme pour les particuliers, les coûts des communications n'entreront plus en ligne de compte. Les communications sans fil présenteront un intérêt par elles-mêmes et serviront en outre de relais avec le réseau de fibres optiques. Les communications bon marché continueront à modifier radicalement la conduite des affaires, le choix du lieu de travail et les méthodes de travail. Elles déboucheront sur le commerce électronique et sur de nouvelles formes de relations tout en faisant apparaître de nouveaux problèmes sociaux, touchant principalement l'équité et la vie privée. Dans une large mesure, la solution à ces problèmes résidera dans la manière d'étudier, de concevoir et de réglementer les réseaux et les relations complexes en jeu. Étant donné la portée économique croissante des technologies liées à l'information, il est naturel et inévitable que les pouvoirs publics en tirent des recettes sous une forme quelconque. Nous imaginons un système d'imposition visant le nombre de bits et d'octets et non le type de communication. A mesure que les coûts des télécommunications baissent, les possibilités technologiques importantes seront moins à rechercher dans le réseau proprement dit que dans les utilisations finales.

Parmi les tendances des technologies de l'information, on peut citer la croissance ininterrompue de la capacité et de la rapidité des ordinateurs, dont la taille diminue parallèlement. Ces trois facteurs conjugués entraînent des conséquences notables : chaque fois que la capacité augmente d'un ou deux ordres de grandeurs, nous sommes capables de traiter un nouveau problème social en temps réel. Face à une situation difficile, la démarche classique consiste à examiner le problème, à recueillir des données, à dégager des conclusions, à proposer des changements et à mettre ces changements en œuvre, puis à recommencer. Le cycle complet dure un an. La gestion en temps réel offre la perspective exaltante d'envisager chaque système comme une expérimentation ouverte permanente. La prouesse technique n'est pas le seul enjeu. Compte tenu de la complexité croissante du monde, les instances supérieures de décision, dans le secteur privé comme dans le secteur public, sont incapables d'assurer avec discernement la gestion des systèmes complexes. Toutefois, dès lors qu'il faut gérer, l'expérimentation ouverte permanente offre une solution plus saine qu'un processus de décision rigide qui laisse souvent à désirer.

Le moindre dispositif deviendra intelligent dès lors qu'il sera muni de ses propres capteurs, microprocesseurs et actionneurs, ou sera intrinsèquement intelligent, comme le sont déjà certaines lunettes qui varient en fonction de la lumière. Grâce à cette intelligence apportée par les technologies de l'information, il pourra accomplir trois fonctions : évaluer ses performances internes, évaluer ses performances externes et, si le bilan est défavorable dans l'un ou l'autre cas, procéder à des réparations ou demander de l'aide. L'intelligence omniprésente suppose, en toute logique, qu'un tel dispositif s'intègre à des systèmes conçus pour une gestion plus efficace, souvent à distance. L'évaluation, la gestion et le

contrôle de systèmes – bâtiment public ou ouvrage de distribution d'eau, par exemple – situés à quelques kilomètres ou milliers de kilomètres seront monnaie courante.

Les ingénieurs qui conçoivent des emballages de produits alimentaires coopéreront avec ceux qui élaborent des appareils ménagers pour faire en sorte que ces emballages soient aussi intelligents que les appareils et coordonnés avec eux. La synergie résultante devrait ramener la durée de préparation des repas à quelques minutes, offrir la possibilité de programmer le système selon les préférences des différents convives et réduire considérablement le temps de nettoyage et d'entretien.

L'intelligence se manifestera de bien d'autres manières. Elle a été abondamment évoquée dans le cas des appartements et des bâtiments, pour la détection des courants d'air, des fuites d'eau, des cambriolages, et d'innombrables phénomènes. Toutefois, les structures pourront devenir plus intelligentes encore. La synthèse des progrès accomplis dans le domaine des matériaux et dans celui des technologies de l'information donne lieu à un nouveau paradigme pour la construction. Les bâtiments du passé étaient conçus en fonction des forces de compression et de tension. On pourrait voir, dans un proche futur, des bâtiments ultra-légers dont la structure porteuse, l'armature, sera faite de composites recyclables hautement performants. La structure, au moment de la mise en place, sera renforcée par des câbles d'acier reliés à des moteurs. Des capteurs externes et internes mesureront les contraintes s'exerçant sur le bâtiment et moduleront la tension des câbles commandée par les moteurs. On s'oriente ainsi vers un modèle de structure dynamique et adaptable. En poursuivant le raisonnement, il va de soi qu'après les bâtiments dynamiques, la conception de bâtiments démontables et transportables, pouvant être agrandis ou réduits, y compris en hauteur, selon les besoins ne devrait pas poser de problème. Il faut donc s'interroger sur le devenir de chaque élément, dispositif, système ou composante qui nous entoure lorsque les trois fonctions qui définissent ci-dessus l'intelligence pourront être accomplies.

Diverses formes d'imagerie, depuis le code à barres jusqu'à la réalité virtuelle, prennent rapidement une place comparable à celle des télécommunications et des moyens informatiques. La réalité virtuelle, associée ou non à d'autres formes d'intelligence artificielle, aura certainement des prolongements technologiques spectaculaires, en particulier dans le domaine de l'enseignement et de la formation. Le système permettra de parvenir aux trois objectifs de l'enseignement général qui n'ont pu être réalisés auparavant, d'articuler ce que nous voulons inculquer avec ce qui est acquis et de faire le lien avec les stratégies d'apprentissage préférées des élèves – stimulations visuelles, acoustiques, kinesthésiques, etc. Le système s'améliorera sans cesse pour faciliter l'apprentissage. Des tâches s'étendant normalement sur des années seront réduites à des

semaines, ou tout au plus à quelques mois, et des acquisitions étalées sur plusieurs mois pourront être faites en deux semaines au maximum. Ce type d'enseignement aura pour la première fois un taux de réussite de 100 pour cent. Presque tous les élèves ou étudiants, dans toutes les disciplines et à tous les niveaux, sont satisfaits s'ils obtiennent des notes équivalant à 85, 90 ou 98 pour cent aux examens, ce qui signifie à l'inverse que 2, 10 ou 15 pour cent des matériaux n'ont pas été assimilés. Les systèmes axés sur la réalité virtuelle et l'intelligence artificielle permettront et favoriseront une assimilation à 100 pour cent qui modifiera profondément la vie et la carrière de ceux qui sont formés ainsi.

Le cyberspace permet désormais de concevoir de multiples projets. L'état de l'art progresse rapidement; à terme, tout depuis l'ouvre-boîtes jusqu'à l'usine chimique sera mis à l'essai, évalué et modifié dans le cyberspace avant de prendre physiquement et matériellement forme. Les applications ne se limiteront pas à la mécanique, mais s'étendront à d'autres domaines tels que la chimie, voire la conception de molécules, non sans favoriser l'apparition de spécialistes en génie moléculaire.

Le traitement de l'image par ordinateur sera dynamique, en trois dimensions et multimédia. À terme, les images produites par ordinateur, outre qu'elles influenceront qualitativement sur notre réflexion, modifieront notre manière de penser. Elles devraient alimenter des procédés mentaux graphique, multidimensionnelle et dynamique.

Le traitement diversifié des informations pourra susciter de nouvelles applications. Supposons par exemple qu'une intervention du Président ou du Premier ministre soit annoncée dans une démocratie. Les ingénieurs concevront un échantillon de 10 000 foyers. Bien que 1 200 suffisent, mieux vaut prévoir un réseau plus étendu pour gagner la confiance du public. Le moment venu, les 10 000 personnes sollicitées seront invitées à faire savoir selon une échelle de 1 à 5 si elles adhèrent ou non aux propos qui sont tenus. Au-dessus de l'épaule gauche de l'orateur apparaîtront des histogrammes : 1 pourra signifier « menteur ! » et 5 « entièrement d'accord ! ». Un tel procédé serait un véritable explosif politique, qui pourrait faire voler en éclats l'inanité du discours et inciter à réfléchir davantage au contenu. Il est appelé à s'étendre à toutes les activités du secteur privé et public, pour toutes sortes de sondages et de campagnes.

Les applications résulteront de la convergence des technologies liées à l'information et à d'autres domaines. Les technologies de l'information permettront d'améliorer la collecte de données, ainsi que les tâches d'analyse, de planification, de vérification et d'évaluation entrant dans la macro-ingénierie. La macro-ingénierie, ou génie à l'échelle planétaire, pourrait devenir l'un des aspects de l'expérimentation ouverte permanente. Il pourrait s'agir d'inverser les cours d'eau en Sibérie pour arroser les plaines d'Asie centrale, de remorquer des

icebergs vers la côte ouest de l'Amérique du Sud ou de prévenir un troisième grand tremblement de terre à San Francisco. Les séismes résultent de tensions accumulées pendant des décennies du fait de la subduction ou du chevauchement des plaques tectoniques. Quand la tension est trop forte, elle se traduit par des secousses pouvant atteindre 8 à 8.3 sur l'échelle de Richter. Les séismes de magnitude 3 sont pratiquement indétectables. Nous devrions être capables d'obtenir des secousses continues ne dépassant pas 3 sur l'échelle de Richter le long des failles pour éviter qu'un cycle d'accumulation de 50 ou 75 ans ne conduise à des séismes de magnitude 8.

Parallèlement à l'apparition d'autoroutes intelligentes, grâce à des systèmes capables tôt ou tard de suivre électroniquement une voiture depuis le contact jusqu'au lieu de destination, les technologies de l'information seront appliquées à la gestion de la circulation et aux rues, permettant ainsi de déterminer les caractéristiques de la circulation sur une distance donnée avant les croisements et de synchroniser les feux de signalisation pour optimiser l'utilisation du réseau routier et, surtout, le temps des usagers.

Les applications universelles des technologies de l'information auront lieu en quatre étapes; on peut considérer que le même cheminement s'applique à tout ce qui est généralement appelé information.

La première étape concerne les données. La collecte et le traitement ne posent pas de problème. Ces données doivent ensuite être converties en information. Une grande partie du travail actuellement mené par le secteur public et privé vise à trouver les moyens d'effectuer cette conversion et d'utiliser la nouvelle information plus efficacement. La troisième étape, déjà amorcée dans certains domaines, consiste à convertir l'information en savoir. La quatrième et dernière étape, où tout reste à faire, ou presque, est celle de la sagesse.

La protection de l'environnement influera sur la quasi-totalité des innovations car le monde entier est de plus en plus sensibilisé au fait que les nouvelles technologies ont souvent entraîné des conséquences préjudiciables inadmissibles, dont la plupart auraient pu être évitées ou grandement atténuées. Les enseignements du passé serviront un jour de point de départ pour la planification. Les effets prévisibles sur l'environnement, à échéance brève ou lointaine, à plus ou moins grande échelle, seront systématiquement intégrés à la planification. L'écologie sera au cœur de la protection de l'environnement.

L'écologie elle-même s'éloigne rapidement de l'image d'une discipline abstraite sous-tendue par des principes relativement généraux, aux applications pratiques limitées à des recherches à court terme sur de minuscules parcelles. Des bases de données systématiques sur tous les aspects des écosystèmes dignes d'intérêt seront mises à jour en permanence. Des initiatives seront prises

pour préserver les écosystèmes ou les reconstituer, voire pour en créer de nouveaux.

Les habitants des pays développés étant appelés à passer un pourcentage croissant de leur temps dans des locaux quelconques, le choix des matériaux, de la conception, de la structure et du taux d'occupation dépendra des facteurs suivants : qualité de l'air intérieur, approvisionnement en eau et niveau acoustique.

Le problème essentiel des technologies en expansion tient à l'absence de vision constructive. Le désengagement observé durant ce siècle par rapport à l'idée de progrès fait oublier que la maîtrise des événements dépend des êtres humains, et d'eux seuls, que la fatalité n'existe pas et que la prise en mains de notre destin suppose un travail de longue haleine lucide et délibéré.

En liaison avec cet objectif de nature politique, il y a une réelle opportunité d'ouvrir au public un large débat sur ce que les technologies permettent de réaliser pour le bien de chacun et de la société partout dans le monde.

Tableau 1. **Réalisations technologiques à prévoir pour les prochaines décennies**

-
- Ingénierie planétaire – enfouissement de déchets dans le manteau terrestre.
 - Remorquage d'icebergs à des fins d'irrigation des zones arides.
 - Exploitation du fond de l'océan.
 - Logistique intégrée, intégration multimodale complète – aucune manutention des marchandises en transit.
 - Systèmes intelligents routes/véhicules.
 - Réseaux de distribution d'eau intégrés à l'échelle continentale.
 - Voitures particulières consommant 2 litres aux cent kilomètres.
 - Fabrication axée sur la résistance, la récupération, le reconditionnement et le recyclage.
 - Aquaculture marine.
 - Centrales nucléaires à sûreté intrinsèque.
 - Prothèses, implants et aides pour l'être humain et l'animal.
 - Technologies du cerveau.
 - Production végétale et animale automatisée.
 - Robots d'extérieur.
 - Diagnostics génétiques, thérapies géniques et outils d'amélioration génétique.
 - Structures intelligentes.
 - Structures dynamiques.
 - Dispositifs, pièces et systèmes intelligents.
 - Modification du climat.
 - Prévention des séismes.
 - Personnalisation des produits.
 - Conception de produits et de systèmes systématiquement fondée sur des simulations.
 - Cuisines automatisées.
 - Prise en compte systématique de l'ergonomie dans la conception.
 - Structures souterraines.
 - Nano-produits et nano-systèmes.
 - Aides robotiques pour l'être humain.
 - Station spatiale.
 - Projets de terraformation.
-

RAPIDITÉ, CONNEXION, INTELLIGENCE : TOUJOURS PLUS*

par

Hervé Gallaire
Vice-président
Xerox Corporation

1. INTRODUCTION

S'il est si difficile d'anticiper l'évolution technologique, ce n'est pas seulement à cause du manque de connaissances sur la technologie elle-même, qui au demeurant pose un problème énorme étant donné la vitesse à laquelle évoluent les technologies de l'information, mais plutôt parce que ce qui est possible ne se réalise pas nécessairement et ce qui se réalise effectivement a pu paraître difficilement possible. La société choisira, parmi toutes les évolutions possibles, celle qui deviendra réalité, en décidant où investir, ce qu'il faut accepter et adopter ou, au contraire, ce qu'il faut rejeter. Dans certains cas, c'est le manque d'imagination qui limite la vision : les débuts de l'ordinateur en offrent une parfaite illustration. Initialement, personne ne pouvait imaginer qu'un très grand nombre d'ordinateurs serait nécessaire, car personne ne pouvait anticiper quel usage en serait fait. Parfois, c'est parce que l'innovation technologique ne donne pas les résultats escomptés que les prévisions se trouvent démenties : l'utilisation du langage parlé pour s'adresser à des machines en est un exemple type. D'un autre côté, alors qu'il est aujourd'hui possible de fournir des services vidéo à la demande, le niveau d'adoption de la technologie n'est pas encore suffisant pour permettre une prédiction. Parallèlement, le fameux « bureau sans papier » reste un mythe même si l'on dispose aujourd'hui de tous les ingrédients nécessaires pour qu'il devienne réalité. Enfin, même les experts qui maîtrisent parfaitement les réalités techniques peuvent se tromper. Bob Metcalfe, qui, en 1973, a

* Eric Peters a directement contribué au chapitre portant sur les MEMS et Dan Holtshouse à celui sur l'économie du savoir. Sophie Vandebroek a fourni d'innombrables références pour les parties relatives à la micro-électronique et aux MEMS. J.S. Brown, M. Lamming, T. Moran, M. Weiser et A. Zaenen ont apporté, avec de nombreux autres collègues, des références et des éléments de discussion.

inventé les réseaux locaux d'entreprise s'est fourvoyé en 1995 en prédisant l'effondrement d'Internet pour 1996 : il n'avait en effet pas imaginé que l'infrastructure Internet serait remplacée aussi vite pour répondre aux nouveaux besoins.

Cet article évoque l'avenir des technologies de l'information. Aucune technologie ne s'est développée aussi vite que les TI, tant du point de vue technique que commercial. Même si l'on doit s'attendre à un essoufflement de cette croissance, celle-ci devrait rester suffisante pour entraîner, dans nos vies, des bouleversements aujourd'hui imprévisibles. C'est avec cette conviction en tête que les projections suivantes ont été élaborées. Le mot *rapidité* dans le titre renvoie au fait que l'évolution générale des semi-conducteurs donnera naissance à des dispositifs bien plus rapides que ceux que nous connaissons aujourd'hui. Nous nous intéresserons tout d'abord aux semi-conducteurs. Nous examinerons en détail un type particulier de microsystèmes, les systèmes micro-électromécaniques (MEMS), qui connaîtront un essor considérable et influenceront fortement sur notre environnement.

Connectivité et *intelligence* sont deux caractéristiques complémentaires des technologies de l'information. Les systèmes de TI offriront de plus en plus de possibilités de connexion et seront capables d'assurer des fonctions bien plus complexes. L'article passe en revue les dispositifs de télécommunications et de mise en réseaux qui se profilent déjà à l'horizon ; les nouveaux moyens de communication informatique et les agents qui feront apparaître les systèmes plus intelligents dans leurs rapports avec les humains ; et pour finir, les évolutions qu'entraîneront ces changements techniques au niveau des entreprises. On trouvera chez Dertouzos (1997) et Negroponte (1995) des points de vue intéressants sur cette évolution. On pourra également consulter Ichbiah (1996).

2. SEMI-CONDUCTEURS ET INDUSTRIES ÉLECTRONIQUES

Pour décrire la trajectoire de l'industrie des semi-conducteurs et de l'informatique, Gordon Moore a dit : « si l'industrie automobile s'était développée au même rythme (que l'industrie des semi-conducteurs), les voitures rouleraient à un million de km/heure en consommant à peine plus d'un réservoir d'essence et il reviendrait moins cher de mettre sa voiture à la casse que de payer son ticket de parking ». De fait, au cours des trente dernières années, l'industrie des semi-conducteurs a réussi à multiplier la capacité des puces mémoire par quatre tous les trois ans, en réduisant la largeur d'un « trait » à l'intérieur des transistors, et la puissance d'une puce mémoire, mesurée en instructions par seconde (pour un coût donné) a doublé chaque année. L'industrie des semi-conducteurs a enregistré une croissance annuelle de 20 pour cent pendant près de trente ans. Le nombre de transistors expédiés en 1997 est saisissant : dix puissance dix-sept. Ce

chiffre continuera d'augmenter au rythme de 80 pour cent par an car la demande est appelée à progresser. Les applications exigeront toujours plus de puissance, notamment dans le domaine des applications interactives : graphiques, voix, langage. La reconnaissance du langage réel (voix), qui exige 1 000 MIPS à faible coût, n'est pas encore possible aujourd'hui. A mesure que nous parvenons à réduire les dispositifs, ils deviennent plus rapides et consomment moins d'énergie ; actuellement la fiabilité d'une puce mémoire DRAM de 64 Megabits est la même que celle d'un transistor il y a trente ans. Ce qui est véritablement un exploit ! En 1959, un transistor était vendu 6 dollars, prix actuel d'une DRAM de 16 Megabit. Cette évolution concerne les puces mémoire, les puces microprocesseurs ainsi que les puces de communication. Le premier ordinateur, l'ENIAC occupait 70 mètres cubes ; depuis, la miniaturisation a divisé la taille des ordinateurs tous les dix ans. Le facteur de mérite des ordinateurs (puissance de calcul/dimension x coût) a été multiplié par mille tous les 10 ans. La vitesse des processeurs à architecture classique (CISC) est mille fois plus importante qu'il y a 25 ans. Les nouvelles architectures, RISC, par exemple, sont très performantes, coûtent moins cher et consomment moins. Elles pénètrent et créent des milliers de nouveaux marchés et applications. L'intégration hybride est un autre axe de développement, l'objectif étant non plus d'accroître la capacité de stockage ou la puissance de calcul, mais d'intégrer dans une puce un grand nombre de fonctions différentes. Cela devrait également ouvrir de nouveaux marchés dans le domaine de l'électronique grand public, de l'appareil de photo au téléphone numériques.

A chaque génération de puces, la largeur de trait est réduite d'un facteur de 0.7 environ, ce qui signifie que la surface d'une puce est deux fois plus petite que celle des puces de la précédente génération. Cela signifie en outre que la largeur de ligne minimale diminue de moitié environ tous les six ans. On atteindra vers 2010, une largeur de 0.07 micron. Des recherches sont en cours dans plusieurs régions du globe pour parvenir à 0.03 micron ! Parallèlement, l'épaisseur des dispositifs diminue elle aussi. On peut obtenir une épaisseur d'environ 10 couches moléculaires tout en assurant une bonne intégrité. Et de nombreuses couches peuvent être empilées pour augmenter la capacité de la puce. Cependant, un autre problème se pose, celui de la consommation d'énergie. A mesure que l'on empile des transistors sur une puce, qui peut offrir une capacité moindre mais fonctionne à une fréquence plus élevée, les besoins d'énergie augmentent sensiblement. La réduction du voltage n'est donc plus une solution. L'annonce très récente d'IBM concernant l'utilisation du cuivre pour les interconnexions sur la puce et pour la couche métallique supérieure en remplacement de l'aluminium utilisé actuellement donne des raisons d'être optimiste, mais ce n'est qu'un début de solution. Il existe un autre facteur limitatif d'ordre purement financier : les besoins de capitaux d'une usine capable de produire cette technologie sont énormes. Actuellement, une usine produisant 5 000 tranches par semaine en

utilisant une technologie 0.25 micron coûte plus d'un milliard de dollars. Sa durée de vie est estimée à 5 ans, ce qui donne une dépréciation de 4 millions par semaine ! Une telle usine coûtera 2 milliards dans le cas d'une technologie 0.18 micron.

Pendant combien de temps l'industrie pourra-t-elle absorber ces coûts ? Il faudra, pour continuer à réduire la largeur de trait, utiliser la technologie des rayons-X. Les limites naturelles et fondamentales seront atteintes lorsque l'épaisseur des couches se situera au niveau moléculaire. Le temps écoulé entre le développement d'une technologie et la production de masse est de plus en plus long à mesure que les performances technologiques s'améliorent. Il faudra 10 ans pour produire la puce mémoire de 1 Gb. Par conséquent, il sera indispensable de diversifier l'utilisation d'une technologie pour accroître sa durée de vie qui, autrement, ira décroissant et pour amortir les coûts énormes de la R-D technologique. Entre temps, le travail d'extrapolation à partir de l'expérience peut continuer. Dans un certain sens, on ne peut guère se tromper en raisonnant à partir des données du passé.

De toute évidence, l'industrie des semi-conducteurs n'est pas une industrie monolithique. Ce que l'on vient de décrire est applicable à l'une de ses branches en particulier, notamment à celle des semi-conducteurs utilisés dans les systèmes informatiques. Toutefois, l'industrie des semi-conducteurs bénéficie de l'évolution générale et des progrès de l'industrie électronique tout en influant sur ce secteur à travers ses procédés industriels.

L'évolution de l'industrie électronique a, dans certains cas, des retombées très importantes pour beaucoup d'entre nous. Citons l'exemple du téléphone cellulaire* dont la taille sera bientôt compatible avec celle d'une montre-bracelet; vers 2004, il devrait peser moins de 30 grammes, pile comprise. (En 1984, il pesait environ un kilo.) Et nul doute que la capacité de mémoire, magnétique ou optique, continuera d'augmenter aussi rapidement que par le passé. En 2004, les mémoires de grande capacité ne coûteront plus que 0.3 cent par Mega-octet, contre 0.25 cent en 1996; la précision de positionnement des têtes atteindra 0.05 micron, contre 0.2 micron aujourd'hui. Pour ce qui est de la mémoire optique, le DVD (Digital Versatile Disk) remplacera le CD (Compact Disk) avant même que nous n'ayons vraiment eu l'occasion d'utiliser le CD pour nos applications informatiques; telle est la vitesse du progrès. En 2004, la capacité de mémoire des DVD sera 15 fois supérieure à celle des CD actuels et la vitesse de lecture sera également de 5 à 10 fois supérieure. Ce qui succédera au DVD reste au demeurant encore bien imprécis. Pour réellement comprendre l'impact sur la façon dont les documents et les livres seront mémorisés, il faut savoir ceci : une

* Source : Herschel Shosteck Associates, reproduit dans National Electronics Manufacturing Initiative (1996).

nouvelle technologie de magnétorésistance, qui sera bientôt commercialisée, devrait permettre de stocker jusqu'à 300 gigaoctets sur une carte PCMCIA (approximativement 8.5 x 5.5 x 1 cm). Une technologie pouvant aller jusqu'à 10 téraoctets a été expérimentée : bien que dépassant largement nos besoins elle aurait une incidence considérable sur les bibliothèques et le secteur de l'édition. Pour donner une idée, un roman occupe environ un Mega-octet.

Les technologies ne connaissent pas toutes une progression aussi harmonieuse. La technologie d'affichage, par exemple, met en jeu une multitude de techniques concurrentes. Les conditions d'utilisation de l'écran jouent un rôle très important, et la recherche doit tenir compte des différents environnements en même temps : dispositifs portatifs, portables, postes de travail, écrans de très grandes dimensions et afficheurs spéciaux; tous ont des besoins différents en termes d'alimentation, de contrastes, de résolution, de luminosité, d'angle de vue, etc. Il est certain, toutefois, que des écrans plats de haute résolution, en couleurs, et de grandes dimensions seront disponibles d'ici dix ans et qu'ils remplaceront la plupart des terminaux à écran cathodique que nous connaissons actuellement. Ces écrans, qui deviendront omniprésents, remplaceront par exemple les plaques radiographiques actuelles et joueront un rôle clé en médecine.

Le dernier type d'affichage que l'on peut mentionner ici n'est en rien une extrapolation des systèmes d'affichage actuels. On pourrait l'appeler, pour simplifier, papier électrique. Plusieurs technologies devraient permettre, vers 2005-2010, l'avènement d'une sorte de papier ré-utilisable; il pourra être écrit et effacé autant de fois que nécessaire, sera facilement transportable et pliable jusqu'à un certain point. Il pourra servir à faire des livres ou des dossiers dans lesquels il sera possible de naviguer et de travailler sur plusieurs pages simultanément. Depuis plus de dix ans des technologies afférentes ont été étudiées, et les performances ont été considérablement améliorées.

Quelques chiffres peuvent utilement conclure ce chapitre. L'industrie des semi-conducteurs continue à se développer au rythme de 20 pour cent par an, à l'échelle mondiale, et pèsera 250 milliards de dollars en l'an 2000, contre 14 en 1982. Ces chiffres cachent des baisses et des hausses, la surproduction n'est pas rare, notamment en ce qui concerne les puces mémoire; mais l'histoire semble toujours se répéter en dépit de ces baisses et des importantes fluctuations monétaires.

Et il n'y a aucune raison de penser que cette évolution ne se poursuivra pas encore pendant plusieurs années. L'ennui, c'est que nous ne savons pas exactement combien. A partir de quand la technologie cessera-t-elle d'évoluer selon la loi de Moore*? Gordon Moore parle de 2010-2015. D'autres situent également

* Selon laquelle la capacité des microprocesseurs double tous les dix-huit mois.

cette date autour de 2010. Mais ce n'est pas une question de tout ou rien. Certains segments continueront de se développer au même rythme, alors que le progrès général ralentira. Le coût des puces continuera d'augmenter mais le rapport coût/avantages par fonction continuera de diminuer. On prévoit pour 2010, des DRAM de 64 Gbit, dont la largeur de trait sera de 0.07 micron et le coût, de 0.2 cent (0.002 dollar) par megabit, contre des DRAM de 256 Mbit en 98, d'un coût de 7 cents/megabit et d'une largeur de trait de 0.18 micron. Les puces microprocesseurs contiendront le chiffre stupéfiant de 60 M de transistors par centimètre carré et chaque transistor coûtera 0.02 millicent. La fréquence des puces, qui est actuellement de 400 MHz, atteindra 1 100 MHz en 2010. La capacité de stockage des puces DRAM sera multipliée par quatre et celle des puces microprocesseur seulement par trois. La charge nécessaire tombera de 3.3 V actuellement, à seulement 1 V. Il s'agit là, certes, d'objectifs très ambitieux. Toutefois, l'industrie est extraordinairement bien organisée et mène des recherches dans tous les domaines nécessaires pour atteindre ces objectifs. Et elle y parviendra.

Nous ne nous attarderons pas, dans la suite de ce rapport, sur les conséquences du développement de la technologie informatique dans les secteurs où les anciennes générations de systèmes informatiques deviennent rentables (et pratiquement standard). Les ordinateurs embarqués dans les véhicules ne font pas partie des microprocesseurs de pointe que nous venons d'évoquer à travers les chiffres mentionnés. Selon les cas, ils précèdent d'une, deux, voire trois générations les techniques de pointe actuelles. Ils offrent à un coût raisonnable une fonction commode qui peut devenir indispensable en remplaçant une technologie ou en en créant une autre. Cet type d'impact est néanmoins extrêmement important pour les industries des semi-conducteurs et de l'électronique : il leur permet en effet d'amortir leurs innovations sur des périodes beaucoup plus longues et de donner du travail à plus d'entreprises et de personnes. La maison, la voiture ou toute autre réalisation « intelligente » bénéficieront de ce travail d'innovation.

Nos rapports avec les ordinateurs connaîtront cependant un changement radical. Deux types d'évolution émergent de la révolution micro-électronique. Mark Weiser a parlé d'informatique omniprésente pour décrire la première. Nous évoluons aujourd'hui dans un monde d'informatique distribuée. L'informatique omniprésente deviendra réalité lorsque tous les objets renfermeront des ordinateurs et que ces ordinateurs seront connectés les uns aux autres, c'est à dire qu'on pourra de sa voiture, préchauffer son four ou allumer le chauffage de sa maison. L'informatique omniprésente permettra par exemple de connaître l'état de la circulation avant d'aller faire ses courses, de savoir précisément où trouver une place de parking, etc. Internet jouera un rôle clé dans cette évolution, mais des progrès considérables restent encore à faire, notamment dans le domaine

des communications sans fil, de la consommation d'énergie et des piles, et des interfaces utilisateur.

L'informatique omniprésente sera possible en 2005-2010 car les infrastructures nécessaires seront en place, mais son développement sera surtout poussé par une seconde révolution : ce que Weiser et J.S. Brown ont appelé «technologie discrète». Si les ordinateurs sont partout, il est indispensables qu'ils restent périphériques et qu'ils n'occupent pas une place centrale dans notre activité comme les ordinateurs personnels actuels qui demandent une interaction directe et volontaire. Weiser et Brown font à ce propos l'analogie avec la voiture, dans laquelle le bruit du moteur est périphérique, ce qui ne nous empêche pas d'être sensibles à tout bruit *anormal* et d'y réagir aussitôt. La présentation d'un journal comporte de très nombreuses informations périphériques. Tout ce qui nous entoure nous donne des indices sur ce qui est important et ce qui est périphérique. L'ordinateur en mode interactif a encore bien du chemin à faire. L'interaction en 3-D offre une interface utilisateur qui marque un pas en avant, mais un pas seulement; la technologie 2-D avec ses fenêtres fermées et ouvertes précède cette technologie 3-D et ne donne pas assez d'informations sur la périphérie pour entrer dans la catégorie des technologies discrètes. En effet, une fonction périphérique suppose qu'en cas de besoin, on peut la contrôler et agir sur elle. L'évolution d'Internet fournit une autre illustration de ces technologies discrètes. Alors qu'aujourd'hui Internet connecte un ordinateur à un autre et une personne à une autre, l'évolution d'Internet vers le Mbone (Multicast backBone – dorsale multidestinataire) permet des flux de trafic entre de multiples personnes et permet le flux d'activités qui constitue le «voisinage» d'un utilisateur. Qu'est-ce qui remplacera le Web sur Internet pour que les perspectives de la diffusion multidestinataire se concrétisent et cette notion de périphérie devienne une réalité?

Cela ne fait aucun doute, sous l'effet de l'extraordinaire succès des industries des semi-conducteurs et de l'électronique, notre environnement connaîtra une formidable évolution. En résumé, les performances des semi-conducteurs continuent de suivre une croissance exponentielle. Cette évolution affectera encore plus profondément nos vies au cours des prochaines années, la baisse des coûts se conjuguant au développement du réseau pour bouleverser nos environnements.

3. LES SYSTÈMES MICRO-ÉLECTROMÉCANIQUES (MEMS)

La révolution des semi-conducteurs a consisté à rendre possible le transfert d'une information d'un endroit à l'autre de façon plus rapide, plus fiable et moins coûteuse d'année en année. Une révolution du même type, la révolution micro-électromécanique est en train de se faire. Les systèmes micro-électromécaniques

permettent de transférer des informations non seulement électroniques mais aussi mécaniques, chimiques ou biologiques. Cette révolution repose sur deux types de systèmes : des actionneurs et des capteurs. Les capteurs permettent de convertir une forme d'énergie en une autre. Les actionneurs permettent aux capteurs d'agir les uns sur les autres. Les MEMS utilisent des technologies d'intégration à très grande échelle (VLSI) pour créer des composants structurels plutôt que des éléments de transistors, de type portes ou contacts métalliques. Ces composants exigent généralement un traitement ou un assemblage ultérieur avant de pouvoir être utilisés. [Voir Petersen (1982) pour une description détaillée du secteur des micromachines.]

Les MEMS aujourd'hui

Actuellement, les composants/produits micro-électromécaniques dont la commercialisation donne de bons résultats se trouvent principalement :

1. dans l'industrie médicale (capteurs de pression artérielle jetables sur silicium produits par dizaines de milliers/ans) ;
2. dans l'industrie automobile, notamment les accéléromètres micro-usinés des ballons de sécurité dont la production atteint des dizaines de millions par an, des capteurs chimiques pour les contrôles antipollution, les capteurs de pression à l'admission ;
3. les produits de consommation comme les tête d'impression à jet d'encre, les écrans de projection et l'instrumentation scientifique pour les systèmes d'analyse chimique.

Dans les laboratoires universitaires et industriels, toutefois, il est étonnant de voir combien de fonctionnalités du monde macro ont trouvé leur équivalent dans le monde micro (largeur de ligne de quelques microns et dimensions des composants de l'ordre de 100 μm à quelques mm) qu'il s'agisse de micromoteurs, d'engrenages, de transmissions, de mécanismes cinématiques, de pompes à fluides, de valves, de filtres à particules, de miroirs ou lentilles dirigeables, voire même de moteurs à combustion interne et à incandescence micro-usinés intégrés sur une puce. Cette technologie n'est pas l'apanage d'un continent ou d'un pays, les techniques les plus modernes sont encouragées aux États-Unis aussi bien qu'en Europe et qu'en Asie.

A mesure que ce secteur arrive à maturité la technologie exerce de plus en plus un effet moteur, alors que les dix premières années, il fallait davantage encourager son développement ; on privilégie de plus en plus la R-D industrielle et à Silicon Valley, un très grand nombre de « start-up » travaillent sur les MEMS. La première décennie était celle de la technologie/boîte à outils, la seconde est/sera celle de la commercialisation (la technologie permettant des applications

intéressantes) et favorisera la diffusion universelle de la technologie micro-électromécanique, qui restera toutefois très discrète pour les utilisateurs/consommateurs journaliers.

Domaines d'application et conséquences futures des MEMS

Un certain nombre d'études de marché indépendantes réalisées au cours des cinq dernières années divergent sensiblement quant à l'estimation (en dollars) du potentiel futur du marché (de quelques milliards à des dizaines de milliards), mais s'accordent généralement sur les grandes applications commerciales des cinq à dix prochaines années. Ces applications sont : 1) les dispositifs mécaniques et inertiels (principalement les microcapteurs de force, pression, accélération, débit et également les gyroscopes); 2) les dispositifs fluidiques (imprimantes à jet d'encre, analyse chimique sur une puce, dépistage/essais médicamenteux); 3) les appareils optiques (affichages, composants optiques de communication, scanners à laser et modulateurs) et 4) les dispositifs de stockage de données. Au demeurant, il est tout à fait possible que les applications qui s'imposeront sont des applications que nous ne sommes pas en mesure de prévoir à ce stade; tout comme les lasers ou les transistors ont trouvé leur place dans les maisons, les voitures ou les PC, les dispositifs micro-électromécaniques feront de plus en plus part de la vie quotidienne. Des extrapolations de l'impact possible des technologies de l'information sont présentées ci-après.

Impact possible des technologies de l'information

Entrée de données

Les composants micro-électromécaniques optiques, tels que les différents micromiroirs ou microlentilles à balayage que l'on connaît actuellement, pourront, équipés de détecteurs optiques intégrés, acquérir une image optique et la convertir en bits; cette opération sera exécutée à grande vitesse et dans un module de quelques millimètres cube seulement. Des interfaces homme-ordinateur peu coûteuses, permettant de scanner la rétine ou les empreintes digitales pourraient bientôt être universellement utilisées à des fins d'identification pour les transactions dans l'espace virtuel.

La technologie permettant la fabrication de systèmes de guidage inertiels imprimés sur une puce devrait bientôt être disponible. Ces systèmes permettront de positionner un objet dans l'espace en mesurant les 6 accélérations auxquelles il est soumis à tout moment. L'objet positionné pourrait être la pince d'un robot (ce qui permettrait d'alléger les robots sans perdre en précision, ce qui les rendrait du même coup plus rapides), ou un stylo (unité d'entrée qui transmettrait des données écrites sous forme binaire à un ordinateur ou serait

utilisée à des fins d'identification), ou un gant/une bague/une montre pour les interfaces gestuelles homme-machine. La technologie nécessaire pour implanter trois accéléromètres et trois gyroscopes sur une puce de silicium est, en gros, disponible aujourd'hui.

Les capteurs micro-électromécaniques deviendront, pour un nombre croissant de variables physiques, chimiques, thermales, optiques et autres, les yeux, les oreilles, le nez, les papilles et la peau des systèmes d'information de demain. Ainsi, de très nombreuses *start-ups* de Silicon Valley explorent les possibilités offertes par le concept de laboratoire micro-électromécanique pour, par exemple le traitement de fluides et les analyses bio(chimiques) sur des puces jetables, qui permettraient aux médecins d'effectuer diverses analyses de sang et d'obtenir les résultats immédiatement sans avoir à envoyer les prélèvements à un laboratoire et à attendre plusieurs heures ou jours avant d'avoir les résultats.

Sortie de données

Le développement des dispositifs micro-électromécaniques offre des perspectives particulièrement intéressantes dans le domaine de la production et de l'affichage de données.

En particulier, le DMD (Digital Mirror Device) de la société Texas Instruments, actuellement utilisé dans les projecteurs numérique haute résolution, est une puce de silicium d'environ 1cm² comprenant plus d'un million de miroirs microscopiques. Chaque miroir est électromécaniquement orientable, pour réfléchir un faisceau lumineux sur un écran de projection (pixel brillant) ou hors de cet écran (pixel noir). Le jeu de ces millions de miroirs micro-électromécaniques réunis sur cette puce et de leurs circuits électroniques intégrés produit des images vidéo XGA en millions de couleurs à vitesse normale sur un écran de projection de 150 cm.

Pour aller du plus grand au plus petit, plusieurs petites entreprises, comme Microvision par exemple, travaillent à la fabrication de micro-affichages, pour arriver à « cacher » des écrans couleurs haute résolution dans des lunettes classiques. L'idée est d'utiliser la rétine comme écran de projection, c'est-à-dire qu'au lieu de regarder une image réelle projetée sur un moniteur ou un écran, l'image virtuelle (les mots « réel » et « virtuel » sont pris ici dans leur sens optique) balaye directement la rétine. Cela donne au spectateur l'impression de regarder un écran de 17 pouces situé à 60cm de lui, le spectateur pouvant décider de le regarder ou pas, d'y arrêter son regard ou au contraire de le traverser pour regarder le monde physique, ou alors de le faire disparaître par simple pression d'un bouton... La technologie micro-électromécanique jouera un rôle clé dans la facilité d'utilisation de ces systèmes d'affichage et cette facilité sera essentielle pour qu'ils soient acceptés par un large public.

Stockage de l'information

Aujourd'hui, on a déjà une idée des dispositifs micro-usinés utilisables pour remplacer certains composants des systèmes de stockage classiques (têtes de lecture/d'écriture de disque dur). Il existe également un potentiel pour les systèmes de balayage par faisceau laser à grande vitesse et à résolution élevée pour le stockage optique des données. Le stockage et l'extraction micro-électromécanique de données holographiques en 3-D est une autre voie de recherche. Tous ces dispositifs visent à multiplier par plusieurs ordres de grandeur la vitesse et/ou la densité du stockage de données; certains, toutefois, paraissent n'être que des possibilités encore lointaines.

En tout état de cause, la technologie micro-électromécanique devrait permettre non seulement d'accroître la densité des données sur les supports de stockage, mais aussi de réduire la taille et le prix des mécanismes de lecture et d'écriture, peut-être même jusqu'à ce qu'ils finissent par disparaître dans leurs supports.

Traitement de l'information

Plusieurs applications de la microfluidique s'imposent dans le domaine biomédical. Des microcanaux pour l'acheminement de fluides, des microréservoirs de réactifs, des microchambres de réaction et des micromécanismes de pompage imprimés par photolithographie sur une puce sont utilisés pour différentes applications, notamment pour la multiplication de séquences d'ADN (PCR), l'analyse d'ADN (électrophorèse sur une puce) et des tests biologiques combinés à grande échelle qui permettent aux sociétés pharmaceutiques d'effectuer de façon plus rentable des tests de dépistage.

Diffusion de l'information

La micro-électromécanique et l'optique se complètent naturellement étant donné que les microsystèmes ne peuvent produire que des microforces et qu'aucune force n'est nécessaire pour diriger ou moduler un faisceau lumineux (contrairement aux micromoteurs ou à d'autres dispositifs de commande micro-électromécaniques qui ont bien du mal à produire assez de puissance pour mouvoir leur propre rotor et à plus forte raison une charge utile). Beaucoup de composants optiques ont de fait déjà fait leurs preuves aujourd'hui. Plusieurs intéressent directement les systèmes de communication optique (commutateurs optiques à large bande (micromiroirs) pour le multiplexage dans des applications de la fibre optique jusqu'à la borne de raccordement ou jusqu'à l'abonné. Compte tenu des lois fondamentales de la réduction d'échelle, les micropièces mécaniques peuvent fonctionner à des vitesses extrêmement élevées par rapport à leurs grandes sœurs du monde macro. On est arrivé à faire fonctionner certaines pièces mécaniques à des fréquences de l'ordre du Mégahertz.

Indirectement, la micro-électromécanique pourrait offrir des perspectives extrêmement prometteuses pour les futurs systèmes de communication planétaire dans le cadre des travaux actuellement menés par la NASA/JPL et d'autres organismes sur les micro-, nano- et pico-satellites. Les satellites et les projets spatiaux en général sont actuellement en train d'évoluer : au lieu d'un petit nombre de satellites très coûteux de charges utiles importantes, il semble aujourd'hui préférable d'envoyer un grand nombre de satellites de charges utiles réduites moins coûteux. Dans ce contexte, on peut imaginer qu'un grand nombre de très petits pico- ou nano-satellites placés en orbites basses remplacera les quelques gros satellites géostationnaires pour assurer les besoins de télécommunications de demain. Ces constellations de satellites pourraient être mises en orbites à très faible coût en raison de la faible masse des satellites (quelques centaines de grammes contre quelques dizaines de kg précédemment !) et parce qu'une orbite basse suffit à couvrir tout le globe à condition de déployer un grand nombre d'engins. JPL mène des recherches actives sur les composants micro-électromécaniques pour équiper les systèmes de propulsion, de commande, de détection et de communication de ces futures générations de satellites miniatures. Ces recherches portent notamment sur les lanceurs, les pompes à carburant, les gyroscopes, les accéléromètres et les systèmes de refroidissement/chauffage micro-usinés. La couverture totale du globe par des satellites « bon marché » pourrait à terme faciliter la connectivité des sources d'informations personnelles portables ou « vestimentaires » dans les réseaux sans fil.

Pour conclure sur les MEMS

Pourquoi les MEMS, qui ont déjà 15 ans, n'ont-ils pas une incidence plus importante sur le monde d'aujourd'hui (comparée aux effets des 15 premières années de la micro-électronique) ; cette situation devrait-elle changer à l'avenir ? L'un des principaux obstacles réside dans l'emballage des dispositifs micro-électromécaniques qui doivent être isolés de leur environnement tout en étant capables d'agir sur cet environnement ; la modélisation des outils constitue aussi, dans une certaine mesure, un obstacle ; cependant, l'utilisation des MEMS dans les têtes d'impression des imprimantes à jet d'encre montre que ces dispositifs peuvent donner de très bons résultats sur des marchés de masse très concurrentiels et que dans certains domaines, en tout cas, ces obstacles peuvent être surmontés.

4. UN NOUVEAU PARADIGME : LE RÉSEAU

Scott McNealy a dit : « le réseau, c'est l'ordinateur ». Et cela est profondément vrai aujourd'hui, avec l'avènement d'Internet comme réseau public. Toutefois, cette constatation a pris un sens nouveau avec Internet et le World Wide

Web. Le réseau devient la nouvelle interface avec l'ordinateur, mais aussi la nouvelle interface avec l'entreprise, avec les différentes communautés et peut-être même avec les personnes. Pour que cela devienne une réalité – et marque en outre un progrès réel – il faudra encore beaucoup travailler afin de développer les possibilités offertes par les interfaces utilisateurs sur le réseau ou autrement. Nous décrirons celles-ci ultérieurement.

