



ENERGIE

les
cinquante
prochaines
années

Énergie : Les cinquante prochaines années

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:
ENERGY: THE NEXT FIFTY YEARS

© OCDE 1999

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

Dans les décennies à venir, le secteur de l'énergie sera confronté à un ensemble de plus en plus complexe de défis étroitement imbriqués – d'ordre économique, géopolitique, technologique et environnemental – qui ne concerneront pas seulement les pays de l'OCDE. Parallèlement à la croissance démographique qui se poursuit dans les pays en développement, il faudra répondre aux besoins en énergie de milliards de nouveaux habitants dans les zones rurales et, tout particulièrement, dans les agglomérations. Dans le même temps, on s'attend à une baisse des approvisionnements en pétrole et gaz naturel classiques dans un avenir relativement proche, et à leur concentration croissante au Moyen-Orient (pétrole) et dans des pays tels la Russie et l'Iran (gaz). L'utilisation des ressources énergétiques classiques, y compris le charbon, se verra presque certainement soumise à de nouvelles contraintes dans la mesure où des limites de plus en plus strictes seront imposées au total des émissions de gaz à effet de serre qui pourront être rejetées dans l'atmosphère – contraintes qui conduiront à s'intéresser davantage aux sources et technologies énergétiques de substitution. Les réponses qui seront apportées à ces évolutions très diverses joueront un rôle essentiel en ce qu'elles façonneront les courants d'échanges et les flux d'investissement, les positions concurrentielles et la structure des économies dans toute la planète, en déterminant simultanément les aptitudes de l'humanité à construire un avenir durable.

Il faudra beaucoup de temps pour relever ces défis. En fait, la transformation radicale des structures actuelles de la production et de la consommation d'énergie – infrastructures de transport et autres infrastructures techniques, configuration des agglomérations, nature du parc d'équipements industriels, technologies courantes, valeurs et attitudes, etc. – pourrait prendre non moins de cinquante ans.

Afin d'examiner ces questions, l'OCDE a organisé, en coopération avec l'Agence internationale de l'énergie (AIE), une conférence du Forum sur l'avenir qui s'est tenue à Paris en juillet 1998. Des personnalités de premier plan venant des sphères gouvernementales, des milieux d'affaires et du monde de la recherche s'y sont retrouvées pour étudier les enjeux ainsi que les tendances et évolutions concevables de la situation énergétique mondiale d'ici à 2050; pour examiner les

possibilités et les contraintes associées à l'évolution probable de facteurs clés tels que le paysage géopolitique, les nouveaux modes de transport et les nouvelles technologies énergétiques, ainsi que l'état du climat; et pour envisager dans une perspective pluridisciplinaire toute la gamme de réponses stratégiques possibles.

La conférence s'est composée de quatre sessions. La première entendait donner une vue d'ensemble des perspectives énergétiques – d'abord jusqu'en 2020, puis à l'horizon 2050 – en vue de recenser certains des principaux enjeux et incertitudes. La deuxième session était axée précisément sur la dimension géopolitique et sur les problèmes d'environnement, tandis que la troisième a permis d'évaluer les probabilités d'évolution des structures de la demande d'énergie et les potentialités des technologies énergétiques, classiques et nouvelles. La quatrième session, enfin, a été consacrée à l'examen des options stratégiques qui s'offrent aux décideurs des pouvoirs publics et des entreprises.

Cet ouvrage réunit l'ensemble des contributions présentées lors de la conférence, précédées d'une introduction du Secrétariat. Il est publié sous la responsabilité du Secrétaire général de l'OCDE.

Table des matières

Chapitre 1. L'avenir de l'énergie à long terme : évaluation des tendances et enjeux essentiels par <i>Reza Lahidji, Wolfgang Michalski et Barrie Stevens</i>	7
Chapitre 2. Perspectives énergétiques à l'horizon 2020 : questions et incertitudes par <i>Jean-Marie Bourdair</i>	35
Chapitre 3. Perspectives énergétiques mondiales à l'horizon 2050 et au-delà par <i>Arnulf Grübler</i>	49
Chapitre 4. Vers un avenir énergétique durable par <i>Dieter M. Imboden et Carlo C. Jaeger</i>	75
Chapitre 5. Les structures de la demande d'énergie vers l'an 2050 par <i>Martin Bekkeheien, Øystein Håland, Reidulf Klovening et Roar Stokholm</i>	113
Chapitre 6. Les options systémiques pour le développement durable par <i>Chihiro Watanabe</i>	143
Annexe : Liste des participants	185

L'avenir de l'énergie à long terme : évaluation des tendances et enjeux essentiels

par

Reza Lahidji, Wolfgang Michalski et Barrie Stevens

Secrétariat de l'OCDE, Unité consultative auprès du Secrétaire général

Malgré des incertitudes considérables, il y a une assez large convergence de vues sur les perspectives énergétiques concernant les vingt prochaines années, qui tient peut-être surtout à ce que l'on n'escompte pas un changement radical des tendances énergétiques à long terme dans cet intervalle. Les biens d'équipement se renouvellent lentement et, dans la majeure partie du parc des vingt prochaines années, on fera appel aux technologies actuelles (ou passées) pour la production d'électricité, dans le secteur du logement et, dans une moindre mesure, dans les transports. En outre, la dynamique de la demande d'énergie, relativement stable depuis 1982, devrait normalement, de l'avis général, poursuivre sa trajectoire à long terme. Néanmoins, vers 2010/2020, il se pourrait bien que le panorama commence à se modifier. De nouvelles technologies seront sans doute mises en service, il pourrait apparaître de nouvelles générations de biens d'équipement et d'infrastructures et, s'agissant des ressources énergétiques, la production de pétrole classique devrait diminuer, tandis que de nouvelles sources d'énergie, en particulier les nouveaux pétroles (non classiques) et les énergies renouvelables, devraient se trouver de plus en plus en première ligne.

1. Les vingt prochaines années : poursuite des tendances actuelles?

Le scénario de l'AIE tablant sur une poursuite de l'évolution actuelle, présenté dans le chapitre qui suit par Jean-Marie Bourdair, est fondé sur des hypothèses économiques et démographiques relativement courantes. Selon les prévisions, la croissance économique mondiale représentera 3.1 pour cent par an, soit près de la moyenne enregistrée au cours des 25 dernières années, les taux de croissance étant plus élevés dans les pays en développement et les économies en transition, et plus faibles dans la zone de l'OCDE. La population mondiale devrait s'accroître notablement, bien qu'à un rythme qui se ralentira progressivement, pour atteindre

8 milliards d'habitants en 2020. La consommation totale d'énergie augmentera de 2 pour cent par an et l'intensité énergétique diminuera de 1.1 pour cent par an. Cependant, l'efficacité énergétique risque de s'améliorer plus lentement que prévu en Chine et dans les économies en transition. Les émissions de CO₂ devraient croître parallèlement à la demande primaire, autrement dit, un peu plus rapidement que par le passé, en raison de la stabilisation de la production électronucléaire et du vif essor de la consommation de charbon en Chine et dans d'autres pays d'Asie.

Une caractéristique frappante de la situation générale est une amélioration autonome de l'efficacité énergétique découlant de l'adoption de technologies perfectionnées (laquelle est induite par la quête d'avantages concurrentiels), qui va de pair avec la croissance du PIB. Ce phénomène laisse présager deux possibilités contrastées pour l'avenir. D'une part, il pourrait se révéler difficile de s'écarter de cette tendance autonome si les prix et les cadres institutionnels demeuraient inchangés. D'autre part, il est tout à fait possible que l'efficacité énergétique s'améliore considérablement s'il se produit des variations des prix et/ou des changements de comportement – par exemple sous l'effet de l'instauration de nouvelles taxes ou de réformes réglementaires. En ce cas, les gains d'efficacité énergétique pourraient atteindre 20 ou 30 pour cent en 2020, selon le deuxième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Stabilité relative des structures de la demande d'énergie

Trois utilisations entrent en ligne de compte dans la demande d'énergie : elles concernent l'électricité, la mobilité et les applications fixes (surtout pour le chauffage). Dans les pays de l'OCDE, la demande d'électricité et de mobilité a été d'une stabilité remarquable par le passé, progressant généralement de pair avec le PIB malgré les chocs des prix pétroliers de 1973 et 1979. Les applications fixes, par contre, en ont subi les conséquences et on a constaté des améliorations rapides de l'efficacité énergétique dans ce domaine (surtout en réaction aux signaux des prix, et en partie sous l'influence des politiques mises en œuvre), une demande grandissante d'activités de services à faible consommation d'énergie et certaines relocalisations d'activités industrielles dans des pays en développement.

Dans l'ensemble, on prévoit que ces tendances persisteront dans les décennies à venir, mais avec certaines variations importantes. Dans les pays en développement, la consommation d'énergie augmentera sans doute de façon prononcée, par suite de l'amélioration du niveau de vie, de la croissance démographique, de l'urbanisation rapide et de la substitution graduelle des énergies commerciales aux non commerciales. Les perspectives sont plus incertaines dans le cas des économies en transition, où les observations passées sur l'intensité énergétique ne sont pas utilisables pour prévoir l'avenir. Les pays de l'OCDE,

enfin, pourraient connaître une certaine saturation dans le secteur des applications fixes, le chauffage en particulier, mais l'étendue du phénomène et le moment où il interviendra sont difficiles à prédire. En résumé, les pays non membres de l'OCDE joueront un rôle beaucoup plus important qu'à l'heure actuelle, à la fois en ce qui concerne l'offre et la demande, et les émissions de CO₂.

Les combustibles fossiles restent prédominants dans le dosage des formes d'énergie utilisées

Jusqu'à l'an 2020 environ, les combustibles fossiles continueront d'occuper une place prédominante dans la consommation d'énergie. La consommation pétrolière sera surtout déterminée par les besoins pour les transports et par le fait que le pétrole continuera de jouer un rôle de combustible de «bouclage», c'est-à-dire qu'il servira à combler la brèche lorsque les autres formes d'énergie ne seront pas disponibles en quantités suffisantes. L'utilisation du gaz – là où il sera accessible – augmentera rapidement, car ce sera le combustible privilégié pour le chauffage, les procédés de transformation et la production d'électricité; quant à la consommation de charbon, elle croîtra aussi, mais plus lentement, dans les régions où le gaz sera inaccessible ou plus coûteux que le charbon. Les principales sources d'énergie non fossile (fission nucléaire, hydroélectricité, biomasse) verront probablement leurs parts diminuer dans le total des approvisionnements. L'utilisation de la biomasse en particulier, encore prédominante dans certains pays en développement, pourrait régresser parallèlement à l'abandon des formes d'énergie non commerciales au profit de combustibles commerciaux qui ira de pair avec la hausse des revenus réels dans ces pays. Les prix du pétrole et du gaz semblent devoir rester relativement stables jusqu'en 2010, pour augmenter ensuite de quelque 50 pour cent en termes réels à un moment donné entre 2010 et 2020, lorsque les nouveaux pétroles remplaceront le pétrole classique dans les approvisionnements supplémentaires. Cependant, les approvisionnements en pétrole classique étant de plus en plus concentrés au Moyen-Orient, et les réserves de gaz naturel prenant de l'ampleur en Russie, en Iran et dans certaines régions d'Asie centrale, il se pourrait bien que les probabilités de perturbation des prix à court terme et de chocs des prix pétroliers augmentent.

Dans le secteur de l'électricité, on peut s'attendre aussi à une prépondérance de l'utilisation de combustibles fossiles, du moins si l'on applique le critère du moindre coût dans la prévision des choix de nouvelles centrales électriques. L'énergie nucléaire, l'hydraulique et d'autres sources d'énergie renouvelables ne sont pas concurrentielles partout compte tenu de la structure actuellement prévue des prix, ou se heurtent à diverses difficultés pour obtenir l'acceptation du public, c'est pourquoi toute expansion importante les concernant devra obéir à des décisions délibérées des pouvoirs publics. En Europe, en Amérique du Nord, en Russie et dans les nouveaux États indépendants, il faudra résorber la puissance installée excédentaire par rapport à la demande de pointe. On prévoit que la

consommation de charbon demeurera importante en Amérique du Nord ainsi qu'en Chine et dans d'autres pays en développement. L'utilisation du gaz devrait s'accroître rapidement, notamment dans les pays producteurs, et en partie dans des centrales à cycle combiné. Enfin, le pétrole demeurera le combustible d'appoint dans les périodes de pointe de la demande, de perturbation des approvisionnements gaziers ou de hausse des prix du gaz. A tout prendre, à l'horizon 2020, le rythme d'évolution des parcs électriques devrait s'être légèrement amélioré grâce au renouvellement des biens d'équipement (qui progresse lentement, il faut le reconnaître). La puissance électrique installée aura augmenté de 3 500 GW (gigawatts), dont la moitié en Chine et dans les autres pays en développement, et un tiers dans la zone de l'OCDE.

2. Après 2020

A de nombreux égards, les années 2010/2020 pourraient marquer un tournant décisif dans la transformation des systèmes énergétiques. Les facteurs en jeu sont très divers. A l'horizon 2050, la population mondiale se sera accrue de plus de 2 milliards d'habitants, dont la majeure partie habitera dans des villes du monde en voie de développement. En outre, l'importance de la demande, de la production et des échanges des pays de l'OCDE faiblira de plus en plus sur la scène énergétique mondiale; en revanche, ils conserveront un grand rôle en tant que fournisseurs de technologies. Les préoccupations liées à la sécurité des approvisionnements énergétiques, dont se souciaient surtout les pays de l'OCDE jusqu'à présent, seront partagées par un plus grand nombre de pays.

Certes, il est peu probable que la répartition des sources d'énergie utilisées soit réellement bouleversée par rapport à la situation actuelle, mais les approvisionnements pétroliers et gaziers pourraient connaître de profonds changements et les politiques relatives au changement climatique risquent d'avoir de fortes répercussions. Un développement des échanges est fort possible, au fur et à mesure que les productions locales de pétrole et de gaz approcheront leur point culminant dans certaines régions du monde, notamment dans la plupart des pays producteurs de l'OCDE. De nouvelles technologies sont appelées à apparaître et de nouvelles infrastructures seront construites pour venir à l'appui de la production et faciliter les échanges, notamment dans le secteur gazier. Dans nombre de pays, les entreprises publiques du secteur de l'énergie seront probablement privatisées, ce qui intensifiera la concurrence sur les réseaux d'énergie. L'un des principaux moteurs de ces changements sera sans doute la réorientation de la demande, qui se détournera des matières premières (biomasse, pétrole) pour privilégier des services énergétiques plus pratiques.

Cette transformation du secteur de l'énergie à l'échelle mondiale pourrait bien s'accélérer au cours de la période 2020-2050. Une multitude de possibilités et de

contraintes façonneront les systèmes énergétiques qui feront leur apparition. Par exemple, de nombreux dispositifs d'utilisation finale (notamment l'automobile), procédés industriels, systèmes de chauffage, éléments constitutifs des infrastructures et des parcs immobiliers, commenceront à être remplacés en recourant à de nouvelles technologies, et nombre des centrales électriques existantes se trouveront à la fin de leur durée de vie utile. En 2050, toutes les technologies et tous les dispositifs énergétiques auront été remplacés au moins une fois, ce qui offre de très vastes possibilités d'orienter l'évolution de l'économie et de la société sur une trajectoire beaucoup plus économe en énergie. Néanmoins, il faut du temps pour produire et déployer des technologies – nouvelles et classiques – et la baisse des dépenses de R-D dans le domaine de l'énergie est actuellement préoccupante. De surcroît, en raison de l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à long terme, il sera essentiel d'investir dans des technologies et de prendre les mesures permettant d'atteindre des objectifs plus stricts en matière de protection de l'environnement. Par ailleurs, la production pétrolière aura probablement commencé à baisser, suivie de près par le gaz; même si les ressources en nouveaux pétroles et nouveaux gaz combleront le déficit pendant un certain temps, il faudra trouver à terme des énergies de substitution.

Quatre scénarios

Dans le chapitre dont il est l'auteur, Arnulf Grubler expose les quatre scénarios – intégrant les technologies, les ressources, les infrastructures et les institutions financières – élaborés par l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA) pour décrire des stratégies conduisant à la mise en place d'autres systèmes énergétiques à très long terme. Afin d'élargir le champ des possibilités, toutes les technologies opérationnelles de nos jours ont été intégrées dans l'analyse, indépendamment de leur viabilité commerciale potentielle. Les technologies qui ne sont pas encore opérationnelles, la fusion nucléaire par exemple, n'ont pas été retenues car, selon les prévisions, elles ne devraient pas jouer un rôle important dans le prochain demi-siècle.

Dans le scénario A, qui comporte deux variantes, la liberté des échanges, des conditions géopolitiques favorables et une restructuration économique rapide entretiennent la croissance économique mondiale, laquelle atteint en moyenne 2.7 pour cent par an entre 1990 et 2050. La croissance économique elle-même permet un renouvellement plus rapide des parcs d'équipement et facilite la mutation structurelle dans le secteur de l'énergie. Les gains d'efficacité sont faibles (1 pour cent par an). Le scénario A1 table sur une exploitation plus poussée des ressources pétrolières et gazières, classiques et non classiques, à la faveur de l'évolution technologique, ainsi que sur une transition vers une exploitation acceptable de l'énergie nucléaire et des énergies nouvelles et renouvelables à la fin de la période

considérée. Les émissions de carbone atteignent 12 Gt (gigatonnes) en 2050 et 15 Gt en 2100 (7 Gt en 1995). Dans le scénario A2, l'utilisation du pétrole classique, et tout particulièrement du gaz classique, est rationnellement gérée pour faciliter la transition vers l'ère d'après l'énergie fossile, où prédomineront le nucléaire et les énergies renouvelables (principalement la biomasse et l'énergie solaire). En conséquence, les émissions de carbone se stabilisent progressivement (9 Gt en 2050), puis diminuent (7 Gt en 2100).

Le scénario B est un scénario intermédiaire, caractérisé par une évolution progressive des technologies, par la libéralisation des échanges et par le décollage des pays du Sud. La croissance mondiale se situe en moyenne à 2.1 pour cent par an et l'efficacité énergétique ne s'améliore que de 0.8 pour cent par an. Le recours aux combustibles fossiles est important et durable, ce qui implique en particulier une stabilisation de la part du charbon dans les sources d'énergie primaire utilisées. L'augmentation des émissions de carbone, modérée dans un premier temps (10 Gt en 2050), s'accélère par la suite (14 Gt en 2100). Après 2020, il apparaît de graves tensions liées à l'épuisement des ressources en combustibles fossiles, à la charge financière de la mise en valeur des nouvelles sources d'énergie et aux conséquences de la détérioration considérable de l'environnement.

Enfin, dans le scénario C, la diffusion des technologies et les relations internationales sont mobilisées en faveur des objectifs écologiques et de la redistribution internationale. Le régime des échanges internationaux intègre les normes d'environnement et les objectifs du développement durable. Les taxes sur le carbone freinent quelque peu la croissance dans la zone de l'OCDE, mais elles sont recyclées (et favorisent donc la croissance) dans les pays en développement. Dans l'ensemble, le taux de croissance annuel du PIB représente en moyenne 2.2 pour cent entre 1990 et 2050. L'exploitation des sources d'énergie renouvelables à petite échelle contribue à ralentir le processus d'urbanisation. L'énergie nucléaire acquiert un nouvel élan grâce à l'entrée en scène d'une nouvelle génération de réacteurs plus sûrs. L'efficacité énergétique s'améliore de 1.4 pour cent par an et il se produit un découplage notable de la croissance économique et de la demande d'énergie. Les émissions de carbone diminuent pour s'établir à 6 Gt en 2050 et à 3 Gt en 2100.

Un aspect important de ces scénarios tient à la façon dont y sont traitées les incidences à long terme des politiques d'environnement sur la croissance. Traditionnellement, cette question est analysée à l'aide de modèles macroéconomiques qui ne tiennent pas compte des coûts des atteintes à l'environnement ni ne font ressortir clairement la dynamique de la croissance économique. Par conséquent, les politiques d'environnement visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre entraînent systématiquement, lorsque ces modèles sont appliqués, une perte de bien-être et un tassement de la croissance économique. Les scénarios à

long terme de l'IIASA, en revanche, décrivent un monde dans lequel sont mises en œuvre des politiques appropriées qui ne permettent pas uniquement de préserver l'environnement, mais favorisent aussi l'apparition de technologies plus propres et plus efficaces et qui, en fin de compte, confortent la croissance économique.

Caractéristiques communes aux quatre scénarios

Certaines caractéristiques des systèmes énergétiques futurs semblent communes à tous les scénarios considérés. Tout d'abord, il faut citer l'hypothèse selon laquelle aucune contrainte naturelle ne pèse sur les approvisionnements potentiels en énergie pendant le demi-siècle prochain, voire au-delà. En effet, si l'on tient compte des quantités potentiellement récupérables, les ressources de base en charbon, pétrole, gaz et uranium sont immenses. La quantité d'énergie solaire transmise à la Terre chaque année avoisine, à elle seule, 130 000 Gtep (gigatonnes d'équivalent pétrole), chiffre à mettre en regard de la consommation actuelle totale d'énergie, à savoir 9 Gtep. Les contraintes ne concernent pas les ressources potentielles en soi, mais plutôt la façon dont elles seront exploitées : elles sont surtout d'ordre technique, économique, environnemental et politique.

La deuxième caractéristique commune aux scénarios à l'étude concerne les approvisionnements en pétrole et en gaz qui, en dépit du fait que l'apogée de l'ère des combustibles fossiles sera probablement révolue, seront encore considérables jusqu'en 2050, puis diminueront plus ou moins rapidement après cette date. Dans tous les scénarios, les énergies renouvelables (y compris la biomasse) apparaissent comme étant la principale source d'énergie à plus long terme, bien qu'à des degrés très divers. L'avenir de la fission nucléaire, par contre, dépendra du perfectionnement de la technologie, de sa viabilité commerciale et de son acceptabilité par le public compte tenu des aspects relatifs à la sûreté et à la sécurité.

On constate également une convergence des structures générales de la consommation finale d'énergie dans les différents scénarios examinés. La rôle de l'électricité prend de l'ampleur dans tous les cas de figure, et on prévoit un accroissement de l'utilisation de l'hydrogène ainsi que du méthanol – mais, pour ce dernier, lorsqu'il sera devenu plus concurrentiel et que l'infrastructure correspondante sera construite. Sous la pression des consommateurs, qui réclameront des services énergétiques plus souples, plus commodes à utiliser et plus propres, on passera plus rapidement d'une utilisation des ressources sous leur forme d'origine (biomasse, charbon) vers des systèmes faisant intervenir la transformation et la distribution de l'énergie.

Cette inflexion décisive devrait entraîner des besoins d'investissement plus stables dans le secteur de l'approvisionnement énergétique (de l'ordre de 3-4 pour cent du produit mondial brut) et en forte hausse dans les activités liées à

l'utilisation finale. Il sera peut-être beaucoup plus difficile de mobiliser l'épargne pour financer les investissements du côté de l'approvisionnement qu'à l'époque où des entreprises énergétiques d'État bénéficiaient des flux considérables de crédits publics qui leur étaient principalement consacrés. Cela pourrait obliger, en particulier, à supprimer des obstacles institutionnels, à réformer les politiques des prix et à relever les taux de rentabilité des investissements. Ces investissements, s'ils atteignent un volume important, présentent toutefois un atout considérable : ils peuvent favoriser une amélioration de l'efficacité énergétique dépassant les tendances autonomes.

Incertitudes

Le panorama qui se dessine à long terme à la lumière de ces prévisions de l'AIE et de l'IASA comporte plusieurs incertitudes importantes, notamment liées à deux aspects primordiaux : la sécurité énergétique et les perspectives géopolitiques d'une part, les impacts sur l'environnement et les politiques environnementales de l'autre. Dans l'élaboration des prévisions de la demande, on risque de se heurter à de graves difficultés – par exemple pour déterminer les niveaux de saturation potentiels dans les pays de l'OCDE (s'agissant du chauffage et des appareils électroménagers, notamment), les profils d'évolution future de la mobilité (en particulier, les transports) dans les pays Membres et non membres de l'OCDE et l'amélioration de l'efficacité énergétique au-delà des réalisations passées. Enfin, les répercussions possibles des nouvelles technologies (dans le domaine de la production d'énergie et, plus généralement, dans les systèmes énergétiques) posent également des dilemmes importants.

Les principales hypothèses retenues dans les différents scénarios sont sujettes à d'autres incertitudes. Les premières questions qui se posent concernent la croissance de la productivité et, en définitive, la croissance économique à très long terme. En particulier, les avis sont partagés quant aux courbes probables de la croissance économique dans les pays non membres de l'OCDE dans les prochaines décennies. A la limite, il est permis de supposer que les pays en développement, même s'ils ne pourront pas se passer des industries de l'acier, de la construction mécanique, des produits chimiques et d'autres activités industrielles, ne reproduiront pas exactement le même parcours d'industrialisation que les pays de l'OCDE en raison du caractère évolutif des technologies de production et d'utilisation (et surtout de l'omniprésence de la micro-électronique). Certains modèles régionaux donnent toutefois à penser que quelques pays en développement pourraient faire un bond en avant et rattraper les pays développés beaucoup plus rapidement que prévu, en s'orientant vers des activités de services et d'industrie légère. Dans l'un ou l'autre cas, la baisse de l'intensité énergétique dans ces pays pourrait dépasser le rythme escompté dans les prévisions. Par ailleurs, en ce qui

concerne les économies en transition, l'ampleur, la durée et les conséquences de la restructuration industrielle sont très incertaines.

Une deuxième série d'incertitudes est liée à la démographie. On peut établir des estimations relativement fiables de l'évolution de la population sur une période de vingt ans. En outre, du seul fait que l'accroissement annuel de la population a atteint un sommet en 1990 et accuse maintenant un léger déclin, on peut faire des extrapolations beaucoup plus précises qu'auparavant. La population mondiale pourrait atteindre 8 ou 8.5 milliards d'habitants avant 2050. Néanmoins, la marge d'erreur qui peut croître progressivement au cours d'une période de cinquante ans est plus préoccupante.

Une troisième série d'incertitudes concerne les réserves pétrolières. Compte tenu des rendements en diminution de la prospection pétrolière et de la forte possibilité que les quantités estimées de pétrole finalement récupérable soient plus faibles qu'on ne le pense en général, certains experts affirment que la production pourrait commencer à régresser plus tôt que prévu – selon certaines estimations (réserves estimées finalement récupérables de 1 800 milliards de barils), dès 2007. Ce constat semble assez solidement étayé : même si les réserves récupérables de pétrole représentaient 2 600 milliards de barils, le point médian de la courbe d'épuisement ne serait repoussé que de 11 ans, jusqu'en 2018/19.

3. Le paysage géopolitique dans les prochaines décennies

Dans l'évaluation des tendances d'évolution future de la situation énergétique, l'une des tâches les plus ardues, de caractère très spéculatif, consiste à imaginer le contexte géopolitique dans lequel elles sont appelées à se dessiner. Néanmoins, une évaluation des réserves récupérables de combustibles fossiles classiques et de leur localisation géographique permet de dégager une bonne orientation d'analyse dans un premier temps.

Pétrole et gaz : une concentration régionale grandissante

L'une des principales conclusions à tirer des prévisions énergétiques à long terme est que les combustibles fossiles joueront encore un rôle prédominant pendant 30 ou 40 ans au moins. Les réserves finalement récupérables de pétrole classique se situent, selon les estimations, dans la fourchette de 2 à 3 000 milliards de barils, compte tenu des progrès technologiques dans les domaines de l'exploration et de l'exploitation. A partir des estimations des réserves régionales, on prévoit que la production mondiale de pétrole classique culminera à un moment donné entre 2010 et 2020. Selon l'AIE, l'écart grandissant entre l'offre et la demande devrait faire monter les prix de 17 dollars à 25 dollars par baril (dollars de 1990), et le déficit d'approvisionnement devrait être comblé par les nouveaux pétroles. Leur mise en valeur exige toutefois des investissements considérables et, comme on est

moins sûr des quantités disponibles que dans le cas du pétrole classique, il pourrait en découler des inadéquations temporaires entre l'offre et la demande mondiales.

Étant donné que les réserves de gaz naturel sont estimées à 1 900 milliards de barils d'équivalent pétrole, la production de ce combustible ne devrait normalement pas atteindre son maximum avant 2020. Cependant, l'évolution de son prix suivra probablement celle des prix pétroliers, car ces deux produits sont aisément interchangeables. Les régions Europe et Pacifique de l'OCDE devraient recourir de plus en plus aux importations : en provenance de Russie et d'Afrique du Nord par gazoducs à destination de l'Europe et sous forme de gaz naturel liquéfié à destination du Japon et de l'Asie. En Amérique du Nord, les prix du gaz pourraient augmenter à mesure que s'accroîtront les pressions exercées sur les réserves parce que les niveaux de production sont élevés. Comme dans le cas du pétrole, il faudra mobiliser des capitaux considérables pour mettre en place les installations de production de gaz et les infrastructures connexes.

L'extrapolation de la demande mondiale de pétrole et des approvisionnements ne provenant pas du Moyen-Orient met en évidence un décalage de plus en plus important, peu après l'an 2000, que devrait permettre de résorber une augmentation de la production dans le Golfe persique et la Péninsule arabique. Selon l'opinion courante, l'Asie du Sud-Est et le Japon, ainsi que l'Europe et les États-Unis dans une moindre mesure, feront appel de plus en plus aux approvisionnements pétroliers extraits dans cette région, du moins jusqu'au moment où les nouveaux pétroles seront mis sur le marché en grandes quantités. Une pareille concentration est préoccupante du point de vue de la sécurité des approvisionnements énergétiques. Certes, selon toute vraisemblance, l'OPEP optera pour une stratégie d'accroissement des volumes de production, à mesure que la demande augmentera et que d'autres producteurs seront évincés de la course, et de maintien des bas prix afin de ne pas encourager des réorientations de la demande ou l'entrée de nouveaux acteurs sur le marché. Les incertitudes politiques dans la région sont néanmoins devenues plus fortes que jamais : la stabilité politique de tous les grands pays producteurs de pétrole semble fragile; le processus de paix israélo-arabe est presque interrompu; le cas de l'Irak n'est pas encore résolu. Le gaz pose le même type de difficultés : il est appelé à devenir une composante essentielle des approvisionnements énergétiques après 2020 alors que les principaux gisements gaziers sont concentrés en Russie et en Iran.

Interdépendance croissante

Les gisements de gaz et de pétrole récemment découverts en Asie centrale, qui pourraient se révéler du même ordre de grandeur que ceux de la Mer du Nord, voire plus vastes, modifient assurément dans une certaine mesure la situation géo-

politique. Les craintes pour la sécurité des approvisionnements sont moindres, mais la question du risque reste posée. Cette découverte met également en lumière un autre aspect essentiel de l'avenir géopolitique, à savoir l'interdépendance grandissante des producteurs et des consommateurs, d'où la nécessité de resserrer la coopération entre les entreprises et les pays, de même qu'entre les secteurs public et privé. Tout d'abord, l'exploitation des ressources de la région ne fait que commencer, des investissements massifs seront nécessaires, et il faudra surtout compter sur des technologies et des capitaux étrangers. Pour pouvoir tirer pleinement parti du potentiel de la région, il faut, au préalable, que la conjoncture politique locale, le cadre juridique et le climat économique extrêmement incertains s'améliorent nettement. Au demeurant, quel que soit le choix des principaux débouchés pour le pétrole et le gaz de la région (l'Europe par gazoducs et oléoducs, en passant par l'Arménie et la Turquie, la Russie ou l'Iran; l'Asie par voie maritime ou en traversant l'Afghanistan, ainsi que l'Océan indien), les pays de la région devront instaurer une coopération à long terme.

Produits énergétiques : évolution des échanges et de l'investissement

A plus long terme, la donne géopolitique pourrait toutefois se voir profondément modifiée par les évolutions qualitatives de l'offre et de la demande d'énergie. Les scénarios énergétiques à long terme, fondés sur des dosages très divers des sources d'énergie primaire utilisées, révèlent une convergence remarquable des structures de l'utilisation finale dans tous les pays, induite par la préférence des consommateurs pour des formes d'énergie plus commodes à utiliser, plus souples et plus propres. En conséquence, dans tous les cas de figure, on prévoit que la part de l'énergie primaire sera réduite au profit de l'énergie secondaire dans la composition des échanges. Les pays exportateurs seront encouragés à accroître leurs recettes en transformant les sources d'énergie primaire en produits d'exportation à valeur ajoutée. Les échanges pourraient gagner en souplesse du fait que les combustibles secondaires peuvent souvent être produits à partir de différentes sources d'énergie primaire, et les préoccupations liées à la situation géopolitique seraient moindres.