Les télécommunications et les réseaux connaissent une révolution analogue à celle de la micro-électronique en partie grâce aux progrès de la micro-électronique et de l'optoélectronique. Comme le constate George Gilder, « l'économie d'aujourd'hui déborde d'architectures obsolètes reposant sur une largeur de bande insuffisante, des transistors gratuits et des watt gratuits : ce qui est en train de changer est que techniquement, la largeur de bande disponible va augmenter à un rythme défiant la loi de Moore dans les industries des semi-conducteurs et de l'informatique ». Cela signifie que la largeur de bande des fibres optiques dépassera largement les besoins, tels qu'ils s'expriment à l'heure actuelle; que la technologie sans fil concurrencera sévèrement la téléphonie classique qui subira les assauts de la téléphonie par Internet; que l'avenir du câble, du téléphone et de la fibre optique dépend des débouchés que l'on trouvera à ces technologies et non pas des limites de la technologie, et également des politiques de prix qui ne marcheront pas automatiquement avec la déréglementation. Il est tout à fait probable que l'association des technologies de la fibre et du sans fil (jusqu'à l'abonné ou jusqu'au mobile) constituera un défi majeur pour les grands opérateurs. Chaque technologie est poussée pour atteindre de nouvelles limites, comme les lignes de cuivre qui commencent à atteindre 8 Mb/s et qui, selon les prévisions, pourraient monter jusqu'à 20 Mb/s; les téléphones mobiles utilisant une bande de fréquences plus large pourraient acheminer jusqu'à 50 Gb/s; la fibre pourrait assurer de tels débits avant même l'avènement des ordinateurs optiques. La question qu'il faut se poser peut-être est : que fera-t-on de toute cette largeur de bande? On devrait, dans dix ans, pouvoir à partir d'un terminal intégré (c'est-à-dire le même signal que pour le téléphone, le modem, le fax, etc.) accéder à n'importe quel abonné ou source de données (intégration vidéo/voix).

Les réseaux de données publics commutés et leurs services continueront à s'étendre et déboucheront sur un réseau public commuté à moyenne (1.5 Mb/s) et large (50 Mb/s et plus) bande. L'interconnectivité avec les réseaux privés se développera également et plusieurs types d'entreprises capteront des parts de marché auprès des consommateurs; les compagnies d'électricité, par exemple, sont en train de devenir des acteurs importants. Si l'extension des technologies des télécommunications et la mise en place de l'infrastructure joueront un rôle clé dans l'avenir des technologies de l'information, l'impact des coûts des communications désormais indépendants de la distance, n'est pas encore connu.

Cette évolution pourra avoir certains effets négatifs, notamment si les mordus d'Internet laissent leurs lignes ouvertes 24 h sur 24, encombrant les réseaux téléphoniques conçus pour un autre usage. Les implications politiques sont un autre aspect qu'il faudra aussi étudier.

Dans l'analyse des conséquences d'Internet pour l'activité, il est important de garder à l'esprit que l'évolution technique – et l'évolution des prix – dans les télécommunications pourraient être des facteurs déterminants. Beaucoup de choses ont été déjà écrites à ce sujet, c'est pourquoi nous n'examinerons ici que deux points : les communautés Internet et les entreprises.

Internet et ses communautés

Les gens utilisent Internet pour son contenu – pour tout ce qu'il a à offrir – mais aussi pour y trouver une communauté. Si Internet est un marché, comme nous le verrons plus tard, il est en train de devenir, premièrement et avant tout, un ensemble de communautés, professionnelles ou non, communautés qui sont d'ailleurs à l'origine de son succès et qui assureront sa réussite à long terme.

Il ne faut pas confondre communautés et cultures; même s'il existe une culture Internet, que de moins en moins d'internautes comprennent aujourd'hui (accès et utilisation gratuits, par exemple), cette culture tendra à disparaître pour être remplacée par une culture plus mercantile et commerciale. Plus important, le Web et les outils logiciels que nous voyons apparaître aujourd'hui favorisent le développement de communautés. Il existe un certain nombre de caractéristiques essentielles à la réussite d'un système au service des communautés; bien que ces caractéristiques soient bien identifiées, aucun système n'est encore satisfaisant à l'heure actuelle : les communautés ont besoin d'une médiation technologique où la technologie annule la distance et donne une impression de proximité. Ces caractéristiques sont universelles et doivent permettre des modes d'interactions variés simultanément entre de multiples utilisateurs, et impérativement l'interaction en temps réel. Pour se développer, les communautés auront besoin de nouveaux outils comme les MUDS (dimensions multi-utilisateurs). Le réseau permettra d'être actif et plus seulement passif au sein de la communauté. Le courrier électronique marque déjà un premier pas dans cette direction; les forums de discussion en sont un autre. En fait, le nombre de concepts actuellement développés est tel, qu'il est difficile de prévoir ce que l'avenir nous réserve. On assiste à une multiplication des espaces de dialogue, implémentés de diverses façons et permettant divers mécanismes d'interaction. Les MUDS et leurs avatars* de demain définissent des espaces où les personnes se rencontrent et peuvent constamment, lorsqu'elles partagent les mêmes domaines

d'intérêt (le vin, le jardinage, la micro-électronique, etc.), échanger des informations dans la durée, en enrichissant leurs échanges par divers types de documents (audio, vidéo, discussions antérieures sur le Web sur des sujets voisins, etc.). Ils adopteront des technologies push pour diffuser des nouvelles à leurs membres ou établir des « listes de copains » ; ils utiliseront des systèmes de filtrage automatique définis par la communauté pour sélectionner l'information et la diffuser à ses membres.

Ces technologies offrent aussi des perspectives passionnantes pour l'Intranet, notamment pour les entreprises qui pourront se doter de nouveaux outils de communication afin d'ouvrir l'accès à l'information directement depuis les consommateurs. Les entreprises modifieront leurs systèmes d'information et de communication pour tirer parti de ces technologies. Les membres d'un groupe de soutien logistique pourront partager des informations dans le monde entier, sans passer par la hiérarchie, pour s'aider mutuellement à résoudre certains problèmes difficiles rencontrés par les clients. Le courrier électronique est insuffisant pour cela. Des outils de type MUDS seront combinés à des langages 2-D ou 3-D tels que VRML* pour décrire les situations spatiales du monde réel, ainsi qu'à des données audio et vidéo, et donneront des descriptions réalistes de leurs environnements. On ne saurait trop souligner l'importance de l'influence du Web sur les procédures des entreprises, pas seulement sur les procédures commerciales, mais aussi sur les procédures internes. Le jour viendra où la documentation ne sera plus diffusée que par électronique dans le cadre de la logistique de vente ; les annotations faites par les lecteurs ou les utilisateurs seront mises en commun, ce qui donnera naissance réellement à une documentation vivante. Pour être efficaces, ces procédures exigeront d'associer des technologies push et pull ; le profil des membres d'une communauté sera systématiquement établi pour assurer le meilleur usage de la technologie push et éviter la saturation et la surcharge d'informations. D'une certaine façon, les premiers groupes de discussion sur Internet ont montré que la plupart des gens apprennent à bien utiliser leur temps mais ce qui sera plus difficile à l'avenir sera d'éviter que les communautés à vocation commerciale qui auront la maîtrise des informations diffusées ne surchargent leurs abonnés. Ces problèmes trouveront sans doute une solution satisfaisante au cours des dix prochaines années puisque la plupart des gens choisiront leur propre communauté. Les équipes de développeurs de matériel et de logiciel travaillant en tant que communauté mettront au point de nouvelles procédures de conception collective qui bouleverseront complètement nos notions de délais de commercialisation.

* *Virtual Reality markup language* – langage de codage de la réalité virtuelle – comme HTML (*hypertext markup language*), un logiciel standard de recherche sur le Web.

Les agents

La notion d'agent joue un rôle essentiel dans les dispositifs évoqués ci-dessus. En fait, cette notion peut être mise en avant chaque fois qu'il est question d'Internet, dans la mesure où cette technologie devient omniprésente. Un agent est un logiciel qui automatise, au nom d'un utilisateur ou d'un autre agent, une tâche qui est généralement une tâche distribuée. Cette idée n'est certes pas très nouvelle, mais elle devient plus intéressante lorsque l'agent est capable de résoudre des problèmes, de se fixer des objectifs, de percevoir son environnement et d'agir sur lui, de raisonner sans connaître parfaitement son environnement, et surtout de collaborer avec d'autres agents distribués pour mener à bien sa tâche. C'est là qu'intervient la notion « d'intelligence », et les approximations logicielles d'agents intelligents deviendront bientôt parfaitement banales, grâce à l'arrivée de langages de programmation comme JAVA qui permettent la mobilité, si ce n'est l'intelligence proprement dite des agents. Plus haut, on a fait allusion à un type simple d'agent en décrivant l'interaction entre un individu, en tant que conducteur, sa voiture et ses équipements électroménagers. De toute évidence, aucun utilisateur ne souhaitera programmer toutes ces interactions à l'avance. Il fera donc appel à des agents qu'il souhaitera certainement combiner. Il faudra toutefois encore attendre bien des années avant que cette opération présente vraiment de l'intérêt; nous avons vu dans les applications professionnelles que combiner des objets était loin d'être évident et c'est seulement aujourd'hui que nous découvrons les outils graphiques qui permettent cette opération; de par leur nature, les agents sont bien plus complexe que les objets, et les applications avancées des agents décrites par Negroponte ou Dertouzos ne verront pas le jour avant la fin de la prochaine décennie. S'agissant de concepts de type intelligence artificielle, il importe d'évaluer soigneusement ce qui sera effectivement possible à grande échelle. Des technologies sont en cours de développement pour permettre à un agent accédant à un service de demander une information dans un format standard; cela établirait un ensemble de caractéristiques communes à tous les services intervenant dans un domaine donné, ce qui rendrait un agent bien plus applicable dans ce domaine. L'étape suivante consiste seulement à obtenir que les services décrivent leurs (différentes) fonctions à l'aide d'une syntaxe commune, ce qui donne encore plus de flexibilité à chaque agent – les agents devenant alors véritablement généralistes.

Internet en tant que marché

Internet et le Web introduisent des changements profonds dans le monde des affaires. D'une part, de nouveaux marchés émergent; de l'autre, apparaissent de nouveaux modes d'affaires – de nouvelles façons d'engendrer des profits à partir des ventes. Ces deux évolutions simultanées vont se poursuivre en paral-

lèle, et auront des répercussions durables. En ce qui concerne le Web en tant que marché, les prévisions varient considérablement selon les sources, mais il est permis de tabler sur un chiffre d'affaires de 200 milliards de dollars par an dans la première partie du siècle prochain. La société la plus dynamique à l'heure actuelle est probablement CISCO, qui réalise plus de 2 milliards de dollars de chiffre d'affaires sur Internet – et contrairement à la plupart des hypothèses relatives à l'utilisation commerciale du Web, ce montant ne correspond pas à la vente au détail de produits de consommation, mais à des équipements d'interconnexion de réseau, coûteux et complexes à configurer. En outre, il est tout à fait probable que l'impact majeur du Web se fera sentir sur les activités interentreprises, et de fait, les produits CISCO ne sont généralement pas achetés par des « utilisateurs ». Si l'EDI (l'échange électronique de données entre entreprises) a été un échec relatif, l'utilisation du Web pour faciliter les échanges interentreprises sera une grande réussite. Le Web permettra de réduire les coûts de distribution, d'où un effet de désintermédiation. Au lieu de nous lamenter à propos des effets de la désintermédiation sur l'emploi, que personne ne pourra stopper, nous devrions nous demander s'il est possible de « ré-intermédier » quelque chose que les consommateurs seront disposés à payer. On pourrait évoquer, par analogie, le monde des services de sous-traitance des systèmes d'information, qui montre qu'il est effectivement possible de créer de nouvelles activités avec un client tout en réduisant le coût de base de l'activité que l'on mène pour ce client. L'imagination sera essentielle dans ce cas, et même si l'on s'éloigne du thème de ce document, il est inquiétant de voir que la plupart des enfants dans la majorité des pays européens ont une culture informatique moins développée que ceux de nombreux autres pays.

Avec Internet, en fait, va naître le besoin de nouveaux modèles d'entreprise. Les magasins en ligne ont déjà des répercussions sur les commerces traditionnels, qui amènent ces derniers à réagir par d'importantes et salutaires contre-mesures. Indispensables à l'expansion rapide du commerce, un certain nombre de technologies progressent constamment : interfaces utilisateur, technologies de recherche, fonctionnalités transactionnelles visant à garantir l'exécution d'une transaction, outils de paiement électroniques et instruments destinés à établir des relations de confiance entre partenaires. Les consommateurs prendront une part active à la formulation de l'offre future de produits (ainsi qu'au modelage du Web lui-même). Les communautés de consommateurs exploitant certains des outils décrits précédemment exerceront une influence considérable sur les concepteurs de produits. De fait, cette perspective a de quoi inquiéter de nombreux concepteurs, qui n'ont aucune envie de voir se mener sur le Web des campagnes contre un produit ou une société. Du point de vue des nouveaux modèles d'entreprise, la grande inconnue est l'incidence de la publicité sur le commerce électronique et les liens d'interdépendance qui se créeront entre eux.

L'interaction entre l'industrie du contenu et celle des supports deviendra extrêmement importante. Cependant, des changements importants ne sont pas à prévoir pour l'heure. Par exemple, certains des outils de recherche actuels affichent des bandeaux publicitaires pour des produits spécifiques dans la catégorie des produits correspondant à une interrogation donnée; si ce type de publicité est très bon marché aujourd'hui, ce modèle est trop limité et ne saurait persister à long terme. Une possibilité serait que la largeur de bande soit sponsorisée par les propriétaires de contenus. Quelle que soit la forme finale, on peut s'attendre sans grand risque à ce que les budgets publicitaires se réorientent progressivement vers l'Internet.

Internet et marketing

Internet en tant qu'outil de marketing aura un impact considérable sur les ventes directes. Le marketing évoluera de multiples façons, influant sur le secteur de la publicité, qui le complète. Le jour viendra où le marketing direct individualisé, sur le réseau, remplacera, ou du moins réduira considérablement, l'envoi en nombre de gros catalogues, dont la rentabilité est très faible, et où la consultation de catalogues électroniques deviendra courante dans le cadre des passations de marché sur Internet, qui supplanteront et étofferont les EDI. Cette évolution se produira avant que les catalogues grand public ne soient remplacés par des catalogues électroniques. Grâce à son coût marginal extrêmement faible, le réseau remplacera aussi les publicités directes sans adresse, qui sont très peu rentables. L'identification et l'attraction du consommateur seront donc essentielles à cet égard. En ciblant des communautés, on pourra cibler des clients.

L'activité de banque de détail fournit une bonne illustration de ces évolutions. Ce secteur va subir de profonds bouleversements au cours de la décennie à venir, et la plupart des banques n'ont pas entièrement compris l'urgence de cette transformation et laissent d'autres institutions financières occuper le terrain en matière de délivrance d'informations financières. C'est ainsi qu'Intuit, qui offre des produits financiers groupés, vend ses services en partenariat avec des banques en Europe, alors qu'aux États-Unis, il s'adresse directement, et avec beaucoup de succès, aux particuliers, menaçant la position concurrentielle de nombreuses banques. Le partenariat permet de mieux cibler la vente de services complémentaires personnalisés. La tendance est cependant irréversible. Comme toujours, il est préférable de cannibaliser ses propres services avant que quelqu'un d'autre ne le fasse. L'exemple des pertes de parts de marché de l'Encyclopedia Britannica au profit du CD-ROM Encarta de Microsoft devrait être mûrement réfléchi. Les secteurs de la presse évaluent activement les possibilités offertes par le Web en matière de distribution. Les journaux traditionnels ne seront guère touchés avant la fin de la prochaine décennie, notamment parce qu'aucune technologie « de substitution » (écrans plats ou papier électrique) ne

sera largement disponible avant ce délai. Il n'est toutefois pas invraisemblable que la publicité se tourne vers les annonces électroniques, mettant en danger les journaux dont les coûts monteront alors en flèche; ils risquent d'en mourir, non parce qu'ils seront remplacés, mais parce que le modèle d'entreprise auquel ils correspondent ne sera plus viable. Pour en revenir, par conséquent, à l'avenir de la banque de détail, il se peut que le véritable risque pour ce type d'activité soit de voir les clients commencer à explorer le net pour trouver des fournisseurs de services au lieu de s'adresser à leur agence. C'est la déconstruction du modèle intégré d'une banque. Il y a une grande différence entre offrir un accès électronique à quelques services bancaires et la désintermédiation ou la déconstruction des services bancaires, mais ce qui est possible se produira si certains des problèmes techniques déjà évoqués trouvent une solution. Ainsi, des transactions sécurisées seront bientôt possibles pour de nombreuses formes de transaction financières électroniques. Le commerce sur Internet est d'ores et déjà une réalité. Les autorités de certification et leur reconnaissance légale sont pour demain. La technologie du chiffrement et ses répercussions juridiques sont aussi de plus en plus largement comprises. Au début du siècle prochain, il sera couramment admis que la sécurité peut être garantie, notamment l'impossibilité totale de remonter jusqu'au payeur; de nombreux systèmes de paiement coexisteront, qu'il s'agisse d'argent électronique, de cartes de crédit ou de systèmes de micropaiement.

Quelques obstacles risquent cependant de faire s'écrouler les scénarios précédemment décrits. Ces obstacles ne tiennent pas aux problèmes techniques évoqués, mais relèvent de deux aspects : psychologique et fiscal. Il se pourrait bien que les différences culturelles freinent le commerce électronique, par exemple dans le cas des services bancaires informatisés; après tout, même aujourd'hui, combien d'argent reste en sommeil dans les foyers français, risquant d'être volé au lieu d'être déposé à la banque? Il est possible que certaines cultures soient très lentes à adopter ces nouvelles technologies et ces nouveaux modes de prestation de services. L'éducation joue ici un rôle majeur. Le plus grand risque, cependant, est celui de l'imposition des transactions menées sur Internet, qui persiste malgré les dénégations du monde politique. Il sera encore aggravé si, en même temps, le modèle d'entreprise adopté pour l'accès à Internet évolue de telle sorte que la structure forfaitaire actuelle sera plus ou moins remplacée par un système de tarification à l'utilisation (peut-être plus logique), l'utilisation étant fonction de plusieurs paramètres, comme la largeur de bande, le volume, la qualité du service, la durée, la distance, etc. Trop de changements soudains de cette nature feront sans aucun doute obstacle au développement du marché électronique. Huberman (1997) a élaboré des modèles mathématiques de l'Internet, dans lesquels des profils d'utilisateurs caractéristiques sont employés pour étudier les temps de réponse, la congestion des réseaux, etc.

D'après son analyse, il est clair qu'un Internet « libre et gratuit » finira toujours par s'engorger, quelle que soit la largeur des canaux de communication. On peut donc prévoir l'apparition d'un Internet à plusieurs niveaux, où les services d'un certain niveau de qualité seront payants, et passeront par des canaux différents et privés. Il y a là de quoi engager un vaste débat, mais cette perspective se réalisera.

Un autre aspect souvent mentionné au sujet du commerce électronique, et du Web en général, est celui de la protection de la propriété intellectuelle, couramment appelée protection du droit d'auteur. Paradoxalement, la disponibilité de masses d'informations sur le Web en diminue le prix auprès du consommateur, indépendamment de tout jugement de valeur sur les possibilités de préserver ou non la propriété intellectuelle. Si le contenu a moins de valeur, la concurrence entre les sociétés ou les propriétaires de contenus ne portera pas sur le seul contenu, mais aussi sur la reconnaissance de la marque, sur l'image, sur la vogue du produit, etc. Cette évolution est déjà en cours, et un rude choc attend les propriétaires de contenu qui ne s'en rendent pas compte. Par exemple, le fait pour un auteur d'ouvrir un site Web, ou d'utiliser le site de son éditeur, pour créer un « bavardoir » deviendra non seulement courant, mais indispensable, tout comme aujourd'hui l'auteur dédicace ses ouvrages dans les librairies. Une fois encore, la technologie évoluera de façon à devenir suffisamment simple pour que la plupart des auteurs puissent l'utiliser. Une fois le contenu disponible sur Internet, doit-on, et peut-on, le protéger? Tant que l'on n'aura pas résolu cette question, il y a peu de chances de voir des contenus de grande valeur circuler sur le Web. Le cas des journaux dont une version électronique est consultable contre paiement donne une idée de ce qui se prépare pour l'avenir. En effet, même s'il est bien évident que l'abonné peut diffuser le journal auprès d'autres personnes, le système semble attirer suffisamment de clients pour être déjà rentable (The Times, Wall Street Journal, etc.). Or, il n'existe aucune protection sérieuse contre les copies, et pourquoi y en aurait-il une si les lecteurs se comportent de façon rationnelle comme ils le font avec la version papier? Des services additionnels (recherche d'informations complémentaires, par exemple) pourraient engendrer des recettes supplémentaires. Pour l'essentiel, il n'existe pas de problème de droit d'auteur pour l'information éphémère contenue dans un journal. En revanche, les contenus durables et de grande valeur, du moins aux yeux de ceux qui les possèdent, ne seront pas diffusés sur Internet tant que la copie et la redistribution ne seront pas sous contrôle. Il est vrai que plusieurs technologies commencent à voir le jour (leur usage ne se généralisera qu'au cours du prochain siècle) qui permettent à la fois d'enfermer les contenus dans des conteneurs sécurisés et de distribuer les droits d'usage avec les conteneurs, limitant ainsi l'utilisation du contenu à ce qui est autorisé et payé. Mais il demeure que ce principe de la visualisation (publication, impression) sécurisée

ne se répandra que lorsque les propriétaires de contenus le jugeront assez sûr. L'élément moteur, dans ce cas, sera peut-être davantage la diffusion d'images sur Internet que celle d'informations purement textuelles.

Enfin, il importe de traiter la façon dont le Web va se muer en un outil de communication entre les personnes et entre n'importe quels types de dispositifs, en particulier les appareils électroménagers. Il faudra certes de nombreuses années pour parvenir au stade de la mise en œuvre, mais la définition de l'infrastructure Internet a radicalement évolué en 1995 avec l'adoption par l'Internet Engineering Task Force (IETF) d'une nouvelle version du mécanisme de transport de base utilisé par Internet, à savoir le Protocole Internet, ou protocole IP. Rejeté à maintes reprises en faveur de normes ISO ou de normes d'entreprise dans un passé récent, IP est en passe de devenir le protocole universel, désormais considéré incontournable. Le nouveau protocole IPv6 présente de nombreuses caractéristiques nouvelles, comme la sécurité et les fonctionnalités de radiodiffusion, ainsi qu'un espace d'adressage phénoménal, sur 128 bits. Cela signifie qu'il y aura assez d'adresses pour pratiquement tout le monde, tous les ordinateurs, tous les appareils électroménagers dans le monde auront leur propre adresse : grille-pain, téléphone, voiture, document, tout ce qu'on peut imaginer. En d'autres termes, chaque objet peut devenir un serveur et fournir informations, données ou documents (par l'intermédiaire des pages Web) en réponse à n'importe quel « demandeur », qu'il s'agisse d'une personne ou d'une machine. Il est maintenant possible d'accéder à la radio, en passant par son câblage électrique ou par toute autre connexion Internet, pour obtenir des renseignements sur sa garantie ; elle pourra aussi donner, sans que l'utilisateur n'ait à intervenir, des informations sur des spectacles spécifiques correspondant à ses goûts particuliers. Même s'il faut une ou deux dizaines d'années pour que tous les fournisseurs d'accès à Internet, les routeurs, etc. effectuent les changements nécessaires, ce jour viendra. Toutes ces fonctions bénéficieront aussi de la mise au point de nouveaux logiciels qui permettront de télécharger et d'exécuter localement des programmes qui normalement ne sont pas installés sur place (parce qu'un paiement est exigé, ou parce que sa durée de vie est trop courte...). C'est le concept Java, qui, tant qu'il bénéficie d'une infrastructure récente, se développera beaucoup plus rapidement que l'infrastructure de télécommunications nécessaire pour tirer pleinement parti d'Internet, et d'ailleurs du protocole IPv6 lui-même. Bien avant que ces nouveautés ne soient mises en place, l'impact de Java (et d'autres technologies) se fera sentir avec le développement des clients et serveurs dits « allégés », des architectures à trois niveaux, etc. Les unités centrales ne sont pas mortes, mais ce sont les serveurs, et non les utilisateurs, qui y accéderont.

5. COMMUNIQUER AVEC LES SYSTÈMES : L'INTERACTION HOMME-MACHINE

Ceci est peut-être la plus grande inconnue de l'avenir des TI. Qu'est-ce qui fera la différence entre un très vaste marché accessible uniquement à ceux qui connaissent l'informatique, et un immense marché planétaire accessible à tous ? C'est la facilité avec laquelle le système et l'utilisateur pourront communiquer qui fera la différence, dans un monde où le coût du système de base tombera à des niveaux très faibles, peut-être même à zéro. Le PC sur une puce, comme nous l'avons vu, est pour demain.

Nos relations avec les dispositifs commandés par ordinateur, ainsi que l'interaction avec ceux-ci pour accomplir une tâche dans un environnement physique, vont se transformer radicalement au début du siècle prochain. L'un des aspects essentiels de cette évolution est la « réalité virtuelle » et ses variantes, comme la « réalité augmentée » ou les « ordinateurs vestimentaires ». Les paragraphes suivants traitent de la réalité virtuelle, ainsi que de l'interface utilisateur plus traditionnelle, qui donne lieu à de captivantes technologies nouvelles ou en voie de maturation.

La réalité virtuelle et ses variantes

Pour décrire les systèmes informatiques interactifs en 3-D qui donnent à l'utilisateur une impression de présence dans l'espace, qu'elle soit visuelle, auditive, voire tactile ou olfactive, il est peut-être préférable, et plus réaliste, de parler d'environnements virtuels plutôt que de « réalité virtuelle ». Les casques à réalité virtuelle, les gants de données, les systèmes de simulation haptique en sont des exemples. La réalité virtuelle permet donc une interaction entre le corps, par exemple la tête, et d'autres objets, par l'intermédiaire de l'ordinateur. Il existe une variante, appelée « réalité augmentée », qui aborde la réalité virtuelle d'un autre point de vue, à savoir qu'il s'agit d'utiliser les ordinateurs pour améliorer et « augmenter » les objets réels, créant ainsi un environnement virtuel qui peut réagir aux actions de l'utilisateur. Par exemple, une caméra posée sur un bureau permet à l'utilisateur de travailler avec des ciseaux virtuels sur du papier, sans couper ce dernier, en faisant des gestes de couper-coller avec ses doigts sous la caméra (ou de manière électronique). Avec les projecteurs et systèmes d'affichage transparents et les écrans portatifs, les objets quotidiens peuvent acquérir des propriétés électroniques. De nombreuses applications de la réalité augmentée se développeront dans des milieux où l'être humain accomplissant une tâche aura besoin d'accéder à des informations dont il ne dispose pas sur le moment. Par exemple, avec un casque à réalité virtuelle, l'ingénieur services pourra voir et lire les pages du manuel dont il aura besoin pour réparer ce qu'il est en train de manipuler. Des prototypes existent, et les difficultés techniques

posés par les interfaces sont en train d'être résolues. Il sera possible, d'un geste du doigt, de voir l'intérieur de sa voiture ou de son imprimante, et de naviguer en tournant la tête ou en parlant à son ordinateur.

L'informatique « discrète » a été mentionnée plus haut comme une évolution possible dans ce domaine. Les ordinateurs « vestimentaires » deviennent une réalité, précurseurs évidents de la technologie informatique discrète. Une montre peut se comporter comme un ordinateur, et échanger des informations avec un Pc, et fournir l'agenda de la journée ou le courrier électronique sans connexion câblée et avec une interface très rudimentaire. Au siècle prochain, les vêtements intégreront des puces informatiques, réagissant à l'environnement, à la température, voire aux autres personnes. Une technologie comme celle des MEMS permettra de disposer d'outils de positionnement dans l'espace qui sont importants pour faire des lunettes d'affichage, par exemple, ou des gants, plus acceptables. Les systèmes de suivi du regard font aussi des progrès, mais pas autant que les gants ou les capteurs de mouvement des doigts ; ces technologies ont déjà fait la preuve qu'elles pouvaient, par exemple, permettre de jouer de la musique en tapotant sur un bureau. Les systèmes d'affichage peuvent aussi servir à donner une impression de présence spatiale, qu'il s'agisse d'écrans vidéo (téléconférence) ou d'écrans muraux (médiaspaces). Aucun cependant n'est aussi efficace que la réalité virtuelle ou la réalité augmentée. Le succès de la téléconférence ne se démentira pas, mais il ne devrait pas se développer sensiblement, cette technologie ne pouvant donner le sens de communauté et de présence physique qui est véritablement nécessaire. Dans les environnements médiaspace, la reconnaissance des gestes dans l'espace est l'ingrédient indispensable pour créer une réalité augmentée. L'interaction avec un dispositif d'affichage et l'utilisation d'un outil capable de capter les gestes et d'y réagir créent un environnement très intéressant pour les réunions de discussion ou de conception. La technologie existe, elle est en phase de maturation. Elle pourrait cependant être remplacée par l'utilisation de caméras et d'outils d'analyse d'image qui permettront aussi de réagir à des gestes. Les discussions de groupe et les conférences prendront un tour entièrement différent lorsque les gestes seront interprétés et exécutés dans le monde électronique virtuel, mais agiront sur le monde réel. Des langages gestuels seront élaborés, peut-être même spécialisés dans certains domaines. Concrètement, on utilisera une combinaison de reconnaissance gestuelle et de capture audio, ou vidéo, pour pouvoir annoter des réunions. L'interaction entre l'utilisateur et le dispositif d'affichage mural, électronique ou non, permettra donc la fluidité des actions – et l'on aura moins conscience de la présence du système d'affichage lui-même, qui sera relégué à la périphérie ou à l'arrière-plan. C'est seulement à ces conditions que l'on pourra éviter d'inhiber les participants à la réunion, qui pourraient sinon se sentir responsables de leurs déclarations au-delà de ce qui se produit dans une réunion classique. Ce qui est

possible sur ces grands écrans interactifs sera aussi possible dans d'autres environnements où les ordinateurs et autres dispositifs rivaliseront pour fournir un monde virtuel et augmenté en même temps. Les réunions de conception et de résolution de problèmes deviendront des documents pouvant être utilisés de manière plus efficace qu'auparavant.

Les lecteurs de documents personnels (PDR) offrent un autre exemple de dispositif créant un environnement virtuel qui imite le papier. Les systèmes d'affichage devront être considérablement améliorés car ils devront être légers, robustes, présenter de bonnes caractéristiques de réflectance ou d'émissivité, etc.; la technologie du papier électrique décrite précédemment pourrait bien répondre à ces critères, mais les PDR à écran plat existeront avant le papier électrique. Le PDR reproduira la façon dont le papier est manipulé; il devra afficher au moins deux pages en même temps, offrir des fonctionnalités permettant de naviguer dans un texte, d'y placer des repères, de l'annoter, etc. Il s'agira d'une reproduction virtuelle de l'outil réel, le papier. Mais comme pour d'autres environnements virtuels et augmentés, le fait de se trouver dans un environnement électronique offre des atouts supplémentaires par rapport à l'environnement « papier » : si l'on trébuche sur un mot, on peut immédiatement accéder à un dictionnaire, ou se connecter à un site web pour chercher des informations complémentaires. Les possibilités sont infinies. Faut-il en conclure que si la grande majorité des documents sources est à l'avenir (si ce n'est déjà fait) sous forme électronique, le papier deviendra inutile et que nous aurons atteint le fameux stade du bureau sans papier? La réponse est non; de fait, tout indique que l'utilisation du papier est appelée à augmenter pendant au moins dix ans. Les PDR seront réservés à des usages très particuliers. Le papier possède de nombreuses qualités qu'il sera toujours difficile de reproduire : non seulement ses qualités physiques qui sont évidentes, mais aussi la manière de l'utiliser, la façon dont l'oeil humain peut lire; la lecture du papier reste en effet, et restera longtemps, plus efficace – et agréable – que la lecture sur écran. Autre différence fondamentale, les PDR ne devront pas afficher les mêmes informations que sur les supports papier. Pour se différencier et attirer les lecteurs, un journal sur PDR ne sera probablement pas représenté de la même manière qu'un journal classique.

Grâce à la technologie des agents évoquée plus haut, la personnalisation de l'affichage et de la lecture, ainsi que du contenu, seront la norme sur les PDR.

En résumé, parallèlement à la mise au point de dispositifs bon marché et puissants, ordinateurs ou MEMS, caméras ou capteurs de toutes sortes, notre relation à l'environnement va considérablement changer. En particulier, on ne saisit pas encore toutes les répercussions des fonctionnalités offertes par les caméras numériques, qui seront bientôt intégrées à notre environnement informatique pour un coût raisonnable.

Interface utilisateur

Même si rien de ce qui précède ne devait se généraliser, l'interface avec l'ordinateur telle que nous la connaissons aujourd'hui est appelée à évoluer notablement, sous l'effet des avancées technologiques et de la nécessité de répondre aux besoins des professionnels ou des personnes qui ne connaissent pas suffisamment l'informatique. La tendance actuelle va vers le multimodal et le multimédia. En utilisant, simultanément ou non, des modalités multiples pour communiquer avec l'ordinateur, il sera possible d'améliorer très utilement la plupart des tâches. Des modalités qui ne sont pas utilisées aujourd'hui deviendront courantes, d'autres évolueront à différents rythmes. La reconnaissance vocale constituera le plus important secteur de croissance dans le domaine de l'interface utilisateur. Une version permettant de s'exprimer sans avoir à faire de pause entre les mots sera disponible avant 2010, mais ne fonctionnera pas encore avec plusieurs locuteurs. L'éventail d'applications possibles est très large, même pour la parole continue monolocuteur. Les outils de prise de notes seront couramment utilisés, de même que les moteurs de recherche dans les bases de données ou sur le Web, et les outils donneurs d'ordres. Les premiers à apparaître seront les assistants numériques personnels (PDA) spécialisés. Pour des domaines où les connaissances sont limitées, certaines de ces applications sont même déjà disponibles aujourd'hui lorsque l'ordinateur est entraîné dans des domaines techniques particuliers. L'indépendance par rapport aux domaines est un problème beaucoup plus ardu. Au-delà de la reconnaissance de la parole, la compréhension du discours restera très probablement hors de portée, même si de véritables dialogues avec un système seront possibles dans un contexte bien défini (recherche documentaire, par exemple). Dans cette catégorie, la reconnaissance de l'écriture manuscrite fera des percées importantes, mais elle ne deviendra pas courante dans le cas de l'écriture manuscrite non contrainte. L'écriture présente en effet plus de variabilité que la parole. Les langages permettant une écriture manuscrite simplifiée vont continuer de se répandre, et pourront tenir pleinement compte de vos abréviations, mais la voix remplacera progressivement la plupart de leurs utilisations.

La compréhension du langage naturel est le complément de la reconnaissance de la parole. Beaucoup assimilent la technologie du langage naturel à la technologie de la traduction. Ce n'est pas nécessairement le cas, et de fait, de nombreux progrès accomplis n'exigent pas la compréhension véritable du langage naturel nécessaire à une véritable traduction : l'analyse morphologique et l'analyse syntaxique sont assez bien comprises et intégrées à des produits comme les éditeurs de texte, les outils de recherche ou les vérificateurs de grammaire ; des améliorations continueront d'être apportées à ces applications, élargissant, à moindre coût, la gamme des fonctions possibles et des langues traitées. Les vérificateurs de syntaxe et de grammaire sont moins avancés que

leurs équivalents morphologiques, mais avec l'introduction de grandes bases de données sémantiques reliant des concepts apparentés, l'efficacité de ces vérificateurs de grammaire avoisinera les 100 pour cent et dépassera les compétences de la plupart des gens. (Même un système parfait ne pourra cependant pas lever l'ambiguïté de : « J'ai observé l'homme au télescope ».) Les documents techniques, par exemple, seront facilement analysés et vérifiés, à condition que le domaine en question ait été décrit. Ces outils ouvriront la voie à la technologie de la traduction. Les systèmes actuels dits de traduction automatique ne font pas ce qu'ils annoncent. Il s'agit au mieux d'une aide à la traduction, qui fonctionne mieux, comme toujours, lorsqu'elle se limite aux contenus techniques. La traduction automatique continuera d'être « assistée », des outils plus puissants seront mis en œuvre, apportant aux auteurs et aux traducteurs de rapports des formes d'aide sans précédent; l'utilisation de mémoires de traduction se généralisera et le système de traduction sollicitera les utilisateurs pour qu'ils suppriment les quelques ambiguïtés qu'il ne pourra résoudre. Si le téléphone traducteur, qui permet à des interlocuteurs de langues différentes de parler dans leur propre langue, ne verra pas le jour avant longtemps, la compréhension combinée de la parole et de la langue permettra des interactions directes avec des systèmes. Les applications en langage naturel destinées à la gestion des contenus (recherche, extraction, indexation, résumé) feront de grands progrès, en particulier pour ce qui concerne la production de résumés. Il existe déjà des systèmes automatiques d'établissement de résumés; les avancées futures permettront d'annoter un document pour donner des définitions de genre, des suggestions pour le « résumeur », etc. Le langage naturel et la parole seront les grands vainqueurs de la prochaine décennie en ce qui concerne l'interface utilisateur.

Le clavier et l'écran resteront très présents dans notre environnement, non sans subir toutefois d'importants changements : le clavier et la souris évolueront pour permettre d'entrer les données des deux mains dans les activités de conception – c'est là une évolution technologique essentielle qui verra aussi de nombreuses innovations remplacer la souris ou en accélérer le fonctionnement, même sur PC; en combinant le curseur (la souris) et des fonctions plus élaborées que les clics de la souris (même les menus accessibles en cliquant avec la souris), on améliorera la productivité. Le concept ToolGlass a été élaboré dans le but d'enrichir fortement l'interaction, en fournissant une sorte de palette mobile attachée au curseur mais transparente, de sorte que l'on puisse encore voir le dessin sous-jacent. L'évolution des systèmes d'affichage a déjà été mentionnée; les assistants numériques personnels continueront d'être utilisés avec des interfaces utilisateur nettement améliorées, notamment en liaison avec le Web. Les téléphones mobiles reliés à Internet, par exemple, offriront des fonctionnalités d'affichage et de commande vocale bien meilleures, qui en feront une solution de remplacement intéressante pour de nombreuses utilisations des ordinateurs por-

tables, notamment du fait que les liaisons par infrarouge avec d'autres appareils faciliteront les communications et leur permettront d'offrir une multitude de services qui n'ont pas encore été créés.

Un autre domaine appelé à évoluer considérablement est celui de la visualisation des données et, plus généralement, de la visualisation de l'information, voire de la visualisation dans l'espace. Les résultats des travaux de recherche en cours seront associés à d'autres réalisations comme les outils de visualisation en 3-D, le Web, l'informatique omniprésente, etc. L'une des limitations bien connues des interfaces utilisateur actuelles est qu'elles ne peuvent représenter que quelques dizaines d'objets en même temps, et ces objets n'ont pas de relation situationnelle entre eux; la métaphore utilisée est celle du plan de travail, ou « desktop », mais il s'agit d'une très médiocre imitation des véritables plans de travail; pour les applications qui n'ont pas pour objet de décrire un bureau elle ne sert pas à grand chose. Nous avons besoin de nouveaux objets pour visualiser et manipuler l'information, sur la base d'une structure sous-jacente qui doit être inventée et pourrait commencer par des dispositifs comme les murs en perspective, les outils de représentation hiérarchique, les outils de représentation tabulaire, les calendriers spéciaux, les outils de représentation temporelle, etc. Tels sont, parmi d'autres, les outils qu'il nous faudra mettre au point pour visualiser à la fois les détails et le contexte. C'est la clé de la notion d'informatique « discrète » exposée précédemment. Nous avons besoin de fournir, par des moyens graphiques, des représentations de perceptions de l'objet (chiffres, etc.) manipulé. Il nous faut présenter des transitions animées qui opèrent des changements d'échelle et que la psychologie cognitive préconise depuis longtemps. On trouvera ci-après quelques exemples de technologies de laboratoire actuellement étudiées, dans lesquelles le cognitif et le perceptuel se renforcent mutuellement. Une série de chiffres, lorsqu'ils sont très nombreux, n'est guère parlante. La même série, représentée de manière à faire ressortir les irrégularités et les éléments saillants, prend immédiatement une autre dimension. Dans un tableur où les résultats mensuels sont représentés branche par branche, produit par produit, si les chiffres sont remplacés par des segments colorés liés à certains seuils, il est possible de représenter 1 000 lignes en même temps, et s'il existe des lignes de force, elles sautent aux yeux immédiatement. « L'arbre à cônes » est une technique qui permet de représenter des hiérarchies extrêmement vastes, comme une structure arborescente de fichiers ou une topologie de réseau : compréhension, perception et navigation peuvent être extraordinairement facilitées par un tel outil, qui permet de visualiser les détails et le contexte; combiné avec des couleurs, il permet d'explorer un réseau de manière très efficace; combiné avec le mouvement en 3-D, il donne un accès ultrarapide à l'endroit recherché, et montre son contexte. D'autres outils, inspirés de ces concepts, permettront à l'utilisateur de ne pas être surchargé d'informations inutiles.

Encore un autre outil, développant la métaphore du plan de travail, propose une vision en trois dimensions de la pièce, du bureau, des étagères, etc. – présentant les pages comme des pages, les livres comme des livres, les étagères comme des étagères, qui donne une image en perspective des objets de notre bureau tels que nous les voyons, qui nous permet de les manipuler directement, créant par exemple des livres composés de pages Web que l'on place sur des étagères pour pouvoir s'y reporter ultérieurement, est un outil beaucoup plus puissant qui commence à offrir un contexte et des formes à l'utilisateur du « bureau ». Une profonde intuition est nécessaire pour créer ces nouvelles formes d'interfaces, mais cela ne suffit pas. Il est absolument indispensable de faire appel aux compétences des sciences sociales qui font jouer des notions comme l'importance du contexte.

Cette multiplicité de concepts pour décrire l'avenir des interfaces utilisateur et de nos environnements est la marque d'un domaine florissant et riche de promesses, qui recevra une nouvelle impulsion avec l'utilisation du papier comme objet interactif grâce au développement rapide des caméras numériques, des stylos numériques, des communications sans fil, etc.

6. VERS UNE ÉCONOMIE DU SAVOIR

Nous pouvons encore parler de technologies de l'information, mais en traitant en fait d'autres concepts que celui de l'information. Les données et le savoir sont également manipulés les ordinateurs. Il existe un continuum entre ces trois concepts. Le savoir et sa gestion suscitent assurément un nouvel intérêt. Même si elle est parfois présentée comme la dernière mode lancée par les consultants, les maisons d'édition et les organisateurs de conférences, la gestion du savoir correspond à un mouvement profond et multiforme qui influe même sur l'économie; nous sommes en train de passer d'une économie fondée sur les industries manufacturières et les services à une économie du savoir. Bien que les connaissances relatives à la concurrence, aux clients, aux marchés, aux technologies, aux procédés, aux communautés, etc., aient toujours joué un rôle décisif dans la réussite commerciale, l'importance du savoir ainsi que les atouts que représente le savoir d'une entreprise deviennent si importants pour celle-ci qu'il est indispensable de trouver un moyen plus explicite et systématique de gérer le savoir dans l'entreprise. C'est ainsi que la propriété intellectuelle devient un outil essentiel de l'entreprise. Les licences procurent à elles seules 1 milliard de dollars par an à IBM. Le rythme d'obsolescence du savoir s'accélère et il devient donc de plus en plus urgent de pouvoir emmagasiner, communiquer et partager les connaissances. Des outils comme Internet et le Web renforcent ce facteur d'accélération, avec des conséquences organisationnelles au niveau des cadres moyens. Étant donné la pression croissante qui s'exerce sur la productivité du travail lié au savoir, la voie de la croissance ne passe plus par la mise en œuvre de ressources

supplémentaires, mais par des outils de savoir ainsi que par une bonne compréhension des aspects culturels du lieu de travail et de l'interfonctionnement des communautés partageant les mêmes pratiques. Traduire ces idées générales en outils et en comportements occupera les responsables et les chercheurs du secteur des TI pendant la prochaine décennie.

Un exemple de modèle communautaire est celui d'une infrastructure sociale et technique mise en place pour que des techniciens puissent partager et enrichir leur savoir en matière d'entretien et de réparation. Il ne s'agit pas de remplacer la formation structurée, mais les conséquences pour le service aux consommateurs, donc pour le bénéfice net des entreprises, sont évidentes. Il est intéressant de noter que l'incitation à contribuer n'est pas d'ordre financier; il s'agit plutôt de reconnaissance personnelle. Comprendre ce qui peut être accepté est aussi important que la technologie proprement dite.

Il importe donc de soutenir de façon plus systématique, au-delà de ce qui est déjà fait, le travail lié au savoir. Des outils doivent être élaborés pour favoriser la création continue, la condensation et l'utilisation ou la réutilisation des savoirs tant des organisations que des individus; ces trois processus sont étroitement imbriqués, aussi les outils devront-ils être intégrés. Par savoir, on entend dans ce contexte les compétences et qualifications de l'entreprise, les processus commerciaux qui facilitent le travail lié au savoir, les répertoires de connaissances explicites et la propriété intellectuelle. Les systèmes de gestion du savoir exigeront donc le développement de répertoires et de bibliothèques, d'outils de navigation, de cartographie et de simulation du savoir, ainsi que d'outils destinés à faciliter la circulation du savoir. Par exemple, les bases de données ne facilitent pas la tâche des travailleurs du savoir. Il n'est pas acceptable de passer par un administrateur pour créer des bases de connaissances. La navigation sera facilitée par de nouveaux outils de visualisation, de production de résumés, d'indexation et de recherche; ainsi, les travailleurs du savoir devront disposer de nouveaux outils pour extraire des sujets à partir des services d'agences de presse; la classification automatique des genres de documents devrait aussi leur faciliter la tâche; surtout, ces outils pourront être personnalisés par l'intéressé, en fonction de ses centres d'intérêts. Les technologies push et pull faciliteront la circulation du savoir, par l'intermédiaire des outils de négociation. Des mécanismes de circulation du savoir seront construits pour anticiper, suggérer, développer, guider et établir les connexions entre les travailleurs du savoir et les sources de connaissances dont ils ont besoin.