Enfin, bien que les combustibles fossiles soient appelés à rester prédominants pendant quelques décennies encore, le développement des sources d'énergie de substitution, en particulier les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire, pourrait finalement remodeler le paysage. La répartition internationale des ressources en énergies renouvelables devrait être beaucoup plus équilibrée que celle des combustibles fossiles. La production pourrait être très décentralisée et les échanges régionaux se multiplier au détriment des échanges mondiaux. La fission nucléaire, en revanche, dont les perspectives seront peut-être limitées dans les pays de l'OCDE, pourrait bien connaître un développement rapide dans les

pays non membres de l'OCDE, notamment en Asie, ce qui allégerait sensiblement la dépendance de la Chine et d'autres pays de la région à l'égard des approvisionnements en combustibles fossiles provenant du Moyen-Orient. Dans le même temps, un essor des programmes nucléaires en Asie pourrait déclencher une relance plus générale de l'industrie nucléaire (production d'électricité, traitement des combustibles nucléaires, évacuation des déchets, etc.), avec des conséquences importantes pour les courants d'échanges et les flux d'investissement futurs dans le secteur nucléaire.

4. La dimension écologique

Le système énergétique mondial actuel, où prédominent les combustibles fossiles, est par essence l'une des causes de l'accroissement des concentrations atmosphériques de CO₂ et, partant, il accélère l'altération du système climatique de la planète. La consommation moyenne d'énergie par habitant varie d'un facteur supérieur à 20 entre les pays industrialisés et les pays en développement, et elle porte en elle le risque d'un quadruplement de la demande d'énergie dans les pays en développement, au fur et à mesure que l'industrialisation et l'urbanisation s'imposent et gagnent de la vitesse. La forte consommation d'énergie des pays industrialisés fait augmenter la consommation énergétique mondiale parce que ceux-ci propagent, dans le monde entier, les modes de vie et les technologies qui leur sont propres. Comme le signalent Dieter Imboden et Carlo Jaeger dans le chapitre dont ils sont les auteurs, des changements progressifs et marginaux, bien qu'ils aient leur importance, ne suffiront pas pour que le système énergétique devienne écologiquement viable dans les cinquante prochaines années, ce qui laisse prévoir que le système énergétique actuel ne saurait durer et qu'il est indispensable de découpler la consommation d'énergie de la croissance économique pour s'engager dans la transition vers un système durable.

Augmentation du risque et de la complexité

L'étendue de la pollution et les risques liés aux divers types de pollution – pollution atmosphérique classique et toxique, effet de serre, radioactivité des déchets nucléaires, accidents sur les sites de production (nucléaire, gaz, hydrocarbures), accidents pendant le transport (navires-citernes, pipelines), détérioration du paysage, etc. – doivent être rigoureusement évalués, pour éviter des effets multiplicateurs de risques que la primauté accordée à l'un d'eux peut provoquer. De surcroît, il faut parfois mettre en balance deux types de pollution. L'emploi de moteurs à injection directe, par exemple, pourrait très sensiblement réduire les émissions de CO₂ des voitures d'ici à 2010, mais au prix d'une augmentation des émissions de NO_x, la pollution locale se substituant ainsi, dans une certaine mesure, à la pollution mondiale.

De l'avis général, les technologies permettant de ramener la pollution locale à des niveaux acceptables sont à notre portée dans les décennies à venir, à condition de se préoccuper suffisamment des activités de recherche et de développement, et de veiller à la diffusion des technologies dans les domaines correspondants. Néanmoins, elles ne sont pas nécessairement adaptées pour s'attaquer aux problèmes que posent le changement climatique planétaire et les émissions de gaz à effet de serre.

Le défi du changement climatique

Le réchauffement de la planète sera peut-être le problème d'environnement le plus épineux à résoudre pour la communauté internationale dans les prochaines décennies. Ces dernières années, et en particulier depuis le sommet de Rio en 1992, nombre de pays ont pris de nouvelles initiatives pour faire face au changement climatique. A l'échelon international, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques entrée en vigueur en 1994 engage globalement les parties signataires à atteindre un objectif commun de stabilisation des concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre à un niveau permettant d'éviter une interférence anthropique dangereuse avec le système climatique. Aux termes de la Convention, les pays en développement et développés s'engagent à prendre en compte le changement climatique dans les cadres où s'inscrivent leurs politiques sociales, économiques et environnementales; à coopérer sur les aspects scientifiques, techniques et éducatifs, ainsi qu'à mettre en commun les informations. Les parties s'engagent également à promouvoir le transfert de technologies et une gestion durable des ressources. Selon le principe des «responsabilités communes mais différenciées», les pays développés s'engagent aussi, en vertu de la Convention, à prendre des mesures spécifiques pour réduire les émissions de gaz à effet de serre.

En décembre 1997, un accord s'est dégagé sur le Protocole de Kyoto, qui renforce les engagements des pays développés en matière d'atténuation. Le Protocole engage les pays développés à réduire leurs émissions globales de gaz à effet de serre d'au moins 5 pour cent dans les années 2008 à 2012, par rapport aux niveaux de 1990, et énonce des objectifs différenciés pour chaque pays. Les objectifs de réduction des émissions sont détaillés, ils couvrent six types de gaz à effet de serre et, partant, les activités de tout un éventail de sources et de puits socio-économiques (par exemple, approvisionnement et utilisation de l'énergie; industrie; agriculture; aménagement du territoire et foresterie; ainsi que déchets). Les activités qui consomment de l'énergie sont toutefois à l'origine de la majeure partie des émissions de gaz à effet de serre dans les pays développés et occuperont donc une place importante dans les stratégies nationales d'application. Le Protocole définit également un certain nombre de mécanismes du marché destinés

à permettre aux Parties de collaborer pour atteindre les objectifs de réduction au moindre coût : il s'agit notamment de l'application conjointe, de l'échange de droits d'émission et du mécanisme pour un développement « propre ». Ce dernier prévoit des transactions entre les pays développés et en développement concrétisées dans le cadre de projets en vue de favoriser un développement durable et de générer des compensations d'émissions pour les investisseurs des pays développés.

Les modalités précises de l'accord restent à décider et elles détermineront, dans l'ensemble, ses coûts et son efficacité. Les pays participants sont en désaccord sur un certain nombre de questions importantes, notamment le calendrier et les règles d'application des mécanismes du marché, ainsi que l'équilibre entre l'investissement dans les mesures d'atténuation par le biais de mécanismes internationaux du marché et les actions nationales. Malgré ces difficultés, le Protocole de Kyoto est perçu, en général, comme un changement radical dans la gestion internationale des problèmes de l'environnement mondial. De l'avis général, il est nécessaire de continuer à renforcer la coopération internationale pour faire face à la menace du changement climatique.

Dans une perspective à long terme, la nécessité de limiter les concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre à un certain niveau – environ 450 ou 550 ppm d'équivalent CO₂ – pour éviter un changement trop grave du climat amène à fixer un plafond pour les émissions cumulées pendant la période visée, objectif qui implique une baisse radicale des émissions de gaz à effet de serre et une rupture de tendance par rapport à l'évolution économique et énergétique actuelle. Il se pose de ce fait le problème de trouver un profil temporel optimal, de nouveaux modes de coopération internationale et des incitations novatrices offertes par les pouvoirs publics pour atteindre ces objectifs avec un bon rapport coût-efficacité. Il serait essentiel de s'orienter vers des systèmes énergétiques se passant des énergies fossiles et d'encourager les consommateurs et les producteurs à prendre en compte les problèmes d'environnement dans leurs décisions courantes. Les politiques des pouvoirs publics auront un rôle important à jouer pour s'assurer que les producteurs et les consommateurs reçoivent du marché des signaux clairs et soient incités à amorcer la transition vers un avenir à faibles émissions de gaz à effet de serre.

Concilier la lutte contre les émissions et la croissance économique – réalité ou fiction?

L'une des principales difficultés de la politique relative au climat tiendra aux coûts, réels ou perçus, de la réduction de la pollution. Bien entendu, au départ, il faudrait s'y attaquer par des mesures dites « sans regrets », qui procurent des avantages pour l'environnement à un coût économique très faible ou nul, et qui peuvent

même, en fait, se révéler profitables au plan économique. L'éventail de ces mesures irait, par exemple, de l'élimination des subventions qui font augmenter les émissions de gaz à effet de serre à l'étiquetage écologique et à une meilleure information des consommateurs sur l'utilisation de l'énergie dans les entreprises et les organisations. Il est toutefois difficile, du point de vue politique, d'édicter certaines de ces mesures (notamment, la suppression des subventions), sans compter que les progrès qui en découleront seront probablement insuffisants pour maîtriser les émissions mondiales. Dans la mesure où les externalités environnementales ne sont guère prises en compte dans les mesures touchant à la croissance économique, on considère généralement que les politiques de plus vaste portée – fondées sur des instruments économiques tels que les taxes sur le carbone ou les permis négociables, ou sur la réglementation – entraîneront des coûts toujours plus importants. Dans cette optique, par conséquent, il faut trouver un compromis entre la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la croissance économique (ou, pour le moins – du point de vue des entreprises ou des gouvernements nationaux –, la compétitivité).

Néanmoins, plusieurs arguments relativisent et peuvent même réfuter le bien-fondé d'un pareil compromis, si les politiques relatives au climat accompagnent une évolution vers des modes de consommation et de production durables à la faveur du progrès technique. Premièrement, le réchauffement de la planète risque lui-même d'entraîner, à terme, un coût économique qui serait moindre si les émissions étaient enrayerées. Deuxièmement, l'innovation et les percées technologiques peuvent créer de nouveaux débouchés pour les entreprises, notamment en améliorant l'efficacité énergétique. Étayé par une éducation et une formation appropriées, le progrès technique est susceptible de créer plus d'emplois et/ou d'accroître la productivité, d'où une meilleure efficacité des économies. Troisièmement, le processus de changement pourrait générer des rendements de plus en plus importants, notamment liés à l'apprentissage par la pratique, qui feront baisser les coûts au-delà d'un certain point.

A tout prendre, alors qu'un changement progressif semble se heurter rapidement à l'obstacle des coûts, une mutation à grande échelle pourrait bien permettre de concilier la réduction des gaz à effet de serre et la croissance économique.

5. Évolutions futures de la consommation d'énergie et des technologies d'utilisation finale

Parmi les trois principales utilisations analysées qui entrent dans la demande d'énergie primaire, à savoir l'électricité, les transports et les applications fixes, les deux premières ont fait état, par le passé, d'une tendance à la hausse dans les pays de l'OCDE, allant généralement de pair avec l'évolution du PIB. La part des applications fixes dans le PIB, en revanche, a diminué parce que la demande s'est tour-

née vers l'électricité, que des gains notables d'efficacité ont été réalisés et que les activités de services ont généralement pris le pas sur les activités industrielles au sein des économies. Un autre facteur à l'origine de cette évolution est le recul rapide de l'utilisation de la biomasse (comme combustible non commercial, avant les deux chocs pétroliers). Ce phénomène a accompagné la fin du processus de remplacement progressif de la biomasse par la chaleur commercialisée dans les applications correspondantes, qui reste à accomplir dans la plupart des pays en développement. Dans les prévisions de la demande d'énergie tablant sur la poursuite des tendances observées, celles-ci persistent généralement pendant les prochaines décennies dans les pays de l'OCDE, tandis que la consommation d'énergie par habitant des pays en développement s'aligne peu à peu sur celle des pays développés. Cependant, à terme, toute une série de facteurs, allant des évolutions sociodémographiques et des nouvelles technologies d'utilisation finale à la mondialisation de l'activité économique et à l'émergence de la société de l'information, devraient exercer une influence importante sur les besoins en énergie.

Les incidences du vieillissement de la population et de la hausse des revenus

L'une des évolutions démographiques fondamentales des prochaines décennies, commune à tous les pays de l'OCDE, ainsi qu'à certains grands pays en développement, est le vieillissement de la population, dont les effets sur la consommation d'énergie seront toutefois probablement mitigés. Les chiffres de la population se stabiliseront progressivement, mais le nombre de ménages devrait croître assez rapidement, en raison de la réduction de leur taille. Les ménages composés d'une seule personne devraient représenter 36 pour cent du total dans l'Union européenne en 2010, contre 30 pour cent en 1990. Le vieillissement de la population pourrait se traduire aussi par un allongement du temps passé à domicile, une élévation des températures dans les bâtiments et une utilisation accrue des ascenseurs et autres dispositifs électriques, d'où une augmentation de la consommation de chaleur et d'électricité (se substituant partiellement, toutefois, à celle des transports).

Des incertitudes pèsent également sur la relation entre le revenu et la consommation d'énergie. En particulier, on estime généralement que la demande de transport représente une part à évolution lente, aussi bien dans les revenus que dans le temps. Si l'on retient encore cette hypothèse pour les décennies à venir, les volumes du trafic croîtraient sensiblement, parallèlement aux revenus, tandis que les temps de transport demeureraient constants. D'un point de vue purement mécanique, cela aboutirait à un vif essor de l'utilisation des transports rapides qui, dans la mesure où il s'agit de transport aérien, risque d'aggraver considérablement les problèmes actuels d'encombrements et de détérioration de l'environnement. En revanche, la richesse accrue pourrait bien rendre les populations plus exigeantes en matière de qualité de l'environnement, avec tout ce que cela implique pour

les structures de la consommation et les technologies nouvelles, respectueuses de l'environnement.

Les perspectives des technologies d'utilisation finale très perfectionnées

La consommation d'énergie dans les pays de l'OCDE au cours des décennies à venir pourrait bien se caractériser essentiellement par l'abandon des énergies primaires au profit de formes d'énergie moins polluantes et autorisant une plus grande souplesse d'utilisation, conjugué à une tendance à différencier davantage les services énergétiques. Comme le soulignent Martin Bekkeheien *et al.* dans le chapitre dont ils sont les auteurs, il est très possible que les nouvelles habitudes de comportement des consommateurs, favorisées notamment par des changements de la réglementation, soient un moteur de cette évolution, en déclenchant ou renforçant des améliorations notables du rendement des technologies d'utilisation finale dans les transports et les produits utilisés par les ménages, dans les applications industrielles, ainsi que dans les bâtiments à usage résidentiel et commercial. Dans nombre de ces secteurs, des technologies nouvelles, souvent porteuses d'innovations radicales, sont d'ores et déjà disponibles : les moteurs hybrides fonctionnant à l'essence et à l'électricité, les moteurs à injection directe et les piles à combustible pour les automobiles ; les supercondensateurs utilisés dans les appareils ménagers ; les moteurs électriques à meilleur rendement, les technologies de traitement des matériaux et les procédés de fabrication ; les fenêtres de haute technologie, la superisolation, l'éclairage à meilleur rendement et les systèmes avancés de chauffage et de climatisation dans les bâtiments. Leur développement est toutefois entravé, en général, par des coûts excessifs ou par l'absence d'infrastructures adéquates. Nonobstant, dans 50 ans, leur part de marché pourrait être assez considérable dans les utilisations finales de l'énergie.

Parmi les nouvelles technologies riches de promesses, on peut citer en exemple les piles à combustible, qui produisent de l'électricité à partir d'hydrogène. L'hydrogène utilisé comme combustible peut être obtenu par différents moyens, notamment le reformage du charbon, des produits pétroliers ou du gaz naturel. Le carbone extrait dans le procédé de reformage pourrait même, selon certains, être réinjecté dans les anciens gisements de gaz afin d'y augmenter les taux de récupération. Dans une pile à combustible, l'électrolyse de l'hydrogène s'effectue dans le générateur, qui pourrait être remplacé, à terme, par des procédés de conversion directe de l'énergie solaire. Le principal produit secondaire rejeté par la pile à combustible est de l'eau pure. Selon les partisans de cette technologie, les piles à combustible utilisées dans des voitures affichent d'ores et déjà un rendement plus élevé et des coûts d'entretien plus faibles que les moteurs à combustion interne.

Hormis l'absence d'une infrastructure adéquate, le développement des piles à combustible est essentiellement freiné par leur coût initial, dix fois plus élevé au

moins que celui des moteurs à combustion interne. Cependant, ses partisans considèrent aussi que les piles à combustible seront bientôt applicables dans les bâtiments, parce que l'eau chaude qu'elles rejettent (à une température avoisinant 77 °C/170 °F) peut être mise à profit pour fournir des services de chauffage et de climatisation permettant presque d'amortir le coût de l'apport en gaz naturel, de sorte que l'approvisionnement en électricité devient très concurrentiel. Étant donné que cette application dans les bâtiments réclamerait une utilisation (et donc une production) généralisée de petites unités de conversion, les coûts unitaires pourraient baisser du fait de la production accrue, et les piles à combustible deviendraient alors plus abordables pour leur application dans les transports. En outre, compte tenu de leur durée de vie utile prolongée et des faibles besoins d'entretien qu'elles impliquent, il serait peut-être rentable de fournir au réseau de l'électricité produite dans les voitures pendant qu'elles sont en stationnement. Aux États-Unis, par exemple, si toutes les voitures étaient équipées de piles à combustible, l'électricité qu'elles pourraient fournir représente cinq fois la capacité de production totale du réseau national. Qui plus est, chaque propriétaire de voiture pourrait, en vendant cette électricité, réduire de moitié les coûts annuels de financement et d'amortissement de son véhicule. Cet exemple met en lumière comment des actions coordonnées de différents acteurs dans ces secteurs novateurs, notamment les utilisateurs finals, les entreprises d'électricité, les entreprises industrielles et les décideurs, sont susceptibles de provoquer un «saut technologique» beaucoup plus efficace qu'une série de changements progressifs.

La nouvelle société de l'information et les tendances de l'urbanisation

Parallèlement à l'influence de ces facteurs spécifiques, les effets de la mondialisation et du passage de la société postindustrielle à la société de l'information se feront sentir sur la demande d'énergie. Il est à noter surtout que les changements socio-économiques prévus sont d'une telle profondeur qu'ils transformeront finalement l'organisation du travail et des loisirs, les schémas de la mobilité et les tendances de l'urbanisation.

Par suite de la mondialisation et de la nouvelle répartition internationale du travail, certaines activités de l'industrie et des services continueront à se déplacer des pays de l'OCDE – et aussi des nouveaux pays industriels – vers des pays en développement où les coûts salariaux sont bas. Dans certains pays en développement, des constellations industrielles en expansion rapide engendreront de grands centres urbains. Le nombre d'agglomérations de plus de 5 millions d'habitants dans les pays non membres de l'OCDE pourrait être proche de 50 en 2010, contre 23 en 1990. Or, ces évolutions sont de nature à accélérer le développement des infrastructures de transport et des entreprises de services publics, et risquent fort d'intensifier au-delà des prévisions la consommation d'énergie et les problèmes d'environnement. Néanmoins, il est possible également que la généralisation

du développement pousse les pays en développement à abandonner l'industrie lourde plus rapidement que ne le laissent supposer les hypothèses habituelles pour privilégier les industries plus légères et les services, ce qui se solderait par une baisse de la consommation d'énergie.

Dans les pays de l'OCDE, les technologies de l'information et des communications joueront un rôle essentiel dans l'implantation géographique des activités économiques. Le développement des télécommunications semble exercer des influences diverses, et même contradictoires, sur la concentration géographique et, partant, sur les besoins de transport. Des forces centripètes seront probablement associées aux économies d'échelle et au regroupement des activités, dans la mesure où les technologies modernes de l'information autorisent une gestion plus souple et plus efficace des grandes entités économiques. Ces forces seront peut-être confortées par des tendances sociales plus générales, par exemple l'adoption de modes de vie reposant sur la préférence pour l'activité ininterrompue des grandes villes. Certains auteurs ont souligné également que les nouvelles technologies concourent au dynamisme des pôles économiques urbains, et à leurs avantages compétitifs vis-à-vis des zones rurales. Par contre, la baisse des coûts des communications engendre des forces centrifuges qui encouragent les entreprises à décentraliser en partie leurs activités vers des zones moins surpeuplées, où les terrains et la main-d'œuvre sont meilleur marché.

Il pourrait en découler une « déconcentration sélective » due au regroupement dans les centres urbains de l'avenir de services essentiels pour lesquels des contacts personnels demeurent primordiaux (sièges des grandes entreprises, établissements financiers, cabinets d'experts-conseils, etc.) et au redéploiement d'autres activités dans les zones suburbaines et les villes de province. Dans cette optique, la métropole pourrait se composer, de plus en plus, de multiples centres d'emplois (agglomérations polycentriques), reliés les uns aux autres par une configuration complexe de circulation des personnes et de l'information. La structure des transports deviendrait alors plus compliquée et plus diversifiée. Dans l'ensemble, toutefois, les conséquences de ce phénomène pour la consommation d'énergie restent très floues.

6. Évolutions futures des technologies dans le secteur de l'approvisionnement

L'une des principales conclusions à tirer des prévisions et des scénarios à long terme est que le progrès technologique dans le secteur de l'énergie doit permettre de relever le défi consistant à atteindre un développement durable en réduisant au minimum les coûts de la transition. Il faudra probablement, à cet effet, mettre en œuvre tout un éventail de technologies dans le secteur de l'approvisionnement énergétique. A court terme, on pourrait sensiblement faire progresser la maîtrise de la demande et les rendements aux stades de la production et de la distribution,

et accélérer la substitution interénergétique en remplaçant le charbon et le pétrole par du gaz. A plus long terme, cependant, de nouvelles technologies seront nécessaires. D'après les prévisions, il faudra peut-être mettre en œuvre de technologies à haut rendement et à émissions de carbone faibles ou nulles après 2010/2020 si l'on veut réduire les émissions de gaz à effet de serre sans que les coûts soient excessifs.

Le dosage des formes d'énergie utilisées en 2050

Dans la mesure où les combustibles fossiles prédomineront encore jusqu'en 2050, pour que le panachage futur des sources d'énergie utilisées soit durable, il sera essentiel de compter sur des technologies d'utilisation des énergies fossiles avancées et plus performantes. Le charbon pourrait devenir beaucoup plus rentable et acceptable du point de vue de la protection de l'environnement s'il était gazéifié et transformé en combustible liquide. Des avancées seront indispensables dans les domaines de l'exploration, du forage et de la production pour mettre en valeur les ressources de base en pétrole et en gaz naturel. L'exploitation des réserves de gaz naturel situées dans des régions éloignées pourrait être facilitée en perfectionnant les technologies de transport et de conversion chimique du gaz, et la sécurité d'approvisionnement s'en trouverait renforcée. Des percées techniques s'imposent également pour pouvoir exploiter les ressources considérables que représentent les nouveaux pétroles, mais là encore, il faudra trouver un compromis en raison des incidences de ces nouvelles formes d'énergie sur les concentrations de gaz à effet de serre.

L'énergie nucléaire pourrait être une composante importante d'une palette énergétique durable à condition de devenir plus acceptable aux yeux des populations, notamment grâce au développement de réacteurs avancés plus rentables et plus sûrs, à l'amélioration des systèmes de gestion des déchets nucléaires et à un choix consensuel des sites pour l'évacuation des déchets. Les parts des sources d'énergie renouvelables dans la consommation d'énergie primaire devraient progressivement augmenter dans tous les scénarios à long terme, à mesure que des modes d'exploitation novateurs de haute qualité – la panoplie allant de l'électricité au méthanol liquide – remplaceront ceux qui étaient utilisés de longue date. A cette fin, il faudra améliorer la compétitivité au plan des coûts de certaines des technologies actuelles (énergie éolienne et biomasse, par exemple) et la faisabilité technique de certaines autres (énergie solaire, notamment). Néanmoins, un renchérissement substantiel des combustibles fossiles pourrait modifier ce panorama. Enfin, plusieurs procédés techniques possibles, y compris la rétention et l'évacuation du carbone, sont encore à l'étude.

Dans les décennies à venir, dans la zone de l'OCDE et ailleurs, le secteur de la production d'électricité devrait également se trouver confronté à des difficultés

considérables, liées aux investissements massifs nécessaires, à la hausse des prix des combustibles et à l'attention grandissante accordée aux incidences sur l'environnement. Pour les surmonter, il faudra améliorer le rendement des centrales électriques, rendre les unités plus modulaires, normaliser la construction des nouvelles centrales, mettre à niveau les anciennes, diversifier les sources d'énergie et assouplir l'utilisation des combustibles, ainsi que mieux lutter contre la pollution.

Une approche systémique pour répondre aux besoins énergétiques à long terme

Étant donné les défis à relever, on peut soutenir avec force l'adoption d'une approche systémique à l'égard de l'énergie. Comme le suggère Chihiro Watanabe dans sa contribution au présent ouvrage, on peut poursuivre l'objectif d'une production et d'une consommation durables en choisissant l'option systémique qui conduit à associer de façon optimale l'amélioration de l'efficacité, la substitution interénergétique et le piégeage du carbone. Ce choix implique le recours à un ensemble de technologies, que l'on peut faire progresser en appliquant une série de mesures : éliminer les distorsions des prix; faire en sorte que le contexte national soit favorable et permette notamment de répondre comme il convient aux exigences de la sécurité énergétique et de la protection de l'environnement, d'améliorer la compétitivité économique et de disposer de ressources financières; multiplier les effets de l'apprentissage et accroître les économies d'échelle; favoriser la R-D et l'investissement qui, compte tenu des longs délais nécessaires pour qu'une technologie naissante devienne opérationnelle, doivent être lancés dès maintenant; renforcer les réseaux d'information entre entreprises et la coopération internationale en vue d'accélérer la diffusion des technologies compte tenu de l'interdépendance mondiale de plus en plus grande dans le domaine énergétique.

Les approches systémiques supposent également que les pouvoirs publics adoptent une stratégie cohérente, notamment dans les domaines des infrastructures et de la gestion des réseaux. Par exemple, un facteur important qui freine le développement des nouvelles technologies est l'absence d'infrastructures adéquates, notamment dans le cas des piles à combustible. Pour tirer pleinement profit du rendement et de la durabilité de cette technique, il faudrait construire une infrastructure de distribution de l'hydrogène, ce qui peut prendre de nombreuses années et réclamer des investissements considérables. Il serait plus efficace peut-être d'adapter les infrastructures existantes aux besoins des voitures à piles à combustible (par le reformage des combustibles fossiles hors du véhicule, c'est-à-dire dans les centres de ravitaillement) ou bien d'adapter les voitures aux infrastructures existantes (reformage des combustibles fossiles à bord du véhicule). L'industrie automobile a plusieurs projets à l'étude qui privilégient cette dernière formule afin de pouvoir utiliser les infrastructures en place. Par ailleurs, le choix technique des piles à combustible appelle une centralisation des activités de

reformatage des combustibles fossiles et de production de l'hydrogène, qui permettrait de le destiner à d'autres applications et de réaliser des économies d'échelle.

Privilégier la maîtrise de la demande

Enfin, dans le cadre d'une approche systémique, la politique de gestion pourrait progressivement accorder moins d'importance au secteur de l'approvisionnement pour privilégier la maîtrise de la demande. Les politiques énergétiques traditionnelles tendaient à construire des capacités et des infrastructures en amont pour les aligner sur les prévisions de croissance de la demande. L'expansion des installations de production et distribution a elle-même induit, probablement, une demande supplémentaire. Face aux coûts financiers et écologiques élevés de l'accroissement de la capacité d'approvisionnement à la marge, l'action des pouvoirs publics visera sans doute, de plus en plus, à influencer les structures de la demande. L'utilisation rationnelle de l'énergie pourrait être encouragée par des incitations fiscales et le soutien à des projets privés. La solution au problème des encombrements pourrait passer par une meilleure coordination entre la politique d'urbanisme, la mise à disposition de transports publics et la réglementation des transports privés, en tenant compte des besoins de plus en plus variés en matière de mobilité. Les entreprises de services publics, dont la privatisation progresse graduellement, risquent aussi de se montrer plus réticentes à mettre en œuvre des capacités onéreuses, et les politiques publiques de tarification pourraient avoir pour objectif la vérité des prix, en internalisant les coûts sociaux et environnementaux. En résumé, les entreprises de services publics pourraient évoluer dans le sens d'une plus grande flexibilité dans la gestion des réseaux, en différenciant leurs services entre les zones (et périodes) de desserte « chaudes » appelant une modération de la demande et les autres, où cette dernière pourrait être encouragée.

On a d'ores et déjà de bonnes raisons de penser que l'on s'oriente sur cette voie, puisque le consommateur final est de plus en plus souvent placé au point de départ du processus décisionnel. Les formules décentralisées se propagent à mesure que les systèmes fondés sur les technologies de l'information permettent de mieux transmettre des signaux clairs des prix aux utilisateurs finals.

7. Options stratégiques qui s'offrent aux décideurs des gouvernements de l'industrie

Le fil conducteur reliant nombre des questions essentielles est la redéfinition nécessaire des rôles respectivement dévolus aux marchés et aux pouvoirs publics compte tenu de l'évolution rapide des conditions dans lesquelles ils sont appelés à entrer en synergie dans les décennies à venir. En effet, il semble que le contexte

politique, économique, social et environnemental pourrait être très différent du présent au cours du demi-siècle prochain. Il sera sans doute caractérisé par de nouvelles structures de la production et de la consommation et par des systèmes d'information et de communication différents, découlant en grande partie de la mondialisation rapide et continue; par une redistribution des pouvoirs et l'apparition de nouveaux acteurs sur la scène économique mondiale – non seulement des pays, mais aussi des acteurs non gouvernementaux tels qu'entreprises multinationales, ONG, milieux scientifiques, etc. –; et par un trait de plus en plus frappant de la conduite des affaires mondiales, à savoir le décalage qui se creuse sans cesse davantage entre des problèmes qui se posent à l'échelle planétaire et des décisions des pouvoirs publics de portée nationale ou locale.

Les grands thèmes et questions touchant à l'action des pouvoirs publics peuvent s'articuler autour de cinq faisceaux de considérations.

Un premier faisceau se dégage des répercussions à long terme de la diminution des réserves de pétrole et de gaz classiques et de la concentration croissante des ressources pétrolières et gazières dans des régions névralgiques du monde. L'avis qui prédomine, chez les experts en énergie, semble être qu'il n'y aura sans doute pas de problème majeur concernant la disponibilité des ressources dans les décennies à venir, encore que l'on ne puisse pas exclure des aléas difficiles de la conjoncture géopolitique. Deux arguments, en particulier, ont pesé en faveur de l'idée selon laquelle les flux circuleront relativement sans entraves. D'une part, l'histoire a prouvé le bien-fondé du maintien des filières d'approvisionnement même en périodes de tension politique et, d'autre part, les sources non classiques pourront combler rapidement les déficits d'approvisionnement en ressources classiques dus à des perturbations à moyen terme, mais à des prix peut-être plus élevés. Il n'en demeure pas moins que les gouvernements auront un rôle important à jouer sur la scène internationale en vue de faciliter la libre circulation des produits énergétiques. Deux aspects de l'action au moins pourraient avoir de l'importance pour l'avenir à cet égard : la création de réseaux infrastructurels d'approvisionnement énergétique (gaz, électricité, etc.) à l'échelle continentale et un élan important de libéralisation établissant un marché mondial de l'énergie dans lequel celle-ci pourrait faire l'objet d'échanges sans entraves dans le monde entier, ce qui diversifierait les sources d'approvisionnement et élargirait le cercle des acteurs ayant intérêt à ce que les approvisionnements énergétiques soient ininterrompus.

Une deuxième catégorie d'options stratégiques est axée sur le fonctionnement des marchés et les questions qui s'y rattachent eu égard aux subventions, aux externalités négatives et à des compromis difficiles à trouver. Il s'agit, en particulier, de savoir comment résoudre le dilemme qui se pose entre, d'une part, les vertus de la clarté des signaux du marché découlant des variations sans entraves des prix dans le secteur de l'énergie et, de l'autre, les risques associés à la tendance des

industriels à privilégier des orientations à court terme. (Parmi ces derniers, on peut citer en exemple le risque d'un sous-investissement structurel dans la R-D énergétique à long terme, ou celui d'une instabilité injustifiée des prix des combustibles fossiles classiques sur le marché, génératrice de coûts excessifs pour l'économie dans son ensemble.)

Dans une optique plus générale, on peut se demander comment supprimer les subventions qui faussent le jeu de la concurrence et comment consolider le rôle des signaux des prix pour modeler des structures plus efficaces de consommation d'électricité et de gaz, combattre la congestion et réduire la pollution locale de l'environnement, entre autres. Certes, les gouvernements ont d'ores et déjà entrepris des efforts considérables, en recourant à des négociations et à la réglementation, ou par d'autres moyens, en vue d'internaliser les externalités dans la formation des prix, mais il reste encore beaucoup d'initiatives possibles à prendre dans ce sens. On en trouve un exemple dans l'idée selon laquelle les pouvoirs publics devraient donner les orientations, les conseils et les incitations afin que les consommateurs utilisent plus rationnellement l'énergie, en fixant des objectifs à long terme de hausse des prix de l'énergie, par exemple à l'aide de taxes sur le carbone (qui soient sans incidences sur les revenus).