Pour finir, deux aspects de la gestion du savoir sont à souligner. D'une part, contrairement aux technologies de l'information, essentiellement utilisées pour rationaliser, optimiser et réduire les coûts, la gestion du savoir vise à améliorer la productivité des travailleurs du savoir et non à les remplacer. D'autre part, il est probable que son cheminement sera semblable à celui des TI, qui ont tout

d'abord donné lieu à des systèmes spécialisés mis au point pour certains domaines d'activités, avant que n'apparaissent, tout récemment, les premiers réseaux d'entreprise reliant les différents systèmes spécialisés. La même évolution se produira pour la gestion du savoir. Nous aurons besoin d'une multitude de systèmes de soutien (soutien client, service après-vente, assistance aux utilisateurs, soutien technique, etc.). En même temps, il nous faudra attendre que ces systèmes soient intégrés et que l'information ou le savoir circule entre eux pour pouvoir récolter les véritables fruits de cette stratégie, et cela n'est pas pour demain.

7. PERSPECTIVES COMMERCIALES

L'économie fondée sur les TI prendra forme à mesure que les TI évolueront pour créer un monde connecté, reliant les individus aux communautés, les appareils à d'autres appareils, les individus aux appareils, qu'elles donneront naissance à la technologie du savoir et que les interfaces et relations homme-machine se modifieront. Cette dernière section sera consacrée à l'examen de certaines des conséquences qui découleront, pour l'économie des TI et pour l'économie en général, de cette mise en réseau et de la mondialisation qui en résulte.

Une grande partie de l'économie est tributaire des TI. On ne saurait trop souligner, outre ses conséquences techniques, l'importance du rôle joué par « le réseau » ; comme on l'a déjà vu, c'est bien de réseaux et d'ordinateurs, de systèmes ou d'appareils qu'il s'agit. Dans une économie où les communications et le « hardware », ou matériel, deviennent des marchandises, l'abondance engendre l'abondance, contrairement à ce qui se passe dans une économie manufacturière. Le fait que le nombre d'abonnés à AOL augmente confère à ce service une plus grande valeur ; la télécopie n'a de valeur que si ses utilisateurs sont plus nombreux ; et il en est de même pour le courrier électronique, le web, etc. De ce fait, la réussite et la rentabilité ne sont plus réservés qu'aux seuls « gagnants ». Quand on gagne, on gagne gros. Pour survivre, et donc pour tenir les rênes dans cette économie, il faut donc anticiper le moment où il y aura suffisamment de télécopieurs, suffisamment d'abonnés, pour remporter un grand succès. Xerox s'est retiré du marché des télécopieurs, qu'il avait créé, parce qu'il n'existait pas d'infrastructure, pas assez de télécopieurs, et des coûts prohibitifs de rentrée sur le marché. C'est l'effet boule de neige qui explique que « le gagnant rafle tout », et qu'AOL ait dépassé CompuServe. Il est essentiel de prévoir à quel moment le marché se redresse. Dans cette économie, tous les prix baissent, et il faut tenir compte de ce facteur dans les plans d'entreprise. Il importe aussi d'agir aussi vite que possible pour créer de nouveaux produits, car si l'on ne « cannibalise » pas ses propres produits, quelqu'un d'autre le fera. Il s'agit d'une économie de croissance, et non d'optimisation, ce qui nous ramène à l'opposition entre l'éco-

nomie du savoir et l'économie des TI; d'ailleurs le savoir n'est-il pas une affaire de réseau, donc de relations? C'est donc bien une économie tout à fait différente qui s'annonce.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLAIRE, P. (1997), «Managing for Knowledge: The Business Imperative of the 21st Century», *Knowledge in International Corporations*, Carnegie Bosch Institute et Carnegie Mellon University, pp. 6-8.
- ANDERSON, C. (1995), «The Internet – The Accidental Superhighway», *The Economist*, 1 juillet.
- ASOKAN, A., P.A. JANSON, M. STEINER et M. WAIDNER (1997), «The State of the Art in Electronic Payment Systems», *IEEE Computer*, septembre, pp. 28-35.
- BASS, L. et al. (1997), «The Design of a Wearable Computer», *CHI 97*, ACM, pp. 139-146.
- BAUDEL, T. et M. BEAUDOUIN-LAFON (1993), «Charade: Remote Control of Objects Using Free-hand Gestures», *Communications of the ACM*, 36(7), pp. 28-35.
- BELL, G. et J.N. GRAY (1997), «The Revolution Yet To Happen» in P.J. Denning et R.M. Metcalfe (dir. publ.), *Beyond Calculation*, Springer-Verlag.
- BERLIN, A.W. et K. GABRIEL (1997), «Distributed MEMS: New Challenges for Computation», *IEEE Computational Science & Engineering*, janvier-mars, pp. 12-16.
- BIER, E., M.C. STONE, K. FISHKIN, W. BUXTON et T. BAUDEL (1994), «A Taxonomy of See-through Tools», *CHI 94*, ACM, pp. 517-523.
- BOLLIER, D. et C.M. FIRESTONE (1996), *The Future of Electronic Commerce*, The Aspen Institute.
- BROWN, J.S. et P. DUGUID (1995), «The Social Life of Documents», *Release 1.0*, octobre, pp. 1-18.
- BRYZEK, J., K. PETERSEN et W. McCULLY (1994), «Micromachines on the March», *IEEE Spectrum*, mai, pp. 20-31.
- CAIRNCROSS, F. (1995), «Telecommunications, the Death of Distance», *The Economist*, 30 septembre, pp. 5-28.
- CARD, S.K., G.G. ROBERTSON et W. YORK (1996), «The WebBook and the Web Forager: An Information Workspace for the World Wide Web», *CHI 96*, ACM, pp. 111-117.
- DERTOUZOS, M. (1997), *What Will Be*, HarperEdge.
- DYSON, E. (1997), *Release 2.0: A Design for Living in the Digital Age*, Broadway Books, chapitre 2 («Communities»), pp. 31-54.
- EVANS, P.B. et T. WIRSTER (1997), «Strategy and the New Economics of Information», *Harvard Business Review*, septembre-octobre, pp. 71-82.

- FERBER, J. (1995), *Les Systèmes Multi-Agents*, Inter Éditions.
- FUKUMOTO, M. et Y. TONOMURA (1997), «Body Coupled FingerRing: Wireless Wearable Keyboard», *CHI 97*, ACM, pp. 147-154.
- GILDER, G. (1996), «The Gilder Paradigm», *Wired*, décembre, pp. 127-128.
- GROSS, N. (1997), «Into the Wild Frontier», *Business Week*, 23 juin, pp. 72-84.
- HELDMAN, R.K. (1993), *Future Telecommunications, Information Applications, Services & Infrastructure*, McGraw-Hill, New York.
- HINDEN, R.M. (1996), «IP Next Generation – Overview», *Communications of the ACM*, 39 (6), pp. 61-71.
- HUBERMAN, B. (1997), «Storms Brewing on the Internet Horizon», *PC Week*, 13 octobre, pp. 98-100.
- ICHIAH, D. (1996), *L'empire invisible*, Éditions Village Mondial.
- INSTITUTE FOR INFORMATION STUDIES (1996), *The Emerging World of Wireless Communications*, IIS.
- INSTITUTE FOR INFORMATION STUDIES (1997), *The Internet as Paradigm*, IIS.
- JACOBSON, J., C. TURNER, J. ALBERT et P. TSAO (1997), «The Last Book», *IBM Systems Journal*, 36 (3).
- JUDGE, PAUL C. (1997), «Care to Slip into Something More Digital?», *Business Week*, 20 octobre, p. 60.
- KELLY, K. (1997), «New Rules for the New Economy», *Wired*, septembre, pp. 140-196.
- MacINTYRE, B. et S. FEINER (1996), «Future Multimedia User Interfaces», *Multimedia Systems*, 4, pp. 250-268.
- MAKIMOTO, T. (1997), «Market and Technology Outlook in the Year 2000», *IEEE*.
- McINTOSH, S. (1997), «Conquering Semiconductor's Economic Challenge by Increasing Capital Efficiency», *IEEE*.
- MICHALSKI, J. (1995), «What's a Zine», *Release 1.0*, 23 juin.
- NATIONAL ELECTRONICS MANUFACTURING INITIATIVE (1996), *National Electronics Manufacturing Technology Roadmaps*.
- NEGROPONTE, N. (1995), *Being Digital*, Alfred A. Knopf, New York.
- O'DAY, V.L., D.G. BOBROW et M. SHIVELEY (1996), «The Social-Technical Design Circle», ACM Press.
- OFTA [Observatoire français des techniques avancées] (1996), *Nouvelles interfaces hommes-machine*, OFTA.
- O'HARA, K. et A. SELLEN (1997), «A Comparison of Reading Paper and On-line Documents», *CHI 97*, ACM, pp. 335-342.
- PEDERSEN, E.R., K. MCCALL, T. MORAN et F. HALASZ (1993), «Tivoli: An Electronic Whiteboard for Informal Work Group Meetings», *INTERCHI 93*, pp. 509-516.
- PETERS, E. (1996), «Large-Market Applications of MEMS», National Academy of Engineering Symposium on Frontiers of Engineering, National Academy Press.

- PETERSEN, K. (1982), «Silicon as a Mechanical Material», *Proceedings of the IEEE*, 70 (5), pp. 420-457.
- POTTENGER, M., B. EYRE, E. KRUGLICK et G. LIN (1997), «MEMS: The Maturing of a New Technology», *Solid State Technology*, septembre, pp. 89-98.
- RAO, R. (1996), «Quand l'information parle à nos yeux», *La Recherche*, 285, pp. 66-73.
- SEMICONDUCTOR INDUSTRY ASSOCIATION (1997), *The National Technology Roadmap for Semiconductors*.
- TAPSCOTT, D. (1995), *Digital Economy: Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence*, McGraw-Hill, New York.
- TOKORO, M. (1993), «The Society of Objects», Rapport technique SONY CSL, Addendum aux actes de la conférence OOPSLA'93.
- WEISER, M. et J.S. BROWN (1997), «The Coming Age of Calm Technology» in P.J. Deming et R.M. Metcalfe (dir. publ.), *Beyond Calculation*, Springer-Verlag.

BIOTECHNOLOGIE ET GÉNIE GÉNÉTIQUE AU XXI^e SIÈCLE

par

Werner Arber
Biozentrum der Universität Basel
Suisse

Mathis Brauchbar
Locher, Brauchbar & Partner AG
Basel, Suisse

A la veille du XXI^e siècle, la biologie et le génie génétique apparaissent comme les technologies du futur. Ce ne sont pas des sciences nouvelles, mais elles font appel à toutes sortes de stratégies et de méthodes pour étudier et utiliser le matériel héréditaire des êtres vivants et les fonctions biologiques afférentes. Grâce à elles, la science s'enrichit de nouvelles connaissances fondamentales sur les mécanismes de la vie. Ces connaissances peuvent déboucher sur des applications qui profitent à l'humanité. Comme la nouvelle technologie ne date que de quelques décennies, ses possibilités et son potentiel sont loin d'être épuisés, mais il est difficile d'en évaluer l'ampleur et les conséquences. La nouvelle biotechnologie est donc un vecteur de développement technico-scientifique qui en est au début de son cycle de vie technologique et économique. Quant au génie génétique, les scientifiques ont pris conscience très tôt qu'il n'était pas exempt de risques. Les progrès accomplis dans la connaissance des mécanismes de la vie permettent de mieux apprécier ces risques.

INTRODUCTION

Après la naissance de la terre au sein du système solaire il y a environ 4.5 milliards d'années, la vie a probablement commencé à apparaître sous des formes simples il y a 3.5 à 4 milliards d'années. L'évolution biologique a engendré une étonnante diversité d'êtres vivants, depuis les micro-organismes jusqu'aux végétaux et aux animaux supérieurs doués d'aptitudes multiples. L'être humain n'est qu'une espèce parmi quelque 10 millions d'autres toutes différentes. Il est néanmoins le seul à avoir acquis la faculté d'étudier les êtres et

les mécanismes de la vie et de tirer profit de ce savoir. Développer et exploiter la science et la technologie fait partie de l'évolution culturelle de l'homme.

La biotechnologie et le génie génétique* sont aussi les fruits de cette évolution. Ils permettent d'étudier les mécanismes fondamentaux de la vie au niveau des molécules et d'utiliser ces connaissances à des fins industrielles. Ils s'intéressent à un élément essentiel de la vie : la « mémoire génétique » des cellules. Ces informations, qui conditionnent la survie et la multiplication des cellules, peuvent être modifiées. En théorie, les cellules de tous les êtres vivants peuvent être modifiées génétiquement, qu'il s'agisse d'algues, de souris, de bactéries ou de maïs.

Différents êtres vivants jouent un rôle dans des domaines très divers de la vie de l'homme. Ils sont utilisés dans la recherche comme des objets d'étude. Beaucoup d'antibiotiques sont produits par des micro-organismes. La levure sert à brasser la bière et fait lever les pâtes farineuses. Les plantes sont des aliments de base, non seulement pour l'homme, mais aussi pour beaucoup d'animaux de rapport qui nous fournissent de la viande, du lait ou des œufs. Ainsi, partout où il y a des êtres vivants et chaque fois que des êtres sont utiles à l'homme, la nouvelle technologie, donc également le génie génétique, peuvent trouver leur place. Par conséquent, biotechnologie et génie génétique touchent divers secteurs de la vie et, de ce fait, font intervenir des systèmes de valeurs qui peuvent être très différents.

Aujourd'hui, le génie génétique est surtout utilisé en médecine et dans la recherche biologique et biomédicale. Ces dernières années, des processus et des produits génétiques sont cependant apparus également dans l'agriculture et dans la transformation des aliments. Une grande partie des enzymes présents dans les détergents sont d'origine génétique. Le génie génétique intervient également dans la recherche sur les armes biologiques. On peut s'attendre dans les prochaines années à des applications génétiques dans les techniques d'environ-

* Par **biotechnologie**, on entend l'utilisation technique d'organismes ou de parties d'organismes (cellules, protéines, acides nucléiques ou hydrates de carbone). La biotechnologie est donc un terme générique. La **biotechnologie traditionnelle** utilise surtout des organismes naturels et des parties de ces organismes (pour fabriquer de la bière, du pain, du fromage ou des médicaments, par exemple). La **nouvelle biotechnologie** élargit ce terme pour comprendre des méthodes génétiques et biomoléculaires (technique hybridome pour produire des anticorps monoclonaux, par exemple). Le **génie génétique** regroupe toutes les méthodes utilisées pour isoler, caractériser, modifier et transmettre sciemment le matériel héréditaire. Dans la pratique, il est actuellement appliqué principalement dans les domaines de la biotechnologie et de la médecine. Dans les vingt dernières années, il est cependant devenu aussi une méthode incontournable dans la recherche des phénomènes moléculaires intervenant dans les mécanismes de la vie. Le génie génétique est donc utilisé aussi bien dans la recherche fondamentale que dans la biotechnologie industrielle.

nement, dans l'exploitation des espèces utilisées comme matières premières, dans les cosmétiques et dans divers autres secteurs.

Il est cependant difficile d'établir un bilan et de se livrer à des anticipations dans les domaines de la biotechnologie et du génie génétique parce que :

- à l'heure actuelle, on ne peut que formuler des hypothèses sur l'intérêt économique et technique futur de nombreux travaux biotechnologiques et génétiques menés dans le cadre de la recherche fondamentale ;
- les statistiques ne font apparaître jusqu'à présent, ni pour la recherche et le développement, ni pour la production, une démarcation claire entre la biotechnologie traditionnelle (brassage de la bière, par exemple) et la nouvelle biotechnologie et le génie génétique (production de médicaments recombinants) ;
- la démarcation économique entre la biotechnologie et le génie génétique n'est pas aisée non plus : on est en effet en présence de technologies transversales qui n'entrent pas dans un domaine défini d'applications industrielles, mais qui sont l'objet de processus d'innovations dans toute une gamme de secteurs anciens ou nouveaux (en particulier, chimio-pharmacie, agroalimentaire, agriculture, électronique et environnement) ;
- les analyses économiques et les évaluations des potentiels reposent en général sur des délimitations très approximatives et théoriquement insatisfaisantes entre la biotechnologie traditionnelle et la nouvelle biotechnologie (y compris le génie génétique).

En outre, l'exploitation économique de la nouvelle biotechnologie et du génie génétique n'en est qu'à ses débuts. Les extrapolations et les analyses de tendances sont donc difficiles, d'autant que la base de données disponible est encore très fragmentaire, manque d'homogénéité et pose elle-même des problèmes.

La suite de cet exposé va d'abord présenter la genèse et les méthodes de la nouvelle biotechnologie avant de traiter les applications de la biotechnologie et du génie génétique ainsi que leurs possibilités de développement futur. Au stade actuel de la biotechnologie et du génie génétique, le débat sur les risques et la sécurité joue un rôle important. Ces aspects seront donc également évoqués.

GÉNÉTIQUE CLASSIQUE ET MOLÉCULAIRE

La génétique, née il y a un peu plus d'un siècle, repose sur les observations suivantes : les êtres vivants appartenant à une même espèce possèdent globalement les mêmes propriétés, mais ils peuvent se distinguer par des détails. Ainsi, tous les chiens ont des caractères communs bien qu'il existe différentes races

correspondant à différents phénotypes. Lorsque les parents et leurs enfants présentent des caractères communs, c'est que les enfants en ont hérité. La génétique classique étudie les lois naturelles, c'est-à-dire les mécanismes naturels de transmission de l'hérédité.

La recherche a montré que les chromosomes sont les supports de l'information héréditaire. Chez les êtres supérieurs, il se situe dans le noyau cellulaire. La génétique classique s'est d'abord intéressée aux individus qui diffèrent de la norme et qui présentent des formes transmissibles, comme les fleurs aux couleurs anormales. Ces variantes sont dues à une modification de l'information héréditaire (mutations). En croisant des mutants indépendants, les généticiens peuvent déterminer quelle est la partie du chromosome qui est modifiée, ce qui leur permet d'établir des cartes génétiques. Ces cartes leur servent à localiser une propriété ou un gène responsable de cette propriété à l'intérieur d'un chromosome. Ces informations n'apportent cependant aucun renseignement sur la nature chimique de l'hérédité.

Cette énigme a été résolue il y a une cinquantaine d'années. En étudiant des bactéries, on a pu démontrer qu'un acide nucléique était le support du matériel héréditaire à l'intérieur des chromosomes. Cet acide est connu aujourd'hui sous l'abréviation d'ADN. Peu de temps après, Francis Crick et James Watson découvrirent la structure de l'ADN, molécule se présentant sous la forme d'une chaîne spirale double extrêmement longue et très fine. En raison de sa forme, on parle aussi de la « double hélice » pour définir l'ADN. Un gène, c'est-à-dire un caractère héréditaire, correspond à un court segment d'ADN. La découverte de la nature chimique de l'information héréditaire a donné naissance à la génétique moléculaire qui se consacre à l'étude des gènes et de leur activité.

L'INFORMATION HÉRÉDITAIRE ET SES EFFETS

Les molécules contenant le matériel héréditaire ne suffisent pas pour créer la vie. Il faut d'abord lire le message héréditaire sur l'ADN et le traduire dans d'autres « langues ». Ce n'est qu'après son transfert à d'autres molécules biologiques, normalement des protéines, que l'information génétique d'une molécule d'ADN peut produire ses effets. Les protéines sont en quelque sorte des « messagers » entre l'information héréditaire contenue dans les chromosomes et les manifestations de l'organisme. Dans les années 50 et 60, les chercheurs ont découvert la façon dont ce transfert s'effectue à l'intérieur de la cellule. Il est apparu que les mécanismes de traduction du message héréditaire sont identiques pour toutes les espèces d'êtres vivants. La « langue » héréditaire est donc universelle, c'est-à-dire qu'elle est commune à tous les êtres vivants.

Le matériel héréditaire d'une cellule bactérienne comprend plusieurs centaines à plusieurs milliers de gènes selon le type de bactérie. Cependant, pour

qu'une bactérie survive, il ne faut pas que tous ses gènes soient actifs en même temps. Il faut que chaque gène agisse au bon moment. Chez les êtres supérieurs, il en va de même, si ce n'est que la situation est encore plus compliquée. Ainsi, l'être humain possède 50 000 à 100 000 gènes vitaux différents, mais tous ne sont pas actifs dans chaque cellule et ne produisent pas les protéines correspondantes. Il y a une bonne raison à cela : un enzyme digestif, par exemple, a sa place dans les intestins et pas dans le cerveau. Autrement, il serait peu rationnel que les cellules du foie produisent des molécules défensives (anticorps). Chaque type de cellule exprime donc sa propre palette de gènes dont l'activité lui est nécessaire alors que les autres gènes sont au repos. Il est à noter, à cet égard, que chacune des 5×10^{13} cellules du corps d'un être humain adulte possède l'ensemble du message héréditaire, c'est-à-dire du génome humain. On comprend aisément, face à cette extrême complexité, que le corps a absolument besoin de piloter très précisément l'activité des gènes. En général, ce sont des substances spécifiques qui activent et désactivent les gènes requis. Bien souvent, ces substances sont elles-mêmes produites par les gènes.

Mais comment peut-on étudier toutes ces fonctions biologiques et classer les informations héréditaires qui leur sont associées? C'est pour répondre à cette question que de nombreuses stratégies et méthodes de recherche ont été mises au point au cours des trente dernières années. Le génie génétique est au centre de cette recherche. Certains virus et des chromosomes minuscules des bactéries (plasmides) peuvent faire office de vecteurs naturels de l'information héréditaire. Dès les années 50, des spécialistes de génétique microbienne ont constaté que le matériel héréditaire de certains virus et bactéries pouvait se mélanger lorsque ces virus envahissaient les bactéries pour se multiplier. Le matériel héréditaire des virus peut alors s'enrichir d'une partie de celui des bactéries. Les virus servent ensuite de vecteurs d'hérédité. Ils transmettent les gènes bactériens d'une cellule-hôte à une autre. L'information héréditaire ainsi transmise à d'autres bactéries peut se manifester et conférer à la cellule réceptrice des propriétés qu'elle n'avait pas auparavant. Ce mélange naturel de matériel héréditaire de diverses origines a étonné les chercheurs dans un premier temps, mais il s'est confirmé à de multiples reprises depuis lors.

NOUVELLE COMBINAISON DE MATÉRIEL HÉRÉDITAIRE DANS UN TUBE À ESSAI

Les chercheurs américains ont réussi pour la première fois, en 1970, à combiner un segment d'information héréditaire connu avec le patrimoine héréditaire d'un virus dans un tube à essai (*in vitro*). L'ADN introduit dans le virus s'est ensuite multiplié dans les bactéries-hôtes et l'information héréditaire transmise par ce biais s'est manifestée.

Dans les années 70, des spécialistes de biologie moléculaire ont mis au point des méthodes chimiques pour lire précisément la séquence alphabétique des fragments d'ADN sur quelques centaines de segments. Ils ont ainsi réussi à déchiffrer le code héréditaire. La technique de cette analyse séquentielle a été constamment améliorée depuis lors. Aujourd'hui, elle est souvent mécanique. On a pu ainsi déchiffrer l'ensemble du matériel héréditaire des êtres vivants. On connaît aujourd'hui la séquence complète de l'information héréditaire de quelques types différents de bactéries et de la levure du boulanger. La coopération internationale se poursuit activement dans ce domaine et il est permis de penser que dans les dix à vingt prochaines années, on connaîtra la séquence héréditaire complète de l'être humain, mais aussi de nombreux autres organismes.

Cependant, il reste encore énormément à faire. Pour illustrer l'ampleur de la tâche, on peut donner une idée de la dimension des génomes en comparant le nombre d'éléments de construction d'ADN avec le nombre de signes graphiques contenus dans les livres et dans les bibliothèques. Une bactérie du système digestif possède un patrimoine héréditaire comprenant environ 4.7 millions d'éléments de construction, ce qui correspond approximativement au nombre de lettres contenues dans un ouvrage aussi épais que la Bible. Un gène, c'est-à-dire un caractère héréditaire, aurait une longueur comprise entre quelques lignes et deux pages de ce livre. En revanche, le matériel héréditaire diploïde de l'être humain, avec ses 46 chromosomes et environ 6 milliards d'éléments, remplirait une bibliothèque de 1 500 ouvrages.

Les nouvelles combinaisons opérées *in vitro* et la production d'organismes génétiquement modifiés permettent normalement de transplanter un ou quelques gènes, c'est-à-dire d'ajouter une ou quelques pages à la bibliothèque de l'organisme récepteur qui conserve donc la plupart de ses propriétés caractéristiques. Jusqu'à présent, tous les gènes transplantés *in vitro* sont naturels. On n'a encore jamais produit des gènes actifs artificiels qui présentent des caractères inédits.

LES MISSIONS DES GÈNES

Lorsqu'un spécialiste de génétique moléculaire a réussi à décrire la séquence d'ADN du matériel héréditaire d'un organisme, il est encore loin d'avoir fini son travail. En vérité, il ne fait que le commencer. Son objectif est de comprendre les mécanismes de la vie. La séquence des éléments du matériel héréditaire ne donne pas d'information directe sur leur mode d'action. On ne peut connaître immédiatement la fonction d'une séquence d'ADN que si l'on a identifié au préalable, chez un autre être vivant, une séquence quasiment identique correspondant à une propriété biologique déterminée. On peut établir ces

correspondances entre la séquence et la fonction biologique en comparant les bases de données d'ADN.

Bien souvent, pour étudier la fonction d'un gène, il faudra cependant modifier légèrement son message héréditaire. Le gène ainsi modifié est alors introduit dans des cellules vivantes ou des organismes pour étudier son effet. Alors que la génétique classique s'intéressait aux mutations aléatoires, la génétique moléculaire modifie le matériel héréditaire de façon très précise. Elle peut ainsi progresser selon une démarche beaucoup mieux ciblée.

Lorsqu'on étudie un caractère héréditaire chez un animal ou un végétal, on peut se servir du gène modifié pour l'introduire dans des cellules issues de cultures ou dans des organismes entiers. Dans le second cas, la modification génétique est souvent introduite dans le germe des êtres vivants. Parfois, la modification génétique des cellules et du germe donne les mêmes résultats; parfois, les résultats sont différents. On considère normalement que les résultats obtenus sur des organismes entiers sont plus valables que ceux obtenus sur des cultures cellulaires. C'est pourquoi il est souvent indispensable de travailler sur des organismes transgéniques si l'on veut obtenir des résultats fiables dans la recherche des fonctions biologiques héréditaires.

Pour des raisons d'éthique, il est universellement admis que l'on ne procède pas à des modifications génétiques des cellules germinales chez l'être humain. Dans plusieurs pays, il existe une législation qui interdit les interventions génétiques sur le germe de l'être humain. La Convention bioéthique du Conseil de l'Europe interdit elle aussi ces modifications génétiques. Ne serait-ce que pour des raisons scientifiques et techniques, il ne viendrait guère à l'idée d'un chercheur d'étudier les fonctions biologiques héréditaires de l'être humain en modifiant génétiquement son germe parce qu'il faut en général plusieurs générations d'êtres vivants transgéniques pour expliquer des fonctions biologiques. Une expérience sur l'homme prendrait donc plusieurs décennies. Les expériences sur des animaux de laboratoire classiques, comme les souris, sont donc un substitut efficace pour la recherche.

A ce stade de l'exposé, il peut être bon de dresser un bilan succinct : le génie génétique fait intervenir un ensemble de stratégies et de méthodes de recherche qui sont la plupart du temps très ciblées et très parlantes et que nous n'avons pas pu évoquer de façon exhaustive. Ces stratégies et ces méthodes consistent généralement à intervenir de façon ciblée et localisée sur le matériel héréditaire de l'organisme. En ce sens, le génie génétique se distingue radicalement de la génétique classique qui travaille aussi sur des mutants, mais qui ne modifie pas le matériel génétique de façon aussi ciblée. Selon notre définition du génie génétique, la fécondation *in vitro* et le transfert d'embryons dans l'utérus de la femme ne relèvent pas du génie génétique parce qu'elles ne touchent absolu-

ment pas au matériel héréditaire. La sélection classique de plantes et d'animaux ne relèvent pas plus du génie génétique.

EXPLOITATION DES DERNIERS ENSEIGNEMENTS DE LA RECHERCHE

Depuis 1980 environ, l'économie cherche de plus en plus à utiliser les résultats de la recherche fondamentale en génie moléculaire, ce qui a donné un nouvel essor vigoureux à la biotechnologie. On a vu apparaître assez rapidement les premiers médicaments et produits de diagnostic médical issus du génie génétique, comme l'interféron pour traiter certains cancers et des tests de SIDA fiables. Le rythme de ce développement mondial dépend des nouvelles connaissances acquises dans le domaine des processus biologiques. Si les programmes de recherche axés sur le développement d'applications pratiques peuvent, à court terme, déboucher plus rapidement sur des résultats, à plus long terme, les nouvelles applications pratiques dépendent principalement de la recherche fondamentale.

L'introduction de la biotechnologie et du génie génétique en biomédecine constitue en quelque sorte un saut quantitatif. D'un côté, le génie génétique donne une vision approfondie de l'organisme au niveau moléculaire et ouvre de nouvelles possibilités de diagnostic, de prévention, de prédiction pathologique et de traitement. Le diagnostic au niveau de la génétique moléculaire et la thérapie génique entrent dans ce cadre. D'un autre côté, les méthodes de génie génétique permettent de fabriquer des médicaments nouveaux et inédits. La nouvelle biotechnologie contribue ainsi à agir sur la santé des êtres humains non seulement par la voie thérapeutique, mais aussi par des mesures préventives et prédictives ; C'est dans le développement et la production de nouveaux médicaments, de nouveaux diagnostics et de vaccins que la nouvelle biotechnologie exerce le plus d'influence. Dans toutes ces applications, on trouve dès à présent de nouveaux produits d'origine génétique sur le marché. Ainsi, l'érythropoïétine, qui favorise la croissance sanguine, est devenue indispensable pour des dizaines de milliers de personnes souffrant de pathologies rénales. L'interféron alpha est utilisé pour traiter avec succès certaines souffrances d'origine cancéreuse et certaines formes de jaunisse. Le potentiel d'innovation est considérable dans ces domaines : actuellement, à elles seules, les entreprises américaines de biotechnologie sont sur le point de faire homologuer quelque 300 nouveaux médicaments. Dans les années à venir, le génie génétique sera à l'origine d'environ un nouveau médicament sur quatre. Dès à présent, il joue un rôle très important dans la recherche et le développement de nouveaux médicaments.

Le génie génétique a permis de mettre en évidence un certain nombre de gènes responsables de maladies à la suite d'une modification (mutation). Ce diagnostic du matériel héréditaire est surtout effectué lorsque l'on soupçonne

qu'une personne souffre d'une maladie déterminée ou pourrait en être victime. Les maladies héréditaires comme les affections des poumons et des muqueuses par la fibrose kystique peuvent être ainsi décelées, c'est-à-dire diagnostiquées de façon précoce. Cette méthode se caractérise par sa rapidité et sa précision. Le cas échéant, un diagnostic précoce de prédisposition génétique accroît les chances de succès de la prévention ou du traitement.

Le diagnostic du matériel héréditaire permet aussi de déceler les prédispositions à des maladies qui ne se sont pas encore déclarées au moment de l'analyse. Certains examens visent simplement à déterminer si un individu a un risque supérieur à la moyenne de souffrir un jour d'une maladie déterminée comme un cancer du gros intestin, par exemple. Il est vraisemblable que ces examens se multiplieront dans les années et les décennies à venir. Un examen positif, c'est-à-dire qui met en évidence un tel risque, ne signifie absolument pas que cette maladie se déclarera un jour. Un certain nombre de questions essentielles méritent donc réflexion :

- A-t-on le droit de confronter des individus à leur destin génétique, même contre leur gré ?
- Comment peut-on garantir que ces examens ne seront effectués que sur des personnes volontaires et avec leur assentiment ?
- Qui devrait avoir accès à ces informations et dans quel but ?
- Comment peut-on garantir la sécurité des données, y compris pour ces informations ?
- La connaissance de son propre avenir sanitaire est-elle pareillement supportable pour tous les individus ?

Si l'on trouve dès à présent des applications concrètes sous forme de médicaments, de vaccins et de diagnostics sur le marché, l'utilisation de nouvelles méthodes biotechnologiques a encore un caractère essentiellement expérimental pour ce qui est de l'élaboration d'organes artificiels. L'utilisation du génie génétique dans le cadre de la thérapie génique, c'est-à-dire du traitement génétique des cellules de l'organisme, en est elle aussi à un stade précoce et expérimental. Son large spectre d'utilisation, par exemple pour le traitement du cancer ou du SIDA, est aussi peu sûr, à l'heure actuelle, que l'utilisation d'organes d'animaux génétiquement modifiés pour la transplantation (xénotransplantation).

LA GÉNOMIQUE OU COMMENT DONNER UN SENS A L'INFORMATION GÉNÉTIQUE

Le projet « génome humain » est souvent considéré comme le grand projet de la génétique. C'est, il est vrai, une énorme entreprise que de décoder l'ensemble du matériel héréditaire haploïde de l'être humain car il s'agit de

décoder quelque 3 milliards de signes l'un après l'autre. Bien que l'on n'ait décodé qu'environ 1 pour cent de ces données en 1996, ce travail, auquel participent des douzaines d'équipes de recherche dans le monde entier, devrait être achevé d'ici 2005. Le savant américain Eric Lander a comparé cette entreprise avec l'établissement du tableau de classification périodique des éléments chimiques qui a duré de 1869 à 1889. A l'époque, les chimistes ont entrepris de classer les différents éléments par groupes. Aujourd'hui, il ne s'agit pas de 100 éléments chimiques, mais d'environ 100 000 gènes. Ces gènes n'utilisent en réalité qu'environ 5 pour cent du génome. Les autres séquences du matériel héréditaire humain sont peut-être des vestiges de l'histoire de l'évolution et n'ont guère d'intérêt pour l'organisme.

Les gouvernements des pays européens, du Japon et des États-Unis d'Amérique subventionnent le projet « génome humain » à concurrence d'environ 250 millions de dollars par an. La génomique, science qui se consacre à la recherche du matériel héréditaire, est multidisciplinaire. Physiciens et ingénieurs mettent au point des machines pour automatiser et accélérer le décodage du matériel héréditaire. Les spécialistes de biologie moléculaire et les généticiens classent les données et les interprètent. Les informaticiens conçoivent des programmes pour permettre un accès rapide aux données et une comparaison des séquences en temps utile.

La séquence du matériel héréditaire humain – c'est-à-dire la série complète des lettres – et des recherches complémentaires permettront de mieux comprendre le mode de fonctionnement de ces gènes humains; ce n'est pas pour autant que nous pourrions comprendre l'essence même d'un individu. Ce n'est pas la recherche génomique qui nous permettra de percer entièrement le mystère de l'être humain.

En revanche, le projet sur le génome humain revêt une importance essentielle pour l'avenir de l'industrie pharmaceutique car il ouvrira la voie à la compréhension des causes de nombreuses maladies et, par conséquent, à leur thérapie. Sur les quelque 30 000 maladies recensées à l'heure actuelle, nous ne savons en traiter que quelques milliers. Pourtant, 100 à 150 d'entre elles touchent de larges couches de la population. Nombreuses sont celles qui ont une origine génétique et qui font intervenir plusieurs gènes à la fois. Dans le cas de l'hypertension et d'autres affections complexes, on estime que cinq à dix gènes sont concernés.

En médecine, on connaît aujourd'hui un peu plus de 400 cibles différentes pour les thérapies par voie médicamenteuse (enzymes, récepteurs et autres biomolécules qui sont bloquées ou influencées d'une autre manière). La génomique ouvre des horizons entièrement nouveaux pour ces traitements. Le décodage du matériel héréditaire humain et l'analyse des fonctions qui en découlera per-

mettra de découvrir, estime-t-on, 3 000 à 10 000 nouvelles cibles («gene targets»).

Si l'on arrive à identifier de nouvelles cibles génétiques et à comprendre leur mode d'action et leurs interdépendances, on ouvrira la voie à de nouvelles possibilités de traitement thérapeutique, car la complexité de la vie et les phénomènes pathologiques font encore obstacle à cette compréhension.

La génomique débouchera probablement sur une personnalisation des traitements. Il arrive fréquemment que les médicaments ne produisent pas tous leurs effets sur tous les patients. De même, les effets secondaires ne se manifestent que chez certains patients; Ces différences tiennent souvent au matériel héréditaire des personnes traitées. On connaît ainsi différentes variantes de gènes qui font que le corps dégrade plus ou moins rapidement certaines catégories de médicaments. Si la substance médicamenteuse se dégrade lentement, elle reste plus longtemps dans le corps et a donc un effet différent. Ces connaissances permettront de classer génétiquement les patients en fonction de leur réaction probable aux médicaments et, par conséquent, d'optimiser leur traitement.

MALADIES INFECTIEUSES

Le génie génétique peut grandement contribuer à améliorer les traitements non seulement pour les maladies pour lesquelles le matériel génétique du patient joue un rôle, mais aussi pour les maladies infectieuses comme le sida ou le paludisme. Lorsque l'on aura mieux étudié les mécanismes moléculaires à l'origine des pathologies, c'est-à-dire lorsqu'on connaîtra plus précisément les détails de l'interaction entre l'agent pathogène et l'organisme-hôte, on pourra mettre au point de nouvelles formes de traitement. Dès à présent, on trouve sur le marché des médicaments contre le virus HIV du sida qui ont pu être mis au point grâce aux connaissances virales permises par la biologie moléculaire.

En raison de l'utilisation croissante des antibiotiques, on est aussi de plus en plus confronté au problème de la résistance de ces agents pathogènes à ces substances parce que de plus en plus d'agents pathogènes sont insensibles à beaucoup d'antibiotiques. Ce phénomène est particulièrement marqué dans les hôpitaux où les bactéries peuvent survivre malgré des mesures d'hygiène strictes et développer une capacité de résistance. La tuberculose, par exemple, se rencontre à nouveau plus fréquemment, même dans les pays occidentaux. Si elle n'est pas décelée et traitée à temps, elle peut être mortelle. Dans beaucoup de pays du tiers-monde, c'est la principale cause de mortalité. C'est pourquoi l'Organisation mondiale de la santé (OMS) l'a classé en tête des maladies infectieuses les plus dangereuses. Dans les pays industriels, un traitement inadapté ou la

prolifération des bacilles de Koch devenus très résistants à des médicaments autrefois actifs sont les principales causes d'épidémie.

Grâce à leur multiplication rapide et à leur plasticité génétique, les micro-organismes peuvent s'adapter en quelques semaines à un environnement contenant des antibiotiques. C'est donc une course de vitesse entre la recherche pharmaceutique et les agents pathogènes. En étudiant les détails moléculaires des agents pathogènes et leurs interactions avec l'organisme humain, la médecine espère prendre une avance importante dans cette course.

DENRÉES ALIMENTAIRES

A côté de la médecine, la biotechnologie et le génie génétique sont surtout utilisés actuellement dans la production et la transformation de denrées alimentaires. Grâce aux progrès réalisés tout au long de ce siècle, la biotechnologie a atteint un niveau élevé, tant dans la production que dans la transformation des aliments. Elle le doit surtout au développement et à l'utilisation de méthodes biotechnologiques traditionnelles et nouvelles. L'élevage a également bénéficié de techniques de reproduction biologiques qui ont fortement accéléré ce développement. L'insémination artificielle est devenue chose courante depuis de nombreuses années.

Contrairement au secteur de la santé, la nouvelle biotechnologie a ouvert moins de débouchés réellement nouveaux. Le génie génétique n'a pas modifié substantiellement les objectifs de la culture, de l'élevage et de la transformation des aliments. Elle permet néanmoins d'atteindre ces objectifs plus rapidement et plus efficacement. Suivant son champ d'application, la nouvelle biotechnologie a une influence différente sur l'élevage, sur la culture et sur la transformation des aliments.

En ce qui concerne l'élevage d'animaux de rapport, les éleveurs poursuivent deux objectifs principaux : la résistance du bétail aux maladies et l'augmentation du rendement. On a déjà produit des animaux transgéniques qui croissent plus rapidement, qui valorisent mieux les rations alimentaires et qui produisent moins de graisse grâce à l'injection d'hormones de croissance. Il est cependant peu probable que ces animaux génétiquement optimisés puissent se trouver dans nos assiettes dans les prochaines années, tout d'abord parce qu'on note à nouveau une tendance à privilégier une alimentation naturelle et que le génie génétique se heurte à la protection des animaux selon ses applications.

De nombreux sondages le confirment : les transformations génétiques des animaux de rapport ne sont pas souhaitées. Le génie génétique a cependant de l'avenir dans le domaine de la santé animale : des médicaments, des vaccins et des diagnostics d'origine génétique pourraient aider à prévenir et à mieux traiter les maladies chez les animaux.

Après les applications médicales, c'est dans le domaine de la culture végétale que le génie génétique est le plus avancé. Plus de deux douzaines de plantes génétiquement modifiées peuvent être cultivées aujourd'hui dans le monde et ce chiffre est appelé à augmenter considérablement dans les années à venir. Les agriculteurs poursuivent quatre objectifs principaux :

- *Amélioration de la qualité des plantes*, l'objectif étant d'agir sur la composition en substances nutritives ou sur la capacité de conservation. Grâce à une intervention génétique, la célèbre tomate « Flavr-Savr » ne pourrit plus aussi vite que les variétés non traitées.
- *Résistance aux herbicides*. Le Round-up, par exemple, est un produit qui se dégrade rapidement dans le sol et qui présente par conséquent des avantages écologiques par rapport aux autres herbicides. Cependant, des plantes alimentaires comme le soja sont sensibles au Round-up et ont péri quand elles ont été traitées avec ce produit. Du soja transgénique a été doté d'un gène résistant supplémentaire qui lui permet de survivre à un traitement au Round-up.
- *Résistance aux parasites*. Plusieurs pour cent de la production agricole sont perdus parce que les récoltes sont mangées par des parasites qui peuvent être des virus, des champignons ou des insectes. Le génie génétique permet à ces plantes de résister aux parasites. Grâce à ces améliorations génétiques, le maïs est protégé contre la pyrale et la pomme de terre contre certains virus.
- *Modification des propriétés agronomiques*. Afin de développer les possibilités de culture et exploiter des terrains qui ne se prêtaient pas précédemment à l'agriculture, les chercheurs agronomes ont recours au génie génétique pour produire des plantes capables de pousser sur des sols à forte salinité ou dans des zones arides ou chaudes.

Les premières expériences de plantes transgéniques comme le maïs, le soja ou le colza montrent que ces nouvelles variétés sont supérieures aux variétés naturelles. L'industrie agroalimentaire compte que la vente de semences génétiquement modifiées enregistrera dans les prochaines années des taux de croissance de 40 pour cent par an. Il est donc permis de penser que d'ici quelques décennies, chaque semence distribuée à grande échelle aura subi l'influence du génie génétique, qu'elle soit elle-même génétiquement modifiée ou qu'elle soit obtenue par des méthodes génétiques de sélection végétale.

Dès à présent, l'industrie de la transformation des aliments utilise souvent des méthodes très évoluées de biotechnologie traditionnelle. Il s'agit surtout de processus microbiologiques contrôlés et du recours à des enzymes industriels et à d'autres additifs d'origine microbienne (vitamines, antioxydants, édulcorants, etc.). C'est ainsi que la chymosine, enzyme de laboratoire, permet de produire du

lait caillé dont la maturation s'obtient grâce à l'addition de bactéries spéciales. Dans les dix dernières années, de nombreux enzymes d'origine génétique destinés à la transformation des aliments sont apparus sur le marché. Certains additifs ou édulcorants comme les vitamines ou l'aspartame sont fabriqués à partir de micro-organismes génétiquement modifiés. Dans les prochaines années, la nouvelle biotechnologie devrait jouer plus particulièrement un rôle dans la fabrication et le développement d'enzymes industriels et d'additifs.

A l'heure actuelle, des laboratoires et des unités pilotes étudient et développent des bactéries génétiquement modifiées destinées à la transformation d'aliments (yaourts, fromages, kéfir, etc.). Ces bactéries peuvent, par exemple, se protéger contre une infection virale, développer l'arôme de la fraise dans le yaourt, accélérer l'affinage du fromage ou fermenter les bières légères. Ces applications dépendent grandement de l'accueil que leur réservent les consommateurs. On ne peut pas savoir, à l'heure actuelle, dans quelle mesure les organismes génétiquement modifiés pourront être utilisés dans la transformation des aliments.

La caractérisation des aliments obtenue à l'aide du génie génétique joue un rôle important dans l'intérêt que peuvent leur porter les consommateurs. Elle apporte la transparence, d'une part, et autorise des choix, d'autre part. Elle est donc réclamée par la grande majorité des consommateurs européens. On ne sait pas encore la forme que prendra cette caractérisation car il est probable que le génie génétique touchera d'une manière ou d'une autre presque tous les aliments d'ici quelques années.

MATIÈRES PREMIÈRES ET ENVIRONNEMENT

Au cours de la dernière décennie, la protection de l'environnement est devenue un thème majeur. La biotechnologie, directement ou en combinaison avec des méthodes physiques et chimiques, offre des amorces de solutions pour un grand nombre de problèmes environnementaux. Elle ouvre de nouvelles possibilités de production d'énergie et de matières premières, ainsi que de traitement et de valorisation des déchets. En vérité, les méthodes biotechnologiques n'ont été que rarement utilisées, comme dans le cas de l'épuration des eaux usées et de la contamination des sols, pour traiter les problèmes environnementaux. Des études prospectives prédisent néanmoins que le marché mondial de l'environnement devrait offrir des perspectives lucratives aux applications biotechnologiques.

Depuis des décennies, les techniques environnementales et la biotechnologie environnementale développent et perfectionnent les méthodes de traitement des déchets, des effluents liquides et des effluents gazeux, ainsi que les méthodes de décontamination des sols et des eaux souterraines. La complexité

technologique de ces méthodes, leur coût, de même que la grande superficie qu'elles exigent, fixent des limites claires à ces techniques de dépollution. Il est donc souhaitable, dans l'avenir, pour des raisons écologiques, mais aussi macroéconomiques, de remplacer davantage ou tout au moins de compléter fortement les techniques de réparation (« techniques d'aval ») par des techniques de prévention. Dans ce cadre, il faut s'efforcer d'éviter les déchets ou d'en réduire au minimum le volume au stade de la production. Les techniques environnementales se voient donc attribuer de nouvelles missions comme le développement de nouveaux produits compatibles avec l'environnement et totalement ou partiellement exempts de déchets ou bien de nouvelles méthodes écologiques de valorisation des sous-produits et des déchets.