Bien que les prix et les forces du marché aient, de toute évidence, un rôle central à jouer, on peut cerner pour l'avenir des responsabilités importantes des pouvoirs publics dans des domaines tels que la définition des règles du jeu, le recours à la réglementation pour encourager et contrôler le fonctionnement des marchés concurrentiels, l'infléchissement des tendances dans l'économie et la société et le maintien de l'élan acquis des activités de R-D dans des domaines que le secteur privé ne prend pas en charge – ou pas suffisamment. Les fonctions de la puissance publique dans certains secteurs de la production d'énergie, en particulier celui de l'énergie nucléaire, prêtent davantage à controverse. Les partisans d'un rôle actif soutiennent que les longs délais de mise en œuvre et la durée de vie prolongée des centrales nucléaires, les économies d'échelle qui les caractérisent, la sévérité des réglementations nécessaires sur la sûreté et l'incidence de la déréglementation économique font pencher la balance contre le nucléaire; de ce fait, la poursuite de l'intervention du secteur public dans la construction et l'exploitation des centrales demeure essentielle.

Un troisième ensemble de questions de fond a trait au rôle des infrastructures au sens le plus large. Même en retenant un horizon temporel de 50 ans, la lenteur des transformations du parc d'équipements, des transports et des villes tend à «verrouiller» dans la société des modes particuliers de déplacements, de travail, de loisirs et de vie en général qui sont difficiles à changer, et met un frein à l'élan acquis pour la transition vers un paradigme «énergie-environnement» différent. On s'attache donc fréquemment à étudier les possibilités qui s'offrent aux déci-

deurs et aux entreprises d'orienter sur la bonne voie, au stade le plus précoce possible, les projets d'infrastructures. Dans le domaine de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire, par exemple, il est essentiel de s'interroger sur les mécanismes à concevoir pour que des politiques appropriées soient en place avant que les pays en développement ne se trouvent trop engagés dans le processus d'urbanisation pour pouvoir concrètement infléchir la trajectoire du développement urbain. Dans les pays de l'OCDE, en revanche, les questions clés concernent plutôt les moyens permettant de rendre les villes plus adaptables aux nouvelles technologies et aux besoins énergétiques en évolution, ainsi que la possibilité de parvenir à un développement plus centré et plus dense où la demande de déplacements en voiture serait moindre. Parallèlement, dans le secteur des transports, des arguments toujours plus solides montrent qu'il conviendrait de laisser une plus large place aux mécanismes du marché, de réduire les distorsions des prix et d'accroître la transparence des politiques. Le rôle des prix dans la construction des infrastructures est crucial à cet égard, étant donné qu'une tarification appropriée dans ce domaine pourrait déterminer correctement les incitations et les mesures de dissuasion permettant d'orienter les consommateurs vers un comportement plus économe en énergie.

Le quatrième ensemble de questions stratégiques concerne les technologies de l'énergie. Certes, on ne trouve pas dans la technologie toutes les réponses aux graves problèmes du secteur de l'énergie, mais les technologies actuelles et nouvelles joueront toutefois un rôle décisif et ces questions s'inscrivent dans plusieurs dimensions.

La longue période récente de bas prix du pétrole a placé sous les projecteurs les activités de R-D. Il est généralement admis que, dans de nombreuses régions de la zone de l'OCDE, les crédits alloués à la recherche et au développement dans le domaine des technologies de l'énergie sont en baisse. Il est toutefois difficile d'affirmer avec certitude si cela tient à une stagnation structurelle des activités de R-D, ou si la réduction des dépenses est contrebalancée, en partie du moins, par des gains qualitatifs. Dans de nombreux pays de l'OCDE, on en fait actuellement beaucoup plus qu'auparavant, et de manière plus efficace et efficiente. Compte tenu de ces incertitudes, et aussi du fait que les pays de l'OCDE sont appelés à jouer un rôle important en tant que fournisseurs et promoteurs de technologies énergétiques et respectueuses de l'environnement auprès des pays en développement, que peuvent et doivent faire les pouvoirs publics pour promouvoir la R-D à long terme ?

D'autres questions se posent quant à la phase de la commercialisation. Les trois principales solutions technologiques envisageables pour l'avenir – les énergies renouvelables, le nucléaire, le piégeage du CO₂ – ne sont généralement pas concurrentielles de nos jours. Elles se heurtent également à des contraintes très

spécifiques, par exemple la nature intermittente des énergies solaire et éolienne, l'acceptation de l'énergie nucléaire par le public, et la méconnaissance de certains paramètres technologiques dans divers domaines, depuis la gazéification du charbon jusqu'à l'évacuation du CO₂. Généralement parlant, il en va de même pour certaines autres technologies nouvelles, par exemple les piles à combustible, les supercondensateurs pour le stockage de l'électricité, la supraconductivité et les systèmes de bioconversion de l'énergie. A la lumière de ce qui précède, comment les pouvoirs publics peuvent-ils harmoniser les règles du jeu afin de permettre un traitement équitable de ces options? D'une manière plus générale, il est encore permis de se demander s'il est raisonnable de miser sur les « gagnantes ». Les tendances passées mettent en évidence un fort parti pris, en ce sens que seules les technologies ayant fait la preuve de courbes d'apprentissage satisfaisantes, d'économies d'échelle et de baisse des coûts ont trouvé leur place sur le marché ou ont été jugées prometteuses. Il reste encore à savoir comment évaluer les technologies futures et les risques qu'elles comportent, et à qui il appartient d'assumer le risque – capitaux publics, capitaux privés ou une combinaison des deux.

Au stade de la diffusion des technologies, le débat s'articule autour de la validité et de la viabilité des stratégies d'action spécifiques. Le problème consiste à déterminer quel est l'équilibre à trouver entre des instruments économiques qui font augmenter les coûts pour réduire la consommation, des instruments contraignants telles les normes obligatoires et une panoplie de mesures de responsabilisation du consommateur final et de subventions, de nature à permettre l'essaimage de technologies nouvelles ou perfectionnées, par exemple la micro-cogénération (production combinée de chaleur et d'électricité), les pompes à chaleur ou les piles à combustible.

La cinquième série de questions qui se posent aux décideurs des gouvernements et de l'industrie touche à l'énergie et à l'environnement mondial. On constate des divergences de vues très marquées des experts sur la question de savoir si les pays industrialisés respecteront ou non les obligations qu'ils ont contractées en vertu du Protocole de Kyoto et si l'on pourra ou non introduire des engagements plus stricts et juridiquement contraignants à une date ultérieure. Certains ont la conviction que les obligations de Kyoto seront respectées et qu'elles constitueront les assises sur lesquelles se fonderont de nouveaux accords, tandis que d'autres en doutent vraiment, la raison, et non des moindres, étant la difficulté à mettre en place un système viable d'échanges de droits d'émission. Les avis sont aussi très partagés sur la possibilité que ces échanges se développent à grande échelle, ou qu'ils restent très limités. La plus grande source de polémique tient peut-être à la contribution de l'énergie nucléaire pour respecter des normes d'environnement plus strictes. A cet égard, dans les débats, les points de désaccord ne portent pas sur une mais sur plusieurs questions – la compétitivité ou non des futures centrales nucléaires normalisées construites en série; le problème per-

sistant de l'acceptation par le public, en particulier vu les risques liés au fonctionnement des centrales, à l'évacuation des déchets nucléaires et à la prolifération nucléaire; ainsi que les moyens de parvenir à une plus grande transparence et à une définition plus claire des responsabilités afin de modifier les perceptions du public.

Enfin, la coopération est apparue naturellement et à de nombreuses reprises comme un thème essentiel tout au long des débats sur l'avenir à long terme de l'énergie. Le déterminant fondamental est que l'on prend de plus en plus conscience du fait que de nombreux acteurs nouveaux commenceront à intervenir sur la scène internationale et à l'échelon national. La propagation des principes démocratiques, la décentralisation grandissante et l'individualisme accru sont autant de facteurs qui semblent annoncer un plus grand pouvoir de l'individu et une réduction de celui de la puissance publique; la recherche d'un consensus entre toutes les parties prenantes (usagers, consommateurs, ONG, milieux scientifiques, etc.) sur les mesures d'incitation et de dissuasion, et une réglementation moins autocratique; une plus large consultation des consommateurs, des résidents et d'autres parties concernées par les pouvoirs publics et les entreprises; ainsi que des processus décisionnels moins axés sur des particularismes. A l'échelon international, en raison de l'apparition de nouveaux acteurs, de la redistribution des pouvoirs et, en particulier, des fortes chances de voir les pays en développement jouer un rôle toujours plus important dans le secteur de l'énergie, il devient impératif de forger des liens de coopération inédits et plus puissants entre les pays Membres et non membres de l'OCDE pour aborder toutes les questions relatives à l'énergie et à l'environnement.

Perspectives énergétiques à l'horizon 2020 : questions et incertitudes

par

Jean-Marie Bourdairé

Directeur, Coopération à long terme et analyse des politiques
Agence internationale de l'énergie

1. Introduction

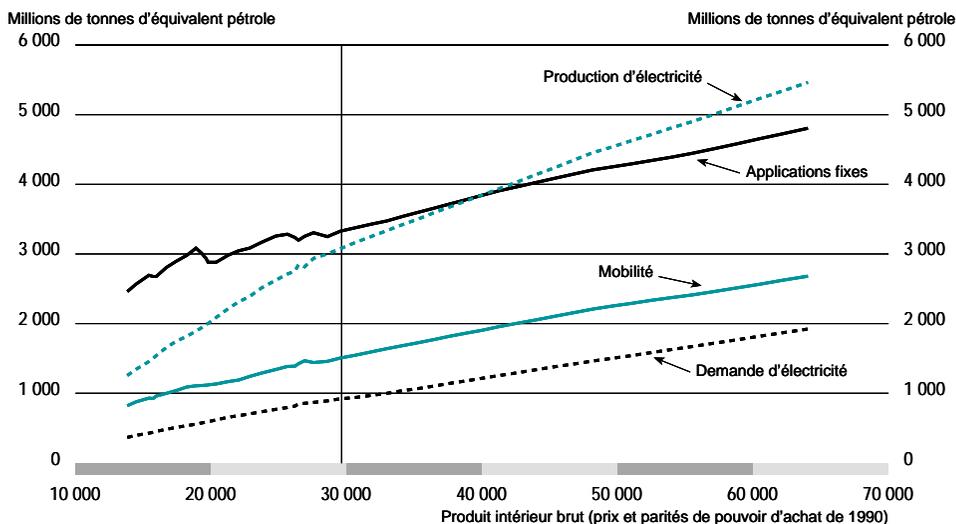
Pour fournir un cadre d'analyse quantitative des évolutions de la situation énergétique dans le monde d'ici à l'an 2020, le présent chapitre présente des prévisions correspondant à un scénario de maintien du *statu quo**. Selon les hypothèses de départ, les politiques en vigueur avant la Conférence de Kyoto ainsi que les relations observées par le passé entre la consommation énergétique, les prix de l'énergie et les revenus demeurent les mêmes qu'avant novembre 1997.

Si les politiques énergétiques actuelles restent en place, les chiffres effectifs de la consommation, des approvisionnements et des prix énergétiques devraient se situer à l'intérieur d'une fourchette d'incertitude avoisinant les prévisions qui tablent sur un *statu quo*. Les principales incertitudes concernent : *i*) les stimulants économiques et technologiques de la demande d'énergie ; *ii*) les technologies utilisées pour l'approvisionnement ; et *iii*) les ressources en combustibles fossiles.

Dans la pratique, bien entendu, les gouvernements adopteront des politiques visant délibérément à empêcher la poursuite de l'évolution actuelle, notamment de nouvelles stratégies destinées à tenir les engagements pris à Kyoto en vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre à des échéances comprises entre 2008 et 2012. En fait, l'avenir de l'énergie à l'échelle mondiale sera sans doute différent de ce que laissent présager les projections fondées sur le maintien du *statu quo*. Ces dernières peuvent toutefois présenter un intérêt comme base de discussion.

* Se reporter à la publication de l'AIE intitulée *World Energy Outlook to 2020*, 1998, pour un exposé plus complet de ces prévisions.

Figure 1. Les services liés à l'énergie dans le monde, 1971-2020



Source : Auteur.

Pour l'essentiel, le scénario de politiques inchangées reporte sur l'avenir les tendances passées de la consommation et des approvisionnements énergétiques dans l'hypothèse où les évolutions de la technologie et des comportements se poursuivraient sans inflexion. Une analyse détaillée de la demande d'énergie a été effectuée pour onze régions du monde ; la zone de l'OCDE se compose des régions Europe, Amérique du Nord et Pacifique. Les économies en transition et la Chine sont traitées à part. Les autres régions examinées sont l'Asie de l'Est, l'Asie du Sud, l'Amérique latine et le Moyen-Orient. Les effets sur la demande des variations de l'activité économique sont analysés pour chaque région et pour chacune des principales formes d'énergie. Les données sur les prix des combustibles sont prises en compte lorsqu'elles sont disponibles. Enfin, les tendances régionales ont été comparées aux tendances à l'échelon mondial afin de vérifier leur cohérence.

2. Tendances de la demande

Certaines tendances de la demande d'énergie sont demeurées notablement stables. On a recensé trois services liés à l'énergie :

- l'utilisation de l'électricité et les formes d'énergie utilisées pour la produire ;
- l'utilisation de combustibles fossiles dans les transports – mobilité ;

- l'utilisation de combustibles fossiles pour le chauffage des locaux et la chauffe dans les procédés industriels (services fixes).

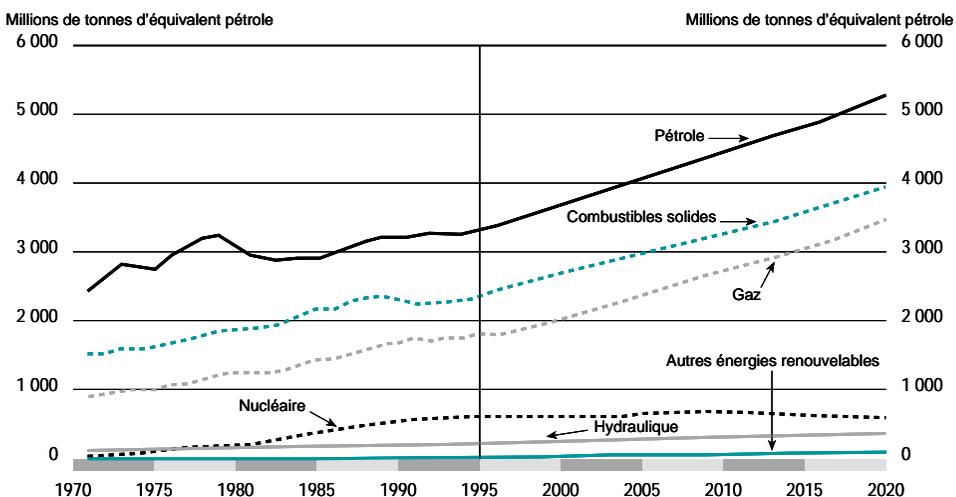
La consommation d'énergie pour assurer ces trois services a suivi de près l'évolution de l'activité économique – produit intérieur brut – depuis la date pour laquelle on dispose des premières données (1960 pour les pays de l'AIE, 1971 pour les économies en transition et les pays en développement) jusqu'à ce jour. L'analyse de la demande d'énergie donne à penser que ces tendances persisteront probablement *si* les politiques énergétiques, l'activité économique et les prix de l'énergie continuent à s'orienter plus ou moins dans le même sens que par le passé.

Cette constatation soulève une première question importante – celle de savoir si les politiques entraîneront une amélioration de l'efficacité énergétique plus grande que celle que l'on a connu depuis le dernier choc pétrolier et, dans l'affirmative, de quelle ampleur. Par le passé, les pressions à la baisse qui se sont exercées sur la consommation d'énergie ont découlé d'un mouvement continu de progrès technologique qui a accru l'efficacité énergétique, phénomène néanmoins contrebalancé, en partie, par une pression à la hausse due à l'augmentation des revenus et au changement des préférences des consommateurs. Ces deux vecteurs donnent lieu à des tendances linéaires persistantes. A l'avenir, de nouvelles politiques fondamentales seront probablement nécessaires pour modifier la nature de ces rapports.