A l'instar des secteurs de la santé, de l'agriculture et de l'alimentation, la technique environnementale est de plus en plus confrontée à l'utilisation de micro-organismes génétiquement optimisés parce que les méthodes traditionnelles et les populations mixtes permettent rarement d'atteindre les rendements souhaités. Les méthodes classiques de dépollution comme les stations d'épuration, les biofiltres ou le compostage se servent des cultures mixtes microbiennes naturellement enrichies pour minéraliser les polluants. Les connaissances fragmentaires sur les principes biologiques de ces méthodes en limitent les performances et les possibilités de perfectionnement technique. Les interactions écologiques entre la multitude des micro-organismes et des organismes supérieurs, de même que les fondements biochimiques, biomoléculaires et génétiques des séquences de réaction les plus complexes demeurent insuffisamment connus.

On ne peut espérer d'amélioration génétique de ces systèmes complexes avant un certain temps parce qu'on ne connaît pas parfaitement les différentes réactions de dégradation qui sont codées par de nombreux gènes souvent inconnus. Les expériences à l'aide de « spécialistes recombinants » se limitent donc actuellement à des cultures et à des essais en laboratoire. Ces spécialistes génétiquement optimisés sont la plupart du temps défaillants en situation réelle dans une station d'épuration ou dans un sol contaminé. L'amélioration génétique axée sur la dégradation d'un polluant spécifique ne suffit pas pour que ces spécialistes survivent dans l'écosystème naturel où s'exerce la concurrence. De plus, dans les cultures mixtes, les micro-organismes recombinants qui survivent perdent souvent les propriétés acquises génétiquement après quelques générations.

Il n'existe donc pas, pour l'heure, d'application pratique des organismes recombinants dans les techniques biologiques classiques de décontamination et il est assez peu probable que ce soit le cas dans un prochain avenir. Les possibilités encore considérables d'adaptation des micro-organismes par une adaptation ciblée et un transfert génétique naturel sont un moyen spécifique et efficace pour améliorer les souches dans le cadre des méthodes classiques. L'énorme capacité

d'adaptation des micro-organismes aux nouvelles conditions du milieu sert de référence. Dans la nature, on trouve des écosystèmes qui se sont adaptés de façon optimale partout où ils disposaient de suffisamment de temps à cet effet.

ARMES BIOLOGIQUES

Le génie génétique est également utilisé dans les laboratoires militaires qui étudient et développent des agents de combat biologiques ou testent des stratégies de défense (vaccination, par exemple). Les micro-organismes, qui sont déjà connus comme armes biologiques à l'exemple de l'anthrax qui provoque la maladie du charbon, constituent les principaux agents de combat biologiques. On ne sait naturellement que peu de choses sur ces recherches. Comme dans le cas des technologies de l'environnement, on ne peut pas escompter, pour les armes biologiques, que le génie génétique soit « meilleur » que la nature. Le génie génétique pourra difficilement créer des micro-organismes encore plus dangereux, plus infectieux et plus agressifs que ceux que la nature nous a déjà donnés. On peut cependant concevoir que des méthodes génétiques puissent conférer une plus grande résistance aux agents pathogènes et les rendre ainsi aptes à des applications militaires afin qu'ils survivent, par exemple, à l'explosion d'une bombe.

BIOÉLECTRONIQUE ET NEUROINFORMATIQUE

Le terme bioélectronique définit la recherche relative à l'analyse, la production, la transmission et le stockage de signaux dans des systèmes biologiques, ainsi que l'utilisation de ses enseignements pour développer des biocapteurs et d'autres composants bioélectroniques susceptibles d'être utilisés, par exemple, pour fabriquer des ordinateurs totalement inédits (biopuces, par exemple). La bioélectronique est donc une science relativement jeune et interdisciplinaire à l'interface de la (bio)chimie, de la (bio)physique, de la biologie moléculaire, de la biotechnologie, de la nanotechnologie et de la microélectronique.

La neuroinformatique est une discipline technique née de l'interaction entre la neurobiologie et l'informatique. Ces principaux centres d'intérêt sont l'étude théorique et expérimentale du traitement de l'information dans le système nerveux central et les applications biotechnologiques d'intégration de composants électroniques et de structures neuronales. La neuroinformatique est un domaine de recherche interdisciplinaire qui intéresse les neurosciences, l'informatique, la microélectronique et la biotechnologie.

La bioélectronique et la neuroinformatique recèlent assurément un énorme potentiel d'innovation scientifique et technique. Toutefois, étant donné que ces disciplines en sont à un stade très précoce de leur développement, toute affirmation relative à leur avenir en matière d'innovation technique ou d'impor-

tance économique relève de la spéculation. Pour l'heure, il n'existe que quelques ébauches d'applications parvenues à maturité. Presque toutes les activités peuvent être imputées à la recherche fondamentale. La bioélectronique et la neuroinformatique ne sont pas mentionnées dans beaucoup d'études sur la biotechnologie, vraisemblablement parce que ces disciplines ne sont pas encore très développées et ne sont guère considérées comme faisant partie de la biotechnologie. Néanmoins, ce domaine de recherche suscite un grand intérêt en raison de son potentiel d'innovation considérable.

Les biocapteurs reposent sur le couplage direct d'un composant biologiquement actif, l'émetteur ou transmetteur du signal, et d'un convertisseur ou transducteur de signal. C'est le phénomène de détection biologique qui détermine la sélectivité d'un biocapteur pour un élément donné. Les domaines d'application actuels et futurs des biocapteurs sont la médecine, au niveau du diagnostic et du contrôle, l'analyse de l'environnement et des aliments, ainsi que le contrôle biologique des processus.

La neurobiologie et l'informatique (traitement automatique d'informations) ont enregistré des progrès remarquables dans les dernières décennies. L'ordinateur et les « systèmes intelligents » sont omniprésents dans la société, la technique et la science. Dans le domaine de l'informatique, les systèmes parallèles, les algorithmes et les tentatives visant à reproduire le mieux possible les habitudes humaines à travers des solutions techniques en robotique, dans les sciences de l'image et dans les systèmes experts constituent de grands défis intellectuels fascinants.

Les neurosciences visent, dans un cadre interdisciplinaire relevant des sciences naturelles, à comprendre la structure et le fonctionnement des systèmes nerveux. Elles ont des liens traditionnels très étroits avec la médecine et les sciences naturelles. L'explosion des publications innovantes, la « Decade of the Brain » aux États-Unis et le « Human Frontier Science Programm » (HFSP) en neurobiologie montrent que les neurosciences focalisent l'intérêt. Le grand défi consiste à assimiler l'immense savoir rapidement croissant sur les structures du traitement de l'information, à comprendre le fonctionnement de ces structures aux différents niveaux en élaborant des théories quantitatives et à les mettre en relation.

Bien qu'elles aient beaucoup de points communs, les neurosciences et l'informatique ne partageaient guère leurs expériences respectives dans le passé. Les raisons sont multiples : les spécialistes d'un domaine n'avaient pas une connaissance suffisante des problèmes et des possibilités de solutions étudiées par les spécialistes de l'autre domaine. En outre, les « critères de sélection » sont très différents dans les deux domaines. Alors que l'informatique privilégie la logique et l'efficacité, les neurosciences, en particulier dans les applications médicales, doivent comprendre les produits de l'évolution. Même lorsque les

informaticiens s'intéressaient aux fonctions cervicales dans le cadre de « l'intelligence artificielle », les objectifs des deux domaines différaient considérablement. Pour l'intelligence artificielle, les informaticiens se satisfaisaient de déterminer les algorithmes mathématiques correspondant aux fonctions cervicales alors que de leur côté les neuroscientifiques s'intéressaient souvent davantage aux structures biologiques et considéraient que l'étude des algorithmes était prématurée.

Toutefois, le fossé entre la neurobiologie et l'informatique se réduit :

- Premièrement, dans les sciences informatiques, le parallélisme fin des « réseaux neuronaux artificiels » analogiques acquiert de l'importance en tant qu'alternative théoriquement et techniquement intéressante au parallélisme « grossier » des ordinateurs numériques.
- Deuxièmement, l'accès à des postes de travail rapides et peu coûteux et à des microprocesseurs très performants constitue une autre raison importante pour rapprocher les neurosciences et l'informatique.
- Troisièmement, on voit poindre entre les neurosciences, la nanotechnologie et l'informatique des applications communes fascinantes dans le domaine de la biotechnologie et dans l'interaction entre les microprocesseurs et le système nerveux : on a déjà testé avec succès des prothèses neuronales pour remédier à des carences de la fonction auditive, les signaux acoustiques étant transmis au cerveau en stimulant le nerf auditif. Pareillement, on peut provoquer une activité motrice en stimulant les muscles et on peut envoyer aux nerfs périphériques des signaux sensoriels qui sont « décodés » au moyen de programmes informatiques adaptatifs. En intégrant ces composants dans un instrument de contrôle sensorimoteur qui pourrait être implanté comme un stimulateur cardiaque avec un taux de fiabilité des branchements suffisant, on pourrait créer une prothèse « intelligente » pour les paraplégiques.

Les ordinateurs actuels reposent sur la technologie des puces au silicium. Les mémoires n'ayant pas une capacité infinie, le développement de puces plus petites et plus performantes se heurte à des limites naturelles qui devraient être atteintes dans un proche avenir. Dans les conceptions futuristes, ce sont des (bio)molécules qui serviront de composants électroniques aux ordinateurs. Les biopuces résulteront de l'organisation automatique des composants électroniques moléculaires, tout d'abord en structures bidimensionnelles qui seront ensuite constituées en réseaux de structures moléculaires tridimensionnelles. A l'heure actuelle, les biopuces ne sont que des concepts imaginaires intéressants.

LE DÉBAT SUR LE RISQUE ET LES GRANDES ORIENTATIONS EN MATIÈRE DE SÉCURITÉ

Ce sont les chercheurs qui, au début des années 70, peu après les premières expériences de combinaison de gènes *in vitro*, ont évoqué les risques susceptibles d'être engendrés par le génie génétique. Une partie des chercheurs qui ont participé à ce débat utilisaient des stratégies génétiques pour découvrir les propriétés des virus cancérogènes. Il fallait donc éviter que les chercheurs ne s'infectent eux-mêmes avec des gènes pouvant déclencher des cancers. Le débat sur le risque associé au génie génétique s'est donc surtout cristallisé, les premières années, sur la sécurité du travail.

Aujourd'hui, la sécurité s'intéresse davantage aux applications économiques du génie génétique. Le débat sur les risques porte, d'une part, sur les microbes génétiquement modifiés et, d'autre part, sur les plantes. On craint surtout les effets sur la santé de l'homme (infections, tumeurs, allergies, empoisonnements, résistance accrue des agents pathogènes aux antibiotiques) et sur l'environnement (apparition de nouvelles mauvaises herbes, élimination d'autres espèces d'un écosystème, mise à mal de la biodiversité, empoisonnement d'animaux).

Toutes les nations qui effectuaient de la recherche médicale de pointe ont participé au débat sur les risques dès le début, mais ce débat a surtout eu lieu aux États-Unis où la conférence Asilomar s'est déroulée en février 1975. A cette conférence, qui est devenue entre-temps légendaire, les participants ont distingué deux types de risque principaux : d'une part, des effets pathogènes éventuels pour les chercheurs et leur environnement et, d'autre part, l'incertitude à long terme sur les réactions de l'environnement à la libération d'organismes au génome génétiquement modifié. Afin de prévenir ces risques, la communauté scientifique a élaboré des lignes directrices dont le respect était obligatoire dans le cadre des activités de génie génétique. Ce sont surtout la Grande-Bretagne et les États-Unis qui ont montré la voie, puis ces lignes directrices ont été rapidement harmonisées à l'échelle internationale. Cette phase d'autocontrôle et d'autoréglementation de la communauté scientifique a été suivie, dans les années 80 et 90, par la création d'une législation correspondante dans de nombreux pays.

La plupart des nations qui utilisent les techniques de génie génétique ont édicté entre-temps des dispositions juridiques spéciales qui sont largement harmonisées à l'échelle internationale. C'est ainsi que les plantes génétiquement modifiées doivent être expérimentées d'abord en laboratoire, puis en serre et enfin, après accord des pouvoirs publics, en champ libre. Ces plantes sont aujourd'hui mieux étudiées que les variétés non traitées en raison d'une série de craintes, comme le fait que des gènes introduits artificiellement puissent se

transmettre spontanément à d'autres plantes dans la nature et provoquer des dommages écologiques.

Bien que les chercheurs aient pu démontrer par des essais en champ que ces gènes peuvent effectivement être transmis à d'autres plantes, les plantes transgéniques n'ont provoqué aucun dommage jusqu'à présent. La transmission de gènes d'une plante à une autre obéit à une loi naturelle qui s'applique aussi bien aux gènes classiques qu'aux gènes introduits artificiellement. Il n'y a pas non plus jusqu'ici de preuve établie qu'une plante transgénique produise des substances toxiques ou déclenche des allergies imprévues.

D'un point de vue biologique, les aliments fournissent à l'homme les acides aminés, les vitamines et autres composés organiques essentiels dont il a besoin, mais aussi l'énergie et les composants chimiques fondamentaux pour son métabolisme. Le génie génétique ne change rien à cela. Dans le cas des acides aminés, qui sont les constituants fondamentaux des protéines, l'organisme humain n'est en mesure d'en reconstituer que la moitié. L'homme doit se procurer les autres acides aminés, appelés essentiels, en décomposant les protéines contenues dans sa nourriture. Les protéines génétiquement modifiées se composent exactement des mêmes vingt acides aminés que les protéines naturelles. Elles ne créent donc aucun risque nouveau.

Si aucun dommage n'a été enregistré jusqu'à présent, cela ne signifie pas qu'on est à l'abri de tout risque. Les plantes transgéniques n'étant sur le marché que depuis quelques années, on n'a pas encore assez de recul pour apprécier les conséquences de leur culture et de leur consommation sur une longue durée. Il se peut que des dommages écologiques surviennent dans dix, vingt ou trente ans seulement. Des études à long terme sont donc effectuées dans le monde entier pour observer les plantes alimentaires transgéniques.

Pour les chercheurs travaillant en laboratoire, il n'y a pas plus de raison de relâcher l'attention. Conscients de leurs responsabilités, les chercheurs estiment qu'il faut continuer à imaginer tous les risques envisageables pour l'ensemble des projets de recherche, qu'il faut prendre toutes les mesures qui s'imposent et qu'il faut respecter les lignes directrices obligatoires. De manière générale, on peut néanmoins penser que l'introduction d'un gène bien connu dans une plante alimentaire bien étudiée devrait présenter moins de risques écologiques que l'introduction d'une plante provenant de l'écosystème d'un autre continent, comme cela se pratique depuis des siècles avec de multiples plantes alimentaires et décoratives. Il y a dix ans, le débat sur les risques se concentrait encore sur les questions techniques de sécurité. Aujourd'hui, on met davantage l'accent sur les questions sociales, politiques et morales liées au développement du génie génétique dans notre société. C'est pourquoi la nouvelle biotechnologie a souvent fait l'objet, ces dernières années, d'études consistant à en évaluer les conséquences («technology assessment»). Ces études visent non seulement à

appréhender les effets d'une technologie du point de vue économique et technique, mais aussi, en faisant appel à des méthodes multiples, à donner une idée générale des répercussions d'un développement technologique et, par conséquent, à fournir les éléments qui aideront à la prise de décisions politiques et économiques. Dans la plupart des pays industrialisés, l'évaluation des effets d'une technologie donnée semble s'imposer comme un instrument pour conseiller les politiques et façonner l'avenir technologique. L'évaluation des risques occupera une place importante dans ce cadre, mais elle perdra le rôle central qu'elle jouait auparavant lors de l'apparition d'une nouvelle technologie.

VUE ÉLARGIE DU MONDE

La génétique moléculaire et le génie génétique qui en est issu donnent une nouvelle impulsion essentielle pour mieux comprendre les fonctions vitales et ouvrent des possibilités d'application dans l'intérêt de l'humanité. Selon beaucoup de scientifiques, une meilleure connaissance des mécanismes de la vie entraîne aussi un plus grand respect de la vie qui peut conduire à son tour à nous sensibiliser davantage à nos responsabilités à l'égard de la nature. Le génie génétique nous aide à mieux nous comprendre nous-mêmes et à mieux comprendre notre environnement, ce qui est la synthèse de l'évolution culturelle de l'humanité et de l'évolution biologique. Beaucoup de principes expérimentaux du génie génétique imitent en quelque sorte une étape de l'évolution lente des êtres vivants. Les conséquences éventuelles de chaque étape doivent être évaluées. La compréhension des phénomènes moléculaires qui sont mis en œuvre au cours de l'évolution biologique peut nous être très utile à cet effet.

Les études de l'évolution biologique à l'aide du génie génétique montrent qu'un grand nombre de gènes spécifiques sont des éléments moteurs de l'évolution, mais également que ces gènes ne peuvent pas en déterminer le sens. Cette assertion peut sembler contradictoire, mais un examen minutieux que ces gènes ne guident pas mécaniquement des fonctions vitales. Au contraire, ils agissent avec beaucoup de souplesse. Ils sont souvent en dialogue permanent avec les influences du milieu environnant – fait qui surprend beaucoup de biochimistes et de biologistes moléculaires. Si nous étions plus conscients de ces faits, cela contribuerait certainement à apaiser nos craintes des risques liés au génie génétique, car il s'agit finalement d'utiliser le génie génétique pour en faire profiter notre civilisation et pour ménager notre environnement aussi bien animé qu'inanimé.

ÉVOLUTION TECHNIQUE ET CHANGEMENT ORGANISATIONNEL : DES STRUCTURES D'INNOVATION DIVERGENTES

par

Meinolf Dierkes, Jeanette Hofmann et Lutz Marz
Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung (WZB)
Allemagne

CRISE DE MODERNITÉ, TECHNOLOGIE ET PROGRÈS

Si l'avenir se situe de plus en plus au cœur des débats des pays industrialisés avancés, il ne faut pas en chercher uniquement la raison dans le changement de millénaire proche, et lourd de symboles. L'intérêt croissant pour les promesses que l'avenir tient en réserve est moins imputable au chiffre 2000 et à la transition vers le *xxi^e* siècle qu'à la crise généralisée et profonde que traversent actuellement les sociétés modernes.

Durant les décennies qui ont suivi la Seconde Guerre mondiale, que l'on évoque de plus en plus souvent comme « l'âge d'or » (Glyn, Hughes, Lipietz et Singh, 1990) ou les « trente glorieuses » (Fourastié, 1979), la population de la plupart de ces pays a été encline à considérer la prospérité et la stabilité exceptionnelles de l'époque comme un état naturel et permanent du système socio-économique. Dans un monde marqué par le mode de vie américain, le miracle économique allemand et le modèle suédois « Folkhem », on a d'abord interprété les signes du déclin de l'âge d'or de l'Allemagne de l'Ouest, qui se sont multipliés depuis la fin des années 1960, comme des aberrations épisodiques auxquelles il serait toujours possible de remédier. L'effondrement du socialisme à la fin des années 1980 a apparemment conforté ce point de vue, amenant certains observateurs, comme Francis Fukuyama pour n'en citer qu'un, à déclarer que cet état nouveau était non seulement durable mais immuable, et à annoncer la « fin de l'histoire » (Fukuyama, 1992; pour une critique de cette thèse, voir Derrida, 1996).

Cependant, de nombreux signes indiquent aujourd'hui que les années glorieuses sont peut-être révolues, tout au moins pour l'heure, et qu'une période

difficile s'installe. Les sciences sociales décrivent diversement cette situation en la qualifiant de « grande crise » (Boyer, 1986, pp. 226-234), de « crise de forme » (Altvater, 1991), de « crise de paradigme » (Dierkes, 1997, pp. 47-48), de « crise de la société active » (Offe, 1984, p. 7), de « crise de l'organisation du modernisme » (Wagner, 1995) et de « crise de l'État providence » (Dierkes et Zimmermann, 1996). Deux certitudes se dégagent clairement et de façon répétée de ces différentes analyses. Premièrement, la crise – telle qu'elle a été diagnostiquée – revêt un caractère à la fois fondamental et durable, et il est impossible à ce jour de prévoir son évolution et son dénouement futurs. Deuxièmement, la crise touche l'ensemble des institutions de la société, des organisations professionnelles, syndicats, associations et fédérations à l'État, aux partis politiques, et aux universités. Si cette appréciation est juste, les organisations doivent se préparer à traverser une période prolongée de turbulences, de nature à remettre en cause leur raison d'être même (Baecker, 1997).

En ce qui concerne les organisations, cette crise embryonnaire se fait sentir sur trois plans différents mais de plus en plus interdépendants. D'une part, la transformation de l'environnement des organisations les contraint à s'adapter pour survivre (Dierkes, 1994). D'autre part, la crise frappe aussi au cœur des organisations. Elle ne les contourne pas mais les traverse. En d'autres termes, la crise détruit aussi généralement les espaces organisés, même si ce n'est pas toujours avec une gravité et une ampleur identiques d'un cas à l'autre (Dierkes et Marz, 1988). Enfin, la crise actuelle entraîne une dégradation, et dans de nombreux cas la disparition consécutive, des conventions d'apprentissage de chaque organisation, c'est-à-dire du consensus interne éprouvé par le temps sur ce que les membres de l'organisation doivent apprendre pour faire face à un environnement nouveau et profondément bouleversé et sur les moyens à mettre en œuvre à cette fin (Dierkes et Marz, 1988).

Il n'est donc pas étonnant que de nombreux individus et groupes aient aujourd'hui le sentiment que l'avenir est beaucoup plus incertain que ce n'était le cas il y a une décennie ou deux à peine. Une bonne partie de ce que l'on tenait alors généralement comme une impossibilité technique, sociale ou politique, voire même pour de la science fiction, fait aujourd'hui partie du quotidien. Nombreux sont ceux qui s'inquiètent de l'évolution de leurs environnements professionnels et de leurs vies quotidiennes dans les années à venir. D'autre part, la question du changement technique et de ses répercussions probables ne cesse de revenir dans ce discours complexe sur le futur.

On peut s'étonner cependant, du moins dans la perspective des sciences sociales, que de nombreux débats pâtiennent d'une théorie erronée classique que l'on croyait généralement éradiquée, à savoir la conviction affichée ou implicite que le changement technique en fin de compte détermine, masque et domine le changement social. Le concept du retard culturel, qui veut que les systèmes

sociaux aient besoin de temps pour s'adapter aux évolutions technologiques, n'est que l'exemple le plus ancien et le plus marquant de cette thèse.

Cette perception de la relation entre évolution technique et changement organisationnel s'exprime aussi de multiples autres façons, parfois spectaculaires, comme c'est manifestement le cas des scénarios élaborés par le spécialiste américain de la robotique Hans Moravec dans son ouvrage « *Mind Children* » (1990). Moravec annonce une « relève génétique de la garde » (p. 13) dans les trente premières années du ^{XXI}^e siècle, une transition au cours de laquelle l'évolution sera dissociée de ses fondements biologiques à mesure que les ordinateurs libéreront l'esprit humain de ses « enveloppes charnelles » protéiformes (p. 163) en lui donnant l'immortalité des machines. Bien entendu ces incursions de l'imaginaire inspirent moins les scénarios sérieux, scientifiquement fondés que des films de science-fiction comme « *The Terminator* » de James Cameron ou « *Robocop* » de Paul Verhoeven, dans lequel des humanoïdes sont parvenus à vaincre le sentiment de la peur. Ce type de prophéties suscite néanmoins un intérêt parfois tout à fait notable, même parmi les spécialistes. En Allemagne, par exemple, le livre de Moravec a agité pendant plusieurs années les débats interdisciplinaires entre les scientifiques spécialisés dans les sciences naturelles, sociales et techniques qui se sont intéressés aux répercussions sur la société de l'intelligence artificielle (Marz, 1993a, b).

Mais le déterminisme technologique ne se limite pas à des cas extrêmes où il revêt des formes imaginées. Il se manifeste habituellement de manière beaucoup plus subtile et influence souvent la pensée des individus sans que ceux-ci en aient toujours conscience. Ainsi, qualifier l'essor des technologies de l'information et des communications de « révolution numérique » (Coy, 1994) et parler d'un « Faust numérique » (Bolter, 1990) est peut être incisif et accrocheur, mais des expressions de ce type peuvent facilement occulter les interactions complexes entre évolution technique et changement organisationnel. Elles donnent l'impression subliminale et souvent involontaire que la numérisation en soi est le moteur de tout changement. Or, des évolutions comme les « documents hypermédias » (Coy, 1994), « les réseaux informatiques ouverts » (Helmert, Hoffmann et Hofmann, 1996a) et le « cyberspace » (Rheingold, 1992) ainsi que des concepts connexes forts comme « la simulation de l'univers » (Grassmuck, 1995) montrent qu'il est impossible de rendre compte des caractéristiques et des directions spécifiques du changement par quelques formules séduisantes évoquant la numérisation.

Des notions comme « l'organisation virtuelle » illustrent aussi avec force ce point de vue. Les réseaux informatiques mondiaux permettent déjà aux entreprises de relier tous les aspects touchant au calendrier, à la matière et à la diffusion des processus de développement des produits dispersés sur l'ensemble de la planète. Non seulement ces réseaux offrent un système pour acheminer

les données, mais ils permettent aussi de créer un espace virtuel où des biens et des services sont proposés et échangés à l'échelle du globe, et dans lequel des individus éloignés physiquement par de grandes distances sont en mesure d'interagir et de communiquer les uns avec les autres en temps réel, instaurant de nouvelles formes de coopération au sein des organisations et entre elles. L'exploitation du potentiel de développement ne relève pas simplement d'une question de numérisation. Les réseaux de transmission de données à large bande, les ordinateurs à débit élevé et autres technologies choisies sont bien évidemment indispensables mais en aucune façon suffisants si l'on veut mettre en place et maintenir effectivement une organisation virtuelle.

En résumé, on considère que les débouchés techniques découlant des résultats de la recherche fondamentale indépendante et guidée par la curiosité dans le domaine des sciences naturelles sont des facteurs qui déterminent le contexte social et environnemental – et c'est ce point de vue qui a façonné notre concept d'évaluation technologique. Il s'agit d'examiner toutes les répercussions possibles des technologies aux niveaux social, écologique, culturel, économique et politique, l'objectif final étant de limiter les incidences négatives et de maximiser les retombées jugées souhaitables. Une grande part de la recherche mondiale menée dans ce contexte s'est révélée utile aux décideurs chargés de gérer les répercussions des nouvelles technologies. Cependant, ces études ont pour la plupart été réalisées trop tardivement pour influencer de façon sensible sur la technologie examinée. Aussi a-t-il fallu accepter l'essentiel des répercussions négatives, ou au mieux en atténuer légèrement les effets. On s'est donc efforcé, au cours de la dernière décennie, de dépasser le déterminisme technologique pur. Des initiatives sont en cours pour améliorer la compréhension des technologies nouvelles, dans l'espoir d'infléchir le processus même d'évolution technologique, de préférence dans la phase précoce de la gestation.

Il va toutefois sans dire que les interactions entre l'évolution technique et le changement organisationnel empêchent toute compréhension si l'on se contente de substituer un concept erroné à un autre, ou si l'on remplace le déterminisme technologique par une quelconque forme de déterminisme social dans lequel les relations de cause à effet ou la relative domination de l'un ou de l'autre élément sont simplement inversés. En définitive, ces formes de déterminisme se réduisent à la question familière et stérile «de l'œuf et de la poule». Les études relatives aux grands systèmes techniques (Joerges, 1993; Mayntz, 1993) et aux théories des réseaux acteurs (Akrich, 1992; Callon, 1991; Law, 1992) ont montré de façon de plus en plus nette qu'une thèse ne parviendra pas à appréhender correctement la dynamique spécifique de l'évolution en cours, et aboutira simplement à un certain nombre de paradoxes fondamentaux et à des méthodes d'explication insuffisantes, si elle présente les aspects sociaux et techniques de cette évolution uniquement, ou même essentiellement, comme des sphères

d'action indépendantes plus ou moins opposées les unes aux autres (Bijker et Law, 1992, pp. 290-306; Jasanoff, 1995; Latour, 1995).

Il est possible de venir à bout de la vision erronée du déterminisme technologique et social, et d'ouvrir des perspectives d'analyse des mécanismes d'évolution en cours, en ayant recours à des concepts élaborés dans le contexte des sciences sociales appliquées à l'étude du progrès technique (Dierkes, 1993; Dierkes et Hoffmann, 1992; NRC, 1988). Des données, datant pour la plupart des deux dernières décennies, corroborent cette approche.

« Sur l'envers de la médaille technologie-société figurent les facteurs institutionnels qui déterminent la technologie. Une série d'études historiques ont à présent analysé la façon dont les forces dominantes de la société, y compris l'environnement culturel, les valeurs, les idéologies, et les structures politiques et économiques, [ont] conditionné le développement et l'introduction de nouvelles technologies et l'émergence d'appareils industriels entiers. »

(NRC, 1988, p. 145.)

Au vu de ces données nouvelles, l'étude de la technologie a subi une profonde transformation au cours de la décennie passée.

« La relation qui unit la technologie et la société a été réexaminée, et la thèse traditionnelle qui veut que le changement technique soit soumis à une logique purement technique, ou à des impératifs économiques, a été remise en cause. On estime à présent que la conception et le contenu « technique » de produits manufacturés et de systèmes peuvent faire l'objet d'analyses et d'explications relevant du domaine des sciences sociales. La technologie est profondément marquée par le contexte dans lequel elle est mise au point et exploitée. Chaque phase de l'élaboration et de la mise en œuvre d'une technologie nouvelle implique une série de choix entre différentes options. Un éventail de facteurs interdépendants – économiques, sociaux, culturels, politiques, organisationnels – pèse sur les options retenues. Un domaine de recherche est ainsi apparu, dans lequel des universitaires venant d'horizons très divers cherchent à améliorer la compréhension de l'évolution technologique considérée comme un processus social. »

(Dierkes et Hoffmann, 1992, p. 6.)

La recherche fondée sur cette approche conceptuelle s'est intéressée à une longue liste de sujets particuliers comme le moteur, l'écriture et la téléphonie (Buhr et Knie, 1993; Canzler, 1996; Canzler et Knie, 1994; Rogers, 1990), la biotechnologie et le génie génétique (Barben, 1997); l'intelligence artificielle (Dierkes, 1994; Marz, 1993a, b); les technologies de l'information et des communications (Canzler, Helmers et Hoffmann, 1995; Grote, Helmers, Hoffmann et Hofmann, 1994); ainsi que des questions techniques d'ordre général comme les relations entre la vision de la technologie et les intérêts des utilisateurs

(Hofmann, 1996, 1997) et le lien entre l'action des pouvoirs publics et l'évolution technique (Dierkes, Canzler, Marz et Knie, 1995; Hoffmann et Marz, 1992). Ces analyses ont également porté sur l'intérêt de ces visions pour le développement régional (Krupp, 1995); et sur les sociétés commerciales et industrielles (Dierkes et Marz, 1994).

LES FACTEURS ORGANISATIONNELS ET INSTITUTIONNELS QUI DÉTERMINENT L'ÉVOLUTION TECHNOLOGIQUE : FONDEMENTS THÉORIQUES

En s'appuyant sur les résultats empiriques issus de ce large éventail d'études, il est possible de mettre en place un cadre théorique qui permette aux chercheurs de définir les facteurs organisationnels et culturels déterminant l'évolution technologique. Selon l'approche théorique qui sous-tend ces travaux, le moteur des avancées techniques doit être compris comme un processus social et politique dynamique (Dierkes, 1990). D'un point de vue organisationnel, on peut mettre en évidence plusieurs paramètres qui agissent sur la mise au point de technologies nouvelles. On examinera dans le présent rapport les trois facteurs les plus importants, à savoir : les visions, la culture organisationnelle et l'apprentissage organisationnel.

Le rôle des visions dans l'évolution technologique

Les visions sont le reflet des idées relatives aux technologies futures que partagent les communautés d'individus, les institutions et les organisations concernées par le processus de la recherche-développement (Dierkes, Hoffmann et Marz, 1996). Elles concrétisent la perception commune de l'opportunité et de la faisabilité des idées et les projettent dans un avenir relativement proche. Ces visions deviennent ainsi des objectifs forts et flexibles qui infléchissent de façon sensible les mécanismes d'innovation. Elles déterminent le processus complexe dans lequel sont engagés des acteurs multiples, visant à décider de la poursuite de certains choix technologiques et de l'abandon d'autres dans le cadre des efforts de recherche et développement (Dierkes et Marz, 1994).

En supposant que les visions doivent leur crédit et leur force de conviction considérables à des facteurs autres que le caractère percutant que leur confère une forme grammaticale lapidaire, on se demande d'où elles tirent leur efficacité. Des images populaires comme les « autoroutes de l'information », la « société sans numéraire » ou le « bureau sans papier » permettent aux institutions d'accumuler une somme d'expérience et de connaissances sur les individus concernés, en combinant de façon singulière et plutôt efficace ce qui est réalisable et ce qui est souhaitable. Elles n'encouragent ni ne favorisent une position au détriment de l'autre, mais ont au contraire pour effet de fondre cette double aspiration en

un objectif ou une perception commune, pour les cristalliser sous une forme nouvelle claire et marquante.

Ces visions du progrès technique assument une triple fonction : elles impriment une direction, facilitent la coordination et agissent comme des forces mobilisatrices. Elles jouent un rôle d'orientation, procurant un point de repère auquel chaque individu peut se rapporter pour ordonner ses perceptions, son raisonnement et ses mécanismes de prise de décision d'une façon qui définit effectivement un objectif commun pour la réflexion sur l'avenir. Ce dessein futur, ou point de référence, fait naître chez l'individu des aspirations, des attentes et des espoirs qui lui paraissent accessibles non seulement parce qu'il souhaite simplement leur réalisation, mais aussi parce qu'ils reposent sur le sentiment qu'il a de leur faisabilité dans un futur relativement proche. Les visions constituent le fondement de perceptions spécifiques et claires associant des idées et des souvenirs concrets qui se sont souvent amassés au fil d'années, voire de décennies d'expérience forgée de certitudes, de craintes, de préjugés et d'engagements personnels profondément ancrés et souvent d'une grande diversité.

Les visions ne révèlent pas seulement des perspectives futures et des perceptions nouvelles quant à l'avenir, elles assurent aussi une deuxième fonction de coordination des perceptions, des pensées et des processus de prise de décision, instaurant une compréhension élémentaire parmi les individus et les organisations. L'existence de cette assise commune contribue dans une large mesure à établir un terrain de rencontre pour les spécialistes et le grand public leur permettant de dépasser des cadres de référence souvent largement divergents, et simplifie considérablement l'indispensable coopération entre ces deux groupes.

Les visions agissent aussi comme une force mobilisatrice en ceci que ces idées ou perceptions sont présentes à la fois dans les esprits et dans les cœurs des individus. Des images classiques comme « l'usine sans ouvrier » ou la « société nucléaire » suscitent souvent de vives réactions émotionnelles chez les individus. Ces visions ne sollicitent pas uniquement les projets objectifs ou rationnels des personnes, mais font appel aux principes et aux valeurs dans lesquels sont ancrées les perceptions, les pensées et les décisions individuelles. C'est cet aspect qui explique la capacité essentielle des visions d'éveiller l'intérêt des individus et de les pousser à agir.

Le rôle de la culture organisationnelle dans l'évolution technologique

L'action qu'exercent les visions sur les innovations techniques est dans une large mesure conditionnée par la culture de l'organisation. Cette culture peut se définir au mieux comme l'ensemble des mécanismes sociaux ou normatifs qui lient entre eux les membres d'une organisation, contribuent à l'instauration de

valeurs, d'idées ou de perspectives communes, et finissent par s'exprimer par des voies souvent symboliques comme les légendes, les rites, les récits et le langage. La culture influence, en particulier, la façon dont l'organisation et ses membres perçoivent leur environnement et les changements qui s'y produisent, la manière dont ils définissent leur rôle vis-à-vis du contexte qui les entoure, et le type de comportement individuel et collectif jugé souhaitable et légitime. La culture organisationnelle est à la fois globale et très spécifique. Elle est ancrée dans l'évolution historique particulière et non transposable d'une organisation, au sein de laquelle se forment et se déterminent les relations entre les membres, leurs perceptions, leurs décisions et leurs modes de comportement (Dierkes, 1988).

La culture organisationnelle peut représenter à la fois un atout et un handicap pour le système. Elle procure un sentiment de stabilité et une identité auxquels les membres de l'organisation peuvent se référer tout en enfermant les comportements dans un moule qui, bien qu'efficace par le passé, risque d'être inadapté ou même de freiner les efforts entrepris pour relever les défis actuels (Dierkes; Hähner et Berthoin-Antal, 1997).

Le rôle de l'apprentissage organisationnel dans l'évolution technologique

De la même façon, l'apprentissage organisationnel joue un rôle crucial dans l'évolution des techniques grâce à sa capacité d'influencer la direction et le cours de la recherche-développement au sein d'une organisation ou dans un réseau d'organisations. L'apprentissage organisationnel, par opposition à l'apprentissage individuel ou de groupe, se définit comme l'acquisition ou la stimulation collectives des perceptions, compétences stratégiques ou processus de réflexion inédits dominants, pour s'adapter aux mutations de l'environnement extérieur (Dierkes et Hähner, 1994; Pawlowsky, 1994). L'apprentissage, tel qu'on l'entend dans ce contexte, ne signifie pas une formation technique professionnelle ou un enseignement académique traditionnel, mais plutôt l'aménagement d'une solution flexible ou l'anticipation du changement par une organisation dans son ensemble. Cet apprentissage trouve son expression, par exemple, lorsque l'organisation décide courageusement d'abandonner des stratégies et des concepts de gestion dépassés pour découvrir et promouvoir des mécanismes organisationnels nouveaux ou réformés et encourager des modes de réflexion inédits. L'apprentissage organisationnel, qui se traduit par des images et des constats originaux, des objectifs audacieux ou des visions fructueuses, remet en cause et, souvent, transforme les structures et la culture existantes.

La nécessité d'apprendre est à présent un élément qui conditionne de plus en plus le succès des organisations (Dierkes et Hähner, 1994). Beaucoup ont instauré une culture, créé des structures et assis leur suprématie dans un environ-

nement relativement stable qui permettait d'avoir une vue d'ensemble claire du marché d'un produit, d'un domaine technique ou d'un secteur industriel particulier. Les mutations accélérées que subissent aujourd'hui ces marchés obligent les organisations à procéder à une révision souvent globale de leurs perceptions, de leurs valeurs et de leur comportement, afin de pouvoir réagir rapidement à la nouvelle concurrence mondiale. Elles doivent mettre au point des stratégies à long terme qui englobent des procédés de production originaux ou des biens et des services nouveaux. Si ce processus d'autoévaluation intervient trop lentement, l'organisation court le risque de « rater le coche » du progrès technique ou de manquer son adaptation au marché et se trouvera peut-être dans l'incapacité de préserver sa compétitivité (Dierkes, 1992).

L'apprentissage organisationnel s'effectue au niveau des individus et des groupes qui en sont souvent à l'origine. Toutefois, comme cet apprentissage ne consiste pas simplement en une accumulation d'expériences indépendantes de formation, mais plutôt en une acquisition collective de perceptions ou de compétences nouvelles, il peut en réalité représenter *moins* que la somme des apprentissages individuels opérés au sein d'une organisation, c'est-à-dire que les perceptions et les compétences acquises par les individus ne sont pas toutes transférables à l'organisation dans son ensemble. Par ailleurs, l'apprentissage organisationnel revêt souvent une dimension *plus vaste* que la totalité des connaissances personnelles engrangées, car il est à même de combiner et d'amplifier les effets éducatifs des expériences et du savoir individuels par le biais du jeu quotidien des mécanismes de coopération et de communication.

Les structures nécessaires pour imaginer des concepts nouveaux et exploiter pleinement les innovations diffèrent d'une entreprise à l'autre, dans certains cas de façon considérable. A un extrême, la R-D menée dans certaines entreprises est séparée des tâches courantes de manière à favoriser au maximum la liberté et la créativité. A l'autre extrême, elle peut être étroitement associée au fonctionnement quotidien, de manière à assurer la pertinence des produits résultant de la recherche appliquée (Dierkes, 1985).

Comme le montrent les deux exemples suivants, les trois facteurs décrits ci-dessus – visions, cultures et apprentissages organisationnels – peuvent agir de façon durable sur l'interaction complexe des mutations techniques et des changements organisationnels. Ces exemples ont en commun deux aspects. Premièrement, ils concernent tous deux une forme particulière d'évolution technique : les nouvelles technologies de l'information et des communications qui ont fait leur apparition depuis le milieu des années 1960, et plus précisément l'informatisation et la numérisation de l'environnement quotidien. Deuxièmement, les deux exemples expliquent clairement qu'une réflexion qui s'exprime exclusivement en termes de déterminisme technologique ou social peut modifier et fausser les perspectives de développement futur.

PÉRENNITÉ DE LA SOCIÉTÉ DE L'AUTOMOBILE : INNOVATIONS SANS CHANGEMENT SOCIAL ET INSTITUTIONNEL MAJEUR

Contrairement aux visions propres à des organisations ou à des entreprises particulières, la représentation de la société de l'automobile présente des ramifications beaucoup plus étendues et profondes. Elle n'appartient pas exclusivement à une organisation unique, mais plonge au contraire ses racines dans les entreprises de l'industrie automobile, les gouvernements, et les associations automobiles, ainsi que dans des domaines extérieurs à la sphère organisationnelle comme le comportement quotidien des conducteurs et leurs projections individuelles et collectives de ce qui est souhaitable et de ce qui est réalisable (Canzler, 1996; Canzler et Marz, 1997). Cette vision, par laquelle l'automobile domine la réflexion relative à la mobilité, a structuré et conditionné les politiques des transports pendant des décennies, et peut aisément être considérée comme l'une des représentations technologiques les plus accomplies en termes de portée, de continuité et d'impact à long terme (Dierkes, Canzler, Marz et Knie, 1995).

Pendant de nombreuses années, l'automobile a été le symbole et l'indicateur incontestés de la prospérité individuelle et macrosociale, comme en témoigne l'affirmation « ce qui est bon pour General Motors est bon pour l'Amérique », ou le fait que la coccinelle de Volkswagen a été des années durant l'emblème du miracle économique allemand. Malgré les nombreuses tensions et évolutions qui annoncent une restructuration de la société de l'automobile (Canzler et Knie, 1994), aucun bouleversement majeur n'est en vue (Dierkes, Buhr, Canzler et Knie, 1995). L'automobile est confrontée à maintes difficultés mais n'a rien ou guère perdu de son attrait (Canzler, 1996).

Aujourd'hui, la vision de la société de l'automobile jouit d'une omnipotence telle dans le monde entier que quasiment chaque organisation qui s'y intéresse est marquée de son empreinte. Elle trouve son expression dans un apprentissage fondé systématiquement sur l'expérience passée. Dans ce contexte, les difficultés de circulation croissantes centrées sur l'automobile, en particulier dans les grandes métropoles, sont traitées comme une simple variante de crises précédentes, gérées avec efficacité. (Pour les quelques exceptions à cet apprentissage empirique, voir Knie, 1994, 1997.) Dans ce cas, il s'agit avant tout de s'en tenir à ce qui constitue le cœur du concept automobile, mais en l'améliorant techniquement, à savoir « la berline puissante propulsée par un moteur à combustion interne » (Canzler et Knie, 1994).

L'apparition massive d'innovations résultant de l'utilisation de technologies nouvelles jusqu'à présent sans aucun lien avec l'automobile va vraisemblablement contribuer de façon significative à préserver la société de l'automobile et même à assurer son expansion dans le monde entier. L'introduction, dans l'automobile du futur, de technologies de l'information et de techniques de détection,

ainsi que de l'optoélectronique, nourrit de vifs espoirs. On surestime parfois le gain d'efficacité réel produit par les accessoires qui font appel aux technologies de l'information, mais il n'y a pas lieu de sous-estimer leur capacité potentielle à résoudre certaines des difficultés majeures auxquelles est confrontée actuellement la société de l'automobile. La télématique offre probablement des perspectives considérables pour la modernisation du secteur des transports, comme en témoignent le projet PROMETHEUS et d'autres programmes de financement de la recherche, en particulier en Europe. L'automobile intelligente fonctionnant en réseau est l'élément central de la vision future de la société de l'automobile.

Le véhicule de l'avenir devrait apporter trois formes d'améliorations qui atténueront les répercussions négatives de la société de l'automobile (Canzler, 1996). Premièrement, les systèmes d'information collectifs sur la circulation (diffusion de bulletins d'information sur l'état de la circulation et les possibilités de stationnement) et les dispositifs de guidage individuel par pilotage automatique ou assisté sont supposés optimiser l'exploitation des axes routiers et des espaces de stationnement existants, augmentant de la sorte la capacité des infrastructures au service des véhicules à moteur. Les mécanismes directionnels statiques utilisant des CD-ROM sont de plus en plus souvent complétés par des systèmes de positionnement global par satellite (GPS) et des dispositifs d'information capables de rendre compte presque en temps réel de l'évolution des conditions de circulation (par exemple, accidents, embouteillages et travaux d'entretien des routes) de manière à les intégrer dans le calcul des itinéraires recommandés.

Deuxièmement, la poursuite du développement et l'introduction des technologies de l'information devraient aboutir à la réalisation de systèmes d'information à consulter avant d'entreprendre un déplacement. Fonctionnant en ligne sur les ordinateurs personnels installés au domicile des particuliers, ces dispositifs joueront un rôle important dans la planification des déplacements et faciliteront les conditions actuelles de circulation durant les heures de grande affluence en augmentant à terme la qualité et la quantité d'informations proposées aux usagers avant leur départ. Il sera apparemment possible, dans un avenir proche, de planifier ses allées et venues avec un degré de précision jusqu'alors inconnu.

Troisièmement, il est prévu de réduire les temps de déplacement et le volume de la circulation en instituant un système électronique de tarification routière (ou de tarification des encombrements). Le recours aux péages et aux dispositifs électroniques pour limiter l'accès au réseau est bien souvent considéré comme un moyen d'introduire les principes du marché dans l'exploitation des infrastructures de transport. La sécurité devrait en outre être renforcée par la possibilité d'exploiter les systèmes interactifs embarqués pour la mise en œuvre des moyens de secours.

Compte tenu de la direction que prennent ces avancées techniques, la meilleure façon de les qualifier serait peut-être de parler d'innovation stagnante, de stagnation innovante ou, pour n'employer qu'un seul mot, de « stagnovation » (Canzler et Marz, 1997). Cette mutation technique ne signifie pas que des modèles de mobilité datant de plusieurs décennies ont été simplement préservés ou gelés ou qu'ils font l'objet d'un remaniement complet, voire d'une remise en cause. Les innovations techniques clairement identifiées correspondent à un apprentissage, au moins partiel, et à une adaptation des organisations et des institutions concernées. Leur caractère novateur tient à la mise en œuvre d'un large éventail de technologies nouvelles dans le domaine de l'information et des communications, de manière à stabiliser la vision actuelle de la société de l'automobile et à exploiter au maximum la marge de manœuvre existante, mais étroite. L'introduction du réseau global de transmission de données dans la puissante berline crée un espace à la fois virtuel et réel pour ces innovations dans l'univers dominé par cette vision. Cependant, ces avancées techniques piétinent dans la mesure où les innovations ne seront pas en mesure de mettre fin aux difficultés en question de la société de l'automobile ; elles ont principalement pour effet de les repousser ou de les atténuer provisoirement en permettant de les gérer plus efficacement. Faire appel aux ordinateurs pour résorber les embouteillages retardera le blocage total du système de transport dans les zones urbaines, mais n'en supprimera pas les causes.

Étant donné que l'innovation représente souvent un élément important dans un univers dominé par une vision technologique forte, elle a tendance à renforcer la stagnovation, retardant ainsi la recherche systématique et la promotion de concepts techniques inédits. Le report des difficultés liées aux déplacements automobiles permet de gagner du temps à court et moyen terme, mais l'objectif de cette démarche est-il de régler définitivement les problèmes ou simplement d'empêcher leur aggravation ? La stagnovation diminue les chances de procéder à une modernisation radicale en concentrant le potentiel d'innovation sur le prolongement de la durée de vie des concepts technologiques actuellement dominants, sans promouvoir de la même façon l'élaboration d'instruments inédits pour résoudre les difficultés sous-jacentes. Plus cette tendance persistera, plus il sera difficile de découvrir et d'explorer d'autres solutions techniques pour accroître la mobilité dans un contexte social et organisationnel différent. Le principal danger de la stagnovation est par conséquent d'occulter la relation qu'il y a entre le report d'un problème et son aggravation, ce qui favorise l'attitude naïve et passive qui consiste à penser que « les choses s'arrangeront en temps voulu ».

Considérant ces stratégies d'innovation qui prolongent la durée de vie d'une vision dominante de la technologie par le biais d'un apprentissage incomplet et d'un changement organisationnel limité, il s'agit de savoir si la stagnovation est seulement une spécificité de la société de l'automobile ou si ce phénomène se

cache dans d'autres démarches visant à faire face aux crises. Il est indispensable de comprendre les fondements de la stratégie de la stagnovation, car dans la mesure où ce processus a des incidences sur la vision des technologies, sa généralisation alimente essentiellement un état d'esprit préjudiciable aux initiatives visant à gérer fructueusement la crise qui frappe la société moderne.

« Maniaco-dépressif » est sans doute le terme qui qualifie le plus fidèlement, bien que de façon légèrement excessive, ce climat. D'une part, la stagnovation favorise un sentiment d'euphorie. Plus une innovation parvient à repousser la nécessité d'une modernisation, plus ce report partiel des problèmes risque d'être adopté comme la solution générale. Améliorer les structures traditionnelles par des innovations progressives semble être « la » manière de venir à bout des difficultés. Les acteurs de la stagnovation peuvent avoir l'impression grisante que le pire est passé, ou du moins qu'ils maîtrisent la situation. D'autre part, la stagnovation encourage les sentiments de dépression. Malgré les nombreuses assurances contraires, le fait de remettre à plus tard une modernisation radicale grâce à la stagnovation fait naître un vague sentiment de malaise dans la population. Il devient de plus en plus difficile pour les responsables chargés de définir les orientations en matière de technologie, de ne pas admettre que la poursuite d'une tendance ne constitue pas à terme un progrès. En même temps, la concentration des efforts sur le perfectionnement et la généralisation de solutions médianes détourne l'attention de moyens envisageables, bien que difficiles à mettre en œuvre, pour faire face à la montée des problèmes. La stratégie qui consiste à stabiliser une situation difficile sans la corriger, et que concrétise un apprentissage partiel dans le cadre des concepts techniques dominants, apparaîtra de plus en plus comme une impasse. Le sentiment de l'inefficacité à long terme de la stagnovation et la perception de son caractère irréversible sont des facteurs qui risquent de nourrir la morosité dans laquelle baigne la stagnovation.

Considérant ce phénomène, on est amené à se demander s'il existe d'autres voies qui permettraient d'exploiter les nouvelles technologies de l'information et des communications pour stimuler l'innovation sociale plutôt que simplement maintenir et réformer progressivement les alliances sociales traditionnelles. L'existence de telles voies de rechange devient évidente si l'on se tourne vers un domaine dans lequel les innovations et les mutations techniques et sociales se mêlent étroitement en se stimulant réciproquement, ce qui est actuellement le cas du réseau Internet.

L'INNOVATION INDUITE PAR LA COOPÉRATION ENTRE LES COMPÉTITEURS : LE RÉSEAU INTERNET

Deuxième exemple des rapports qu'entretiennent évolution technologique et réforme organisationnelle, Internet illustre la façon dont les innovations techni-

ques ouvrent fortuitement la voie à de nouvelles formes de production et d'organisation qui, à leur tour, contribuent distinctement à une nouvelle avancée des technologies. L'histoire de la genèse d'Internet explique que la technologie de transmission propre à ce réseau fasse l'objet d'un programme de développement à l'échelle internationale dans lequel sont engagés la quasi-totalité des grands industriels du secteur de l'information et des communications. Les entreprises qui se livrent concurrence pour écouler leurs produits et conquérir des parts de marché coopèrent de façon étroite et fructueuse lorsqu'il s'agit d'apporter des innovations techniques à l'Internet. Comment cela est-il possible ? Dans quelles conditions s'opère cette collaboration ?

Nul n'ignore qu'Internet était à l'origine un produit de la recherche financée par les pouvoirs publics. C'est le ministère de la Défense des États-Unis qui a tout d'abord financé le développement des techniques de transmission de base qui distinguent Internet de l'univers de la téléphonie (y compris la technologie de transmission par commutation de paquets et les techniques peu fiables visant à assurer la continuité du service téléphonique) ; plus tard, le financement a été assuré de plus en plus par la National Science Foundation (Cerf, 1993). C'est ce qui explique qu'Internet soit resté un réseau de et pour la recherche jusqu'au début des années 90. Les chercheurs chargés du développement et les principaux groupes d'utilisateurs de la technologie étaient des scientifiques qui travaillaient pour la plupart dans les universités. A de rares exceptions près, comme Bolt, Beranek et Newman (BBN), ce sont les centres informatiques des universités américaines qui étaient connectés à ARPANET, le précurseur d'Internet (Comer, 1991 ; Huitema, 1995).

La culture universitaire dans laquelle Internet plonge ses racines a des incidences sur la façon dont s'organisent les innovations techniques s'y rapportant, qui revêtent de ce fait un caractère scientifique. Contrairement aux règles d'action qui prévalent dans le milieu des affaires, l'un des principes intangibles de la culture universitaire veut que l'on rende public et soumette à la discussion les résultats des travaux de recherche. Toute nouveauté est partagée, et accessible aux tiers. Par voie de conséquence, les techniques de transmission sur lesquelles est construit Internet aujourd'hui ont vu le jour dans le cadre d'un projet collectif mené par ce qui était à l'origine un groupe restreint de physiciens et d'ingénieurs, dont certains n'avaient même pas encore achevé leurs études universitaires. Se partageant le travail, ils ont élaboré, testé et mis en œuvre des concepts nouveaux destinés à faciliter l'échange de données entre ordinateurs (Hafner et Lyon, 1996 ; Salus, 1995 ; RFC 1000, 1987). Cette tradition du débat ouvert est illustrée notamment par les collections de publications conservées dans les archives, qui ont stimulé l'échange d'informations : « Internet Engineering Notes » (IEN) et « Requests for Comments » (RFC), qui existent encore aujourd'hui pour ces derniers. Les normes de transmission et d'utilisation d'Inter-

net sont diffusées sous forme d'appels à commentaires (RFC), qui constituent « l'histoire de la philosophie du réseau » (Huitema, 1995, p. 19).

L'apparition de services caractéristiques d'Internet comme le transfert de fichier, la messagerie électronique et les listes de diffusion a stimulé le développement du réseau, qui de sujet de recherches est devenu une ressource dans laquelle puiser à des fins de recherche. Comme l'a déclaré l'un des ingénieurs ayant participé au projet, « l'utilisation d'Internet offre un immense potentiel pour "ré-inventer" le réseau. Le modèle Internet est appliqué à Internet même pour explorer de nouvelles façons d'étendre le réseau ». (S. Doran, 17 avril 1996, sur la liste de diffusion « Ipv6 haters ».) La transmission des communications par le biais des listes de diffusion, qui permet d'envoyer des messages à un nombre illimité de destinataires, est l'instrument de discussion et de coopération le plus important qu'offre Internet aujourd'hui. La technologie d'Internet est développée sur la scène publique, et dans l'immense majorité des cas, décentralisée par l'entremise du réseau (Crocker, 1993; RFC 2026, 1996). Des archives électroniques planétaires retraçant l'histoire du réseau et accessibles à tous garantissent la disponibilité des articles de commentaires et des spécifications techniques.

A mesure qu'Internet élargissait son audience au-delà de la communauté scientifique, les travaux relatifs à son développement revêtaient progressivement un caractère plus formel. En 1986, une instance ouverte sans statut juridique, le groupe de travail IETF (Internet Engineering Task Force), était constituée afin d'aider à inscrire le développement en cours d'Internet dans un nouveau cadre organisationnel (Lehr, 1995).

La réduction progressive des financements publics consacrés au développement d'Internet a été largement compensée par un engagement financier croissant de la part des milieux d'affaires. Les chercheurs travaillant à la mise au point d'Internet ont pris conscience de cette évolution lorsque les membres actifs du réseau sont devenus de plus en plus nombreux à quitter l'université pour intégrer le monde des entreprises. C'est à cette même époque que l'IETF a commencé à connaître un essor considérable, qui ne se dément pas. Il suffit de regarder les adresses électroniques des ingénieurs qui collaborent activement à l'Internet pour constater que rares sont les titulaires qui appartiennent encore à une université. Harvard, le MIT, Stanford, l'Université de Californie du Sud (USC) et l'Université de Californie à Los Angeles (UCLA), qui étaient auparavant au cœur du développement d'Internet, ont abandonné leur rôle moteur dans ce domaine aux fabricants d'ordinateurs et de technologies de réseau, aux principaux utilisateurs et aux fournisseurs d'accès à Internet. Lorsqu'on assiste aux réunions de l'IETF, qui se tiennent trois fois par an, on croise encore bon nombre de vétérans et de héros des années 60 et du début des années 70 en tee-shirt et sandales, mais leurs badges d'identité affichent désormais les noms d'entreprises qui sont pour la plupart plus jeunes que le réseau lui-même. Des firmes comme FTP

Software, Cybercash, RWhois, Openroute et Netweek évoquent des services et des fonctions techniques d'Internet qui n'existaient pas encore il y a quelques années, comme le « World Wide Web ».

L'essor d'Internet se manifeste non seulement par un nombre croissant d'utilisateurs, mais aussi par l'émergence de nouveaux marchés et la création d'une multitude d'entreprises pour les desservir. Netscape, le fabriquant mondialement connu de « navigateurs », logiciels permettant de naviguer dans l'univers graphique du World Wide Web, n'est qu'un exemple. UUNET, qui est devenu entre-temps le plus important fournisseur d'accès au monde, en est un autre. En parallèle à ces évolutions, des domaines d'activité originaux ont vu le jour, en particulier dans le secteur des télécommunications, et dépêchent des spécialistes de réseaux aux réunions de travail de l'IETF.

L'intérêt grandissant des milieux d'affaires pour Internet a transformé ces réunions en événements phares. Alors que moins d'une centaine de participants y assistaient au milieu des années 80¹, c'est aujourd'hui le nombre de personnes composant une délégation dépêchée par une seule entreprise comme Cisco, BBN ou Sun Microsystems. Les assemblées de l'IETF réunissant de 1 500 à 2 000 participants sont devenues chose courante, car ces réunions revêtent une importance cruciale pour toute entreprise qui exerce ou souhaite exercer des activités dans le domaine d'Internet. Dans les entreprises également, les membres actifs de l'IETF consacrent une large part de leur temps à coopérer de façon « bénévole » au développement de nouvelles technologies Internet pouvant faire l'objet d'une normalisation². Les professionnels qui participent au développement d'Internet consacrent, pour un grand nombre d'entre eux, une bonne partie de leur temps de travail disponible à rédiger des projets, à consulter des listes de diffusion et à débattre les sujets du moment, alors même qu'ils sont devenus aujourd'hui des ingénieurs très recherchés sur le marché. Ces spécialistes peuvent se permettre de choisir leurs employeurs.

L'IETF s'est progressivement transformé, passant d'un groupe de chercheurs universitaires à un forum international à vocation largement commerciale destiné à assurer la poursuite du développement d'Internet. C'est aujourd'hui l'organisation économique et technique la plus importante en matière de développement de nouvelles technologies de réseau. L'essor mondial d'Internet témoigne de la prééminence des méthodes et des produits de cette institution par rapport à d'autres instances comme l'Organisation internationale de normalisation (ISO) (Genschel, 1995). Or, comment est-il possible pour des entreprises concurrentes de nouer une collaboration aussi fructueuse ?

L'explication réside vraisemblablement dans la combinaison particulière de méthodes, d'état d'esprit et de primauté du produit qui caractérise ce modèle de coopération. Nous avons déjà mentionné un aspect important qui touche aux procédés : les règles du jeu en vigueur dans les milieux universitaires ont

d'emblée fait naître une culture et suscité des mécanismes de libre coopération au sein d'Internet. Contrairement à l'ISO et aux autres instances de normalisation, l'IETF est demeuré ouvert à tous les individus qui souhaitent lui apporter leur concours. Les conditions d'adhésion ou de représentation n'y sont pas soumises à des règles formelles. Toute personne est la bienvenue si elle possède les compétences techniques nécessaires (Helmers, Hoffmann et Hofmann, 1996a, b ; RFC 2026, 1996), et chacun(e) parle en son nom propre. En d'autres termes, seuls les raisonnements techniques sont pris en compte pour faire reconnaître l'importance d'un point de vue, et les arguments économiques et politiques sont rejetés.

Cet aspect concerne également la dimension culturelle facilitant la coopération entre les entreprises. Les individus qui jouissent de considération au sein de l'IETF sont ceux qui, en plus de posséder des compétences techniques étendues, affichent clairement devant toutes les personnes concernées leur aptitude à faire la distinction entre la situation acquise de leurs employeurs et l'intérêt pour Internet en tant que bien collectif. L'objectif commun des membres de l'IETF est de garantir la pérennité d'Internet en assurant son évolution technique constante et, ce faisant, de veiller à son excellence technique. « Il faut parvenir à un consensus par la perfection du travail effectué sur le plan technique. La quête du consensus conduit à la virtuosité technique » (Huitema, 1995, p. 24). Un trait important de l'identité collective des ingénieurs d'Internet est leur sentiment de compter parmi l'aristocratie mondiale des ingénieurs de réseau. L'appartenance à cette élite suppose en partie d'être capable de passer outre les intérêts à court terme propres à chaque organisation et de « servir » la cause globale d'Internet. Le savoir-faire technique de ces ingénieurs leur permet de détecter avec une relative rapidité les personnes qui manqueraient à ces règles éthiques et de leur retirer leur considération. La mise au point de normes interopérables qui permettent tout d'abord le déploiement mondial du réseau, est considérée comme un moyen essentiel de générer des profits en créant des technologies ou services nouveaux. Enraciné dans la culture, ce sens du bien commun perçu comme une ressource essentielle génératrice de profit, facilite la coopération et détermine la façon dont sont réglés les divergences de vues et les litiges.

Toutes formes de références politiques sont rejetées avec méfiance par l'IETF. L'exemple souvent cité du modèle à ne *pas* suivre est l'ISO, dont les produits sont le reflet de tractations stratégiques. De nombreuses normes élaborées par l'ISO ne parviennent jamais au stade des applications commerciales et ont été incapables de prendre le pas sur les normes Internet ouvertes, malgré un appui politique concerté de la part des États membres de l'organisation. Il est donc capital de régler les différends au sein de l'IETF sur un terrain exclusivement technique. « dans l'Internet, ... la communauté s'efforce de perpétuer la riche tradition de priorité à la recherche et à la technologie, et l'image de

fécondité qui s'y rattache» (Piscitello et Chapin, 1993, p. 27). Lorsqu'il existe plusieurs propositions techniques rivales pour résoudre un problème, chacune peut être approfondie par un groupe de travail indépendant jusqu'à la phase de réalisation. Les fruits de ce travail collectif peuvent être librement discutés et critiqués et faire naître des opinions différentes de la part de toute personne qui souhaite en faire part, dans la mesure où elle a suivi les débats précédents. Un *code opérationnel* est la condition préalable pour qu'une norme nouvelle soit acceptée, c'est-à-dire que deux implémentations au moins doivent démontrer la validité des spécifications techniques en question et leur interopérabilité avec d'autres éléments techniques d'Internet (Alvestrand, 1997; RFC 2026, 1996). C'est le marché qui désignera en fin de compte la solution gagnante.

Cette procédure nous amène au troisième et dernier élément qui fait d'Internet un modèle de coopération, la retenue. Les ingénieurs de l'IETF considèrent que leur tâche consiste à mettre au point des normes techniques qui garantissent la compatibilité des produits vendus sur le marché. Il ne leur appartient pas de décider de l'implantation de ces normes sur le marché, aussi montrent-ils une forte réticence à aborder des sujets et à traiter de questions qui sortiraient du domaine effectif de la compatibilité et de l'interopérabilité pour entrer dans celui du développement industriel des produits. Le mot d'ordre est «le marché décide», et reste valable même lorsqu'il s'agit du succès de projets qui ont mobilisé des ressources humaines considérables pendant plusieurs années, comme l'initiative en cours pour mettre au point la future génération du protocole de base Internet. Le fait que l'IETF ait limité ses activités à un domaine qui présente probablement un intérêt commercial général pour un large éventail de vendeurs et d'utilisateurs – à savoir les conditions techniques de la survie même d'Internet – explique peut-être pourquoi les milieux d'affaires investissent des ressources humaines et matérielles croissantes dans ce projet.

Un modèle original de développement de technologies et de normes internationales s'est de la sorte construit autour de la vision d'Internet (Kowack, 1997; Reidenberg, 1997). Il diffère à deux égards des modèles précédents et de la démarche adoptée dans d'autres domaines technologiques. Les États-nations n'assument plus le rôle de coordinateurs et d'intermédiaires. Cette mission est à présent dévolue aux entreprises. N'ayant pas d'exemple à suivre en matière de rapports de coopération à l'échelle internationale, celles-ci se sont approprié et ont transformé progressivement la fonction de commanditaire de la recherche assumée auparavant par les pouvoirs publics américains. Le modèle d'organisation centralisée, représenté par les compagnies de téléphone, doit aujourd'hui rivaliser avec une forme décentralisée de coordination qui représente un élément essentiel du concept et de la culture d'Internet, caractérisé par des objectifs contraignants, des critères de qualité et des tâches circonscrites à un domaine étroit (Willke, 1997). La rationalité du marché supprime le calcul politique. Il est

évidemment impossible de prévoir les effets de ces changements sur la qualité de la technologie, mais on est en droit de supposer que cette évolution se reproduira également dans d'autres secteurs de la coopération internationale. L'exemple d'Internet indique seulement que des formes de coopération non gouvernementale et assez informelle peuvent se révéler en fait fructueuses.

On constate aussi que ces différents modèles de coopération, déterminés par le concept d'Internet, ont des répercussions visibles sur les produits. La technologie du réseau diffère profondément des technologies qui dominaient précédemment le secteur des communications. Alors que les entreprises qui concrétisent la vision de la « téléphonie » nationale et mondiale sont à l'origine d'une culture et d'une structure centralisée liées à des configurations techniques fondées sur la concentration et l'exclusivité, et bâties autour d'un seul prestataire de services (la compagnie nationale de téléphone) et d'une utilisation unique (le téléphone), la technologie Internet reflète une forme d'organisation et une culture décentralisées qui favorisent la multiplicité des applications. Plus grande est la diversité des secteurs d'activité concernés, plus la technologie qui en découle se révèle flexible et ouverte à des applications nombreuses. Contrairement au triomphe de l'ordinateur personnel d'IBM ou des systèmes d'exploitation DOS et Windows de Microsoft, la consécration d'une solution technique donnée élevée au statut de norme effective n'est pas imputable à l'emprise qu'exerce une firme particulière sur le marché, mais à la compétence conjuguée de l'ensemble des industriels. Cette formule pourrait permettre de réduire les risques de blocage de l'innovation, comme cela s'est produit dans d'autres sphères de l'activité économique.

Internet se prépare actuellement aux utilisations dites en temps réel, comme la téléconférence et d'autres modes de transmission vidéo, et s'est fixé comme objectif futur de développer des structures organisationnelles ouvertes et des applications flexibles. Alors que l'opérateur allemand de télécommunications, produit de la vision et de la culture de la « téléphonie », traîne ses concurrents en justice pour les obliger à utiliser ses lignes téléphoniques et sa technologie de transmission contre le paiement d'une redevance, l'objectif affiché d'Internet est de mettre au point des normes de transmission compatibles avec toutes les technologies existantes dans ce domaine, en ignorant les situations d'exclusivité particulières, les parts de marché ou les brevets (RFC 1958, 1996). La coopération entre firmes concurrentes ne sera fructueuse que si la technologie en cours de développement est conçue pour prévenir les monopoles et procurer des avantages identiques à l'ensemble des fournisseurs. Tout bien considéré, de nombreux signes annoncent l'apparition d'un nouveau modèle de coopération et de production dans lequel les innovations techniques et l'apprentissage organisationnel seront mutuellement indispensables et engagés dans un processus d'entraînement réciproque.

STRUCTURES D'INNOVATION DIVERGENTES : LES ENSEIGNEMENTS À TIRER

Les deux études de cas sur les stratégies d'innovation dans l'industrie automobile et au sein d'Internet font apparaître des tendances diverses. Tandis que l'évolution technique dans l'industrie automobile revêt un caractère nettement marginal et vise à préserver les éléments essentiels de la vision représentant la société de l'automobile, la technologie des télécommunications subit de profondes mutations sur les plans technique et organisationnel, qui touchent non seulement les modes de production et de coordination mais aussi les produits eux-mêmes. La stagnation, caractérisée par le report incessant d'une modernisation fondamentale, s'oppose radicalement aux réformes techniques et organisationnelles liées à des changements de modèles d'apprentissage, de création et de soutien de nouvelles visions révolutionnaires de la technologie.

Le cadre conceptuel présenté ci-dessus ne saurait révéler les causes profondes des divergences observées dans les structures d'innovation des secteurs de l'automobile et des communications. Des concepts comme les visions, la culture organisationnelle et l'apprentissage organisationnel font plutôt ressortir les conditions empiriques susceptibles de justifier la diversité des modes opératoires de l'évolution technologique. D'une façon plus générale, le cadre conceptuel permet d'identifier des modèles spécifiques de changement technique et de les rapporter à leur environnement culturel et organisationnel. De fait, la fusion des aspects techniques, culturels et organisationnels peut être considérée comme l'élément central de cette approche conceptuelle. En étudiant la façon dont un objet technique interagit avec des idées et perceptions sociales ainsi que des finalités et traditions organisationnelles de portée plus générale, on pourra peut-être éviter tout déterminisme technique et social pour expliquer l'évolution technologique.

La comparaison des deux études de cas fait ressortir des différences et des similitudes. Par exemple, les deux types d'innovation naissent sur des marchés établis, voire strictement réglementés par les pouvoirs publics. Aussi bien l'industrie automobile que la structure institutionnelle du secteur des communications résistent farouchement aux changements de modèles d'apprentissage et à l'apparition de nouveaux concepts techniques. Cette résistance conduit tout naturellement à s'interroger sur les facteurs qui ont facilité l'émergence d'une vision totalement novatrice de la technologie (Internet), mais laissé relativement inchangées les formes d'organisation et les cultures en vigueur dans le secteur des communications. Quant à l'industrie automobile, comment se fait-il qu'aucune vision nouvelle ne soit apparue, ni aucun changement radical des formes d'organisation et des cultures ?

Sans pouvoir apporter une réponse globale et totalement satisfaisante à ces questions, les deux cas examinés permettent de clarifier au moins certains aspects susceptibles d'expliquer pourquoi certaines innovations techniques s'imposent et d'autres non. Ces aspects concernent les acteurs du changement ainsi que les fondations du contexte social et politique dans lequel ils interviennent. Comme nous l'avons décrit précédemment, la création d'Internet n'est pas le fait d'organisations chargées jusqu'alors de produire la technologie de transmission internationale. Les protocoles de transmission d'Internet ont vu le jour *malgré* l'opposition du secteur des télécommunications en place. En d'autres termes, le comportement des entreprises de télécommunications en matière d'innovation n'a pas été fondamentalement différent de celui de l'industrie automobile. La tradition qui consistait à apporter des améliorations marginales a été rompue par la constitution d'un nouveau groupe d'intervenants et, partant, par l'apparition d'une nouvelle culture en matière de production et de développement technologique.

Ce modèle concurrent doit sa vitalité et son succès non seulement à la supériorité technique de ses produits, mais aussi au fait qu'il représente un véritable choix offert aux utilisateurs. Contrairement aux options proposées aux consommateurs par l'industrie automobile, qui se limitent à quelques variantes et, en particulier, n'offrent pas de substitut au moteur à combustion, Internet représente une solution de rechange majeure à la correspondance écrite traditionnelle ainsi qu'au téléphone. Le succès de ce système étant tributaire de la décision des consommateurs de l'utiliser, les communications acheminées par Internet ont dans certains domaines largement dépassé les échanges téléphoniques. Il en va de même pour les avancées techniques en cours dans le domaine des services proposés sur Internet. L'expansion accélérée du World Wide Web s'explique en grande partie par l'accueil favorable que lui ont réservé les consommateurs. Pour généraliser, les préférences des utilisateurs peuvent constituer un facteur d'adhésion et d'élection important de concepts technologiques révolutionnaires entraînant une série d'innovations notables sur les plans technique et organisationnel. Il convient donc de reconnaître que les utilisateurs font partie intégrante de la pléiade d'acteurs qui contribuent à la diffusion des innovations socialement souhaitables.

Un autre aspect mis en lumière par ces deux exemples est le contexte politique et social dans lequel s'inscrivent les diverses stratégies en matière d'innovation. La capacité réduite des entreprises de télécommunications de définir des orientations et des règlements nouveaux dans ce domaine de la technologie n'est pas uniquement imputable au succès du modèle rival; le triomphe du modèle Internet correspond aussi à une tendance générale à la déréglementation. L'éclatement des organisations monopolistiques traditionnelles de télécommunications dans de nombreux pays occidentaux favorise l'apparition de fournis-

seurs de taille plus réduite qui utilisent le réseau en place soit pour proposer des services classiques à des tarifs plus avantageux, soit, comme dans le cas d'Internet, pour mettre en place de nouveaux moyens d'exploiter le réseau. L'intérêt qu'éprouve la société pour les nouvelles formes de communication et de services numériques coïncide par conséquent avec une volonté politique d'assouplir la réglementation de ce qui était autrefois un secteur public. Ces conditions ne sont pas réunies dans le secteur automobile, où il n'existe ni acteurs suffisamment influents pour proposer des concepts différents en matière de mobilité, ni technologies en concurrence parmi lesquelles de larges fractions des utilisateurs pourraient choisir.

Ceci nous amène aux aspects organisationnels de l'innovation technique. Deux points en particulier méritent d'être notés. Premièrement, la diversité des schémas d'innovation, illustrée par les secteurs de l'automobile et des communications, nous aide à prendre conscience du fait que l'innovation technique n'aboutit pas automatiquement à une innovation organisationnelle. Réciproquement, les innovations organisationnelles ne découlent pas de technologies nouvelles, et l'émergence de nouveaux modes d'organisation ne garantit nullement que de nouvelles technologies seront élaborées et utilisées avec succès. Compte tenu de l'ampleur et de la gravité de la crise du modernisme évoquée précédemment, les organisations ne peuvent miser principalement, et encore moins exclusivement, sur l'un ou l'autre potentiel d'innovation, en espérant que le reste des innovations nécessaires finira, d'une façon ou d'une autre, par se matérialiser tôt ou tard. Pour faire face à la crise du modernisme, les organisations doivent non pas exploiter les potentiels d'innovation technologique ou d'innovation organisationnelle indépendamment l'un de l'autre, mais les mêler systématiquement. En d'autres termes, le potentiel d'innovation réel des organisations, jusqu'à présent insuffisamment développé, réside non pas dans les innovations techniques et organisationnelles proprement dites, mais dans leur fusion. Cette fusion, pour ainsi dire, représente un potentiel d'innovation secondaire. De l'aptitude à percevoir ce potentiel et de la volonté de le concrétiser dépendra probablement en grande partie l'issue des efforts déployés par les organisations pour élaborer des stratégies visant à faire face à ces crises.

Deuxièmement, non seulement les deux études de cas attirent l'attention des organisations sur l'existence même d'un tel potentiel d'innovation secondaire, mais elles montrent aussi clairement pourquoi il leur est possible et nécessaire de s'attacher beaucoup plus à le développer qu'elles ne l'ont fait dans le passé. Il est certain que les organisations sont bien souvent tentées de s'abstenir d'exploiter ce potentiel d'innovation, échappant ainsi aux difficultés indéniables que cela entraîne. Elles peuvent, par exemple, suivre la voie de la stagnation et utiliser les innovations technologiques pour stabiliser et préserver les visions, structures sociales et stratégies organisationnelles traditionnelles.

L'exemple de la normalisation d'Internet montre cependant que cette attitude peut mener à une impasse, et ce très rapidement parfois, lorsque d'autres organisations plus jeunes et dynamiques combinent innovation technologique et innovation sociale, empruntant des chemins nouveaux et originaux. Certes, de telles incursions en terrain inconnu sont toujours pleines de risques, car rien ne garantit qu'elles rencontreront un succès durable si tant est qu'elles réussissent. D'autre part, les organisations qui osent rechercher de nouvelles voies de développement et de croissance trouveront souvent de nombreuses occasions hors des chemins balisés. Alors que le xx^e siècle touche à sa fin et que les limites de ces chemins se dessinent de plus en plus clairement, la tâche la plus importante pour les organisations est peut-être de percevoir ces occasions afin de les saisir pour surmonter la crise du modernisme et se préparer aux défis du xxi^e siècle.

La stagnation de l'industrie automobile et la capacité d'innovation du secteur des télécommunications soulèvent enfin la question des enseignements politiques qui peuvent être tirés des deux études de cas. A première vue, la réponse évidente semble être le retrait des institutions politiques. L'expansion du secteur des télécommunications ne prouve-t-elle pas que les marchés sont beaucoup plus novateurs que les structures réglementées? L'industrie automobile semble malheureusement offrir l'exemple inverse. Malgré la concurrence internationale croissante qui s'exerce entre les entreprises du secteur privé, les innovations fondamentales sont collectivement évitées. Qui plus est, les innovations techniques de base concernant Internet ont vu le jour grâce à des financements publics. Aussi la relation entre, d'une part, la mise au point de technologies et, d'autre part, l'autonomie des acteurs privés ou de la réglementation publique, est-elle en réalité plus complexe que ne le laissent supposer les appels à la privatisation en vogue à l'heure actuelle. Comme Schumpeter l'a démontré de façon si convaincante, les innovations radicales constituent en général une menace pour toutes les normes établies et les institutions, publiques ou privées. Le succès inattendu d'Internet est une bonne illustration de cet argument. Du fait que personne n'a jamais formé le projet de construire un réseau mondial ouvert en vue de contourner les législations et les protections douanières nationales, aucun organe politique n'a engagé d'efforts sérieux pour en contrôler le développement et l'utilisation. Internet s'est développé à partir d'une « niche », au sein d'une communauté restreinte, et il a fallu plus de vingt ans pour qu'un public plus large en découvre les avantages. C'est pourquoi l'un des enseignements à tirer est en fait fort banal : en dépit des restrictions financières considérables auxquelles sont soumis de nombreux budgets publics et privés dans les pays de l'OCDE, on ne saurait faire l'économie de telles « niches », d'où la nécessité de soutenir des idées nouvelles et des projets de recherche qui vont au-delà d'objectifs à court terme clairement définis, dans des contextes tant commerciaux qu'universitaires.

NOTES

1. D'après le RFC 1718 (1994), « La première réunion, qui s'est tenue en janvier 1986 au Linkabit à San Diego, ne rassemblait que 15 participants. Le 4^e congrès de l'IETF, organisé au SRI à Menlo Park en octobre 1986, a pour la première fois accueilli des professionnels n'appartenant pas au secteur public... On a compté pour la première fois plus de 100 participants à la 7^e assemblée, réunie au MITRE à McLean (Virginie) ».
2. Il ne s'agit toutefois pas de normes au sens officiel du terme. Dans le vocabulaire d'Internet, on les appelle des *protocoles*. Chacun a le droit de les utiliser, gratuitement et de sa propre initiative. Pour reprendre les mots de l'un des ingénieurs qui travaillent sur ces protocoles : « Les normes volontaires sont prisées par le marché parce que les vendeurs et les utilisateurs décident de réaliser et d'acheter des produits en utilisant ces normes et *choisissent* de participer aux réunions des organisations qui en assurent l'élaboration. Ces organisations fonctionnent à partir de la base (J. Day, 2 mars 1996, liste de diffusion « Ipv6 haters »).

BIBLIOGRAPHIE

- AKRICH, M. (1992), «Beyond Social Construction of Technology: The Shaping of People and Things in the Innovation Process» in M. Dierkes et U. Hoffmann (dir. publ.), *New Technology at the Outset: Social Forces in the Shaping of Technological Innovations*, Campus, Frankfurt am Main, pp. 173-190.
- ALTVATER, E. (1991), *Die Zukunft des Marktes. Ein Essay über die Regulation von Geld und Natur nach dem Scheitern des «real existierenden» Sozialismus*, Westfälisches Dampfboot, Münster.
- ALVESTRAND, H.T. (1997), «The Internet Standardisation Process» in T. Buland, H. Finne, S. Helmers, U. Hoffmann et J. Hofmann (dir. publ.), *Management and Network Technology*, Commission européenne, Bruxelles, pp. 59-66.
- BAECKER, D. (1997), «Weil es so nicht weiter geht : Organisation und Gedächtnis in der Transformationsgesellschaft», *Lettre*, 36(1), pp. 26-29.
- BARBEN, D. (1997), «Genese, Enkulturation und Antizipation des Neuen : Über Schwierigkeiten und Nutzen, Leitbilder der Biotechnologie zu re-konstruieren» in M. Dierkes (dir. publ.), *Technikgenese. Befunde aus einem Forschungsprogramm*, Edition Sigma, Berlin, pp. 133-165.
- BERTHOIN-ANTAL, A., M. DIERKES et K. HÄHNER (1994), «German Corporate Responsibilities: Statements of Principle», *Journal of General Management*, 19(4), pp. 24-40.
- BIJKER, W.E. et J. LAW, dir. publ. (1992), *Shaping Technology, Building Society: Studies in Sociotechnical Change*, MIT, Cambridge, Massachusetts.
- BOLTER, J.D. (1990), *Der digitale Faust*, DVA-Oktagon, Stuttgart.
- BOYER, R. (1986), «Conclusion : Capitalismes fin de siècle» in R. Boyer (dir. publ.), *Capitalismes fin de siècle*, Presses Universitaires de la France, Paris, pp. 225-244.
- BUHR, R. et A. KNIE (1993), «Hätten die mechanischen Schreibmaschinen früher besser sein können?», *Historische Bürowelt*, 35, pp. 11-12.
- CALLON, M. (1991), «Techno-Economic Networks and Irreversibility», *Sociological Review Monograph*, 38, pp. 132-161.
- CANZLER, W. (1996), *Das Zauberlehrlings-Syndrom. Entstehung und Stabilität des Automobil-Leitbildes*, Edition Sigma, Berlin.
- CANZLER, W., S. HELMERS et U. HOFFMANN (1995), *Die Datenautobahn – Sinn und Unsinn einer populären Metapher*, WZB Discussion Paper FS II 95-101, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung.

- CANZLER, W. et A. KNIE (1994), *Das Ende des Automobils – Fakten und Trends zum Umbau der Autogesellschaft*, C.F. Müller, Heidelberg.
- CANZLER, W. et L. MARZ (1997), «Stagnovation : Der Automobilpakt und die gedopte Arbeitsgesellschaft», *Universitas*, 610, pp. 359-371.
- CERF, V. (1993), «How the Internet Came To Be» in B. Aboba (dir. publ.), *The Online User's Encyclopedia*, Addison-Wesley, Reading.
- COMER, D.E. (1991), *Internetworking with TCP/IP. Vol I. – Principles, Protocols, and Architecture*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- COY, W. (1994), «Gutenberg und Turing : Fünf Thesen zur Geburt der Hypermedien», *Zeitschrift für Semiotik*, 1-2, pp. 69-74.
- CROCKER, D. (1993), «Making Standards the IETF Way», *Standard View*, 1(1).
- DERRIDA, J. (1996), *Marx' Gespenster : Der Staat der Schuld, die Trauerarbeit und die neue Internationale*, Suhrkamp, Frankfurt am Main.
- DIERKES, M. (1985), «Research in Search of Relevance and Excellence : The Management of Creativity in the Social Sciences» in Robert Lawrence Kuhn (dir. publ.), *Frontiers in Creative and Innovative Management*, Ballinger Publishing Company, Cambridge, Massachusetts, pp. 221-243.
- DIERKES, M. (1988), «Unternehmenskultur und Unternehmensführung», *Zeitschrift für Betriebswirtschaft*, 5/6, pp. 554-575.
- DIERKES, M. (1990), «Technische Entwicklung als sozialer Prozeß : Chancen und Grenzen einer sozialwissenschaftlichen Erklärung der Technikgenese», *Naturwissenschaften*, 5/90.
- DIERKES, M. (1992), «Leitbild, Lernen und Unternehmensentwicklung : Wie können Unternehmen sich vorausschauend veränderten Umfeldbedingungen stellen?» in C. Krebsbach-Gnath (dir. publ.), *Den Wandel in Unternehmen steuern : Faktoren für ein erfolgreiches Change-Management*, Frankfurter Allgemeine Zeitung, Frankfurt am Main, pp. 19-36.
- DIERKES, M. (1993), *Die Technisierung und ihre Folgen : Zur Biographie eines Forschungsfeldes*, Edition Sigma, Berlin.
- DIERKES, M. (1994), «Leitbilder der Technik – ihre Bedeutungen, Funktionen und Potentiale für den KI-Diskurs» in Verein Deutscher Ingenieure (VDI) (dir. publ.), *VDI-Report 21 : Künstliche Intelligenz – Leitvorstellungen und Verantwortbarkeit*, vol. 2, VDI, Düsseldorf, pp. 83-98.
- DIERKES, M. (1997), «Zukunftswissenschaft? Über den Ausgangspunkt und die (Un-) Realisierbarkeit einer Forschungsanforderung», *Wechselwirkung*, 83, pp. 46-56.
- DIERKES, M., R. BUHR, W. CANZLER et A. KNIE (1995), *Erosionen des Automobil-Leitbildes : Auflösungserscheinungen, Beharrungstendenzen, neue technische Optionen und Aushandlungsprozesse einer zukünftigen Mobilitätspolitik. Begründung eines Forschungsvorhabens*, Note de synthèse FS II 95-107, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung.
- DIERKES, M., W. CANZLER, L. MARZ et A. KNIE (1995), «Politik und Technikgenese», *Verbund Sozialwissenschaftliche Technikforschung. Mitteilungen*, 15, pp. 7-28.

- DIERKES, M. et K. HÄHNER (1994), «Unternehmenslernen als Komponente des Wachstums», in H. Albach (dir. publ.), *Globale soziale Marktwirtschaft : Ziele-Wege-Akteure*, Gabler, Wiesbaden, pp. 247-262.
- DIERKES, M., K. HÄHNER et A. BERTHOIN-ANTAL (1997), *Das Unternehmen und sein Umfeld. Wahrnehmungsprozesse und Unternehmenskultur am Beispiel eines Chemiekonzerns*, Campus, Frankfurt am Main.
- DIERKES, M. et U. HOFFMANN, dir. publ. (1992), *New Technology at the Outset: Social Forces in the Shaping of Technological Innovations*, Campus, Frankfurt am Main.
- DIERKES, M., U. HOFFMANN et L. MARZ (1996), *Visions of Technology: Social and Institutional Factors Shaping the Development of New Technologies*, St. Martins, New York.
- DIERKES, M. et L. MARZ (1994), «Unternehmensverantwortung und leitbildorientierte Technikgestaltung» in W. Zimmerli et V. Brennecke (dir. publ.), *Technikverantwortung in der Unternehmenskultur. Von theoretischen Konzepten zur praktischen Umsetzung*, Schäffer-Poeschel, Stuttgart, pp. 89-114.
- DIERKES, M. et L. MARZ (1998), *Leitbild und Lernen : Zum Organisationslernen in Krisen* (Manuscript en préparation).
- DIERKES, M. et K. ZIMMERMANN, dir. publ. (1996), *Sozialstaat in der Krise. Hat die soziale Marktwirtschaft noch eine Chance?*, Gabler, Wiesbaden.
- FOURASTIÉ, J. (1979), *Les trentes glorieuses ou la révolution invisible de 1946 à 1975*, Fayard, Paris.
- FUKUYAMA, F. (1992), *Das Ende der Geschichte. Wo stehen wir?*, Kindler, Munich.
- GENSCHEL, P. (1995), *Standards in der Informationstechnik. Institutioneller Wandel in der internationalen Standardisierung*, Campus, Frankfurt am Main.
- GLYN, A., A. HUGHES, A. LIPIETZ et A. SINGH (1990), «The Rise and Fall of the Golden Age» in S. Marglin et J.B. Schor (dir. publ.), *The Golden Age of Capitalism : Reinterpreting the Postwar Experience*, Clarendon, Oxford, pp. 39-125.
- GRASSMUCK, V. (1995), «Die Turing-Galaxis : Das Universal-Medium auf dem Weg zur Weltsimulation», *Lettre Internationale*, I, pp. 48-55.
- GROTE, C. v., S. HELMERS, U. HOFFMANN et J. HOFMANN, dir. publ. (1994), *Kommunikationsnetze der Zukunft – Leitbilder und Praxis*, Note de synthèse FS II 94-103, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung.
- HAFNER, K. et M. LYON (1996), *Where Wizards Stay Up Late : The Origins of the Internet*, Simon and Schuster, New York.
- HELLIGE, H.D. (dir. publ.), *Technikleitbilder auf dem Prüfstand. Leitbild-Assessment aus Sicht der Informatik- und Computergeschichte*, Edition Sigma, Berlin.
- HELMERS, S., U. HOFFMANN et J. HOFMANN (1996a), *Netzkultur und Netzwerkorganisation. Das Projekt «Interaktionsraum Internet»*, Note de synthèse FS II 96-103, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung.
- HELMERS, S., U. HOFFMANN et J. HOFMANN (1996b), «Standard Development as Techno-social Ordering : The Case of the Next Generation of the Internet Protocol» in

- T. Buland, H. Finne, S. Helmers, U. Hoffmann et J. Hofmann (dir. publ.), *Management and Network Technology*, Commission européenne, Bruxelles, pp. 35-58.
- HOFFMANN, U. et L. MARZ (1992), «Leitbildperspektiven. Technische Innovationen zwischen Vorstellung und Verwirklichung» in K. Burmeister et K. Steinmüller (dir. publ.), *Streifzüge ins Übermorgen. Science Fiction und Zukunftsforschung*, Beltz, Weinheim, pp. 197-222.
- HOFMANN, J. (1996), «Vorstellungen und Bilder in der Technikerzeugung – Eine Episode aus der Biographie des schreibenden Computers» in H.D. Hellige (dir. publ.), *Technikleitbilder auf dem Prüfstand : Leitbild-Assessment aus Sicht der Informatik – und Computergeschichte*, Edition Sigma, Berlin, pp. 161-184.
- HOFMANN, J. (1997), «Über Nutzerbilder in Textverarbeitungsprogrammen – Drei Fallbeispiele» in M. Dierkes (dir. publ.), *Technikgenese. Befunde aus einem Forschungsprogramm*, Edition Sigma, Berlin, pp. 71-97.
- HUITEMA, C. (1995), *Routing in the Internet*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- JASANOFF, S., dir. publ. (1995), *Handbook of Science and Technology Studies*, Sage, Thousand Oaks, Californie.
- JOERGES, B. (1993), *Große technische Systeme. Zum Problem technischer Größenordnung und Maßstäblichkeit*, Note de synthèse FS II 93-507, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung.
- KNIE, A. (1994), *Wankel-Mut in der Automobil-Industrie. Anfang und Ende einer Antriebsalternative*, Edition Sigma, Berlin.
- KNIE, A., dir. publ. (1997), *Die Neuerfindung urbaner Automobilität : Elektroautos in den USA und in Europa* (Manuscrit en préparation).
- KOWACK, G. (1997), Internet Governance and the Emergence of Global Civil Society, *IEEE Communications Magazine*, 35(5), pp. 52-57.
- KRUPP, C. (1995), *Klimaänderung und die Folgen. Eine exemplarische Fallstudie über die Möglichkeiten und Grenzen einer interdisziplinären Klimafolgenforschung*, Edition Sigma, Berlin.
- LA PORTE, T. (1991), *Social Responses to Large Technical Systems: Control and Anticipation*, Kluwer, Dordrecht.
- LATOUR, B. (1995), *Wir sind nie modern gewesen. Versuch einer symmetrischen Anthropologie*, Akademie Verlag, Berlin.
- LAW, J. (1992), «Notes on the Theory of the Actor-Network: Ordering, Strategy, and Heterogeneity», *Systems Practice*, 5, pp. 379-393.
- LEHR, W. (1995), «Compatibility Standards and Interoperability : Lessons from the Internet» in B. Kahin et J. Abbate (dir. publ.), *Standards Policy for Information Infrastructure*, MIT, Cambridge, Massachusetts, pp. 121-147.
- MARZ, L. (1993a), *Leitbild und Diskurs : Eine Fallstudie zur diskursiven Technikfolgenabschätzung von Informationstechniken*, Note de synthèse FS II 93-106, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung.