Il y a cependant lieu de signaler une exception de taille – les inefficacités qui se produisent dès lors que des distorsions apparaissent sur les marchés ou que ceux-ci n'existent même pas. Des réformes de la réglementation élargissant les marchés concurrentiels ou la pratique de transactions commerciales effectuées dans des conditions normales de concurrence à ces domaines d'activités non marchandes (en supprimant les subventions à l'origine des distorsions des prix ou en instaurant une gestion rationnelle de l'énergie dans les bâtiments publics, par exemple) mettraient un terme à ces inefficacités et orienteraient les tendances futures sur une nouvelle voie. Les potentialités à exploiter pourraient se révéler considérables – non moins de 20 à 30 pour cent des utilisations finales prévues d'ici à 2020, selon le deuxième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat –, mais il ne faudrait pas passer sous silence les obstacles politiques à surmonter.

On ne s'attend pas à une percée notable des sources d'énergie non fossiles sur le marché parce que, pour l'heure, elle n'ont pas atteint la viabilité économique (notamment l'éolien ou le solaire) ou ne sont pas acceptées par le public. La demande continuera d'être couverte principalement par des combustibles fossiles. Selon les prévisions, la demande totale mondiale d'énergie devrait croître de quelque 66 pour cent et les émissions de CO₂ liées à l'énergie de 69 pour cent environ entre 1995 et 2020, à moins que de nouvelles politiques ne soient mises en

Figure 2. **Approvisionnement mondiaux en énergie primaire, par source, 1971-2020**



Source : Auteur.

place pour freiner la croissance de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre.

Le pétrole reste le combustible prédominant, le gaz devance le charbon vers 2020, le nucléaire demeure stable et les énergies renouvelables progressent, sans toutefois dépasser une échelle réduite. D'ici à 2020, les décisions de construire des centrales nucléaires seront prises sur des bases politiques surtout, et non économiques. Dans les considérations économiques concernant la plupart des énergies renouvelables, les questions liées à la spécificité des sites et des aspects politiques occuperont une place prééminente.

La répartition géographique de la demande d'énergie devrait se modifier, la zone de l'OCDE passant au second plan par rapport aux pays en développement : selon les prévisions, entre 1995 et 2020, 68 pour cent de l'accroissement de la demande seraient imputables à ces pays et à la Chine.

3. Le couplage avec la croissance économique

Ainsi qu'il a été signalé plus haut, la croissance économique est l'un des principaux stimulants de la consommation d'énergie : son accélération ferait augmenter les projections correspondantes, son ralentissement les abaisserait.

Une prévision de continuité a été retenue pour le monde dans son ensemble, c'est-à-dire un taux de croissance économique très proche de celui des vingt-cinq dernières années – soit une hausse du PIB de 3.1 pour cent par an en termes réels (aux prix et aux parités de pouvoir d'achat de 1990).

En se fondant sur les études des taux de croissance économique à long terme préparées pour le rapport de l'OCDE *Le monde en 2020 – Vers une nouvelle ère mondiale*, publié en 1997, on peut conclure que ces taux dépendront principalement des facteurs suivants :

- la croissance future de la population active et ses qualifications;
- les investissements futurs et le taux de croissance du parc d'équipement; et
- les améliorations de la productivité globale induites par la concurrence – d'où l'importance de la poursuite des réformes réglementaires, de la mise en place de marchés concurrentiels et de la prise de décisions commerciales dans des conditions normales de concurrence chaque fois qu'il en existe la possibilité.

D'après les hypothèses retenues, les pays en développement continueront d'afficher une croissance plus rapide que le monde développé. On considère néanmoins que toutes les régions connaîtront des taux de croissance économique plus faibles que par le passé. Dans les pays de l'OCDE, c'est en raison de la baisse des taux de natalité et du vieillissement de la population, tandis que dans les pays en développement, ce phénomène tient au ralentissement tendanciel de la croissance économique allant de pair avec la hausse des niveaux de vie. Cependant, le taux de croissance économique mondial ne varie pas car, d'une part, les pays en expansion plus rapide voient leurs parts augmenter dans le PIB mondial et, de l'autre, la croissance reprend progressivement dans les économies en transition.

Dans les quelques prochaines années, on s'attend à une croissance plus lente dans certains pays d'Asie, du fait de la crise financière actuelle. Bien que, jusqu'à présent, rien ne permette d'affirmer de manière concluante que cette crise influera sur les perspectives d'expansion économique à long terme, la mise en œuvre des changements réglementaires nécessaires prendra sans doute plusieurs années. Il en découlera des incertitudes tant que durera la transition vers le nouveau mode de gestion. C'est aussi pour cette raison que des taux de croissance économique plus bas ont été retenus pour certains pays de la région Asie-Pacifique.

Le taux de croissance économique futur est particulièrement incertain en ce qui concerne la Chine et les économies en transition.

Dans le cas de la Chine, on pense que les taux de croissance du PIB sont surestimés depuis 1978. Ce sont principalement l'estimation de la valeur ajoutée des différents secteurs (services, agriculture et industrie) et le choix des prix à utiliser pour la calculer qui posent des problèmes. Jusqu'à une période récente, nombre

des prix en Chine étaient administrés et constants au fil du temps. C'est ainsi que les réductions des coûts, des marges et des prix réels obtenues dans les secteurs en plein essor par suite des économies d'échelle ne se sont pas traduites par des baisses corrélatives de valeur ajoutée et d'apport au PIB.

Pour les économies en transition, on est d'avis que les estimations actuelles du PIB sont en deçà des résultats véritables de l'activité économique. Les données officielles sur le PIB portent à croire que l'efficacité énergétique a brutalement diminué depuis 1989, mais cette régression serait contrebalancée, en partie, par le développement d'une économie parallèle, qui pourrait représenter actuellement quelque 40 pour cent du PIB officiel. Il est difficile également d'anticiper le rythme futur des réformes économiques et leurs incidences sur la croissance économique et la demande d'énergie. Étant donné l'impossibilité de les estimer à partir de données historiques, des appréciations optimistes sur ces aspects se sont forgées au cours de l'élaboration de ces prévisions.

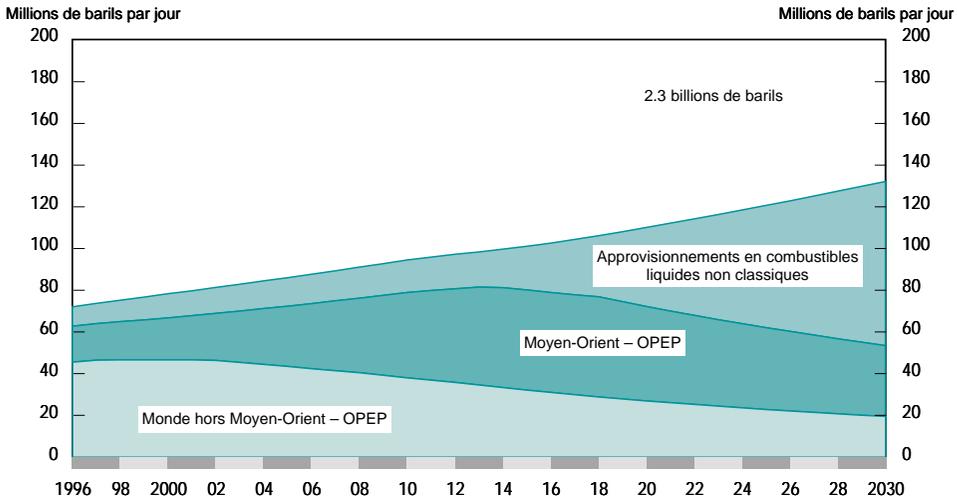
4. Conséquences pour les approvisionnements énergétiques et les prix de l'énergie

La figure 3 montre que la demande mondiale de combustibles liquides – ligne en trait plein – augmente d'environ 1.8 pour cent par an d'ici à 2020. Cette ligne a été prolongée au même taux de croissance jusqu'en 2030 afin d'analyser les conséquences de cette tendance pour les approvisionnements pétroliers sur une période plus longue.

On ne connaît pas avec certitude le volume des réserves récupérables de pétrole brut classique dans le monde entier. L'étude de 1993 intitulée «United States Geological Survey» indique une fourchette comprise entre 2.1 et 2.8 billions de barils. L'analyse de l'AIE avance une fourchette estimative encore plus large, à savoir de 2 à 3 billions de barils. Deux incertitudes majeures entachent ces estimations. La première est liée à la répartition statistique des réserves non encore découvertes, la seconde au facteur de croissance (dans quelle mesure les premières évaluations des réserves, ou celles effectuées ultérieurement, sont-elles sous-estimées?) et à l'effet d'entraînement technologique (jusqu'à quel point le taux moyen de récupération augmentera-t-il d'ici à 2050?).

D'après l'évolution observée dans les régions renfermant du pétrole qui ont atteint leur plein développement, la production pétrolière progresse jusqu'à un sommet puis décline. Aux États-Unis, exception faite de l'Alaska et des productions de mer profonde (supérieures à 300 m de fond) du Golfe du Mexique, ce point culminant a été atteint lorsque la moitié environ des ressources ultimes récupérables avait été extraite. La même méthode de calcul, appliquée à l'échelon régional, laisse supposer que ce maximum de la production de pétrole classique interviendra entre 2010 et 2020. La localisation temporelle dépend : i) des hypothèses

Figure 3. Approvisionnements pétroliers mondiaux, 1996-2030



Source : Auteur.

retenues concernant le volume des réserves pétrolières; ii) des effets du progrès technologique; et iii) des prix futurs du pétrole.

La figure 3 repose sur une hypothèse de 2.3 billions de barils de ressources ultimes récupérables en pétrole classique – valeur la plus probable mentionnée dans l'étude «United States Geological Survey», qui est jugée ici également comme étant la plus vraisemblable.

Les approvisionnements pétroliers provenant de pays producteurs autres que ceux de l'OPEP du Moyen-Orient devraient diminuer après l'an 2000, tandis que ceux de ces derniers devraient culminer vers 2015. Étant donné que la totalité des approvisionnements en pétrole classique ne suffiront pas pour répondre à la demande avant ces échéances, on s'attend à disposer d'approvisionnements supplémentaires en combustibles liquides grâce à la mise en valeur de nouvelles sources – essentiellement, les huiles lourdes et les sables asphaltiques.

Au cours de cette période, on ne prévoit aucune pénurie à long terme de combustibles liquides. Cependant, il pourrait apparaître une certaine instabilité des approvisionnements pendant le passage à l'utilisation des nouvelles sources, notamment si les préoccupations liées au changement climatique entraînent un

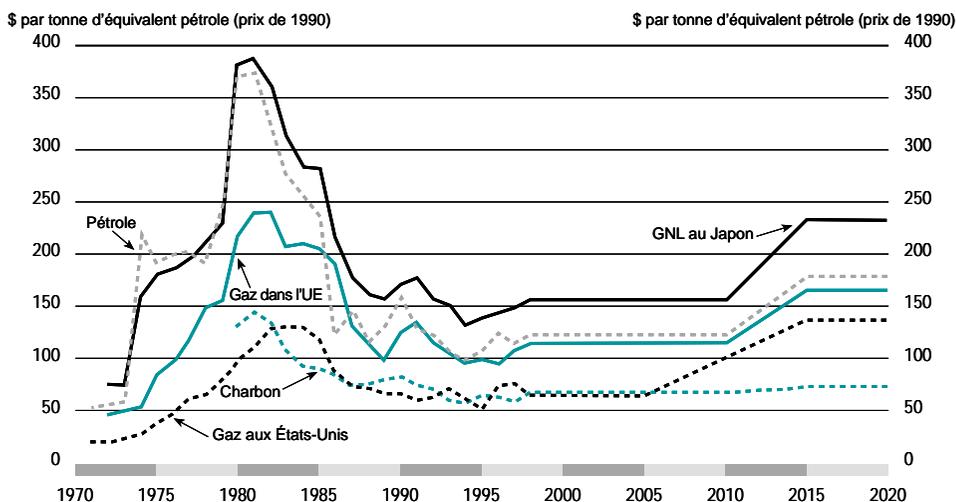
renchérissement du pétrole. Tous les pays devront se préparer à l'éventualité de perturbations des approvisionnements pétroliers au cours de cette période.

L'échelonnement de ces événements dans le temps n'est pas la seule incertitude en cause; on peut aussi s'interroger sur leurs incidences sur les prix des combustibles fossiles. Il est indiqué que les prix mondiaux du pétrole augmenteront de quelque 40 pour cent – pour passer de 17 dollars à 25 dollars par baril aux prix de 1990. En réalité, cette hausse pourrait toutefois se révéler plus forte ou plus faible – évolution, elle aussi, incertaine.

Selon toute vraisemblance, les prix du gaz naturel subiront une influence analogue, parce que le gaz est en concurrence directe avec les produits pétroliers et que les possibilités de pénurie s'accroîtront sur certains marchés régionaux, par exemple en Amérique du Nord, avant la fin de cette période. Les prix du charbon dans le commerce mondial ont également fait l'objet d'un léger ajustement à la hausse, compte tenu des coûts élevés de transport, surtout liés au fioul lourd, qui entrent dans le prix du charbon.

Les prix des combustibles fossiles ne devraient pas, selon les estimations, augmenter constamment en termes réels dans le temps – les «technologies de

Figure 4. Prix des combustibles fossiles en cas de maintien du statu quo



rechange à long terme» y mettront un frein, éventuellement grâce aux approvisionnements en nouveaux pétroles, et/ou à des technologies de maîtrise de la demande de transport des particuliers.

La production mondiale de gaz naturel sera limitée, à terme, par les contraintes des réserves, mais on ne prévoit pas d'en arriver là avant 2020. Les régions Europe et Pacifique de l'OCDE sont d'ores et déjà importatrices de gaz naturel, et ces importations sont appelées à croître. Si les prix du gaz restent faibles en Amérique du Nord comme c'est le cas à l'heure actuelle, la production de la région Amérique du Nord et celle du Mexique, prises ensemble, pourraient plafonner entre 2010 et 2020. D'éventuels déficits d'approvisionnement sur le marché nord-américain du gaz, qui est très concurrentiel, entraîneraient des hausses des prix de ce combustible. Par contre-coup, la demande fléchirait et il en résulterait des incitations à exploiter de nouvelles sources :

- mise en valeur de nouveaux gaz (offshore profond, méthane présent dans les couches de houille ou gaz de réservoirs étanches);
- gazéification du charbon; ou
- importations de gaz naturel liquéfié (GNL).

On a tablé sur l'hypothèse selon laquelle les pays d'Asie à faible revenu importeront peu de GNL avant 2020 en raison de son prix élevé. Dans le reste de la région Asie hors OCDE, certains pays sont exportateurs et d'autres importateurs. Dans l'ensemble, on ne pense pas que la région devienne importatrice nette de gaz de grande envergure. D'ici à 2020, la majeure partie des échanges de gaz devraient s'effectuer à destination des régions Europe et Pacifique de l'OCDE, en provenance surtout de la Russie et du Moyen-Orient, et, dans une moindre mesure, d'Afrique et d'Amérique latine.

Dans une situation où les marchés sont très concurrentiels, l'augmentation progressive de la demande de gaz naturel et de pétrole ménage de grandes possibilités et lance un défi réel aux pays qui en possèdent :

- Les possibilités sont celles de conquérir des marchés à l'exportation et d'obtenir des revenus en devises pour étayer la croissance économique.
- Le défi consiste à instaurer un climat d'investissement avec un minimum de risques qui favorisera l'apport de capitaux pour financer des projets, de technologies et de cadres expérimentés.

5. L'environnement

L'utilisation croissante de combustibles fossiles mettra l'environnement à rude épreuve. Il faudra déployer des efforts considérables à l'échelon local et régional pour réduire les émissions de particules et de gaz acides. Les technologies et les politiques pour lutter contre ce type d'émissions existent déjà et sont

appliquées dans nombre de pays. En général, elles vont sans doute faire augmenter les coûts et limiter la consommation future de combustibles fossiles. De même, le problème mondial du changement climatique risque d'avoir des répercussions importantes sur l'offre et la demande d'énergie, éloignant la tendance probable des prévisions fondées sur une poursuite de l'évolution actuelle.

D'après nos projections, à moins que de nouvelles politiques vigoureuses ne soient adoptées en faveur des technologies respectueuses du climat afin de réduire les émissions de CO₂, les pays de l'OCDE ne rempliront pas les engagements pris à Kyoto dans la période comprise entre 2008 et 2012. Pour pouvoir les respecter, ces pays doivent, directement ou en recourant au mécanisme de flexibilité, réaliser des réductions équivalant à près de 30 pour cent du niveau qu'auraient atteint leurs émissions de CO₂ dans les prévisions fondées sur le maintien du *statu quo*.