- MARZ, L. (1993b), *Das Leitbild der posthumanen Vernunft. Zur diskursiven Technikfolgenabschätzung der «Künstlichen Intelligenz»*, Note de synthèse FS II 93-III, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung.
- MARZ, L. et M. DIERKES (1994), «Leitbildprägung und Leitbildgestaltung : Zum Beitrag der Technikgenese-Forschung für eine prospektive Technikfolgen-Regulierung» in G. Bechmann et T. Petermann (dir. publ.), *Interdisziplinäre Technikforschung : Genese, Folgen, Diskurs*, Campus, Frankfurt am Main, pp. 35-71.
- MAYNTZ, R. (1993), «Große technische Systeme und ihre gesellschaftstheoretische Bedeutung», *Kölner Zeitschrift für Soziologie und Sozialpsychologie*, 45(1), pp. 97-108.
- MORAVEC, H. (1990), *Mind Children : Der Wettlauf zwischen menschlicher und künstlicher Intelligenz*, Hoffmann & Campe, Hamburg.
- NRC (National Research Council), dir. publ. (1988), *The Behavioral and Social Sciences : Achievements and Opportunities*, National Academy Press, Washington, DC.
- OFFE, C. (1984), «Arbeitsgesellschaft» : *Strukturprobleme und Zukunftsperspektiven*, Campus, Frankfurt am Main.
- PAWLOWSKY, P. (1994), *Wissensmanagement in der lernenden Organisation*, Postdoctoral Dissertation, University of Paderborn.
- PISCITELLO, David M. et A.L. CHAPIN (1993), *Open Systems Networking : TCP/IP and OSI*, Addison-Wesley, Reading.
- REIDENBERG, J.R. (1997), «Governing Networks and Rule-making in Cyberspace» in B. Kahin et C. Nesson, *Borders in Cyberspace*, MIT, Cambridge, Massachusetts, pp. 84-105.
- RFC 1000 : J. Postel et J. Reynolds (1987), *Request For Comments Reference Guide*.
- RFC 1718 : The IETF Secretariat et G. Malkin (1994), *The Tao of IETF – A Guide for New Attendees of the Internet Engineering Task Force*.
- RFC 1958 : B. Carpenter (1996), *Architectural Principles of the Internet*.
- RFC 2026 : S. Bradner (1996), *The Internet Standards Process – Revision 3*.
- RHEINGOLD, H. (1992), *Virtuelle Welten. Reisen im Cyberspace*, Rowohlt, Reinbek.
- ROGERS, R.A. (1990), *Visions Dancing in Engineers' Heads : AT&T's Quest to Fulfill the Leitbild of a Universal Telephone Service*, Note de synthèse FS II 90-102, Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung.
- SALUS, P.H. (1995), *Casting the Net: From Arpanet to Internet and Beyond*, Addison-Wesley, Reading, Massachusetts.
- WAGNER, P. (1995), *Soziologie der Moderne : Freiheit und Disziplin*, Campus, Frankfurt am Main.
- WILLKE, H. (1997), «Informationstechnische Vernetzung als Infrastrukturaufgabe – Welche Rolle spielt die Politik?» in R. Werle et C. Lang (dir. publ.), *Modell Internet? Entwicklungsperspektiven neuer Kommunikationsnetze*, Campus, Frankfurt am Main, pp. 115-132.

CONDITIONS MACRO-ÉCONOMIQUES PERMETTANT DE RÉALISER LE POTENTIEL TECHNOLOGIQUE

par

Emilio Fontela
Université de Madrid
Espagne

INTRODUCTION : TECHNOLOGIE ET TENDANCES ÉCONOMIQUES A LONG TERME

Les économistes qui s'intéressent aux tendances à long terme distinguent souvent au XIX^e et au XX^e siècle différentes périodes au cours desquelles des grappes d'innovation ont été introduites massivement. Ces innovations se sont développées dans quelques zones géographiques (principalement en Europe occidentale et aux États-Unis) dotées de caractéristiques socio-culturelles et économiques différentes, et se sont diffusées ensuite progressivement et sélectivement dans le reste du monde¹.

En cette fin du XX^e siècle, nous sommes témoins de processus similaires qui se déroulent dans une zone plus large (les pays Membres de l'OCDE) avec une nouvelle grappe de technologies traitant principalement de micro-électronique, d'informatique et de télécommunications (les technologies de la Société de l'information) ainsi que de biotechnologies, de nouvelles sources d'énergie ou de nouveaux matériaux.

Bien sûr, beaucoup des innovations passées, présentes et à venir découlent directement de l'accroissement des connaissances scientifiques et technologiques, mais il est tout aussi évident que le choix de ces innovations et l'ampleur de leur succès dépendent énormément du contexte socio-économique. Le progrès technologique, dans ses retombées novatrices, est à la fois poussé par l'offre (les connaissances scientifiques) et tiré par la demande (les besoins sociaux et économiques).

Au seuil du XXI^e siècle, les économies de l'OCDE sont les témoins de changements sans précédent :

- à l'intérieur, elles redécouvrent le besoin de mécanismes de marché plus actifs, notamment dans le secteur des services (déréglementation et privatisation des transports et des télécommunications, libéralisation des services financiers, etc.);
- à l'extérieur, elles sont en présence d'une transformation profonde du reste du monde qui passe d'une planification centralisée à des systèmes économiques de plus en plus régis par les mécanismes du marché (plus de 3 milliards de personnes se sont engagés dans cette voie ces dernières années), ce qui crée de nouvelles opportunités d'affaires, mais amène aussi de nouveaux concurrents sur leurs marchés traditionnels.

Malgré le dynamisme évident que comporte ce processus d'élargissement du marché, les performances macro-économiques globales des pays de l'OCDE ne sont pas à la hauteur des espérances. Le taux de croissance du PIB reste faible et le chômage (notamment en Europe) a atteint des niveaux socialement inacceptables. Après le redressement de l'après-guerre et le boom économique qui lui a succédé, les pays industriels avancés accusent manifestement une baisse de régime.

En outre, le taux de variation de la productivité totale des facteurs (PTF) qui mesure les gains macro-économiques liés aux innovations productives² a souvent baissé, ce qui nous amène à nous poser des questions. Les nouvelles technologies se révèlent-elles incapables d'accroître l'efficacité globale du système économique ?

Les chercheurs en économie ont accordé beaucoup d'attention à l'innovation technologique et ont établi certaines relations avec une assez grande fiabilité, aussi bien en théorie qu'en pratique.

Les deux sections suivantes extraient du corps de connaissances existant ce qui apparaît comme les aspects à plus long terme de la relation entre la technologie et l'économie. Ces observations devraient nous aider à tracer les frontières de scénarios pour les années 2020/2030, que nous développerons ensuite. Ce chapitre conclut par une tentative d'envisager les principaux aspects macro-économiques de la Société de l'information qui s'annonce.

QUELQUES ASPECTS SOCIO-ÉCONOMIQUES DES CHANGEMENTS TECHNIQUES

La négligence relativement sereine (*benign neglect*) avec laquelle les auteurs néoclassiques d'ouvrages macro-économiques analysent le changement technique a été compensée par une analyse empirique approfondie de la fonction

globale de production et de la PTF (productivité totale des facteurs) en tant qu'élément immatériel de la croissance de la production (ou de la valeur ajoutée). (Dans le contexte néoclassique, en régime de concurrence parfaite et de rendements d'échelle constants, la PTF mesure les changements des fonctions de production qui sont à interpréter comme des changements techniques.)

Des études récentes de l'OCDE sur la quantification comptable de la croissance, menées dans les années 70 et 80, estiment le taux de croissance annuel moyen du PIB (pour un échantillon de 10 pays Membres) à 2.9 pour cent pour les vingt années considérées, la part du facteur travail augmentant au rythme de 0.6 pour cent, celle du capital au taux de 1.1 pour cent, le reste (1.2 pour cent) correspondant à la croissance de la PTF (environ 40 pour cent de la croissance totale s'explique donc par la PTF)³.

D'où viennent exactement ces gains de PTF? Bien évidemment du changement technique, mais pris dans un sens très large. Tandis que l'explication des variations de la PTF peut être associée empiriquement à des variables du développement technologique, telles que la R-D, ou à des variables relatives aux ressources humaines, telles que le niveau d'éducation de la main-d'œuvre⁴ (et l'on a des preuves abondantes de ces deux relations), il faut comprendre plus en profondeur le processus mis en œuvre. On pourrait faire référence aux théories modernes du management dans lesquelles la compétitivité de la firme repose fondamentalement sur :

- les capacités technologiques;
- les capacités humaines;
- et les capacités organisationnelles⁵.

A l'échelle macro-économique, on pourrait supposer, de la même façon, que la croissance de la PTF est le résultat d'un processus d'accumulation de capital immatériel (technologique, humain et organisationnel). Ce capital immatériel est, pour l'essentiel, complémentaire du capital matériel et pourrait probablement remplacer le facteur travail (un pays comme les États-Unis, avec une croissance relativement faible de la PTF, présente aussi un taux de croissance relativement faible de la productivité de la main-d'œuvre; l'Europe, qui enregistre des taux de croissance de la PTF relativement élevés, est confrontée à de graves problèmes de chômage). En général, il n'y a pas d'expansion sans investissement matériel, et pas d'innovation sans investissement immatériel⁶.

S'il est évident qu'il y a un lien direct entre l'accumulation technologique et les dépenses de R-D d'une part, et entre l'accumulation de ressources humaines et les investissements dans la formation d'autre part, l'accumulation de capacités organisationnelles est plus opaque et comprend des notions telles que l'efficacité des infrastructures⁷, le fonctionnement des institutions et du cadre réglementaire et – très probablement – un large éventail d'éléments culturels⁸;

elle comprend aussi, cela va sans dire, l'évolution des caractéristiques de la structure productive elle-même – de l'organisation globale de la production en réseaux de produits et de branches d'activité.

Dans ce contexte, parmi les plus récentes contributions apportées à l'analyse du changement technique dans les pays de l'OCDE, deux aspects éclairent de façon particulièrement intéressante l'analyse de l'évolution future possible :

- les retombées technologiques; et
- l'adéquation des innovations aux structures institutionnelles.

Les retombées technologiques

Les aspects interdépendants de la structure de production induisent des externalités associées aux innovations, appelées habituellement « retombées sous forme de savoir » (lorsqu'il s'agit de l'utilisation de connaissances technologiques développées dans une branche par une autre branche) ou de « retombées sous forme de rente » (lorsqu'il s'agit de diminution de prix ou d'amélioration de la qualité d'intrants fournis par une branche innovante à ses clients).

Le fait que des retombées sous forme de savoir existent apparaît clairement dans les données sur les brevets ou dans les données tirées des enquêtes sur l'innovation : tout secteur économique s'appuie, pour se développer, sur des évolutions technologiques provenant d'autres secteurs. Plusieurs études ont aussi montré que les efforts de R-D déployés par le secteur fournisseur (convenablement pondérés par les coefficients techniques d'entrées-sorties) expliquent en partie la croissance de la PTF de la branche cliente.

Comme la R-D n'est qu'un aspect du processus d'accumulation technologique et que ce dernier n'est aussi qu'une partie de l'accumulation totale de capital immatériel, on s'attendrait à ce que la croissance de la PTF d'une branche s'explique encore mieux par une combinaison pondérée de la croissance de la PTF des secteurs fournisseurs⁹.

Il est donc clair que la structure d'une économie représente un élément important de la croissance de sa PTF et, par là, de sa capacité d'innovation.

Lorsqu'on examine les « retombées sous forme de rente », d'autres questions surgissent au premier plan. L'idée sous-jacente aux retombées sous forme de rente est la suivante : par suite d'une innovation, un fournisseur peut soit diminuer son prix, soit augmenter sa qualité, aidant ainsi le client à accroître sa propre PTF. Ceci soulève la question de l'appropriation des gains de PTF, et renvoie directement à la structure du marché. Une concurrence parfaite conduira à des prix décroissants (ou à une qualité croissante) chez l'entreprise innovante, alors qu'un monopole pourra tirer pleinement parti de la rente générée par l'innovation¹⁰.

Les retombées sous forme de rente sont un élément important des processus de croissance dans les pays industriels avancés : des baisses de prix relatifs des produits manufacturés résultant de la croissance de la PTF induisent des réactions d'élasticité de la demande qui stimulent la croissance de la production et de nouvelles hausses de la PTF. Un tel cercle vertueux a soutenu le processus de croissance dans les années 50 et 60, mais sa base s'est considérablement érodée dans les années 70 et 80 (avec une saturation croissante de biens de consommation durables qui a modifié les réactions d'élasticité, et l'apparition d'autres contraintes dans les processus d'innovation pour bon nombre d'industries manufacturières, notamment au niveau des biens intermédiaires et des produits de base)¹¹.

Concordance entre changement technologique et changement socio-économique

L'analyse néo-schumpéterienne des cycles longs du développement économique et de leur relation aux changements de paradigmes technologiques a précisé davantage l'argument selon lequel les crises sont la conséquence d'un manque d'adéquation entre un nouveau système technologique et l'évolution du système social, économique ou institutionnel environnant¹².

Pour se déployer complètement, un nouveau paradigme technologique (interprété comme une grappe d'innovations fondamentales simultanées) ne peut être dissocié d'une nouvelle organisation de la production, d'une nouvelle répartition des revenus, de nouvelles structures d'emploi, de nouveaux modes de consommation, de nouvelles relations entre activités publiques et privées, etc.. Ainsi, les nouvelles technologies de la Société de l'information sont source de problèmes pour les anciennes structures socio-économiques, et elles ne peuvent réaliser la totalité de leur potentiel positif tant que la société et les institutions sociales ne sont pas capables d'être en parfaite résonance avec elles.

Pendant une période de transition comme celle dont nous sommes les témoins, à la fin du xx^e siècle, les nouveaux systèmes socio-économiques qui réaliseront le potentiel technologique de la Société de l'information en sont encore au stade embryonnaire, et beaucoup de scénarios différents restent ouverts pour l'avenir.

CHANGEMENT TECHNOLOGIQUE, CROISSANCE ÉCONOMIQUE ET EMPLOI

La section précédente a fait ressortir que la réalisation du potentiel technologique au niveau macro-économique dépendra non seulement des efforts déployés concrètement dans les domaines de la R-D et de l'éducation, mais aussi de la structure du système économique (sa capacité à induire des retombées sous forme de savoir et de rente) et de son adéquation avec le reste des

systèmes sociaux. La présente section examine l'effet que peut avoir la réalisation de ce potentiel économique sur la structure économique et sociale.

Le modèle de croissance déséquilibrée de Baumol¹³ donne une indication importante sur cette question ; si dans une économie certains secteurs présentent une PTF en croissance rapide suite à une augmentation des activités innovantes, alors que d'autres demeurent plus ou moins stagnants en termes de changement technologique, les prix relatifs de la production des secteurs stagnants vont augmenter progressivement et la main-d'œuvre va se déplacer vers ces secteurs stagnants.

Pour bien comprendre où se situe la limite entre les secteurs où la croissance de la PTF est en progrès et ceux où elle est stagnante, il faut rappeler la différenciation du rôle de la main-d'œuvre que fait Baumol : lorsque la main-d'œuvre est avant tout un instrument (« un moyen de production accessoire pour parvenir au produit final »), elle peut être remplacée progressivement par d'autres instruments, mais cela devient purement et simplement impossible quand « la main-d'œuvre est elle-même le produit final ». C'est le cas, bien entendu de nombreuses activités de services où le travail humain est un produit final et leur PTF devrait être relativement stagnante ; mais pratiquement toutes les activités manufacturières et beaucoup de services (notamment les services en réseaux de transport, de communication ou financiers) ont un produit final qui ne nécessite pas nécessairement une main-d'œuvre humaine. Aussi, à très long terme, le modèle de Baumol envisage-t-il une redéfinition sociale du rôle du travail et de l'emploi, et la vitesse de ce changement sera fonction de la vitesse à laquelle de nouvelles technologies économisant de la main-d'œuvre seront introduites par les secteurs où la PTF est élevée.

Le modèle de croissance déséquilibrée, malgré son côté dichotomique un peu simpliste, explique assez bien certains processus macro-économiques fondamentaux du changement observé ces dernières décennies dans les sociétés industrielles avancées. L'emploi et les prix relatifs ont augmenté dans certains secteurs de services, alors que leur part dans la production en volume restait relativement constante ; cette transformation structurelle peut expliquer en partie le ralentissement global de la croissance économique¹⁴.

En supposant que les secteurs où se produisent des innovations puissent, par des baisses de prix (ou des améliorations de qualité) répercuter une partie (ou la totalité) des gains sur les utilisateurs, le résultat final en termes de croissance dépendra de la demande finale, soit directement (si les innovations sont introduites au niveau du consommateur), soit indirectement (si elles sont relatives aux consommations intermédiaires ou aux biens d'équipement). Ainsi, l'élasticité-prix et l'élasticité-revenu de la demande jouent un rôle essentiel en créant une réponse dynamique au changement novateur.

Si nous supposons encore que, dans les pays Membres de l'OCDE, beaucoup de produits manufacturés sont proches des niveaux de saturation (et donc de moins en moins élastiques en réaction aux variations de revenu ou de prix), la question clé concerne la possibilité, pour les nouvelles technologies, soit de développer des produits manufacturés entièrement nouveaux correspondant à de nouveaux modes de consommation (par exemple, les PC), soit d'abaisser le prix de certains services et, dans ces cas là, de trouver des demandes suffisamment élastiques. Alors qu'il peut y avoir certaines limites intrinsèques au développement permanent de nouveaux produits manufacturés, il en va différemment pour les services car pour beaucoup d'entre eux, la saturation est difficile à envisager (il en est ainsi pour l'éducation, la santé, les loisirs, les transports, les services de communication ou d'information).

Dans ces hypothèses, le modèle de croissance future des pays de l'OCDE dépend largement de l'introduction des nouvelles technologies dans les secteurs de services qui emploient encore une main-d'œuvre instrumentale. (Ce sont les seuls où l'innovation technologique est possible car, par définition, les secteurs où la main-d'œuvre est le produit ne peuvent pas être changés technologiquement – bien qu'ils puissent être technologiquement remplacés ou que leur contenu qualitatif puisse être technologiquement modifié.)

SCÉNARIOS

Face au problème de l'introduction de nouvelles technologies, les pays industriels avancés de l'OCDE doivent examiner un certain nombre de questions qui leur lancent un défi; parmi celles-ci, les suivantes nécessitent une attention spéciale :

- Sera-t-il possible de maintenir un haut niveau de bien-être et d'emploi?
- Sera-t-il possible de maintenir l'équilibre écologique?
- Comment les nouveaux développements technologiques influenceront-ils les relations avec le reste du monde?

Ces défis mettent véritablement en cause le modèle de croissance associé aux nouvelles technologies – celui de la Société de l'information. Les caractéristiques de ce modèle peuvent être explorées en examinant divers scénarios – et ceux-ci, à leur tour, peuvent donner quelques idées sur les chemins d'avenir les plus probables.

Le premier scénario (basé sur le «sens commun») reflète l'ensemble des opinions actuelles sur l'avenir (qui reflètent normalement le passé récent ainsi que quelques tendances clairement identifiées à long terme).

Pour approfondir l'analyse, on examinera deux autres scénarios possibles, centrés sur des points de vue opposés quant au rôle des pouvoirs publics dans la promotion des politiques d'innovation. Ces alternatives sont de simples transfor-

mations du scénario basé sur le sens commun ; la première renforce le transfert de responsabilités aux mécanismes du marché (scénario axé sur le « marché »), la deuxième renforce les processus institutionnels (scénario de la « nouvelle société »).

L'analyse est donc construite autour d'une voie centrale, fortement dépendante de situations actuelles supposées réalistes, entourée d'une marge limitée par des concepts radicalement « purs » qui ont peu de chances de se concrétiser (car les systèmes réels ont tendance à être plus complexes et plus « mitigés »). A supposer que le scénario basé sur le sens commun aille dans la bonne direction, la marge couvrira les fluctuations conjoncturelles autour du chemin central, c'est-à-dire les variations entre des contextes socio-politiques qui sont caractéristiques des sociétés industrielles modernes avancées.

Le scénario basé sur le sens commun

Il est assez rare qu'on fasse l'effort d'élaborer des visions cohérentes à long terme de grands systèmes économiques et sociaux, bien que le nombre d'études à plus ou moins long terme sur des questions spécifiques augmente actuellement¹⁵.

Quelques unes des principales caractéristiques du scénario basé sur le sens commun pourraient être les suivantes :

- On s'attend que dans le monde, et notamment dans la zone de l'OCDE, se renforcent les processus d'intégration économique, avec le développement de l'Union monétaire européenne et la création de vastes zones de libre-échange (dans le bassin du Pacifique, dans les Amériques et éventuellement dans la zone atlantique), dans le cadre d'une tendance générale à l'élimination de tous les obstacles aux échanges et autres (OMC).
- Les secteurs de services, qui fonctionnaient traditionnellement dans des marchés nationaux surréglementés et surprotégés, s'ouvriront à la concurrence ; cette tendance, déjà apparente dans des secteurs clés de services comme la finance, les transports et les communications, devrait cantonner les zones « abritées » des économies nationales aux seules activités de services publics qui ne cessent de se rétrécir ; on s'attend aussi de plus en plus à ce que les services sociaux, traditionnellement assurés dans des conditions monopolistiques par des agents de l'État, s'ouvrent à l'offre concurrentielle d'acteurs privés (marchés contestables).
- L'accroissement attendu de la concurrence internationale sur tous les marchés de produits et de services devrait stimuler le processus de mondialisation en ce qui concerne les agents économiques de production (grandes firmes multinationales ou réseaux d'entreprises fondés sur des accords en matière de technologie, d'installations de production, de marketing, etc.) ;

ce processus de mondialisation est déjà visible dans le secteur des services financiers, mais il se développe aussi rapidement dans le secteur manufacturier (par exemple, dans l'automobile) et dans d'autres services (par exemple, les télécommunications).

- L'accès à la technologie et aux ressources financières est considéré comme nécessaire à la compétitivité à tous les niveaux (de l'entreprise et même de la région et de la nation) ; dans les pays de l'OCDE, la permanence des investissements dans la R-D devrait établir solidement le leadership mondial de la zone dans les domaines de la science et de la technologie.

Pour résumer les principales caractéristiques d'un tel scénario fondé sur le sens commun pour les premières décennies du ^{xxi}^e siècle, on peut dire que cette période devrait se caractériser par l'émergence d'un « système économique mondial » de plus en plus orienté par une logique à la fois technologique et économique de compétitivité et d'efficacité. Le nouveau système dispose d'agents clairement identifiés (les entreprises), mais le rôle de l'État a besoin d'être redéfini.

Ce scénario basé sur le sens commun fait référence à des points de vue souvent implicites sur l'avenir, qui sont considérés comme les plus probables par les analystes du long terme. Parmi ces points de vue, nous avons retenu les suivants qui traitent des défis mentionnés plus haut, en faisant toujours référence à la zone de l'OCDE.

a) *Croissance et emploi*

L'impression générale est que, malgré l'activité d'innovation associée aux nouvelles technologies (TI, biotechnologie, nouveaux matériaux) et les gains de productivité à attendre d'une spécialisation accrue des échanges (résultant de l'élimination des obstacles au commerce international) ainsi que de l'efficacité de la mondialisation financière (abaissant globalement les coûts de transaction pour l'économie mondiale), le taux de croissance des pays de l'OCDE restera relativement bas, aussi bien en termes de démographie que d'activité économique (voir tableau 1) :

Tableau 1. **Taux de croissance de la population et du PIB (PPA)**

Taux annuels, en pourcentage

	Population		PIB (PPA)	
	1995/1960	2030/1995	1995/1960	2030/1995
Monde	1.8	1.1	3.7	3.8
OCDE	0.9	0.3	3.3	2.1

Source : CEPII, 1996¹⁶.

En conséquence, on s'attend à ce que les économies de la zone de l'OCDE, qui représentaient 59 pour cent de la production mondiale en 1960 et 52 pour cent en 1995, ne comptent plus que pour 30 pour cent dans la production mondiale en 2030. Il fait toutefois peu de doute que la zone de l'OCDE, en tant que zone la plus avancée technologiquement dans le monde, continuera d'être la principale source de nouveaux développements technologiques et d'innovations.

Les nouvelles technologies devraient modifier pratiquement tous les produits et procédés, les styles de vie et l'organisation de la production, la distribution et la consommation, ainsi que le fonctionnement du système financier. Le sens commun associe les nouvelles technologies au développement de la compétitivité dans les entreprises, les régions et les nations, justifiant ainsi des politiques publiques énergiques dans ce domaine. L'augmentation de la sécurité mondiale se traduisant par une diminution relative de la recherche technologique à caractère militaire, on prévoit que les efforts de R-D se réorienteront vers des objectifs économiques et sociaux¹⁷.

Il est aussi généralement admis que les décennies à venir confirmeront le passage progressif à une économie « planétaire », avec liberté totale de circulation des capitaux, des biens et des services. Dans ce cadre, on peut aussi prévoir que les activités manufacturières se développeront relativement plus vite en dehors de la zone de l'OCDE. Ainsi, dans le scénario basé sur le sens commun, de sérieux doutes subsistent quant à la façon dont on pourrait réaliser le plein emploi dans les pays de l'OCDE. On envisage souvent comme une possibilité l'évolution vers plus d'emploi dans le domaine des activités tertiaires, mais un grand nombre de secteurs de services, principalement les services en « réseaux » (comme la distribution de l'énergie, les transports, les communications, les échanges, la finance et la banque, l'assurance et l'immobilier) manifestent déjà des signes de réduction de la main-d'œuvre¹⁸. On s'attend donc que la création d'emplois se concentrera sur la production de savoir et sur les secteurs de services aux personnes (management, recherche, santé, éducation, loisirs, gestion publique, ou même économie domestique), ou sur le « secteur du changement » (activités de développement de l'innovation dans tous les secteurs), principalement pour les « travailleurs intellectuels » pour lesquels le travail est plutôt un produit final, ou alors pour les travailleurs des services « de niveau inférieur » (qui exécutent encore des activités ne justifiant pas que l'on investisse dans leur automatisation).

L'identification du travail à un « produit » crée de grandes différences dans la capacité qu'ont les travailleurs à générer des revenus, qui dépendra fondamentalement de la valeur marchande de ces « produits » – elle même fonction de références culturelles. Une plus grande inégalité de revenus est donc associée implicitement au modèle de croissance basé sur le sens commun, et plusieurs options restent ouvertes aux responsables des politiques. (Actuellement, les

États-Unis acceptent l'effet de répartition inégale des revenus; la plupart des pays européens préfèrent implicitement la redistribution des revenus et le chômage, tandis que le Japon valorise davantage culturellement certains services à faible productivité et fonctionne donc avec de plus grandes différences de prix relatifs.)

b) Qualité de vie et environnement

Le point de vue traditionnel sur l'avenir à long terme de la qualité de l'environnement prend en compte l'importance croissante des problèmes de nature planétaire, régionale ou urbaine et la nécessité de politiques énergiques (fiscalité et réglementation, ou dépenses publiques). En général, l'introduction réussie de nouvelles technologies fait naître de grandes espérances (amélioration de la qualité de vie, procédés de production plus propre, rétablissement des processus d'équilibre écologique, etc.), ce qui nécessite, encore une fois, des politiques publiques dynamiques en matière de R-D.

« L'image désirable » à long terme d'une croissance écologiquement viable dans la zone de l'OCDE exige donc des politiques publiques assorties de niveaux de priorité qui différeront largement d'un pays à un autre. Le scénario basé sur le sens commun reste toutefois relativement optimiste : dans le cadre de la croissance et du développement technologique évoqués plus haut sous *a*), les économies de l'OCDE devraient pouvoir grandement améliorer leur viabilité écologique et leur qualité de vie dans les prochaines décennies.

c) Relations avec le reste du monde

Le scénario basé sur le sens commun suppose que le reste du monde évoluera en permanence vers des systèmes économiques et sociaux alignés sur ceux traditionnellement adoptés par les pays de l'OCDE, de sorte qu'ils s'appuieront largement sur les marchés et sur des administrations contrôlées démocratiquement, appliquant des politiques compatibles avec le fonctionnement du marché.

Cet aspect du scénario basé sur le sens commun est actuellement corroboré dans les recommandations du FMI, dans les actions de l'OMC, et aussi dans la tendance à la mondialisation au sein du système financier (renforcée par la diffusion technologique de l'informatique et des télécommunications).

Dans ce contexte, on attend de la zone de l'OCDE qu'elle se comporte comme un centre technologique utilisant ses gains d'innovation pour maintenir à la fois sa position commerciale concurrentielle et son rôle pilote dans les transferts technologiques et les IDE. En général, le scénario de sens commun, tout en acceptant le déclin relatif de l'importance des pays de l'OCDE dans l'économie

mondiale, est fondamentalement optimiste quant à leur modèle de croissance fondé sur la technologie. Après la fin de la guerre froide, les pays industriels avancés s'attendent à une période de plus grande stabilité et de développement économique plus soutenu au niveau mondial; le sens commun envisage une série d'évolutions puissantes susceptibles de renforcer la position des économies de l'OCDE, celle de leader dans le développement des nouvelles technologies et sur les marchés financiers. La finance et la technologie sont les facteurs déterminants de la compétitivité, et dans ces deux domaines, la zone de l'OCDE jouit clairement d'un avantage sur le reste du monde. Le fait que le sens commun ne prévoie pas que cet avantage se traduise par une croissance et un emploi plus élevés dans la zone de l'OCDE au XXI^e siècle, est la preuve de l'existence d'autres contraintes socio-politiques (concernant principalement la démographie, les valeurs ou les institutions) qui pèsent sur ce scénario économique.

Scénario axé sur le marché

Le scénario axé sur le marché est envisagé en marge du scénario basé sur le sens commun; il s'appuie sur les propositions les plus extrêmes qui existent actuellement concernant l'application des principes de la concurrence parfaite¹⁹. Il est donc basé sur les mêmes idées générales concernant l'avenir du libre échange dans le domaine des biens et des services et la mondialisation des marchés et des agents économiques. La principale différence par rapport au scénario basé sur le sens commun réside dans la définition de la limite entre activités marchandes et non marchandes. Dans le scénario du marché, les activités des entités publiques sont réduites à celles d'un État « minimal » (justice, défense et administration); la réglementation par le gouvernement démocratiquement élu de l'État remplace l'intervention directe des pouvoirs publics. L'État cesse totalement d'être un producteur de services d'intérêt économique direct (transports et communications) et transfère au secteur privé la production de services sociaux (éducation, santé, assurance, etc.).

Dans le domaine de la science et de la technologie, l'État évite aussi toute activité susceptible d'avoir un intérêt économique (qui doit donc être développée par des agents économiques privés). En conséquence de la privatisation des services publics traditionnels, on attend des entreprises actives sur ces marchés qu'elles suivent la logique de la mondialisation, élargissant ainsi leur zone d'influence au-delà des frontières nationales.

a) Croissance et emploi

Au cas où la zone de l'OCDE serait capable de suivre le scénario axé sur le marché, on pourrait s'attendre à ce que le taux de croissance de la production soit plus élevé que dans le scénario basé sur le sens commun :

- le transfert des services sociaux aux forces du marché devrait, en principe, stimuler leur taux d'innovation grâce aux pressions exercées par la concurrence; les nouvelles TI, appliquées à l'éducation et à la santé, pourraient atteindre des niveaux de diffusion plus élevés;
- face à une demande élastique par rapport aux prix et aux revenus, des services sociaux entièrement privatisés pourraient contribuer au cercle «vertueux» suivant : demande – production supplémentaire – baisse des prix relatifs – demande supplémentaire;
- l'État «minimal» devrait pouvoir réduire la charge fiscale et éliminer les déficits budgétaires, permettant ainsi un abaissement du coût du capital pour les investissements privés.

Parce que la nouvelle vague technologique est centrée sur les TI et que ces technologies sont particulièrement pertinentes dans le secteur des services, il semblerait que les effets positifs attendus de leur introduction dépendront largement du dynamisme des services en matière d'innovation, et il est généralement admis que ce dynamisme est plus grand dans des conditions d'économie de marché : la libéralisation des marchés financiers a déjà grandement stimulé l'innovation et l'efficacité financières, et a été liée à un processus de changement technologique rapide et de mondialisation. Il en va de même dans d'autres secteurs clés de l'économie, comme les télécommunications et le transport aérien, qui ont été stimulés technologiquement et stratégiquement par les processus de déréglementation et de privatisation intervenus dans de nombreux pays de l'OCDE.

L'introduction accélérée des TI dans le secteur des services (notamment dans les services sociaux) devrait modifier de façon importante la demande de main-d'œuvre; comme on le voit déjà dans l'agriculture et dans la plupart des activités manufacturières, le travail instrumental devrait aussi disparaître progressivement, mais néanmoins rapidement, dans de nombreuses activités de services (intensifiant ainsi l'évolution vers une situation où «le travail est un produit»), notamment dans les services de réseaux traditionnels (comme les transports ou la finance), mais aussi dans les «nouveaux» services de réseaux de l'éducation et de la santé du fait de la généralisation des TI. La question de l'emploi prend ainsi plus de poids dans ce scénario.

Dans un pur scénario axé sur le marché, le plein emploi est toutefois obtenu directement sur un marché flexible, sans contraintes réglementaires (comme le

salaire minimum) ni positions oligopolistiques, grâce à une simple baisse en termes réels du taux de salaire moyen.

Inutile de préciser que les principaux résultats négatifs, dans ce scénario, concernent la distribution des revenus : on pourrait s'attendre à une croissance rapide des inégalités jusqu'à des niveaux inacceptables socialement, comme on l'a déjà observé dans un passé récent dans des pays qui ont pris la direction du « minimum d'État » (comme l'Argentine) ou d'une profonde déréglementation (comme les États-Unis).

Dans le domaine des technologies et de l'innovation, les défaillances du marché risquent d'abaisser la croissance économique attendue.

Premièrement, il est possible que la faible probabilité d'appropriation des résultats de la recherche scientifique fondamentale débouche sur un sous-investissement dans ce domaine, réduisant ainsi le flux de nouvelles technologies poussées par l'offre. Deuxièmement, il est possible également que la concurrence dans des secteurs de technologie avancée induise un sur-investissement dans la recherche appliquée. L'équilibre global des produits de la R-D risque alors de ne pas correspondre aux attentes initiales (optimales) du marché.

b) Qualité de vie et environnement

Il est difficile d'associer de hauts niveaux de qualité de vie avec une distribution des revenus très inégale. En outre, il est difficile pour des marchés de pure concurrence (qui fonctionnent avec des objectifs à très court terme) de traiter correctement les problèmes d'environnement. Aussi, en termes de qualité de vie et d'environnement, le scénario axé sur le marché viendrait après le scénario basé sur le sens commun.

c) Relations avec le reste du monde

Dans le contexte du scénario axé sur le marché, les pays de l'OCDE limiteraient leurs politiques de coopération avec le reste du monde à celles qui présentent un « intérêt mutuel ». Dans une situation de concurrence parfaite, on pourrait s'attendre à ce que certains des pays les plus pauvres rompent avec le système – et, là encore, on aurait un élargissement de l'écart entre pays riches et pays pauvres.

Du point de vue du transfert de technologies, ce scénario laisse entrevoir une extension progressive de la zone de l'OCDE : le reste du monde développerait par la suite des systèmes économiques concurrentiels compatibles avec les technologies des pays de l'OCDE.

Les télécommunications et les infrastructures de transport modernes, qui contribuent à la réduction des coûts économiques de transaction et donc à la

réduction des distances géographiques, devraient jouer un rôle essentiel dans ce contexte. Puisque, dans un scénario axé sur le marché, les infrastructures seraient développées essentiellement par des capitaux privés, aux taux de rendement du marché, cette évolution suivrait pour l'essentiel la demande potentielle, ce qui indique clairement qu'il convient de bâtir sur les liens existants plutôt que de concevoir des relations entièrement nouvelles.

En général, le scénario axé sur le marché est un scénario d'efficacité économique dans lequel des processus darwiniens de sélection opèrent au niveau des individus ainsi qu'à celui des institutions ou même des nations. Ce processus contient toujours le risque d'entraîner de nombreuses victimes dans son sillage, et les gains de bien-être économique risquent de ne pas suffire à compenser les pertes de bien-être social. En termes d'évolution technologique et d'innovation, le scénario axé sur le marché (qui, en principe, devrait stimuler le changement) pourrait bien finir par créer des contraintes d'offre et une vision à court terme, du fait de mauvaises décisions d'investissement (défaillances du marché).

Scénario de nouvelle société

Le scénario de nouvelle société est aussi envisagé comme une variante du scénario basé sur le sens commun, soulignant fortement les propositions les plus extrêmes qui existent actuellement en matière de contrôle social de la technologie²⁰. Dans ce scénario, les politiques publiques concernant la technologie sont réorientées, pour l'essentiel, de l'aide aux processus économiques concurrentiels à la satisfaction plus directe des besoins sociaux.

Plutôt que d'aller vers un minimum d'État, dans ce scénario – qui envisage des modes de fonctionnement entièrement nouveaux pour les structures sociales (modifiant les relations entre éducation, travail et loisirs, notamment) – l'État étend à la fois son activité réglementaire et sa production directe de services.

Le cadre général des deux autres scénarios (libre-échange de biens et services, mondialisation des agents économiques) demeure constant, mais le concept de nouvelle société est développé par les différentes nations avec des caractéristiques variées :

- Un nouvel État-providence orienté vers les besoins collectifs d'une société dans laquelle le travail « instrumental » a pratiquement disparu et où tous les emplois sont donc davantage du type « travail comme produit » (professionnalisme, prise en charge par les intéressés et changement permanent). Dans ce contexte, on attend de l'État qu'il offre à tous des opportunités égales de se réaliser et les filets de sécurité correspondants (dans un système productif où tous les producteurs ne peuvent pas « livrer » dans les mêmes conditions). Il produit donc des services sociaux étendus (dans des conditions non marchandes ou de marchés « contestés »).

- Une évolution institutionnelle qui rendrait attrayante une économie de marché fonctionnant avec plus de coopération (y compris un nombre croissant de partenariats privé-public).

Le scénario de nouvelle société décrit au fond une économie de marché dans laquelle les processus démocratiques dictent les réglementations et les contraintes opérationnelles afin de réaliser des objectifs sociaux.

Dans ce contexte, pour que la science et la technologie se développent comme l'exigent les processus d'innovation privés et publics, l'État doit consolider son rôle de principal producteur de savoir fondamental ne pouvant faire l'objet d'une appropriation, et la politique de la science et de la technologie est un instrument qui sert à toutes les autres politiques sociales collectives.

a) Croissance et emploi

Dans le scénario de nouvelle société, la croissance économique attendue dans les pays de l'OCDE pourrait être réduite si on la compare avec celle d'autres scénarios, car le système perd de l'efficacité au profit d'une plus grande égalité des revenus et d'une meilleure répartition de l'accès aux nouvelles technologies.

Alors qu'en principe il n'y a aucune raison pour que la capacité d'innovation de l'État dans la fourniture de services sociaux soit nécessairement inférieure à celle des alternatives qu'offre le marché libre, dans ce scénario la perte globale de potentiel de croissance est liée aux effets d'un processus d'innovation orienté davantage vers les exigences de l'utilisateur que vers la compétitivité. (En fait, dans ce scénario, on peut envisager des possibilités d'organiser l'État de telle manière qu'il ne soit pas isolé des pressions du marché, par exemple en maintenant la constatabilité des marchés là où l'État exerce un monopole.)

Le secteur public pilote les processus d'innovation liés à une part importante des nouvelles technologies (notamment des TI), car il s'occupe directement d'innovation dans l'éducation, la santé, les services administratifs, l'administration de la justice, les transports publics, les services de communication, etc. Les politiques de marchés publics et les politiques publiques en faveur de la R-D sont, dans ce scénario, les principaux instruments permettant de concevoir une Société de l'information « orientée vers l'utilisateur ».

Étant donné que de nombreux services restent en dehors du marché, la portée du processus de croissance « vertueuse » attendu d'une nouvelle grappe de technologies se trouve réduite (aux secteurs manufacturiers et de services d'où proviennent les produits des TI ou les services d'information marchands), et cette considération structurelle confirme de nouveau que le scénario de nouvelle société serait aussi un scénario de croissance faible.

Dans ce contexte, il serait difficile d'envisager une solution de marché au problème du chômage; par conséquent, ce scénario devrait être associé à des mesures réglementaires et institutionnelles visant à réduire les heures de travail et à revoir le rôle du travail rémunéré dans la structure sociale²¹, voire même à briser le lien entre les processus générant des revenus et le travail (par exemple, revenu minimum garanti ou impôt sur le revenu négatif).

b) Qualité de vie et environnement

Dans le scénario de nouvelle société, l'accroissement de la qualité de vie et la protection de l'environnement sont des objectifs primordiaux pour les pouvoirs publics. Les nouvelles technologies devraient être l'instrument de la réalisation de ces objectifs; on s'attendrait donc que le développement novateur des TI, des biotechnologies, des nouveaux matériaux et des nouvelles sources d'énergie soit étroitement lié aux politiques publiques axées sur l'innovation.

Bien sûr, ces politiques comprennent aussi bien des mesures réglementaires que des dépenses publiques et elles nécessitent un financement. Le scénario de nouvelle société appelle un accroissement du rôle économique de l'État ou du moins un redéploiement de ses activités et de ses sources de financement²²; les écotaxes pourraient jouer un rôle important dans ce contexte.

c) Relations avec le reste du monde

Dans le scénario de nouvelle société, les pays de l'OCDE fondent leurs relations avec le reste du monde sur la coopération et non sur la compétition, contribuant ainsi à un développement plus équilibré du monde. Le transfert de technologie est utilisé comme moyen d'améliorer les conditions de vie dans le monde en développement, et les nouvelles technologies sont aussi spécialement promues dans ce but; les TI sont employées comme instrument de liaison. D'une certaine façon, l'action des pouvoirs publics à l'échelle mondiale, orientée par les initiatives de l'OCDE, aide à établir un réseau mondial de solidarité comprenant des éléments financiers et technologiques.

En général, le scénario de nouvelle société envisage un monde dans lequel les gouvernements des pays démocratiques assument la responsabilité en ce qui concerne l'emploi des nouvelles technologies dans la recherche d'un plus grand bien-être planétaire et, ce faisant, stimulent le développement de ces technologies. Cependant, pour financer de façon appropriée les dépenses correspondant à ces nouvelles responsabilités, les pouvoirs publics ont besoin de faire des dépenses directes plus élevées. Le manque de croissance et de financement public correspondant constitue donc le principal goulet d'étranglement empêchant la mise en œuvre réaliste de ce scénario.

CONCLUSION : LA TECHNOLOGIE ET L'AVENIR

La grappe de nouvelles technologies dans la Société de l'information (informatique, télécommunications et micro-électronique), la biotechnologie, les nouveaux matériaux et les nouvelles énergies, est capable de modifier tous les processus de production et tous les produits existants (biens et services). Les nouveaux processus innovants tirent parti de plusieurs développements technologiques imbriqués les uns dans les autres et sont eux-mêmes profondément reliés entre eux. C'est un trait dominant de la nouvelle vague technologique : son efficience s'accroît dans les systèmes économiques complexes.

Les pays de l'OCDE, dont les capacités technologiques et productives sont diversifiées, se trouvent au cœur de cette nouvelle vague technologique. C'est d'abord dans ces pays que les plus grands gains sont attendus initialement, aussi bien en termes de meilleure qualité de vie que de plus grande efficience de la production.

Pour réaliser le potentiel positif des nouvelles technologies, les pays de l'OCDE doivent relever le défi qui consiste à trouver l'adéquation optimale entre le système technologique et le système social et institutionnel environnant.

Les scénarios sont des outils qui aident à explorer les futurs possibles. Le tableau 2 résume certains aspects des scénarios considérés.

Tableau 2. **Résumé des scénarios**

Thèmes	Scénarios		
	Scénario axé sur le marché	Sens commun	Nouvelle société
Croissance	Plus élevée	Comme dans les années 80-90	Plus faible
Emploi	Plein emploi (main-d'œuvre duale)	Chômage élevé	Plein emploi (partage du travail)
Cohésion sociale	Irrégularités croissantes	Différentes solutions	Grande cohésion
Équilibre écologique	Priorité faible	Solutions technologiques	Mesures fiscales
Relations avec le reste du monde	Processus de séparation	Processus de coopération	Solidarité contractuelle
Politique technologique	Demande tirée par les besoins individuels	Poussée par l'offre et tirée par la demande	Poussée par l'offre et tirée par la demande sous l'effet des besoins collectifs

Les solutions les plus probables et les plus souhaitables se trouvent entre les deux extrêmes d'un système technologique totalement régi par le marché et d'un système technologique socialement contrôlé. Ces deux extrêmes ont leurs avantages, mais aussi des inconvénients qui pourraient même surcompenser ces avantages.

Le sens commun tend donc à envisager pour l'avenir seulement de petits écarts par rapport à la situation actuelle, bien que celle-ci produise déjà quelques évolutions non satisfaisantes (principalement dans les domaines de l'emploi et de la distribution des revenus). Le fait que certaines des nouvelles technologies puissent, dans un délai relativement bref, éliminer le besoin de main-d'œuvre instrumentale, poussera probablement à procéder à certaines restructurations fondamentales de l'organisation sociale et à ouvrir un vrai débat politique entre des points de vue opposés sur la concurrence et la coopération comme vecteurs de la solution de conflits socio-économiques. Le débat est déjà en cours dans tous les pays de l'OCDE. Certains, comme les États-Unis, semblent aller dans la direction d'un scénario de marché; d'autres, comme les Pays-Bas, introduisent des changements institutionnels en vue d'un scénario de type nouvelle société.

En principe, on pourrait raisonnablement attendre une croissance économique plus élevée d'un scénario axé sur le marché; comme une croissance économique forte est nécessaire pour réussir à financer un scénario de nouvelle société, le scénario basé sur le sens commun (faible croissance économique) est encore loin du sentier de croissance optimal, compte tenu des points de vue extrêmes qui en plus s'excluent mutuellement. Revoir le scénario basé sur le sens commun en envisageant un sentier de croissance plus élevé demeure actuellement la principale question de politique économique. Se servir à cette fin de l'innovation technologique est un défi lancé aux responsables des politiques technologiques des pays de l'OCDE. Sans doute, le changement technologique stimule par lui-même la croissance, mais pour changer les anticipations à long terme, la technologie a besoin d'autres orientations.

Une analyse des scénarios de marché et de nouvelle société fait ressortir quelques stratégies générales permettant d'améliorer le point de vue du sens commun dans le domaine de la politique technologique :

- Le scénario axé sur le marché envisage que les entreprises puissent adopter des processus plus innovants adoptés par les entreprises dans un environnement concurrentiel, reliant ainsi la déréglementation et l'élargissement du marché au changement technologique; la politique technologique publique se justifie principalement par les défaillances du marché dans les domaines de la science fondamentale et de la recherche technologique préconcurrentielle.

- Le scénario de nouvelle société envisage la possibilité de stimuler les processus innovants, principalement pour satisfaire des besoins collectifs, augmentant ainsi le rôle des marchés publics des produits de la science et de la technologie (rôle excessivement concentré sur la défense jusqu'à présent) et renforçant finalement la capacité de production du système public de R-D.

Ces deux types de considérations sont actuellement contenus dans les approches du sens commun. Cependant, les responsables de l'élaboration des politiques n'en acceptent pas souvent les conséquences finales. Aussi bien le scénario de marché que celui de nouvelle société proposent des politiques technologiques tirées par la demande plus dynamiques (émanant des besoins soit individuels, soit collectifs). Ils impliquent donc un processus de participation aux prises de décisions (avec les entreprises et les acteurs sociaux) qui exige souvent de profonds changements du processus traditionnel d'élaboration des politiques technologiques (exagérément dépendantes de procédures bureaucratiques qui sont fortement influencées par des considérations d'impulsion par l'offre émanant de «l'establishment» de la R-D). L'utilisation de la politique technologique comme outil pour stimuler la croissance économique exige que beaucoup de pays de l'OCDE revoient les prémisses du sens commun d'aujourd'hui quant à la façon dont les décisions devraient être prises dans ce domaine. Il est urgent de se laisser davantage guider par l'anticipation du marché technologique et par les besoins collectifs si l'on veut vraiment qu'à l'avenir la croissance macro-économique soit renforcée par la technologie.

NOTES

1. L'analyse des fluctuations à long terme des systèmes économiques résultant de schémas de développement technologique a été stimulée ces dernières années par C. Freeman et les écoles économiques néo-schumpéteriennes et évolutionnistes.
2. Dans le modèle économique néoclassique, le taux de variation de la Productivité totale des facteurs (PTF), aussi appelé résidu de Solow, est défini de la façon suivante :

$$\hat{r} = \hat{q} - \hat{l} - (1 - \alpha)\hat{k}$$

où le « chapeau » (^) renvoie aux taux respectifs de variation, (r) représentant la PTF, (q) la production nette en termes de valeur ajoutée, (l) le facteur travail, (k) le facteur capital et (a) la part des salaires dans la production totale.

Dans le cadre d'une analyse d'entrées-sorties, la notion de produit brut permet d'introduire les consommations intermédiaires en même temps que les intrants primaires (Wolff, 1997).

3. Des chercheurs de l'OCDE ont effectué plusieurs études sur la croissance de la PTF. Des résultats récents ont été publiés par N. Sakurai *et al.*, 1997. On trouvera un aperçu des résultats de la recherche menée par le Secrétariat de l'OCDE dans le vaste domaine de la diffusion de la technologie, de la productivité, de l'emploi et des qualifications, ainsi que de la compétitivité internationale, dans OCDE, 1996.
4. Après le travail de pionniers tels que E. Mansfield et Z. Griliches, la relation entre la R-D (en général, on distingue la recherche fondamentale de la recherche appliquée) et la croissance de la PTF a été examinée en détail, et des estimations sont disponibles en ce qui concerne les taux de rendement des investissements dans la R-D, a_1 dans l'équation suivante :

$$TFPGRT = a_0 + a_1 RDGDP + e$$

où TFPGR est le taux de croissance de la PTF et RDGDP est le rapport entre les dépenses de R-D et le PIB. Ces taux de rendement sont habituellement estimés entre 10 et 30 pour cent.

Concernant le processus d'accumulation de capital humain, les auteurs préfèrent généralement suivre Denison, Griliches, Kendrick et Jorgenson, et introduire directement les changements de qualité de la main-d'œuvre dans la composante travail de la fonction de production, ou inclure l'éducation comme l'un des facteurs dans un contexte de quantification comptable de la croissance.

5. Basée sur le concept initial de noyau de compétence («core competence») développé par Hamel et Prahalad (1990), l'identification des trois composantes de la compétence (technologique, humaine et organisationnelle) est développée dans Bueno, Morcillo et Rodriguez, 1997.
6. Carter (1994) introduit le concept selon lequel la recherche d'innovation est elle-même une activité économique ayant des exigences de coût et d'investissement : «Les firmes acquièrent du capital immatériel en louant les services d'individus et en leur fournissant tous matériels et équipements dont ils ont besoin pour acquérir de l'information, organiser des réseaux, etc. Les dépenses cumulées correspondant à ces salaires, matériels et équipements sont un investissement immatériel... L'investissement orienté vers le changement s'étend bien au-delà de la R-D officielle et comprend les investissements dans l'organisation et la notoriété, la création et la constante adaptation des réseaux de fournisseurs et de vente, la coopération interentreprises et l'élargissement judicieux de la gamme de produits.»
7. Le travail de pionnier de D. Aschauer (1989, pp. 177-200) a lancé une controverse entre économètres sur la contribution du stock de capital public à la croissance de la PTF; en général, les résultats pour les États-Unis et pour l'Europe montrent qu'il existe un lien direct de causalité.
8. La question de la mesure des aspects institutionnels du processus de changement technologique n'a guère retenu l'attention; nous pouvons cependant citer les résultats de l'enquête de Nadiri (1970) – «Nous avons besoin de connaître la contribution de services gouvernementaux tels que les lois, les règlements, etc. à la croissance de la productivité des facteurs ». C'était une recommandation raisonnable.
9. Un numéro spécial de *Economic Systems Research* (1997) sur les retombées intersectorielles de la R-D rassemble plusieurs études récentes sur les retombées technologiques; des résultats empiriques confirment le rôle très important joué par la R-D indirecte (exécutée par les fournisseurs de biens intermédiaires ou d'équipement) sur les performances globales en matière d'innovation de n'importe quelle branche industrielle. Le document de E.N. Wolff, «Spillovers, Linkages and Technical Change» dans le même numéro d'ESR, trouve également des éléments probants, sur la base de données américaines, selon lesquels «la croissance de la PTF d'une industrie présente une corrélation significative avec la performance des secteurs en amont dans le domaine de la PTF, avec une élasticité de près de 60 pour cent». Wolff conclut : «Les nouveaux résultats présentés ici suggèrent qu'au sein du secteur manufacturier au moins, une diminution de la croissance de la PTF dans une industrie peut faire baisser la croissance technologique des industries qui lui sont associées.» Des résultats assez semblables pour plusieurs pays de l'OCDE sont fournis par Papaconstantinou, Sakurai et Wyckoff (1996). Ces auteurs indiquent que «la partie de la technologie totale incorporée dans la production, qui est acquise à l'extérieur, s'est accrue avec le temps ... La distinction entre industries de haute, moyenne et faible technologie s'émousse quand on tient compte de l'achat d'intrants technologiquement complexes L'analyse révèle que si des innovations se développent principalement dans une grappe d'industries manufacturières de haute technologie, les machines et équipements technologiquement complexes sont acquis principalement par une grappe différente d'industries du secteur des services».

10. L'analyse des effets distributifs des gains de PTF, en particulier comme fonction de la structure du marché, est développée par Carter (1990) et Fontela (1994a).
11. Cette idée est développée aussi par Appelbaum et Schettkat (1994), et par les mêmes auteurs dans le document FS I 93-313 du «Wissenschaftszentrum Berlin für Sozialforschung», qui compare des données concernant l'Allemagne, le Japon, la Suède et les États-Unis.
12. Le travail de Perez (1983) est particulièrement important pour l'analyse du processus d'adéquation entre le changement technologique et le changement social.
13. Baumol (1967, pp. 415-426) conclut comme suit son analyse d'une économie dichotomique, comportant des secteurs où la productivité progresse et d'autres où elle reste à peu près constante : «Selon notre modèle, le secteur manufacturier va probablement continuer à décliner en termes de coûts relatifs et, à moins que l'élasticité-revenu de la demande de biens manufacturés soit très grande, ce secteur risque d'absorber une proportion encore plus faible de la population active, à la suite de quoi notre économie risque d'avoir encore plus de mal à maintenir son taux de croissance global de la production». Cette évolution asymptotique à long terme vers une croissance économique plus faible est connue sous le nom de «maladie de Baumol».
14. Utilisant des données américaines pour la période 1947-76, Baumol, Batey Blackman et Wolff (1985, pp. 806-817) ont montré que «Les parts de la production des secteurs évolutifs et stagnants sont en fait demeurées relativement constantes dans la période d'après-guerre, de sorte qu'avec l'augmentation des prix relatifs, la part des dépenses totales des services (stagnants) et leur part dans la population active ont augmenté de façon spectaculaire (leurs prix ont augmenté à peu près au même rythme, alors que leur productivité était à la traîne par rapport aux secteurs en progrès), exactement comme le suggère le modèle». Les auteurs ont observé des signes d'activités «asymptotiquement stagnantes» dans certains secteurs de pointe (comme la télédiffusion et l'informatique) qui «contiennent à la fois un élément technologiquement complexe et une main-d'œuvre relativement incompressible – forte intensité de main-d'œuvre», suggérant ainsi que «le dynamisme apparent de telles activités peut très bien s'avérer transitoire et quelque peu illusoire».
15. Il y a vingt ans, dans INTERFUTURS, une étude de l'OCDE sur les tendances à long terme dans les pays Membres et leurs relations avec le reste du monde, cette Organisation faisait office de pionnier dans le domaine de la construction de scénarios (OCDE, 1979). Le Projet Interfuturs de l'OCDE tient à jour en permanence une base documentaire sur les études prospectives fournissant les résultats clés de travaux sélectionnés dans la production mondiale (*Future Trends*, OCDE, Paris). Dans *Cohésion sociale et mondialisation de l'économie* (OCDE, 1997), des scénarios sont utilisés pour explorer d'autres possibilités de relation entre la cohésion sociale et le modèle de développement. Dans le premier chapitre de cet ouvrage, Michalski, Miller et Stevens (1997) – après avoir examiné l'incidence de changements marginaux apportés au modèle de l'État providence – étudient deux autres scénarios : un scénario individualiste réduisant considérablement le rôle de l'État dans tous les domaines, et un scénario fondé sur la solidarité, dépendant principalement d'institutions collectives fortes et de valeurs partagées. A de nombreux égards, cette analyse est compatible avec les scénarios de sens

commun (projection dans l'hypothèse où la situation actuelle reste inchangée), de marché et de nouvelle société examinés dans ce document.

16. Le CEPII (1996) a publié un résumé du projet de recherche exécuté pour la CE (DG XVII), traitant du cadre macro-économique des projections à long terme concernant l'énergie.
17. On trouvera une description plus détaillée des aspects technologiques d'un scénario basé sur l'opinion actuelle d'experts dans Northcott, (1991), *Britain in 2010*, notamment dans la partie I traitant du monde en 2010.
18. Fontela (1994b) définit la question de l'emploi comme suit : « la plupart des industries manufacturières et beaucoup d'activités de services (notamment les services en réseau) ont atteint ou sont sur le point d'atteindre leur plus haut niveau d'emploi, et il est probable qu'elles auront moins besoin de main-d'œuvre à l'avenir ».
19. Un scénario axé sur le marché est décrit comme suit par Northcott (1991, p. 320) : « Ce scénario est destiné à illustrer les effets de mesures « judicieuses » visant à laisser plus de liberté aux mécanismes de marché, avec plus de déréglementation et de privatisation, moins d'impôts et de nouvelles réductions importantes des dépenses publiques ». Parallèlement, Shell International Petroleum, dans ses *Global Scenarios 1992-2020* (1993), étudie un scénario dans lequel le succès des mesures de libéralisation génère des pressions en faveur d'une plus grande libéralisation, ouvrant en permanence de nouvelles opportunités d'investissements et d'échanges. Dans Michalski, Miller et Stevens (1997), selon le scénario individualiste, « le fait de réduire considérablement le rôle de l'État dans tous les domaines – programmes sociaux, réglementation économique, entreprises publiques – contribue assez directement à élargir la marge de manœuvre laissée aux individus et aux entreprises dans leurs décisions d'affectation des ressources ».
20. On pourrait dire qu'un scénario de nouvelle société s'appuyant sur le progrès technologique a été étudié de fait depuis de nombreuses années (1979-1994) dans le cadre du programme FAST (Prévision et évaluation dans le domaine de la science et de la technologie), DG XII, Commission de l'Union européenne. Pratiquement tous les aspects intéressants du changement social associés aux nouvelles technologies ont été analysés (principalement par des chercheurs européens) dans le cadre de ce programme.
21. Il y a 150 ans, avec une espérance de vie à la naissance de 57 ans, un ouvrier de l'industrie passait 66 pour cent de son temps disponible à l'usine (déduction faite des années d'enfance et du repos physique pris pendant toute la vie). Aujourd'hui, dans les pays de l'OCDE, ce pourcentage varie entre 15 et 20 pour cent et ne cesse de diminuer à cause de la réduction du nombre moyen d'années travaillées dans une vie et de l'augmentation de l'espérance de vie. Une plus grande intégration du travail, de l'éducation et des loisirs est maintenant certainement possible, mais exige de nouvelles évolutions institutionnelles (par exemple en matière de formation continue).
22. Le scénario de nouvelle société peut inclure de grands changements dans la structure fiscale (par exemple, donner un rôle clé à l'imposition des externalités environnementales négatives ou des flux d'information) et, plus généralement, dans les activités

publiques génératrices de revenus (par exemple exploitation économique de biens collectifs tels que l'eau). Les méthodes actuelles de financement de l'État ont été développées dans le cadre de la société industrielle et ne sont pas nécessairement bien adaptées à la société de l'information à venir.

BIBLIOGRAPHIE

- APPELBAUM, E. et R. SCHETTKAT (1994), «The End of Full Employment? On Economic Development in Industrialised Countries», *Intereconomics*, mai/juin, pp. 122-130.
- ASCHAUER, D. (1989), «Is Public Expenditure Productive?», *Journal of Monetary Economics*, 23, mars.
- BAUMOL, W.J. (1967), «Macroeconomics of Unbalanced Growth: The Anatomy of Urban Crisis», *American Economic Review*, 57, juin.
- BAUMOL, W.J., S.A. BATEY BLACKMAN et E.N. WOLFF (1985), «Unbalanced Growth Revisited: Asymptotic Stagnancy and New Evidence», *American Economic Review*, vol. 75, n° 4, septembre.
- BUENO, E., P. MORCILLO et J.M. RODRIGUEZ (1997), «Management of Technology: Proposal for a Diagnosis Model», *The Journal of High Technology Management Research*, Arizona State University, vol. 8, n° 1.
- CARTER, Anne P. (1990), «Upstream and Downstream Benefits of Innovation», *Economic Systems Research*, vol. 2, n° 3, pp. 241-257.
- CARTER, Anne P. (1994), «Change as Economic Activity», Brandeis University Department of Economics.
- CEPII – Centre d'Études Prospectives et d'Information Internationales (1996), *La Lettre du CEPII*, 148, Paris, juillet.
- Economic Systems Research* (1997), Numéro spécial sur les retombées intersectorielles de la R&D, coordonné par P. Mohnen, vol. 9, n° 1, mars. Contient en particulier E.N. Wolff, «Spillovers, Linkages and Technical Change».
- FONTELA, E. (1994a), «Inter-industry Distribution of Productivity Gains», *Economic Systems Research*, vol. 6, n° 3, pp. 227-236.
- FONTELA, E. (1994b), «Perspectives à long terme de la croissance et de l'emploi», *Les Sociétés de l'OCDE en transition : L'avenir du travail et des loisirs*, OCDE, Paris.
- FREEMAN, Christopher, dir. publ. (1996), *Long Wave Theory*, The International Library of Critical Writings in Economics, 69, Edward Elgar Publishing, Cheltenham (RU), Lynne (EU).
- HAMEL, G. et C.K. PRAHALAD (1990), «The Core Competence of the Corporation», *Harvard Business Review*, vol. 68, n° 3.

- MICHALSKI, W., R. MILLER et B. STEVENS (1997), « Flexibilité économique et cohésion sociale au XXI^e siècle : Résumé des questions et points principaux des débats », *Cohésion sociale et mondialisation de l'économie*, OCDE, Paris.
- NADIRI, M.I. (1970), « Some Approaches to the Theory and Measurement of Total Factor Productivity: A Survey », *Journal of Economic Literature*, VIII, 4, pp. 1137-77.
- NORTHCOTT, J. (1991), *Britain in 2010*, The Policy Studies Institute, London. 1^{re} partie : « The World in 2010 ».
- OCDE (1979), *Face au futur : pour une maîtrise de vraisemblable et une gestion de l'imprévisible* (le projet Interfuturs), OCDE, Paris.
- OCDE (1996), *Technologie et performance industrielle*, Paris.
- OCDE (1997), *Cohésion sociale et mondialisation de l'économie*, Paris.
- PAPACONSTANTINO, G., N. SAKURAI et A. WYCKOFF (1996), « Embodied Technology Diffusion: An Empirical Analysis for 10 OECD Countries », STI Working Papers, 1996/1, OCDE, Paris.
- PEREZ, C. (1983), « Structural Change and Assimilation of New Technologies in the Economic and Social Systems », *Futures*, vol. 15, n° 5, pp. 357-376.
- SAKURAI, N., G. PAPACONSTANTINOU et E. IOANNIDIS (1997), « Impact of R&D and Technology Diffusion on Productivity Growth: Empirical Evidence for 10 OECD Countries », *Economic Systems Research*, vol. 9, n° 1, pp. 81-109.
- SHELL INTERNATIONAL PETROLEUM (1993), *Global Scenarios 1992-2020*, Londres.
- WOLFF, Edward N., dir. publ. (1997), « The Economics of Productivity (I and II) », *The International Library of Critical Writings in Economics*, 77, Edward Elgar Publishing, Cheltenham (RU), Lynne (EU). Voir aussi *Economic Systems Research*, 1997.

PERSPECTIVES MONDIALES : LA TECHNOLOGIE FACE AUX DÉFIS PLANÉTAIRES

par

Luc Soete

Institut de recherche économique sur l'innovation et la technologie de Maastricht
(MERIT)

Université de Limburg
Pays-Bas

INTRODUCTION

Il ne fait guère de doute que, rétrospectivement, les dix dernières années ont été une période de mutations structurelles historiques à l'échelle planétaire. C'est ainsi qu'on a assisté à l'effondrement des anciens pays communistes et à leur ouverture accélérée aux incitations économiques du marché, au déplacement du pôle de croissance du marché mondial de l'ancienne zone de l'OCDE nord-atlantique vers le bassin Pacifique, à la libéralisation des marchés financiers débouchant de fait sur la mobilité internationale des capitaux, ainsi qu'à la réduction spectaculaire des coûts du traitement de l'information et des communications qui a ouvert un nombre croissant de secteurs aux échanges internationaux et réduit d'une manière spectaculaire, en apparence du moins, les distances physiques, conduisant à ce qu'il est convenu d'appeler le « village planétaire ».

Face à ce processus de restructuration mondiale accélérée les pouvoirs publics ont à relever un certain nombre de défis fondamentaux au niveau national (et européen). Les responsables ont été amenés à prendre davantage conscience des répercussions internationales accrues de leur action. Des politiques pouvant paraître « viables » dans un contexte national (voire européen) risquent progressivement de le paraître moins dans un contexte international. Si l'ouverture à la restructuration internationale mondiale (dans le secteur des biens manufacturés ou de certains services) commence seulement à se faire sentir et si ses incidences ne se mesureront pleinement qu'au siècle prochain, elle n'a cependant pas tardé à mettre en évidence une réduction considérable de la marge de manœuvre laissée aux décideurs sur le plan des politiques nationales dans un grand nombre de domaines. Cette évolution ne concerne pas seulement la politi-

que macro-économique traditionnelle, mais aussi les politiques sociale, fiscale, de protection sociale, et autres, qui relevaient jusqu'ici du seul domaine de la politique nationale.

Par parenthèse, il est intéressant de constater que cette évolution suscitée par la mondialisation soulève certaines difficultés de fond quant au processus même de l'intégration européenne. Les objectifs de l'intégration européenne qui semblent à dominante économique se trouvent être en effet progressivement dépassés, dans leur visée et leur rythme de mise en œuvre, par le processus d'intégration à l'échelle planétaire. [Il suffit de penser à l'accord de l'OMC conclu à Singapour sur la libéralisation des échanges en matière de technologies de l'information.] On peut légitimement se demander si le processus de l'intégration économique européenne – dont l'objectif central est de tirer parti des avantages d'échelle offerts par un marché de 350 millions de consommateurs – n'est pas, du moins dans le domaine des biens manufacturés, sur le point d'entrer dans une phase de rendement marginal décroissant, et s'il ne requiert pas une nouvelle réflexion et peut-être une nouvelle initiative pour le siècle prochain (Soete, 1997).

Le présent article examine brièvement, dans une première section, certains grands aspects de la mondialisation liés aux nouvelles technologies de l'information et des communications (TIC). Sans vouloir minimiser l'importance de certaines autres caractéristiques de la mutation structurelle mondiale, ces technologies semblent néanmoins avoir été un des principaux « moteurs » de l'accélération du processus de mondialisation. A bien des égards, les TIC représentent la première mutation technologique « mondiale » à laquelle nos sociétés ont eu à faire face dans leur histoire (OCDE, 1996).

Dans les trois sections suivantes, nous analysons les différents phénomènes d'interaction entre les conditions existant à l'échelle mondiale, et l'apparition et l'utilisation des nouvelles technologies. Il ne fait guère de doute que la plupart des solutions à nos problèmes économiques, sociaux et environnementaux mondiaux, actuels et futurs, devront être trouvées dans l'utilisation plus efficace des nouvelles technologies dans des domaines aussi variés que la production et la distribution de denrées alimentaires, les techniques respectueuses de l'environnement (recyclage, procédés non polluants et émissions nulles), les énergies renouvelables, les systèmes plus efficaces et moins polluants de transport de voyageurs et de marchandises, la santé et la prévention des maladies, etc. L'important rendement social des investissements publics et privés dans ces domaines dépasse largement les frontières nationales. A cet égard, l'approche nationale traditionnelle de la science et de la technologie, héritée de la mentalité de l'après-guerre et/ou de la guerre froide, paraît particulièrement dépassée et fondée sur des intérêts nationaux à court terme.

La section 2 examine les interactions entre la dynamique de croissance des pays et l'évolution des capacités technologiques et d'innovation des entreprises dans un environnement de plus en plus mondialisé. L'analyse met en évidence la complexité du cadre institutionnel régissant les activités scientifiques et technologiques, qui forme ce qu'il est convenu d'appeler le « système national d'innovation » (Freeman, 1987; Lundvall, 1992; Nelson, 1992). L'efficacité de tels cadres institutionnels nationaux est incontestablement remise en cause par le comportement de plus en plus mondial des entreprises privées; elle l'est également par le rôle et le poids accrus des paramètres régionaux, notamment des politiques élaborées à ce niveau, dans la création et le maintien des avantages liés à la localisation.

Qu'est-ce qui continue alors de justifier que les politiques dans ce domaine soient élaborées à l'échelon national? La section 3 présente brièvement certains des principaux arguments stratégiques concernant les politiques d'aide dans le domaine de la technologie et la « compétitivité internationale ». Les nombreuses publications sur ce thème, qui ne sont pas examinées ici¹, mettent en évidence la diversité des situations tant en ce qui concerne la nature de la nouvelle technologie (radicale, progressive) que les différents secteurs (à forte intensité de recherche, axé sur les procédés, etc.) susceptibles d'entrer en jeu, ainsi que leurs incidences normatives sur le plan des politiques nationales. Cette diversité des situations ne se traduit pas simplement par une impressionnante multiplicité de dispositifs institutionnels nationaux régissant la création et la diffusion de l'innovation et les capacités technologiques; elle fait aussi apparaître qu'il est difficile de définir une politique fondée sur « les meilleures pratiques »². C'est pourquoi, malgré les avantages évidents d'une coopération internationale et l'établissement d'un certain nombre de règles du jeu équitables à l'échelle mondiale, la question de l'ampleur et de la nature de la concurrence entre les politiques, plutôt que leur harmonisation³, reste ouverte.

La section 4 oriente l'analyse vers un domaine de préoccupations mondiales qui paraît moins controversé, sur le papier tout au moins. Il concerne la mise au point et la diffusion à l'échelle mondiale de technologies respectueuses de l'environnement. C'est par excellence le domaine dans lequel les décideurs seront de plus en plus confrontés à la nécessité de mener une action conjointe au siècle prochain. Ils nécessiteront dès lors une version internationale de la panoplie traditionnelle des instruments de politique nationale (réglementations directes, instruments économiques et achats publics).

Comme le montre très bien l'exemple des technologies respectueuses de l'environnement, nombre d'enjeux de la mondialisation renvoient à des questions de gestion démocratique mondiale, et même de capacité de production de recettes à l'échelle mondiale, qui sont mentionnées dans la conclusion. Comment transformer la tendance actuelle à la déréglementation inspirée par la libéralisa-

tion, et l'ouverture de nombreux secteurs nouveaux à la concurrence internationale en un processus d'intégration plus constructive, y compris sur le plan du financement? Tel est le principal défi qui nous est lancé pour le siècle à venir. Pour réussir, cette intégration constructive devra non seulement concilier les nombreux intérêts divergents des pays et des régions dans une multitude de domaines, mais aussi prendre pleinement en compte les intérêts des générations futures.

1. MONDIALISATION ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DES COMMUNICATIONS

Comme dans de nombreux autres domaines de la mutation structurelle, les données concrètes touchant à la mondialisation font actuellement l'objet d'un débat⁴. La plupart des données facilement accessibles portent essentiellement sur les courants d'échanges et les flux d'investissement direct étranger (OCDE, 1993). Ces données semblent indiquer généralement que la mondialisation n'a guère progressé. Les importations vers l'UE en provenance de certains nouveaux entrants [nouveaux pays industriels (NPI), diverses autres économies d'Asie, économies en transition d'Europe orientale] se sont rapidement accrues ces vingt dernières années, mais pas au point de marquer en quoi ce soit une rupture structurelle par rapport au passé. De même, les flux d'investissement direct étranger ne représentent encore qu'une petite fraction de l'investissement total dans les pays de l'OCDE. A l'évidence, ces mesures des courants internationaux ne reflètent qu'un aspect limité de la « mondialisation ». Ainsi, les flux financiers, pour prendre un autre exemple, se sont mondialisés d'une manière spectaculaire depuis vingt ans. Les transactions transfrontières de valeurs mobilières ont augmenté dans les pays de l'OCDE depuis 15 ans : de 10 pour cent du PIB en 1980, elles sont passées à 150-250 pour cent en 1995. Dans le même temps, le volume mondial des opérations en devises s'est accru pour dépasser 1 200 milliards de dollars par jour (Rapport annuel 1996 de la BRI). Le développement des échanges d'informations, disponibles instantanément et à l'échelle planétaire, ne peut en revanche faire l'objet que de conjectures. Il ne fait guère de doute que le monde est bel et bien entré dans une nouvelle ère où l'accès mondial est devenu la principale caractéristique de la production *comme* de la consommation.

Au cœur de ce processus se trouvent bien sûr l'ensemble des nouvelles technologies de l'information et des communications, qui permettent de réduire d'une façon spectaculaire les coûts de gestion et de traitement des informations et des communications. S'il peut être inapproprié de parler d'accès « mondial » dans un monde où la moitié de la population n'a pas d'accès direct au service public du téléphone, il existe néanmoins une tendance à l'accès mondial intrinsèquement liée à la capacité des TIC à transmettre l'information et les connaissances dans l'espace et dans le temps. Dans certains secteurs (comme celui de la

finance), où ce processus s'est accompagné d'une déréglementation et d'une libéralisation au plan institutionnel, la mondialisation, qui a été extrêmement rapide, est pratiquement achevée : les capitaux sont devenus un facteur de production mobile à l'échelle internationale. Pour ce qui est de la production manufacturière traditionnelle, la baisse des coûts de communications et d'information a encore accru la transparence internationale des marchés, renforçant les possibilités de délocalisation internationale. Dans des secteurs tels que les services, les nouvelles TIC permettent – souvent pour la première fois – un accès mondial peu coûteux à des sites d'implantation où la main-d'œuvre est bon marché, ce qui facilite la relocalisation de diverses fonctions et activités « courantes » de services. Entreprises et organisations ont fini par découvrir les avantages que présentent les différences internationales de coûts de main-d'œuvre dans des secteurs se prêtant peu jusqu'ici aux échanges internationaux (Freeman et Soete, 1994).

Autrement dit, les TIC contribuent à la transparence économique mondiale et – en mettant en évidence les avantages de coût d'autres lieux d'implantation – elles concourent à la mobilité internationale des capitaux et à l'« externalisation » internationale de certaines activités. En outre, les TIC ont aussi eu une incidence positive sur l'accès international à l'information et aux connaissances « codifiées » (David et Foray, 1995). Cette information, notamment les connaissances économiques relatives aux marchés, devient disponible dans une certaine mesure à l'échelle mondiale. Si les capacités d'utiliser ces connaissances codifiées ou de les transformer varieront considérablement au niveau local, le potentiel d'accès existe néanmoins. Les TIC représentent donc le potentiel de rattrapage, fondé sur la transparence des avantages économiques, tout en mettant en évidence l'importance capitale des éléments de connaissance « tacites » et des compétences qui sont indispensables pour accéder aux connaissances codifiées au plan international (Foray et Lundvall, 1996 ; OCDE, 1996) Il importe dans ce contexte de souligner d'emblée les avantages incontestables qu'offre cette économie mondiale transparente et sans frontières – le rêve du spécialiste de l'économie mondiale. Dans une certaine mesure, les nouvelles TIC réalisent ce rêve en créant les incitations économiques qui permettent une convergence accélérée des pays et dès lors assurent un niveau de développement plus égal à travers le monde.

2. ENTREPRISES « MONDIALES », CAPACITÉS TECHNOLOGIQUES ET DYNAMIQUE DE CROISSANCE DES PAYS

Les pressions exercées par les mutations structurelles présentées ci-dessus ont entraîné une transformation de la *forme* même de la mondialisation. En dehors de la mondialisation induite par la libéralisation financière internationale accélérée, la mondialisation semble en effet ne plus se limiter simplement aux activités

de vente et à leurs services connexes comme le marketing, la distribution et le service après-vente, et s'étendre largement à la production, notamment celle des fournisseurs de sous-ensembles, à l'investissement, en particulier l'investissement immatériel, aux fusions et acquisitions, aux partenariats, aux alliances dites « stratégiques », etc.

Comme il ressort de nombreux travaux récemment publiés sur les activités commerciales internationales (entre autres Narula, 1996 et Pavitt et Patel, 1998), les objectifs des entreprises s'inscrivent de plus en plus dans des stratégies de présence mondiale, qui visent simultanément à bénéficier des avantages d'échelle procurés par les marchés mondiaux et pour un nombre croissant d'actifs immatériels (recherche, communication, marketing, logistique, gestion), et à exploiter la diversité, souvent liée à la géographie, des consommateurs et des facteurs de production. Les techniques d'organisation et de production de la grande entreprise multinationale lui donneront la souplesse nécessaire pour faire face à cette diversité. La décentralisation de ses unités de production et même du développement de nouveaux produits, conjuguée à une diversification de ses sous-traitants, lui permettront de tirer pleinement parti de cette diversité. Cela explique la tendance, apparemment contradictoire, à la « glocalisation », liée à la présence physique, dans ce qui semble parfois des conditions de production relativement « autarciques », bolditaldans les différents grands blocs commerciaux (UE, ALENA, ANASE, Chine), caractérisée par des produits « locaux » souvent très différenciés, mais aussi des échanges mondiaux de plus en plus développés pour certaines compétences technologiques de base de l'entreprise par exemple à travers la formation d'alliances ou la constitution de réseaux avec d'autres entreprises.

La localisation d'une usine par une entreprise « multidomestique » sera étroitement subordonnée à des facteurs touchant aux conditions locales. Le choix de l'implantation sera souvent fonction des compétences locales, des infrastructures et de l'accès aux connaissances ; parallèlement, l'entreprise elle-même concourra bien entendu au développement à long terme des ressources humaines disponibles, à l'accès aux connaissances, au savoir-faire des fournisseurs locaux et à la constitution de réseaux. Ces facteurs souvent rares et parfois « déterminés » géographiquement contribuent à créer les rendements croissants qui caractérisent le développement à long terme (Arthur, 1995).

Ces tendances apparemment contradictoires soulèvent un certain nombre de questions importantes sur le plan de l'action publique dont la moindre n'est pas celle du niveau auquel la politique doit être mise en œuvre pour être la plus efficace. De toute évidence, les entreprises mondiales ou « multidomestiques » remettent en cause la signification d'un grand nombre de politiques *nationales*. Dans bien des cas, ces entreprises peuvent se conduire en aussi bonnes « citoyennes » que les entreprises nationales ; mais dans d'autres, non. Il est

difficile, voire impossible pour les gouvernements de définir des critères en la matière : les lignes directrices actuelles de l'OCDE relatives aux investissements étrangers directs ne constituent guère qu'une « norme » volontaire de bonne conduite internationale.

A la suite du Programme Technologie/Économie (TEP) mené par l'OCDE à la fin des années 80 (OCDE, 1991, 1992), il a été proposé pour guider l'action nationale d'établir un moyen de mesure du « degré de mondialisation » des entreprises, par exemple en termes de composition des conseils d'administration, de répartition internationale des postes de direction, de laboratoires de recherche et – plus généralement – d'investissement matériel et immatériel. Compte tenu du débat actuel mené au travers de diverses publications sur l'ampleur et la nature de la « mondialisation », cette mesure pourrait servir à évaluer la nature des fusions et acquisitions, en particulier dans les secteurs ayant fait l'objet, au niveau national, d'un soutien industriel et technologique : si l'entreprise A, dont le siège est situé à l'étranger, était estimé ayant un faible degré de mondialisation, on pourrait considérer que l'intégration d'une entreprise nationale dans entreprise A revient à placer l'entreprise nationale sous contrôle étranger. En revanche, dans le cas d'une entreprise nationale présentant un faible degré de mondialisation, son intégration à une entreprise plus mondialisée pourrait lui ouvrir de nouveaux débouchés sur le marché mondial.

Mais il ressort de ce qui précède que de tels indicateurs risquent de perdre rapidement de leur fiabilité du fait des nombreuses possibilités concrètes de falsification ou de dissimulation de ces modes de caractérisation de la mondialisation. A l'évidence, une réaction plus internationale au niveau des politiques s'impose⁵. La nécessité d'instaurer un certain nombre de règles du jeu internationales, en particulier dans le domaine de la politique de la concurrence, tient précisément aux différences nationales existant dans ce domaine et à l'absence d'un système international de contrôle des investissements transnationaux, et des fusions et acquisitions. Au risque de devenir progressivement une source de différends internationaux dans les quelques domaines où il existe déjà une harmonisation internationale et une autorité institutionnelle (politique commerciale et OMC, par exemple), cette politique internationale devrait viser à contre-carrer la constitution d'ententes à l'échelle internationale entre des entreprises mondiales, à réduire les disparités entre les politiques nationales de la concurrence, et à contrôler de plus près le degré et l'ampleur de la mondialisation de ces entreprises.

Dans le même temps, l'entreprise « multidomestique » remet en question la pertinence, d'un point de vue régional et local, de la politique élaborée au niveau national, ce qui peut paraître paradoxal. Comme indiqué précédemment, les entreprises « multidomestiques » à la fois tirent parti de l'existence d'un avantage lié à l'infrastructure locale, et contribuent à la renforcer. L'infrastructure

du système d'innovation est particulièrement importante à cet égard. C'est elle qui apporte les principales incitations à l'investissement privé dans les ressources immatérielles, notamment les ressources humaines ; autrement dit, l'établissement de liens avec les instituts publics de recherche (éventuellement en aidant à créer des centres d'excellence spécialisés, des partenariats de formation, des organismes d'information technique, etc.) peut conduire à la création d'un pôle local d'apprentissage *interactif*. Voire éventuellement à la création d'un « centre de compétences » mondial pour un produit ou un créneau donné.

L'exploitation effective par les entreprises multidomestiques de ces avantages créés à l'échelon local et la contribution qu'elles y apportent posent elles aussi plusieurs problèmes importants d'orientation de l'action. Au niveau des sites, elles pourraient souvent se traduire par des rivalités concernant les services offerts aux entreprises et par une surenchère permanente. Comme il ressort de l'expérience européenne, il en résulte une multiplication des pôles de croissance, des parcs scientifiques ou des technopoles ; mais aucun n'atteint la taille nécessaire pour mobiliser certaines externalités essentielles et dégager des rendements croissants, et tous alourdissent le coût de la communication et de l'interaction.

Le désir des autorités locales d'attirer ces centres de haute technologie illustre dans une certaine mesure combien les politiques nationales ont perdu de leur pertinence dans ce domaine. Ce phénomène est patent dans les régions périphériques transfrontières où l'intérêt national général a peu de chances de coïncider avec l'intérêt local. Dans le Limbourg méridional aux Pays-Bas par exemple, la définition de la politique et des priorités nationales en matière d'infrastructures ou d'investissements étrangers, par exemple, est de plus en plus perçue comme relevant d'une forme de *randstaddemocratie*, selon l'expression employée par le président de la chambre de commerce locale. Si l'intensification de la concurrence mondiale a donné un rôle accru aux conditions régionales, notamment à la politique régionale (Porter, 1996), le citoyen considère de plus en plus ces conditions locales – qualité de l'environnement, éducation des enfants, offre de services sociaux et culturels – comme des éléments essentiels à son bien-être et à sa qualité de vie. D'où la pression politique croissante qui s'exerce en faveur de la décentralisation ou, en matière d'action publique, notamment de moyens financiers, du transfert des compétences des centres de décision nationaux vers les collectivités locales (régions, villes, etc.). Face à l'érosion du rôle des gouvernements nationaux, les citoyens eux-mêmes semblent demander de plus en plus qu'une part accrue de leurs prélèvements fiscaux contribue directement à l'amélioration de leurs conditions de vie locales. L'efficacité de ces politiques peut en outre être appréciée d'une manière beaucoup plus directe et immédiate.

3. POLITIQUES NATIONALES D'AIDE DANS LE DOMAINE DE LA TECHNOLOGIE ET COMPÉTITIVITÉ INTERNATIONALE

Dans le cadre des politiques nationales, on peut considérer que le progrès économique et social repose sur une capacité générale à soutenir la concurrence sur des marchés de plus en plus mondialisés et sur la dynamique induite par l'alternance entre gagnants et perdants dans l'exploitation des nouvelles opportunités économiques dont la maîtrise passe d'une entreprise à l'autre et d'un pays à l'autre. C'est en ces termes qu'ont été définies d'une manière générale les politiques économiques nationales. Pour ce qui est de la compétitivité, il s'agit de savoir si la technologie revêt aujourd'hui une importance telle dans le processus de mutation structurelle et de mondialisation que les différences dans la capacité à commercialiser la technologie doit être un sujet de préoccupation prioritaire pour les entreprises et les gouvernements. Par ailleurs, s'agit-il uniquement d'un problème de stratégie et de capacité des entreprises, ou faut-il une intervention des autorités publiques pour les entreprises du pays puissent affronter la concurrence sur le marché international ?

C'est dans cette optique que l'on peut envisager le vieux débat sur les capacités différentes dont disposent l'Amérique du Nord, l'Europe et l'Asie. Le problème n'est pas tant d'accéder à la technologie que de pouvoir innover et diffuser la technologie. Ces capacités sont tributaires d'un large éventail de conditions et d'institutions, qui, pour certaines, peuvent être fortement influencées par la politique gouvernementale – mais la clé du succès réside surtout dans l'esprit d'entreprise, en favorisant l'innovation dans les domaines de la technologie, de la gestion et du financement.

Compte tenu de la grande diversité des dispositifs institutionnels, est-il possible d'identifier certaines caractéristiques communes entre entreprises ou entre pays ? Pour apporter des éléments de réponse, il est indispensable, comme l'ont souligné nombre d'économistes de l'école (néo)-schumpeterienne (de Dosi, 1984 à Howitt, 1996), d'établir une distinction entre le progrès technique « normal » qui procède selon les trajectoires définies par un paradigme déjà établi, et les progrès technologiques « extraordinaires » liés à l'apparition de paradigmes radicalement nouveaux.

Dans le second cas, il est généralement admis que les processus du marché ne sont pas suffisants pour infléchir l'apparition et la sélection de ces ruptures technologiques radicales. Lorsque le processus d'innovation présente un caractère hautement exploratoire, sa capacité de réaction directe aux signaux économiques est relativement faible, et il dépend beaucoup des connaissances purement scientifiques. L'expérience montre que dans ce cas, des organismes non marchands semblent avoir joué un rôle important, en assurant souvent les conditions nécessaires à de nouveaux progrès scientifiques et en sélectionnant *ex ante*

le paradigme technologique exploré parmi une large gamme de paradigmes possibles. On se souvient sans doute du cas de la technologie des semi-conducteurs et des ordinateurs et du rôle joué par les organismes militaires et les grandes entreprises d'électronique dans le développement initial de ces technologies radicalement nouvelles. On a pu constater des situations analogues au tout début de la chimie des produits de synthèse⁶, ou plus récemment lors de l'apparition de la bio-ingénierie, des nouveaux matériaux, ou même d'Internet.

Le contexte institutionnel et scientifique et la politique publique en vigueur ont une importance fondamentale dans la recherche et la sélection bolddes nouveaux paradigmes technologiques; ils ont une incidence sur *a*) les mécanismes de relais entre la science pure et les progrès technologiques, *b*) les critères et les moyens de recherche utilisés par les agents économiques, et *c*) les contraintes, incitations et incertitudes auxquelles sont confrontés les candidats à l'innovation.

De la même façon, au niveau international, lorsque de nouvelles technologies apparaissent, le succès relatif des différents pays ou différentes régions du monde sera fonction de l'adéquation entre le cadre scientifique du pays et ses capacités (ressources, compétences) technologiques, de la nature de ses « institutions relais », de sa situation économique (prix relatifs, nature et taille des marchés, disponibilité/rareté des matières premières, etc.), et de la nature des règles de conduite, des stratégies et des formes d'organisation qui prévalent parmi les acteurs économiques. Toutes ces variables subissent également, mais à des degrés divers, l'incidence des politiques publiques, soit directement (par exemple, dans le cas des politiques de marchés publics, ou des subventions à la R-D qui influent incontestablement sur les signaux économiques auxquels chaque entreprise est confrontée), soit indirectement (par exemple, l'incidence du système éducatif sur les compétences scientifiques et technologiques, celle des politiques fiscales sur la création d'entreprises, etc.).

Pour ce qui est du progrès technique « normal », la diversité des modes d'organisation dans le domaine de l'innovation est naturellement beaucoup plus marquée, ce qui rend difficile de dégager des tendances générales. Deux d'entre elles ont toutefois été mises en exergue par les études publiées.