Si l'on tient pour acquises les hypothèses concernant la croissance économique et les gains d'efficacité énergétique, les économies en transition respecteront probablement leurs engagements, à peu de choses près. Elles doivent moderniser leurs industries; pour ce faire, elles deviendront plus efficaces et se tourneront vers des combustibles à moins forte intensité de carbone. Il y a toutefois lieu de se demander à quel rythme elles franchiront ces étapes et quel niveau risquent d'atteindre les émissions aux échéances comprises entre 2008 et 2012.

Les augmentations des émissions de CO₂ en Chine et dans d'autres pays en développement sont importantes entre 1995 et 2020 – près des trois quarts de l'accroissement total dans le monde. Néanmoins, l'expansion rapide de leur parc d'équipement leur ouvre des possibilités de coopération avec les pays de l'AIE.

Les gouvernements n'ont pas encore choisi les politiques qu'ils envisagent d'adopter pour remplir leurs engagements de Kyoto, ni décidé quel sera le degré de coopération internationale possible. Les effets des différentes politiques et leurs interactions n'ont pas été complètement étudiés non plus. C'est pourquoi on ne peut pas encore modifier les prévisions tablant sur la poursuite de l'évolution actuelle pour faire ressortir comment seront respectés les engagements de Kyoto.

En revanche, il est possible d'étudier l'ordre de grandeur économique des mesures que devraient prendre les consommateurs d'énergie dans les pays de l'AIE pour remplir les engagements de Kyoto, indépendamment d'une éventuelle coopération avec les économies en transition ou les pays en développement où il s'offre des solutions possibles moins coûteuses.

On pourrait choisir de conjuguer des économies d'énergie obligatoires de 1.25 pour cent par an dans les utilisations finales et le remplacement du charbon par le nucléaire ou les énergies renouvelables dans la production d'électricité. Par exemple, les pays de l'AIE pourraient concrétiser la moitié de la réduction de 30 pour cent des émissions de CO₂ qui s'impose pour tenir les engagements pris à

Kyoto en parvenant à diminuer de 1.25 pour cent de plus par an la consommation par unité de PIB dans la période 1998-2000.

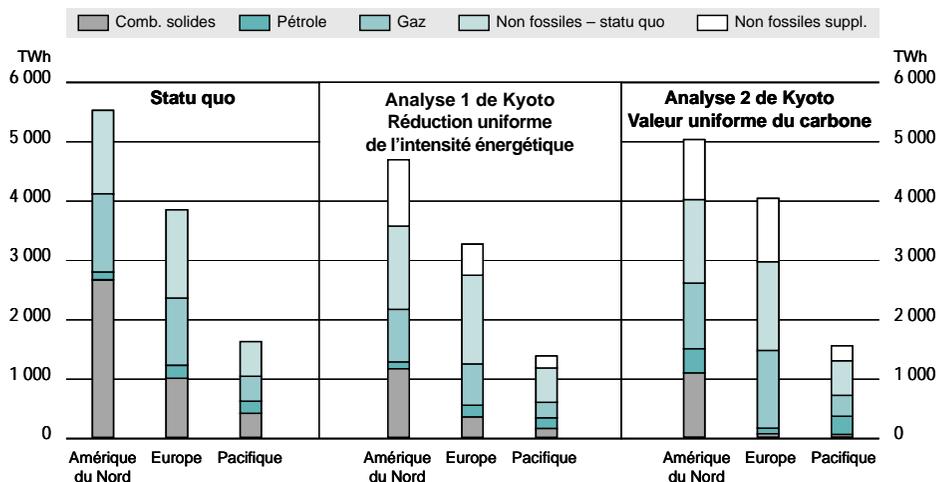
Sur la base des tendances dérivées des élasticités observées au cours des cinquante dernières années, il est possible d'obtenir la même réduction en ajoutant aux prix des combustibles fossiles une valeur du carbone qui augmenterait régulièrement, entre 1998 et 2003, pour passer de zéro à 250 dollars par tonne de carbone. Elle ramènerait les prix du pétrole au niveau qu'ils avaient atteint au plus fort de la crise pétrolière de 1979. Cette valeur attribuée au carbone est élevée pour deux raisons. Tout d'abord, parce que la période d'une dizaine d'années pendant laquelle on s'efforcera de réduire les émissions de CO₂ est courte : elle ne permet pas un renouvellement important du parc d'équipement ou l'adoption de technologies plus performantes; qui plus est, elle ne laisse pas assez de temps pour développer des technologies nouvelles ni pour réduire les coûts grâce au processus d'apprentissage. Ensuite, parce que cette analyse ne prévoit pas une flexibilité qui encouragerait l'adoption de mesures moins onéreuses de réduction des émissions de CO₂ dans les pays en développement ou les économies en transition.

L'une ou l'autre de ces stratégies, à savoir une amélioration supplémentaire de 1.25 pour cent de l'efficacité énergétique ou une valeur du carbone de 250 \$/t, ne permettrait de réaliser que la moitié de la réduction nécessaire des émissions. L'autre moitié des 30 pour cent de réduction globale dans les pays de l'AIE serait obtenue, dans cet exemple présenté à titre indicatif, en remplaçant environ la moitié du charbon consommé pour la production d'électricité par des énergies non fossiles. C'est aussi une éventualité qui s'écarte radicalement de la tendance de maintien du *statu quo*, fondée sur les hypothèses suivantes : la plupart des nouvelles centrales seront alimentées au gaz naturel s'il est disponible, et au charbon là où le gaz est rare et les importations gazières coûteuses, comme en Chine et en Inde; le pétrole continuera d'être utilisé comme combustible d'appoint pour répondre aux pointes de la demande, ou bien dans des régions isolées, car il est facile à transporter et à stocker; et seuls les pays qui mettent actuellement en œuvre des programmes nucléaires construiront des centrales nucléaires à l'avenir.

La figure 5 compare la consommation d'énergie pour la production d'électricité du scénario de maintien du *statu quo* aux résultats des analyses de Kyoto. Le déclassement anticipé d'un grand nombre de centrales à charbon serait nécessaire pour remplacer la moitié de la production d'électricité à partir de charbon dans les pays de l'OCDE par de l'électricité produite au moyen de technologies utilisant des énergies non fossiles, en vue de remplir les engagements de Kyoto à l'horizon 2020.

Cette analyse de Kyoto n'est présentée qu'à titre indicatif. Elle fait toutefois ressortir que les nouvelles politiques à adopter pour respecter les engagements de Kyoto impliqueront des changements radicaux des comportements, qui restent à déterminer.

Figure 5. Comparaison des combustibles utilisés pour la production d'électricité selon le scénario de maintien du statu quo et dans les analyses de Kyoto



Source : Auteur.

Pour respecter les engagements de Kyoto, les pays développés doivent adopter de nouvelles politiques et mesures afin de freiner la croissance de la demande d'énergie et d'abaisser la teneur en carbone de l'énergie utilisée, par rapport aux prévisions en cas de maintien du *statu quo*; néanmoins, afin d'alléger le coût global pour l'économie, il leur faudra aussi trouver les moyens de tirer parti de certaines des possibilités les plus efficaces par rapport aux coûts qui se présentent dans les économies en transition et les pays en développement.

6. Conclusions

L'ouvrage *World Energy Outlook* et son analyse indicative concernant Kyoto s'efforcent de mettre en lumière les trois grands enjeux qui façonneront les premières décennies du siècle prochain :

- Les défis liés à la demande d'énergie : jusqu'à présent, l'énergie a été fournie sur des marchés de plus en plus libres et concurrentiels à des prix raisonnables pour accompagner la croissance économique. Quant à l'avenir, tout porte à croire que la demande ira en augmentant : comment dépasser les améliorations autonomes et régulières de l'efficacité énergétique qui se sont dégagées des tendances passées, presque linéaires.

- Les défis liés aux approvisionnements énergétiques : des ressources sont disponibles – fossiles et non fossiles – mais il faudra ajouter à la palette énergétique certaines sources nouvelles. Comment faire face à la dépendance accrue à l'égard du Moyen-Orient et à la baisse de la production de pétrole classique, compte tenu des inadéquations géographiques de plus en plus marquées de l'offre et de la demande de gaz ainsi que des limites à respecter concernant le maximum de carbone fossile qu'il est possible de rejeter dans l'atmosphère.
- Le défi consistant à établir la relation correcte entre l'offre et la demande d'énergie : comment remplacer les anciens systèmes énergétiques, contraignants et centralisés, qui se sont révélés inefficaces. Les efforts de décentralisation allant «du sommet à la base», par exemple lorsque des producteurs indépendants d'électricité en vendent à des entreprises électriques de service public qui n'ont pas fait l'objet de réformes, commencent à montrer leurs limites en Asie. Les marchés concurrentiels reposent sur le libre choix des consommateurs – c'est pourquoi les réformes de la réglementation doivent partir de la base, c'est-à-dire commencer par eux, qui payent et devraient pouvoir choisir librement le service dont ils ont besoin et le fournisseur qu'ils préfèrent.

En résumé, s'il est permis aux marchés de fonctionner et que la valeur du carbone y est suffisamment explicite, les conditions seront propices à l'obtention de résultats plus respectueux du climat, sous les effets conjugués du progrès technologique et des changements de comportement.

Perspectives énergétiques mondiales à l'horizon 2050 et au-delà

by

Arnulf Grübler

Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués
Autriche

1. Introduction

Le présent document résume une étude des perspectives énergétiques régionales et mondiales à long terme, menée conjointement pendant cinq ans par l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA) et le Conseil mondial de l'énergie (CME)¹. Pour commencer, il donne un bref aperçu des scénarios de l'IIASA-CME, puis analyse le bien-fondé des perspectives énergétiques à long terme. Les discussions sur la démographie, la géopolitique, les infrastructures, les investissements en technologie et les problèmes d'environnement qui suivent illustre bien que c'est seulement dans une perspective à long terme, à l'horizon 2050 ou au-delà, que l'on peut entrevoir les possibilités et les contraintes éventuelles de l'évolution des systèmes énergétiques, ainsi que les défis qu'elles posent aux pouvoirs publics et aux entreprises à brève ou à moyenne échéance.

2. Aperçu des scénarios

L'étude conjointe de l'IIASA-CME établit trois hypothèses différentes de développement économique, qui se subdivisent en six scénarios d'évolution du système énergétique mondial à long terme. Ils portent tous sur la période s'étendant jusqu'à 2050, mais des résultats sont également présentés pour l'an 2100. En résumé, l'hypothèse A présente un avenir de progrès technologiques impressionnants et, partant, de forte croissance économique. L'hypothèse B décrit un avenir où les progrès technologiques sont moins ambitieux, mais peut-être plus réalistes; par conséquent, le taux de croissance économique y est plus intermédiaire. L'hypothèse C prévoit un avenir « riche et vert » : il prend en ligne de compte des progrès technologiques considérables et une coopération internationale sans pré-

cédent, dont notamment des transferts très importants de ressources du Nord au Sud, explicitement ciblés sur la protection de l'environnement et l'équité internationale. Les caractéristiques essentielles de ces trois hypothèses sont présentées au tableau 1.

Les scénarios à long terme donnent principalement pour message qu'il est plus facile de prévoir sous quelles formes les consommateurs voudront utiliser l'énergie à l'avenir que d'estimer le niveau absolu de la demande ou d'anticiper quelles sources d'énergie permettront d'y répondre. La hausse progressive des revenus par habitant dans toute la planète poussera les populations à chercher davantage de services énergétiques plus efficaces, plus propres et moins dommageables pour l'environnement. Ainsi, on peut raisonnablement envisager dans quel sens s'orienteront les consommateurs d'énergie. Néanmoins, il reste à savoir quels types d'entreprises fourniront les services énergétiques, de quelle manière et au moyen de quelles technologies.

Ce message essentiel se révèle réellement valable pour un large éventail d'avenirs possibles – allant d'une expansion extrêmement forte de la production de charbon à des limites strictes, ou d'une élimination progressive de l'énergie nucléaire à un accroissement notable de son utilisation, ou encore, s'agissant des émissions de carbone en 2100, d'un niveau allant d'un tiers seulement des volumes actuels à plus du triple. Néanmoins, dans les variantes étudiées, les différentes options envisagées arrivent toutes à s'adapter au facteur d'appel prévu de la demande, privilégiant des formes d'énergie plus souples et modulables, plus commodes à utiliser et plus propres. Il y a donc de bonnes chances pour que les consommateurs obtiennent effectivement ce qu'ils veulent. Quels seront leurs fournisseurs, quelles sources d'énergie seront exploitées, quelles infrastructures seront impliquées et quels moyens technologiques seront déployés sont autant de questions dont la réponse est fonction du développement économique dans le monde, des progrès de la science et de la technologie ainsi que des politiques et des institutions. Les fournisseurs qui prendront à bref délai les décisions les plus efficaces pour que l'évolution de leurs services aille de pair avec celle des préférences des consommateurs auront un avantage décisif.

Un deuxième message essentiel qui se dégage des scénarios de l'IIASA-CME est que l'activité économique, et les marchés de l'énergie en particulier, se déplaceront à long terme vers les pays actuellement en voie de développement. La vitesse et la chronologie de ce transfert sont encore incertaines (et diffèrent donc dans les trois hypothèses et les six scénarios correspondants), mais l'orientation générale ne fait aucun doute : c'est surtout dans le Sud que les marchés se développeront à l'avenir.

Parallèlement à l'accroissement démographique, le rattrapage économique – processus par lequel les pays en développement parviendront à une

Tableau 1. **Résumé des trois hypothèses en 2050 et 2100 par rapport à 1990**

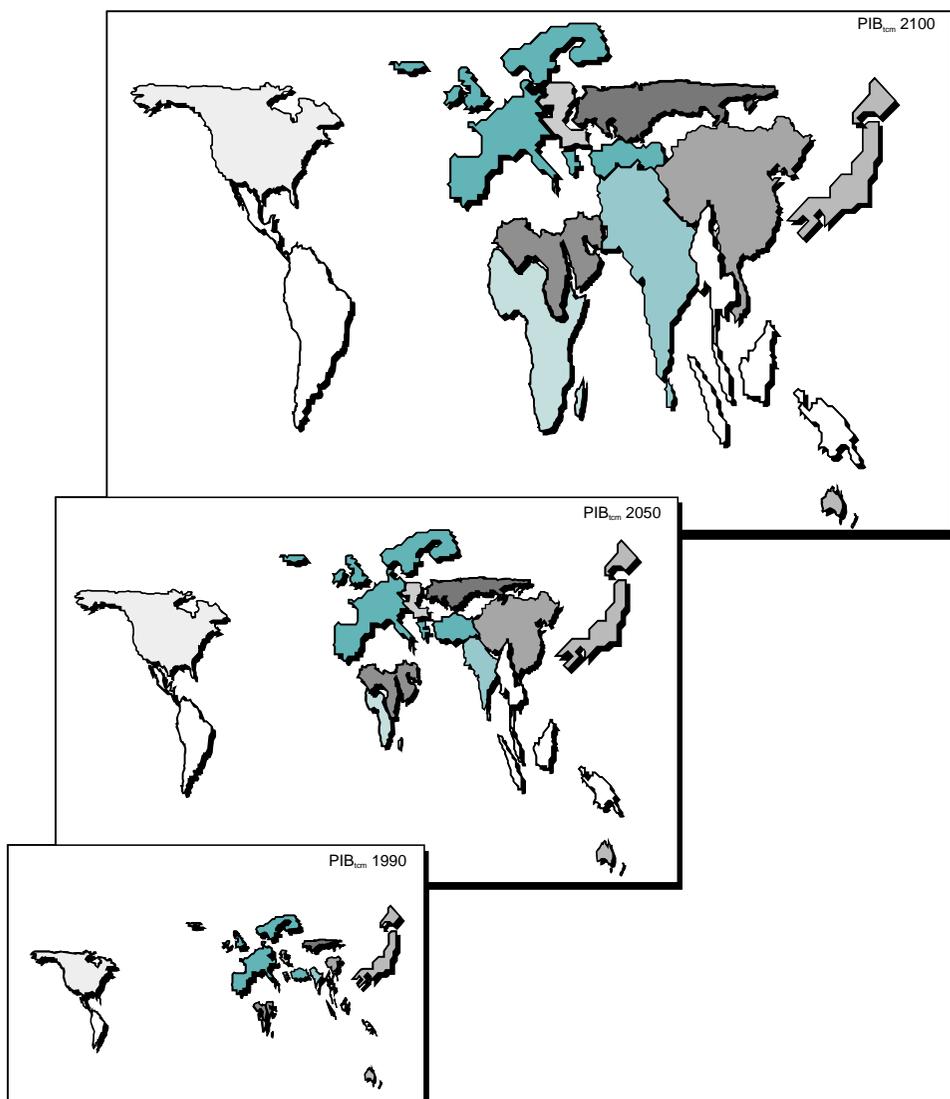
	Hypothèse		
	A Forte croissance	B Intermédiaire	C Inspirée par le souci de l'environnement
Population, milliards :			
1990	5.3	5.3	5.3
2050	10.1	10.1	10.1
2100	11.7	11.7	11.7
PMB, billions de \$US (1990)			
1990	20	20	20
2050	100	75	75
2100	300	200	220
Amélioration de l'intensité énergétique primaire mondiale, % par an			
	Moyenne	Faible	Forte
1990 à 2050	-0.9	-0.8	-1.4
1990 à 2100	-1.0	-0.8	-1.4
Demande d'énergie primaire, Gtep			
1990	9	9	9
2050	25	20	14
2100	45	35	21
Ressources disponibles			
Fossiles	Importantes	Moyennes	Faibles
Non fossiles	Importantes	Moyennes	Importantes
Coûts des technologies			
Fossiles	Faibles	Moyens	Élevés
Non fossiles	Faibles	Moyens	Faibles
Dynamique technologique			
Fossiles	Forte	Moyenne	Moyenne
Non fossiles	Forte	Moyenne	Forte
Écotaxes			
	Non	Non	Oui
Limitation des émissions de CO₂			
	Non	Non	Oui
Émissions nettes de carbone, GtC			
1990	6	6	6
2050	9-15	10	5
2100	6-20	11	2
Nombre de scénarios			
	3	1	2