D'une part, il existe une spécificité propre à la technologie et à chaque pays quant à l'importance relative de ce qui est coordonné et organisé par la « main visible » que constituent les structures des entreprises et de ce qui est laissé à la « main invisible » des marchés (Pavitt, 1984; Tidd *et al.*, 1997). Dans les industries à forte intensité de recherche par exemple, une fois établis les paradigmes technologiques, le processus de la concurrence schumpeterienne tend à donner naissance à des oligopoles relativement importants qui internalisent des moyens considérables d'innovation (ordinateurs, semi-conducteurs, produits chimiques de synthèse, logiciels, contenus, etc.). Dans les industries à forte intensité de

production, d'une façon quelque peu analogue, la « main visible » des grandes entreprises place l'organisation du progrès technologique au centre de leur comportement stratégique (c'est le cas pour l'automobile, la plupart des autres biens de consommation durables, etc.). Dans le cas de fournisseurs spécialisés, les progrès technologiques sont généralement organisés en assurant une adéquation entre les compétences technologiques particulières propres des fournisseurs et les relations étroites (souvent d'égal à égal et qui ne relèvent pas uniquement du domaine marchand) qu'ils entretiennent avec les utilisateurs ou les fabricants de sous-ensembles. Enfin, ce n'est que dans les industries essentiellement d'amont que les mécanismes d'organisation et de coordination du progrès technologique semblent conserver un certain nombre de caractères proches de la conception classique de la « main invisible » : les progrès technologiques sont généralement disponibles sur le marché sous forme de nouveaux biens d'équipement, les entreprises sont nombreuses mais leurs liens stratégiques sont ténus, etc.

D'autre part, il existe d'importantes différences intersectorielles dans la place relative qu'occupent les institutions publiques et les organismes privés dans le processus d'innovation (Mansfield, 1995, Rosenberg et Nelson, 1994). Certains secteurs tablent sur un processus endogène de progrès technologique, tandis que d'autres sont fortement tributaires des sources d'innovation publiques. L'étude menée par Dosi, Pavitt et Soete (1990) propose la généralisation empirique suivante : plus le rôle de la « main visible » des organisations oligopolistiques est important, plus le besoin d'intervention d'institutions strictement publiques dans les processus de coordination économique et de progrès technologique est faible. Et la proposition inverse est également vraie : plus une activité relève de la « concurrence parfaite », plus elle a besoin que ses externalités et ses progrès technologiques soient organisés selon des formes institutionnelles strictes. L'agriculture en offre un exemple connu : traditionnellement, une part importante de ses progrès technologiques, aux États-Unis tout au moins, a été le fruit de travaux de recherche financés par l'État. En revanche, nombre de secteurs manufacturiers dominés par les oligopoles ont réalisé de manière endogène un nombre important de leurs progrès technologiques « normaux », et ils semblent avoir relativement bien réussi à coordonner leurs ajustements prix/quantités.

L'analyse qui précède laisse supposer que dans le développement économique d'après-guerre des pays de l'OCDE, d'une part, des organismes extérieurs au marché ont joué un rôle décisif dans l'apparition de nouveaux paradigmes technologiques, tandis que, d'autre part, les conditions de l'opportunité technologique et d'appropriabilité de la technologie ont permis de garantir un rythme soutenu de progrès technique « normal » assuré d'une manière endogène par les entreprises manufacturières oligopolistiques. Il importe de noter toutefois que tous les gouvernements sont intervenus, selon des modalités et à des degrés divers en fonction des secteurs et des pays, pour renforcer l'incitation à innover.

Face à cette variété de facteurs et d'acteurs, est-il possible de dégager une règle quelconque, établissant un lien entre les formes institutionnelles, le degré d'intervention des pouvoirs publics et les résultats économiques, qui puisse présenter un intérêt pour une analyse des sentiers de croissance et de développement futurs ? Dans le monde complexe et en pleine mutation que nous examinons ici, il paraît difficile de parvenir à des conclusions définitives sur les structures nationales « optimales ». Au mieux peut-on définir certains des arbitrages qu'implique chaque configuration organisationnelle. Du point de vue de la politique de la technologie, trois de ces arbitrages paraissent essentiels. Tout d'abord, à l'origine même du processus d'innovation lancé par des agents motivés par le profit, se trouve nécessairement une forme ou une autre de « défaillance du marché » au sens statique. Une possibilité variable d'appropriabilité fournit l'incitation nécessaire pour innover, mais elle implique en même temps des « profits excédentaires » et une répartition « sous-optimale » des ressources. Les techniques les plus performantes et les meilleurs produits se diffusent dans l'économie (nationale et internationale) au bout d'un certain temps, et l'écart qui sépare la frontière technologique et les techniques les moins performantes permet également d'apprécier dans une certaine mesure l'inefficience statique de tout mode de répartition des ressources⁷.

L'asymétrie des capacités est une conséquence directe du caractère en partie appropriable des avancées technologiques. Elle correspond également à une asymétrie des signaux économiques qui fait qu'une forte opportunité technologique, présentant un degré élevé d'appropriabilité de l'innovation, peut constituer une forte incitation à innover pour une entreprise située à la frontière technologique ou qui en est proche. Dans le même temps, ces opportunités technologiques constitueront un signal négatif fort (une barrière à l'entrée) pour une entreprise dotée de capacités technologiques relativement faibles. Un bon exemple en la matière est donné par le secteur des logiciels dont le développement actuel et la concentration géographique aux États-Unis (Steinmueller, 1996) font suite à l'application de plus en plus efficace des droits de propriété intellectuelle dans le monde entier.

Le deuxième arbitrage concerne la façon dont chaque société développe ses capacités technologiques et réussit à les mettre au service de l'esprit d'entreprise et de l'innovation. Cette fois encore, on constate des écarts importants au niveau international entre « l'origine de l'esprit d'entreprise » et son mode d'institutionnalisation. La différence entre l'esprit d'entreprise organisé des entreprises japonaises et l'archétype du self-made-man qui prévaut aux États-Unis en constitue un exemple type, de même que la « production » formalisée des compétences technologiques/managériales en France (École polytechnique, etc.) et l'anarchie du système italien. Nombre d'historiens ont décrit d'une manière fort éclairante le développement de la technocratie américaine, mettant en évidence les pro-

fondes mutations subies par les économies contemporaines depuis l'époque du capitaliste protestant classique étudié par Weber dans son ouvrage *L'Éthique protestante et l'esprit du capitalisme*. Il conviendrait toutefois de mener davantage d'études internationales sur les mécanismes de formation des managers/technocrates/entrepreneurs afin de comprendre l'offre sociale, dans les différents pays, de ce facteur essentiel à l'innovation. C'est dans cette optique qu'il faut comprendre l'appel de l'UE au développement de l'esprit d'entreprise [qui figure parmi les recommandations du Sommet extraordinaire pour l'emploi tenu par l'UE (1997) à Luxembourg].

Le troisième arbitrage concerne la recherche de l'efficacité de la répartition ou la flexibilité, ou, plus généralement, d'une part l'« adaptation » à un état du monde particulier et d'autre part l'aptitude à faire face à des environnements différents (et imprévisibles). On peut faire l'analogie avec l'évolution biologique. Une optimisation extrême dans un environnement donné peut conduire au « syndrome du dinosaure » et à l'incapacité de faire face au changement. À l'inverse, une forte adaptabilité a des chances d'entraîner un gaspillage, un sous-emploi des capacités, et une sous-utilisation des ressources.

Il ne fait guère de doute que la diffusion actuelle des nouvelles technologies de l'information et des communications a considérablement modifié l'arbitrage entre flexibilité et économies d'échelle, au profit de la flexibilité et en abaissant les rendements minimaux justifiant l'introduction de procédés automatisés et en réduisant le cycle de vie des produits. Il existe aujourd'hui un besoin beaucoup plus important de diversité dans les capacités, les règles de conduite et les processus de répartition, diversité qui pourrait assurer une plus grande adaptabilité à l'incertitude et au changement. L'une des grandes forces du capitalisme a été sa capacité à produire en continu des ressources redondantes, à explorer un nombre « excessif » de trajectoires technologiques, à produire une profusion de « génotypes » technologiques/organisationnels. En un sens et contrairement à l'ancienne notion d'équilibre général, si les économies de marché contemporaines présentent un avantage par rapport aux économies à planifier, c'est probablement que les premières ne parviennent pas à un équilibre de type Arrow-Debreu, mais sont fortement imparfaites et se caractérisent toujours par des inefficacités de répartition et un sous-emploi des capacités technologiques.

Les questions touchant à l'action publique sont par conséquent, comme on pouvait le prévoir, relativement complexes. Comment produire en continu une « diversité » suffisante ? À l'inverse, comment assurer une meilleure réalisation du potentiel des nouvelles technologies ? Dans quelle mesure la réalisation de ce potentiel est-elle essentiellement fonction de l'esprit d'entreprise et de la prise de risque individuels ? L'évolution actuelle vers un régime d'appropriation plus strict et applicable à l'échelle mondiale (en matière de droit des brevets, de

copyright et de droit d'auteur) ralentit-elle la diffusion internationale de la technologie et accroît-elle les rentes de monopole liées à la technologie ? Ces questions sont encore plus étroitement imbriquées dans les économies ouvertes et, à plus forte raison, dans l'environnement « planétaire » de plus en plus mondialisé du xxi^e siècle.

L'évolution mondiale présentée ci-dessus exige une coordination internationale beaucoup plus active et explicite, qui permette de fixer les priorités au niveau mondial dans le domaine de la science et de la technologie, voire de garantir un certain degré de diversité dans un monde de l'information et des communications à l'échelle planétaire. A un niveau général, il ne fait guère de doute que si l'on prend en compte la complexité de la science et de la technologie dans tous ses aspects, les interactions, la constitution de réseaux et la coordination à l'échelle internationale (qui existent de fait dans le secteur privé où la recherche est financée par des fonds privés) dans le domaine de la recherche fondamentale et prospective financée par l'État présentent des avantages manifestes. Compte tenu de l'augmentation des coûts de la recherche dans de nombreux domaines, il est évident que la coordination et la collaboration internationales constituent un moyen plus efficace de bénéficier des avantages potentiels des efforts de recherche au niveau aussi bien national que mondial.

Comme on pouvait s'y attendre, ces avantages mondiaux ont été le plus tangibles dans les activités de recherche liées à ce qu'il est convenu d'appeler la « mégascience », où aucun pays à lui seul ni même aucun bloc de la Triade n'est plus en mesure de faire face à la diversité et à la multiplicité des disciplines, démarches et méthodes scientifiques, et à plus forte raison à l'augmentation rapide du coût des équipements et du matériel nécessaires à des recherches aussi coûteuses. Il serait intéressant de ce point de vue de se demander si les pays les plus riches et les plus développés ne doivent pas aussi jouer un rôle plus actif dans le partage du fardeau à l'échelle internationale de ces activités de recherche en mégascience. Il existe des écarts marqués par exemple dans le montant des fonds publics consacrés à la recherche fondamentale par les différents pays de l'OCDE. Or de tels écarts ne sont pas toujours étroitement liés au niveau de revenus de ces pays, ni à leur taux de croissance. Néanmoins, sans entrer dans le débat international du « bénéficiaire sans contrepartie » en matière de science et de flux de connaissances, la question d'une responsabilité globale plus explicite mérite d'être posée. Cette responsabilité revêt une importance encore plus décisive si l'on fait intervenir dans l'analyse la demande « mondiale » et les problèmes d'environnement véritablement planétaires auxquels le monde est confronté – anet au sens le plus large, cette catégorie de problèmes peut également inclure la famine, les maladies, la désertification, les besoins d'énergie, etc. Dans chacun de ces domaines, on pourrait dire que le taux de rendement social pour l'ensemble de la planète est plus élevé que le taux de rendement

social pour chacun des pays pris isolément. Face au gaspillage des ressources à l'échelle mondiale que risque d'entraîner les doubles emplois, la coordination des activités de recherche dans ces domaines, par-delà les questions de prestige national, doit figurer au premier rang des priorités.

4. COOPÉRATION TECHNOLOGIQUE A L'ÉCHELLE MONDIALE ET DÉVELOPPEMENT DURABLE

A bien des égards, la mise à contribution des politiques de la science et de la technologie et leur utilisation active à l'échelle mondiale pour atteindre les objectifs d'environnement doivent constituer l'orientation et la priorité nouvelles des politiques publiques en matière de technologie. A première vue, cela semblerait nécessiter un retour à l'optique des années 50 et 60 où les objectifs d'intérêt public étaient atteints dans le cadre de projets de recherche finalisée, mais la situation actuelle exigerait d'adopter une orientation plus explicitement mondiale. Toutefois, il existe une différence fondamentale entre les anciens projets finalisés, tels que les programmes dans les secteurs du nucléaire, de la défense et de l'aérospatiale, et les nouveaux projets visant à appuyer un développement écologiquement durable. Les anciens projets visaient à mettre au point des technologies radicalement nouvelles dans le cadre de projets d'achats publics qui, dans une large mesure étaient isolés du reste de l'économie, même s'ils avaient souvent une incidence sur la structure de certaines industries et pouvaient donner naissance à de nouvelles technologies dérivées ayant des retombées de vaste portée dans d'autres secteurs. A la différence des anciens projets, les projets « finalisés » touchant à l'environnement devront combiner des politiques de marchés publics avec un large éventail d'autres mesures, de façon que leurs effets se fassent sentir dans toute la structure de production et de consommation de l'économie.

Le fait que les effets des nouveaux projets finalisés doivent se faire sentir dans tous les secteurs pour atteindre les objectifs d'environnement nécessite donc une approche plus systémique au niveau de l'action publique. On trouvera résumées dans le tableau 1 (extrait de Freeman et Soete, 1997) les principales caractéristiques et différences des anciens et nouveaux modèles de projets finalisés.

Tableau 1. **Caractéristiques des anciens et des nouveaux projets «finalisés»**

<i>Anciens projets : défense, nucléaire et aérospatiale</i>	<i>Nouveaux projets : technologies respectueuses de l'environnement</i>
La «finalité» est définie en termes de nombre et de type de réalisations techniques, sans que leur faisabilité économique entre véritablement en ligne de compte. • Les objectifs et l'orientation du développement technologique sont définis au préalable par un petit groupe d'experts. • Le projet fait l'objet d'un contrôle centralisé par une administration publique. • La diffusion des résultats en dehors de l'équipe restreinte de participants revêt peu d'importance ou elle est activement découragée. • Le projet est limité à un petit groupe d'entreprises qui peuvent participer car l'accent est mis sur un petit nombre de technologies radicales. • Il s'agit de projets autonomes qui ne nécessitent pratiquement pas de politiques complémentaires et dont la cohérence ne fait pas l'objet d'une attention particulière.	La «finalité» est définie en termes de solutions techniques économiquement envisageables à des problèmes d'environnement particuliers. • L'orientation du changement technique est infléchie par un large éventail d'acteurs, dont les pouvoirs publics, des entreprises privées et des associations de consommateurs. • Le projet fait l'objet d'un contrôle décentralisé assuré par un grand nombre d'agents. • La diffusion des résultats est un objectif central et elle est activement encouragée. • L'accent est mis sur le développement d'innovations tant radicales que progressives, afin de permettre la participation d'un grand nombre d'entreprises. • Des politiques complémentaires sont indispensables au succès du projet et une grande attention est portée à sa cohérence par rapport aux autres objectifs.

Source : Freeman and Soete, 1997, p. 415.

L'une des principales difficultés auxquelles se heurte la politique de l'environnement concerne la façon d'encourager les technologies respectueuses de l'environnement dans une économie de marché qui sélectionne les produits et les procédés non sur des critères environnementaux, mais sur la base de la rentabilité qui, elle-même, subit l'incidence de la demande, souvent étrangère. Cette difficulté peut être surmontée notamment en élaborant des politiques qui tirent parti des caractéristiques complémentaires et cumulatives du progrès technique. Il s'agit de développer des politiques qui orienteront, dans des directions bénéfiques pour l'environnement, les efforts permanents menés par l'industrie dans le domaine de l'innovation et de la technologie. Idéalement, le procédé s'auto-renforcerait puisque la recherche de solutions techniques nouvelles suivrait la même trajectoire technique. L'expérience acquise par exemple dans la production d'électricité au moyen de cellules photovoltaïques, dans les quelques cas où cette technologie est économiquement compétitive, devrait produire des effets d'apprentissage qui amélioreront progressivement le rapport coût-efficacité des cellules photovoltaïques et accroîtront leur compétitivité. Cet accroissement de la compétitivité devrait ensuite attirer de nouveaux investisse-

ments dans cette technologie, qui déboucheront eux-mêmes sur d'autres perfectionnements techniques et réductions de coûts et sur une augmentation du nombre d'applications économiquement envisageables. C'est ce qui s'est déjà produit avec la baisse des coûts de l'énergie éolienne et d'autres sources d'énergie renouvelables dans de nombreux pays.

Il existe trois grands moyens d'action pour inciter les entreprises privées à investir dans la mise au point de technologies respectueuses de l'environnement : les réglementations directes, les instruments économiques et les marchés publics. Nous nous proposons de les examiner chacun brièvement; tous posent des problèmes de fond pour une application à l'échelle mondiale.

Les réglementations directes, sous forme par exemple de normes de qualité de l'air, de l'eau, des sols et des produits, ou de limitations visant les conditions d'utilisation d'un produit, sont probablement la méthode la plus courante de réduire la pollution ou l'exposition à des substances dangereuses. Au niveau international, ces réglementations différeront considérablement, presque par définition, d'un pays à l'autre ou d'une région à l'autre. Dans la mesure où des émissions données ont d'abord des effets locaux, ces différences sont compréhensibles, même si les régions transfrontalières peuvent poser des problèmes particuliers. Dans des domaines où les effets planétaires sont plus marqués (changement climatique, pollution des océans, surpêche, etc.) il sera difficile de parvenir à un accord mondial sur un cadre réglementaire, comme le montrent les progrès limités réalisés en la matière. Les réglementations ont aussi été largement critiquées, d'un point de vue théorique, comme étant moins efficaces que les instruments économiques pour promouvoir l'innovation dans le domaine des technologies moins polluantes.

Parmi les instruments économiques figurent les permis d'émission négociables, les taxes sur les émissions et sur les produits, et dans certains cas les subventions, même si celles-ci sont examinées plus loin avec la question des marchés publics. Les instruments économiques diffèrent des réglementations directes en ce qu'ils ne fixent pas de normes d'émission. La pollution est autorisée, mais le pollueur en paie directement le coût (principe du pollueur-payeur). Les instruments économiques s'inscrivent dans des politiques qui estiment les coûts externes de la pollution et les rattachent aux facteurs de production ou aux produits. Par exemple, les combustibles à haute teneur en soufre pourront être taxés de façon à inclure les coûts estimés des dommages à l'environnement provoqués par les pluies acides. Le surcoût encouru par l'industrie devra inciter à innover pour trouver des combustibles de remplacement ou des technologies nouvelles susceptibles de réduire les émissions de soufre. Dès lors qu'au niveau international, rien n'empêcherait que ces permis soient négociés ou échangés, il serait de toute évidence indispensable d'instaurer un contrôle réglementaire (international) de ce type de marchés mondiaux.

D'une façon plus générale, l'utilisation efficace des instruments économiques est tributaire d'une amélioration des pratiques de comptabilité employées pour estimer les coûts d'environnement, ainsi que de la mise au point de technologies permettant de mesurer les émissions avec précision. Jusqu'à présent, ces exigences se sont heurtées à des obstacles importants, en particulier dans un contexte international où ces activités sont souvent organisées à l'échelle nationale. Néanmoins, des moyens pourraient être mobilisés pour donner la priorité aux investissements internationaux destinés à développer des systèmes de surveillance en temps réel de la pollution causée par toute une gamme de substances, systèmes qui seraient contrôlés par des institutions internationales indépendantes. Il serait également nécessaire, en complément, d'identifier et de supprimer les instruments économiques ayant des effets négatifs tels que les allègements fiscaux et les subventions dans le secteur de l'agriculture qui favorisent des pratiques nocives pour l'environnement.

Les politiques de marchés publics au plan international, comme c'est le cas au plan national, peuvent jouer un rôle important dans la réalisation de l'objectif du développement écologiquement durable, soit par une aide directe à la recherche et au développement, soit par des subventions en faveur de l'utilisation ou du développement de technologies respectueuses de l'environnement dans les entreprises privées. Les achats directs sont sans doute la meilleure formule pour développer des nouvelles technologies destinées à être utilisées dans des infrastructures comme les systèmes de distribution de l'énergie, de transports et d'élimination des déchets, car ils permettent dans une certaine mesure un « rattrapage », voire un « saut » technologique. Des subventions ou des programmes d'aide, par exemple sous forme d'allègements fiscaux ou de projets de recherche en coopération entre l'industrie et les établissements publics de recherche, pourraient être le moyen le plus efficace de développer des technologies de production propre, lorsque la majeure partie des connaissances actuelles est détenue par les entreprises privées et n'a pas été codifiée ni rendue publique.

L'objectif essentiel de ces politiques est d'encourager la diffusion rapide à l'échelle internationale de technologies respectueuses de l'environnement. Toutefois la diffusion peut aussi être appuyée par des programmes qui accroissent le nombre de personnes connaissant l'innovation et capables de la mettre en œuvre pour répondre aux besoins de l'industrie. Les politiques visant à soutenir les projets de démonstration et les programmes de transfert de technologie peuvent y concourir en multipliant et diversifiant les utilisateurs potentiels. Des programmes de marchés publics, fondés sur des principes « gradualistes » (*incrementalist*), peuvent aussi favoriser la diffusion rapide des technologies les plus performantes en augmentant le nombre de personnes ayant une connaissance directe de la technologie et la capacité de l'utiliser dans le secteur privé.

L'objectif du développement écologiquement durable nécessite de développer et d'appliquer un large éventail de technologies, ayant chacune un mode particulier. Compte tenu du nombre de technologies, de besoins et d'applications, les pouvoirs publics ne disposent pas des informations nécessaires pour décider du type précis d'innovation nécessaire à la solution de certains problèmes particuliers. Les échanges et la collaboration à l'échelle internationale peuvent donc se révéler très fructueux à cet égard. En même temps, au lieu de définir des solutions, les politiques doivent viser à influencer sur les incitations dont les entreprises font l'objet, comme évoqué précédemment, et à soutenir des programmes de recherche qui tirent parti de l'extrême diversité des sources et applications des innovations en veillant à ce que soit exploré et développé le plus large éventail possible de technologies potentiellement bénéfiques. On peut y parvenir en mettant en œuvre des programmes de recherche et de marchés publics qui impliquent des entreprises innovantes, des utilisateurs potentiels de produits et procédés nouveaux, des établissements publics de recherche, et des organisations non gouvernementales. En outre, pour veiller à ce qu'un large éventail d'applications possibles soit aussi exploré, les programmes de marchés publics visant à développer de nouvelles technologies doivent également inclure un grand nombre d'entreprises susceptibles de tirer avantage de ces technologies. Ce dernier point est particulièrement important compte tenu de l'importance des connaissances et des modalités particulières selon lesquelles les différentes entreprises utilisent les technologies.

Les technologies qui marquent une « percée » radicale, comme les perfectionnements progressifs de technologies existantes sont indispensables. Une technologie mettant en œuvre l'énergie solaire ou une autre source d'énergie renouvelable constitue un exemple d'innovation radicale pour l'avenir qui pourrait jouer un rôle fondamental dans une économie écologiquement viable. Une amélioration technique des moteurs d'avions à réaction visant à diminuer la consommation de carburant et les émissions de NOx est un exemple d'innovation progressive qui aurait des effets bénéfiques sur l'environnement.

Il convient de noter que le terme de « gradualisme » (*incrementalism*) est utilisé par plusieurs chercheurs pour désigner une approche spécifique du processus d'innovation qui s'oppose à la conception taxinomique de l'innovation. Un processus d'innovation « gradualiste » peut donner lieu à des innovations progressives comme à des innovations radicales. Le principe de base du « gradualisme » est que le processus d'innovation doit viser à encourager des évaluations fréquentes d'une technologie en développement par un grand nombre de chercheurs ou d'utilisateurs potentiels. Cela peut se faire en imposant des temps de développement relativement courts pour chaque avancée technique, des projets de petite envergure, des niveaux d'investissement faibles pour chaque projet, et un besoin minimal d'infrastructures spécialisées ne pouvant être aussi utilisées à

d'autres fins. Les trois derniers critères visent à permettre à plusieurs entreprises et institutions de recherche de mener des projets de recherche parallèles sur une technologie donnée, afin d'accroître le nombre de personnes susceptibles d'évaluer la technologie d'un point de vue critique, soit en la soumettant à la rigueur des lois du marché, soit par d'autres moyens, et d'utiliser les résultats de ces évaluations pour orienter les nouveaux développements techniques.

L'objectif d'une approche « gradualiste » du processus d'innovation est d'éviter le surinvestissement dans un nombre limité de technologies coûteuses qui se révèlent ensuite inexploitable, d'un coût excessif, ou plus nocives plus l'environnement que les technologies qu'elles étaient censées remplacer. Un tel risque existe avec les projets finalisés visant à mettre au point des technologies radicalement nouvelles dans le cadre de grands projets coûteux de longue durée qui limitent le nombre de participants à quelques établissements de recherche ou quelques entreprises de pointe sur le plan technique. Toutefois il peut être nécessaire de renoncer à un ou plusieurs principes « gradualistes » s'ils risquent d'empêcher toute exploration d'une technologie potentiellement bénéfique.

Parmi les organisations susceptibles d'accentuer la pression externe qui pèse à l'échelle internationale sur les entreprises figurent, outre les pouvoirs publics, les établissements de recherche, le secteur des technologies de protection de l'environnement, et les organisations non gouvernementales (ONG) comme les associations de consommateurs, et les organismes de santé publique ou de défense de l'environnement. Les ONG peuvent pour ce faire jouer sur la demande en sensibilisant les consommateurs aux problèmes d'environnement et aux mauvaises pratiques des entreprises. En Allemagne, les organisations de consommateurs semblent avoir réussi à exercer ce type de pression d'une façon particulièrement efficace.

Des pressions peuvent être exercées sur les entreprises au niveau interne par les organisations professionnelles et syndicales, ainsi que par les services de protection de l'environnement et de marketing des entreprises privées. Ces organisations peuvent faire évoluer les pratiques en veillant à ce que les questions d'environnement soient prises en compte et considérées comme un facteur important dans une stratégie à long terme. Il est également nécessaire de développer la recherche en sciences sociales de façon à mieux cerner la capacité des organisations et des individus à s'adapter aux objectifs d'environnement, et à concevoir des politiques appropriées pour favoriser ce processus.

L'objectif du développement écologiquement durable exige la mise en œuvre d'un large éventail de politiques complémentaires pour appuyer l'investissement dans les nouvelles technologies respectueuses de l'environnement, et la diffusion rapide des applications efficaces. Ces politiques, même si elles sont souvent nationales, par nature, en ce qu'elles soutiennent, par exemple, la

compétitivité et la capacité d'évolution de l'industrie, ont leur équivalent au niveau international.

Les politiques visant à mettre au point des technologies respectueuses de l'environnement peuvent contribuer à améliorer la compétitivité de l'industrie de deux manières au moins. D'une part, en réduisant la quantité de matériaux et d'énergie consommée par unité produite, les nouvelles technologies font baisser les coûts. D'autre part, les politiques qui orientent l'innovation vers la mise au point de produits et de procédés satisfaisant à des normes strictes de performances environnementales et de protection de l'environnement peuvent aussi accroître la compétitivité mondiale de l'industrie si ces normes sont susceptibles d'être imposées dans l'avenir par de nombreux pays. Mais les accords internationaux dans le domaine de la réglementation environnementale – signe probablement le plus tangible d'une intégration positive – posent des problèmes complexes sur le plan de l'action publique.

Comme le soulignait *The Economist*, « les problèmes d'environnement respectent rarement les frontières nationales ». Les déchets industriels et ménagers d'un pays donné peuvent contaminer l'atmosphère ou les eaux dans un grand nombre d'autres pays, voire à l'échelle planétaire, comme c'est le cas des CFC. De la même manière, les polluants d'un grand nombre de pays peuvent converger sur un seul pays ou une seule région. Étant donné le caractère planétaire des problèmes d'environnement, l'objectif du développement écologiquement durable revêt de l'importance pour toutes les régions et tous les pays du monde, et il exige une diffusion à grande échelle des nouvelles technologies, ainsi que des institutions de soutien. Le caractère multinational tant des problèmes que des solutions conduit à penser que les organisations supranationales comme l'ONU ont un rôle important à jouer, mais, en même temps, le caractère localisé d'un grand nombre de sources de pollution et la diversité des institutions et des solutions mises en place pour résoudre les problèmes d'environnement (pour éliminer ou recycler les déchets ménagers ou industriels, par exemple), exigent un engagement à grande échelle des autorités régionales et nationales. C'est la raison pour laquelle on ne saurait parvenir à un développement écologiquement durable sans la participation active de tous les niveaux de l'administration publique. Cela nécessite d'appliquer le principe de subsidiarité avec rigueur afin de déterminer les responsabilités à chacun des niveaux. (On peut définir le « principe de subsidiarité » comme consistant à laisser la décision au niveau le plus bas possible auquel puisse s'exercer efficacement la responsabilité dans chaque cas.)

A l'évidence, s'il s'agit d'un gouvernement fédéral comme il en existe en Allemagne, aux États-Unis ou au Canada, la répartition des responsabilités dépendra du contexte constitutionnel, juridique et politique, mais le principe de subsidiarité est une référence utile pour accroître au maximum la participation de la population locale et réduire au minimum la centralisation administrative.

Toutefois, dans le cas de l'Union européenne ou du gouvernement fédéral des États-Unis, il ressort que nombre de responsabilités sont mieux assumées soit aux niveaux supérieurs, soit conjointement par les autorités supranationales, fédérales, nationales et locales. On peut espérer qu'au siècle prochain, des agences intercontinentales planétaires seront en mesure de jouer un rôle renforcé en matière de normes mondiales de manière à aider les pays à éviter le problème de la perte d'avantage concurrentiel national ou régional du fait de l'introduction de mesures de protection de l'environnement rigoureuses, comme les taxes sur le carbone, etc.

Toutefois la définition et la création d'un consensus sur des objectifs d'environnement particuliers posent un problème délicat, notamment lorsque ces objectifs nécessitent de considérablement modifier des technologies systémiques et fortement imbriquées. L'agriculture est, par exemple, un système de production et de consommation où sont impliqués non seulement les exploitants et les consommateurs, mais aussi les pouvoirs publics par le biais des programmes de subventions et de soutien des revenus, et les fournisseurs de matériel, de pesticides et d'engrais. Pour résoudre les problèmes d'environnement causés par l'agriculture, il pourrait être nécessaire de procéder non seulement à des modifications mineures, comme la mise au point de pesticides moins toxiques, mais aussi à une transformation d'ensemble de la structure de production agricole. De même, la réduction de la consommation d'énergie pourrait nécessiter de procéder à des changements systémiques dans les infrastructures de transport complexes mises en place depuis un siècle afin de valoriser l'attrait et la souplesse des transports publics par rapport à la voiture particulière. Ce type de mutations au niveau du système techno-économique ne saurait être opérées sans débat politique. L'instauration d'un tel débat à l'échelle planétaire, compte tenu de la diversité des intérêts et arbitrages en jeu, est une tâche à laquelle l'OCDE et beaucoup d'autres organisations internationales seront en mesure de contribuer au siècle prochain.

CONCLUSION

Ce chapitre s'est attaché à examiner les enjeux institutionnels du processus de mondialisation, en particulier dans la création, la diffusion et l'utilisation des nouvelles technologies. Il y a en particulier deux domaines où la mondialisation (limitée ici à la sphère de l'économie réelle)⁸ semble remettre en question le processus traditionnel d'élaboration des politiques nationales et fait apparaître l'urgente nécessité d'une action publique à l'échelle internationale.

D'une part, à la suite de la libéralisation accrue des échanges et des flux de capitaux ces dix dernières années, les entreprises ont progressivement axé leur stratégie sur le double objectif de bénéficier des avantages d'échelle procurés

par 1) une présence sur les marchés mondiaux et de plus en plus liés à certains de leurs investissements et actifs immatériels (technologie, publicité, logistique, gestion), et 2) une présence locale davantage axée sur la production et la distribution dans des régions géographiques hautement diversifiées. D'où le concept de « glocalisation ». Les stratégies mondiales de ce que l'on a appelé les entreprises « multidomestiques » ou les « entreprises-réseaux » remettent de plus en plus en question la pertinence de politiques industrielles et de politiques de la technologie à vocation nationale et même européenne. Dans une certaine mesure, on assiste aujourd'hui à un retour, au niveau régional, de certains arguments antérieurs touchant à la « stratégie » nationale en faveur des politiques industrielle et technologique.

Si des organisations internationales telles que le GATT, puis l'OMC, ont été mises en place pour faire face à la libéralisation internationale des échanges de biens, de services et d'investissements et ont vu leur mandat s'étendre au fil des années (OMC, OMPI), le champ d'application et la nécessité d'une action publique internationale ont progressé beaucoup plus rapidement et ils ne se limitent plus aux aspects traditionnels de l'intégration mondiale touchant à la libéralisation et à la déréglementation, relativement faciles à mettre en œuvre (intégration dite « négative »). La nécessité d'une intégration « positive » visant à la mise en place d'un cadre réglementaire mondial harmonisé, et le caractère qu'elle doit revêtir, continuent toutefois d'être largement débattus. Dans des domaines tels que la politique de concurrence, les droits de propriété intellectuelle (comme il ressort d'une comparaison entre les États-Unis, l'Europe et le Japon sur le plan du droit des brevets, du copyright ou du droit d'auteur), la politique industrielle ou technologique, il existe des différences marquées dans la nature des politiques nationales et dans leur champ d'application. Toutefois, comme indiqué dans la section 2, tous ces domaines sont essentiels aussi bien à la mise au point des nouvelles technologies qu'à leur diffusion. Ils s'inscrivent souvent dans un réseau d'institutions relativement diverses et à vocation nationale, enracinées dans une longue histoire. Il est particulièrement difficile de transformer ou d'adapter ces institutions au nouvel environnement mondial. Pourtant, il ne fait guère de doute, qu'avec l'augmentation de la complexité, des risques et des incertitudes qui entourent la mise au point et le développement de nouvelles technologies, les interactions, les réseaux, les alliances, la coordination et la collaboration à l'échelle internationale dans le domaine des politiques d'aide nationale présentent des avantages manifestes. De même, face aux possibilités à l'échelle mondiale de partage des connaissances et de diffusion des nouvelles technologies permettant d'exploiter pleinement leur potentiel « planétaire » dans la solution des problèmes, les politiques nationales sont insuffisantes et nécessitent d'être complétées par une action internationale équivalente.

Cela vaut tout particulièrement pour les problèmes d'environnement auxquels notre planète est actuellement confrontée. Parmi les nombreuses questions qui se posent, les auteurs se sont limités dans la quatrième section à celle du développement durable. Là aussi, il est clair que les solutions à certains problèmes urgents d'environnement devront être trouvées dans une utilisation plus efficace des nouvelles technologies. Les politiques nationales de la science et de la technologie doivent être recentrées en priorité sur la collaboration internationale et la diffusion mondiale de la technologie. On peut affirmer que le taux de rendement social de telles activités pour l'ensemble du monde est plus élevé que le taux de rendement social pour chaque pays pris isolément. Face au gaspillage des ressources à l'échelle mondiale que risquent d'entraîner les doubles emplois, la coordination des activités de recherche, par-delà les questions de prestige national, doit figurer au premier rang des priorités. Cette fois encore toutefois, cette collaboration volontaire paraît de moins en moins suffisante face à la mondialisation accélérée que connaissent les problèmes d'environnement auxquels notre planète est confrontée. Il paraît indispensable de créer une institution internationale mondiale indépendante pour mettre en œuvre les principales mesures nationales de diffusion des technologies respectueuses de l'environnement examinées dans la section 4 : réglementations spécifiques, incitations à l'instauration de droits d'émission négociables à l'échelle internationale, achats publics.

Comme en témoignent les récentes réductions opérées par les différents pays membres dans le financement des organisations internationales, pour garantir l'indépendance d'une telle institution mondiale, il est indispensable d'instaurer un mode de financement plus direct, échappant au contrôle démocratique des différents pays, mais directement fondé sur une contribution « citoyenne » à l'échelle planétaire. La volonté politique de s'attaquer aux problèmes mondiaux doit se mesurer non pas simplement dans celle de créer de nouvelles institutions internationales ou d'élargir le domaine de compétences des institutions existantes, mais aussi dans la volonté des gouvernements nationaux de « déléguer » une partie de leurs pouvoirs nationaux qui peuvent sembler démocratiques d'un point de vue national, mais qui ne le sont pas toujours du point de vue de la citoyenneté mondiale. C'est dans cette dernière optique que des propositions visant à instaurer une taxe planétaire sur différents aspects de la mondialisation (comme la taxe Tobin, celle sur les transports internationaux, ou celle sur les transmissions électroniques, dite « taxe sur les modems ») prennent toute leur signification. L'imposition marginale de certains gains de bien-être procurés par la mondialisation ne vise pas à défendre les intérêts protectionnistes ou concurrentiels d'un pays donné, mais constitue la contribution (en dehors du domaine de compétences des gouvernements nationaux) des citoyens du monde à la recherche de solutions aux problèmes mondiaux de la planète.

NOTES

1. Il suffit de noter que pratiquement tous les pays de l'OCDE disposent encore, sous différentes formes, d'un conseil ou groupe consultatif sur la compétitivité.
2. C'est l'une des raisons pour lesquelles le projet de suivi du G-7 actuellement mené par l'OCDE porte précisément sur cette question.
3. Tout un ensemble d'idées intéressantes ont été avancées sur cette question par Geelhoed, 1997.
4. Pour des opinions divergentes, voire notamment Ohmae (1990), Patel et Pavitt (1991), Pearce et Singh (1992), Scherer (1992), Dunning (1993) Achibugi et Michie (1995). Pour un aperçu général des publications sur ce thème, voir Archibugi et Michie (1997).
5. Voir en particulier les diverses contributions *in* Siebert, 1997.
6. Pour plus de détails, voir Freeman et Soete, 1997.
7. C'est dans ce sens qu'on peut interpréter les mesures des progrès techniques fondés sur les meilleures techniques et sur les techniques moyennes élaborées *in* Soete et Turner (1984).
8. Compte tenu de l'optique de cette étude, les auteurs ont ignoré, d'une manière générale, les principaux aspects de la mondialisation financière.

BIBLIOGRAPHIE

- ARCHIBUGI, D. et J. MICHIE (1995), « The Globalisation of Technology: A New Taxonomy », *Cambridge Journal of Economics*, 19, pp. 121-140.
- ARCHIBUGI, D. et J. MICHIE, dir. publ. (1997), *Technology, Globalisation and Economic Performance*, Cambridge University Press, Cambridge.
- ARTHUR, W.B. (1995), *Increasing Returns and Path Dependence in the Economy*, The University of Michigan Press, Ann Arbor.
- BIS (1996), *Annual Report*.
- COMMISSION EUROPEENNE (1997), *Construire la société européenne de l'information pour tous*, Groupe d'experts de haut niveau, Rapport final, CE, Bruxelles.
- DAVID, P.A. et D. FORAY (1995), « Distribution et expansion de la base de connaissances scientifiques et technologiques », *STI Revue*, vol. 16, OCDE, Paris.
- DOSI, G. (1984), *Technical Change and Industrial Transformation*, Macmillan, Londres.
- DOSI, G., K. PAVITT et L. SOETE (1990), *The Economics of Technical Change and International Trade*, Wheatsheaf, Brighton.
- DUNNING, J. (1993), *The Globalization of Business: The Challenge of the 1990s*, Routledge, Londres.
- FORAY, D. et B.-A. LUNDVALL (1996), *Employment and Growth in the Knowledge-based Economy*, OCDE, Paris.
- FREEMAN, C. (1987), *Technology Policy and Economic Performance: Lessons from Japan*, Pinter, Londres.
- FREEMAN, C. et L. SOETE (1994), *Work for All or Mass Unemployment: Computerised Technical Change into the 21st Century*, Pinter, Londres.
- FREEMAN, C. et L. SOETE (1997), *The Economics of Industrial Innovation*, 3^e édition, Creative Print and Design, Londres.
- GEELHOED, L.A. (1997), « 1997 : Een delta in Europa », *ESB*, 1 janvier, pp. 4-8.
- HOWITT, P. (1996), *The Implications of Knowledge-Based Growth for Micro-Economic Policies*, The University of Calgary Press, Calgary.
- LUNDVALL, B.-A. (1992), *National Systems of Innovation: Towards a Theory of Innovation and Interactive Learning*, Pinter, Londres.
- MANSFIELD, E. (1995), *Innovation, Technology and the Economy, Selected Essays*, 2 vol., Elgar, Aldershot.

- NARULA, R. (1996), «Forms of International Cooperation between Corporations» in C. Jepma et A. Rhoen (dir. publ.), *International Trade: A Business Perspective*, Longman, Harlow, pp. 98-122.
- NELSON, R. (1992), «What Has Been the Matter with Neoclassical Growth Theory?» in G. Silverberg et L. Soete (dir. publ.), *The Economics of Growth and Technical Change*, Elgar, Aldershot.
- OCDE (1991), *La technologie dans un monde en évolution*, Paris.
- OCDE (1992), *La technologie et l'économie : les relations déterminantes*, Paris.
- OCDE (1993), *Questions pour 1993 : l'Approche de l'OCDE*, Rapport intérimaire du Secrétaire général, Paris.
- OCDE (1996), *Technologie, productivité et création d'emploi*, vol. I et II, Paris.
- OHMAE, K. (1990), *The Borderless World*, Harper, New York.
- PATEL, P. et K. PAVITT (1991), «Large Firms in the Production of the World's Technology: An Important Case of "Non-globalisation"», *Journal of International Business Studies*, vol. 22, pp. 1-21.
- PAVITT, K. (1984), «Patterns of Technical Change: Towards a Taxonomy and a Theory», *Research Policy*, vol. 13, n° 6, pp. 343-73.
- PAVITT, K. et P. PATEL (1998), «Global Corporations and National Systems of Innovation: Who Dominates Whom?» in J. Howells et J. Mitchie (dir. publ.), *National Systems of Innovation or the Globalisation of Technology*, Cambridge University Press, Cambridge.
- PEARCE, R. et S. SINGH (1992), *Globalizing Research and Development*, Macmillan, Londres.
- SCHERER, F.M. (1992), *International High-Technology Competition*, Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- SIEBERT, H., dir. publ. (1997), *Towards a New Global Framework for High-Technology Competition*, J.C.B. Mohr, Tübingen.
- SOETE, L. (1997), «The Impact of Globalization on European Economic Integration», *The ITPS Report*, n° 15, pp. 21-28.
- SOETE, L. et R. TURNER. (1984), «Technology Diffusion and the Rate of Technical Change», *Economic Growth and the Structure of Long-Term Development*, St. Martin's Press, New York.
- TIDD, J. et al. (1997), *Managing Innovation : Integrating Technological, Market and Organizational Change*, Wiley, Chichester.

Annexe

LISTE DES PARTICIPANTS

Président

Donald JOHNSTON
Secrétaire général de l'OCDE

PARTICIPANTS

Werner ARBER
Nobel Laureat
Professor of Genetics
Biozentrum
University of Basel
Suisse

Walter S. BAER
Vice President
RAND Corporation
États-Unis

Simon BEST
CEO and Managing Director
Zeneca Plant Science
Royaume-Uni

Walter BRINKMANN
Senior Vice President
Coca Cola Europe
Belgique

Roberto CARNEIRO
President
Grupo Forum
former Minister of Education
Portugal

Joseph F. COATES
President
Coates & Jarratt, Inc.
États-Unis

P.S. DEODHAR
Chairman
Mahanagar Gas Ltd
former Chairman of the Electronics
Commission
of the Indian Government
Inde

Frederik A. von DEWALL
General Manager and Chief Economist
ING Bank
Pays-Bas

Meinolf DIERKES
Professor and Director
Abteilung Organisation
und Technikgenese
Wissenschaftszentrum Berlin
Allemagne

Emilio FONTELA
Professor of Economics
University of Madrid
Espagne

Hervé GALLAIRE
Vice President
Xerox Research Centre Europe
France

Orhan GÜVENEN
Undersecretary
State Planning Organisation
Prime Minister's Office
Turquie

Ian HARVEY
Chief Executive
BTG plc.
Royaume-Uni

Makoto KURODA
Secretary-General
Japanese Association for
the 2005 World Exposition
former Vice-Minister, Ministry of
International Trade and Industry (MITI)
Japon

Reinhold LEITTERSTORF
Director General
Federal Ministry of Education,
Science, Research and Technology
Allemagne

Wolfgang LIEB
Secretary of State
Ministry for Science and Research
Northrhine-Westfalia
Allemagne

Ulf MERBOLD
Scientific Astronaut
European Astronaut Centre
European Space Agency (ESA)
Allemagne

Wolfgang MICHALSKI
Directeur
Unité consultative auprès
du Secrétaire général
OCDE

Paolo MONFERINO
Executive Vice President
FIAT Spa
Italie

Hans Henning OFFEN
Vice Chairman of the Managing Board
Westdeutsche Landesbank
Allemagne

Erik ØVERLAND
Advisor
Ministry of National Planning and
Coordination
Norvège

Werner POLLMANN
Senior Vice President
Daimler-Benz AG
Allemagne

Grégoire POSTEL-VINAY
Chef de l'Observatoire des Stratégies
Industrielles
Ministère de l'Économie, des Finances
et de l'Industrie
France

Bernard ROCQUEMONT
Président Directeur Général
Thomson CSF
France

Jorma ROUTTI
Director-General
DG XII : Science, Research
and Development
Commission européenne

Hanspeter SCHELLING
Chairman, Research Advisory Board
Novartis International AG
Suisse

Walter SCHUSSER
Vice President
Siemens AG
Allemagne

Luc SOETE
Director
Maastricht Economic Research Institute
for Innovation and Technology
Pays-Bas

Huijiong WANG
Vice President, Academic Committee
Development Research Center
The State Council
Chine

Ms Tayce A. WAKEFIELD
Member of the Board of Directors
General Motors of Canada Ltd.
Canada

Secrétariat de l'OCDE

Barrie STEVENS
Adjoint au Directeur
Unité consultative auprès
du Secrétaire général

Riel MILLER
Administrateur principal
Unité consultative auprès
du Secrétaire général

Pierre-Alain SCHIEB
Administrateur principal
Unité consultative auprès
du Secrétaire général

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE
(03 98 03 2 P) ISBN 92-64-26052-8 – n° 50118 1998