Abréviations : PMB = produit mondial brut ; Gtep = gigatonnes d'équivalent pétrole ; CO₂ = dioxyde de carbone ; GtC = gigatonnes de carbone.

productivité équivalente à celle des pays industrialisés et rattraperont en conséquence leurs niveaux de revenus par habitant – implique une relocalisation à long terme des activités économiques. A l'heure actuelle, les pays de l'OCDE, bien qu'ils comptent moins de 20 pour cent de la population mondiale, produisent et consomment près de 80 pour cent de la production économique de la planète (produit mondial brut mesuré aux taux de change du marché). Ces disparités se font jour à la figure 1, où la taille des 11 régions du monde représentées traduit leur importance, proportionnellement à leur PIB de 1990 (aux taux de change du marché). La carte économique du monde de 1990 est très déformée par suite des disparités actuelles entre les régions. On peut à peine discerner la plupart des régions en développement en comparaison du Japon, de l'Europe occidentale et de l'Amérique du Nord. Il suffit de comparer, par exemple, la taille du Japon en 1990 à celle de la Chine ou du sous-continent indien. Pour les années 2050 et 2100, la carte économique présentée correspond à l'hypothèse B, scénario intermédiaire de l'étude de l'IIASA-CME, qui est le plus prudent eu égard à la vitesse du rattrapage économique du monde en développement. Néanmoins, sur une longue période, les cartes économiques commencent à ressembler aux cartes géographiques que nous connaissons bien. La signification de cette évolution est double : premièrement, le rattrapage économique est un processus, et un défi à relever, qui s'étend sur un siècle. Il se peut que certaines régions progressent plus vite que d'autres, mais globalement, les pays en développement qui les composent auront besoin de plus de cinq décennies pour approcher les niveaux de revenus généralement observés dans les pays de l'OCDE dans les années 60 ou 70. Deuxièmement, avec le rattrapage économique à long terme, la croissance de l'économie et des marchés de l'énergie interviendra surtout dans le monde en développement, point sur lequel on reviendra dans ce chapitre dans les discussions sur les aspects géopolitiques de l'utilisation de l'énergie plus bas.

Comme le montre la figure 2, la structure de la consommation finale d'énergie présente une homogénéité remarquable dans tous les scénarios. Étant donné la hausse des revenus, tous les scénarios reflètent un changement général et continue vers des énergies mises à la disposition des consommateurs sous des formes de plus en plus flexibles, commodes à utiliser et propres. Autrement dit, *la qualité prime toujours plus*. On utilise de moins en moins d'énergie sous ses formes d'origine, par exemple dans les applications directes classiques du charbon et de la biomasse, et les consommateurs reçoivent de plus en plus de l'énergie passant par des filières complexes de transformation et de distribution. L'adoption généralisée de vecteurs énergétiques de plus haute qualité et de systèmes de transport spécifiques, tels les pipelines et les réseaux, multiplient les possibilités d'échanges et œuvrent en faveur de modes de consommation finale semblables dans des régions où les structures de l'approvisionnement en énergie primaire sont fondamentalement différentes.

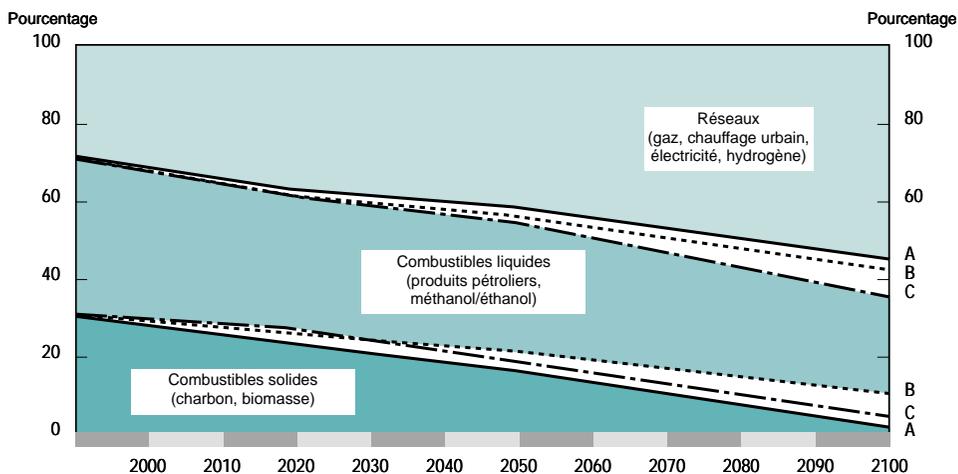
Figure 1. Évolution de la répartition géographique de richesses économiques, hypothèse B de l'IIASA-CME



Note : Les superficies des régions du monde sont pondérées proportionnellement au niveau de leur PIB de 1990 (exprimé aux taux de change du marché [tcm]).

Source : Auteur.

Figure 2. Consommation finale mondiale d'énergie sous forme de combustibles solides et liquides, et par réseaux

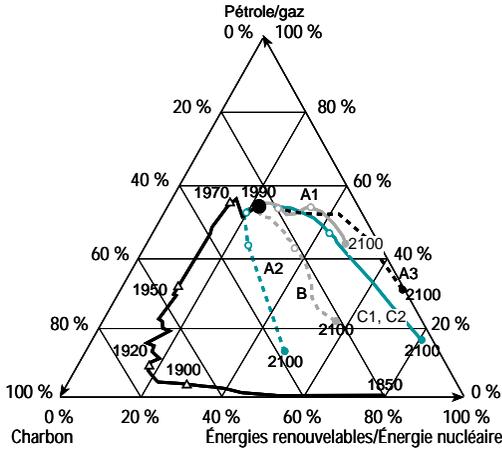


Note : Les parties grisées qui se superposent correspondent aux variantes dans les hypothèses A, B et C.
Source : Auteur.

D'un point de vue quantitatif, la demande d'énergie est manifestement différente selon les scénarios. Les taux de croissance économique, les mutations structurelles, les progrès technologiques et les politiques d'environnement sont les quatre principaux déterminants à long terme². Les niveaux futurs de la demande d'énergie peuvent largement varier, même si les caractéristiques d'un scénario sont par ailleurs semblables en ce qui concerne la population et le degré de développement économique (tableau 1). L'étude de l'IIASA-CME prévoit que les besoins en énergie seront multipliés par un facteur compris entre 1.5 et 3 d'ici à 2050, et entre 2 et 5 d'ici à 2100. Au reste, la croissance de la consommation d'énergie est ralentie par l'amélioration ininterrompue de l'intensité énergétique. A long terme, on peut envisager des gains considérables de productivité des facteurs dans l'ensemble de l'économie (c'est-à-dire, la croissance économique), mais pas dans le secteur de l'énergie.

Quant à la répartition des approvisionnements en énergie primaire (figure 3), une conclusion importante de l'étude est la grande diversité des structures d'approvisionnement qui sont conciliables avec les tendances persistantes de la consommation finale d'énergie présentées à la figure 2. Chaque angle du triangle de la figure 3 correspond à une situation hypothétique dans laquelle la totalité de la demande d'énergie primaire est couverte par une seule source : pétrole et gaz au

Figure 3. Évolution de la structure des énergies primaires



Note : Parts du pétrole et du gaz, du charbon et des sources non fossiles, en pourcentage, de 1850 à 1990 (triangles) et dans les six scénarios de l'IIASA-CME jusqu'en 2020 (cercles ouverts), 2050 (losanges) et 2100 (cercles fermés).

Source : Auteur.

sommet, charbon à gauche et sources non fossiles (énergies renouvelables et nucléaire) à droite. En 1990, leurs parts respectives étaient les suivantes : 53 pour cent pour le pétrole et le gaz (mesurée par rapport aux lignes de la grille dont les pourcentages figurent à droite), 24 pour cent pour le charbon (pourcentages à gauche) et 23 pour cent pour les sources d'énergie non fossiles (pourcentages à la base du triangle).

Compte tenu des longues durées de vie utile des centrales électriques, des raffineries et d'autres installations énergétiques, le renouvellement du parc d'équipements n'est pas suffisant avant 2020 dans les scénarios pour que l'on puisse déceler des différences sensibles entre les investissements qui y sont respectivement consacrés. A cette échéance, cependant, sous l'effet des travaux de RD-D, des investissements effectués et des stratégies de diffusion des technologies, les germes des disparités qui apparaîtront après 2020 dans la structure des systèmes énergétiques auront été largement répandus. Les décisions qui seront prises d'ici à 2020 détermineront les trajectoires divergentes de développement qui se concrétiseront après cette date. Ainsi, le rythme des changements structurels dans les systèmes énergétiques mondiaux restera lent, ce qui est cohérent avec l'évolution observée par le passé que l'on retrouve à la figure 3. De ce fait, les actions à court terme gagnent de l'importance lorsqu'elles peuvent amorcer des transfor-

mations à long terme : à cet égard, les exemples les plus frappants sont les investissements dans les infrastructures et la technologie.

Au demeurant, on ne peut plus considérer que les produits énergétiques du futur seront prédéterminés par les conditions géologiques. La pénurie imminente des ressources que l'on présageait dans les années 70 ne s'est pas matérialisée. La poursuite des efforts d'exploration et des progrès technologiques ont entraîné un accroissement des réserves accessibles à un coût raisonnable, tendance qui persistera au moins jusqu'en 2020. Selon tous les scénarios, après cette date, le pétrole et le gaz classiques cesseront progressivement d'être utilisés. Cette transition s'accomplit assez lentement dans le scénario A1, qui prévoit d'abondantes ressources pétrolières et gazières. Dans le scénario A3 et l'hypothèse C, elle se déroule plus vite parce que le progrès technologique est plus rapide (scénario A3) ou que les politiques énergétiques et environnementales favorisent la mise en valeur d'énergies non fossiles de substitution (hypothèse C). Dans le scénario A2 et l'hypothèse B, l'abandon du pétrole et du gaz s'accompagne d'un recours important au charbon, dont la part de marché à long terme se situe entre 20 pour cent et 40 pour cent après 2050. Cependant, ce charbon est rarement utilisé directement, mais plutôt transformé en vecteurs énergétiques de haute qualité (électricité, combustibles liquides et gazeux) pour répondre aux exigences des consommateurs à revenu élevé de la deuxième moitié du ^{xxi}e siècle. Aussi pourra-t-on tirer parti de toute une palette de ressources et de technologies envisageables très différentes pour faire face à la tendance à exiger une énergie plus propre qui se manifestera chez des consommateurs de plus en plus riches dans le monde entier.

3. Pourquoi élaborer des scénarios à long terme ?

Seule une perspective à long terme permet d'explorer les mutations radicales possibles dans les systèmes énergétiques mondiaux. Sur une période de une à trois décennies, qu'il est d'usage d'adopter dans les études sur l'énergie, il n'y a ni un rattrapage suffisant de développement économique des pays du Sud, ni un renouvellement suffisant du parc d'équipements dans le secteur de l'énergie, pour créer une situation qui diffère de façon appréciable de celle que l'on connaît aujourd'hui. A très longue échéance, les disparités économiques d'aujourd'hui seront toutefois atténuées. Les revenus par habitant dans les pays en développement pourraient augmenter, à long terme, au point d'atteindre les niveaux que l'on observe à présent dans les pays de l'OCDE. De façon analogue, après 2050, tout le parc d'équipements du système énergétique mondial aura été renouvelé une fois au moins, d'où de vastes possibilités d'évolutions technologiques radicales. Cette section examine cinq faisceaux de variables particulièrement importants si l'on envisage un horizon temporel de cinq décennies ou plus : la démographie et l'urbanisation; le développement économique et les inflexions

qui en découlent dans la géopolitique de la consommation d'énergie; les besoins en infrastructures; la technologie; et enfin, les problèmes d'environnement.

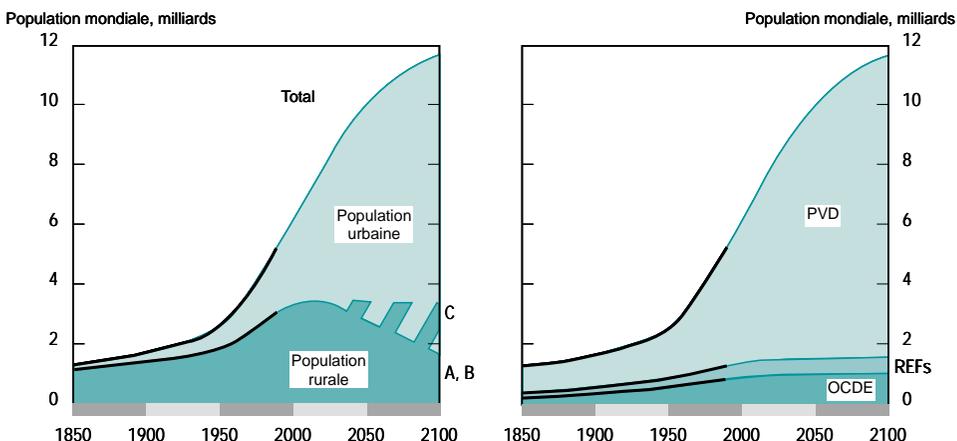
Démographie et urbanisation

La dynamique démographique inéluctable (les mères de demain sont déjà nées aujourd'hui) permet d'établir sans guère de risques de se tromper des prévisions démographiques concernant les deux décennies à venir. D'ici à 2020, la population mondiale atteindra 8 milliards d'habitants environ, quelles que soient les projections que l'on consulte – Nations Unies, Banque mondiale ou IIASA. A l'horizon 2050 et au-delà, d'un autre côté, l'incertitude s'accroît, mais non de manière uniforme.

Si l'on considère les données sur la population mondiale, la marge d'incertitude est un peu plus faible que ne le laisserait croire le sens commun. A partir des premières prévisions démographiques établies récemment selon la méthode probabiliste par l'IIASA (Lutz, Sanderson et Scherbov, 1997), les démographes attribuent une probabilité de 80 pour cent à un chiffre de population mondiale compris entre 9 et 13 milliards à la fin du *xxi*^e siècle, lequel est supérieur de quelque 8 pour cent et inférieur de 23 pour cent au chiffre de 1992 de la Banque mondiale, retenue comme projection démographique médiane dans l'étude de l'IIASA-CME (figure 4). Deux conséquences des évolutions démographiques à long terme sont moins certaines. Il s'agit, en premier lieu, du vieillissement de la population, qui touchera d'abord les pays de l'OCDE (par exemple, le Japon), et ensuite de plus en plus, le pays qui se trouvent actuellement en voie de développement (par exemple, la Chine). On connaît mal les répercussions de ce phénomène sur la croissance économique ou sur l'utilisation des ressources. La seconde incertitude concerne les effets des évolutions démographiques, notamment le déclin des taux de fécondité, sur la transformation de la société dans son ensemble, et donc les possibilités de rattrapage économique. Selon le point de vue où l'on se place, on peut faire valoir que la croissance de la population freine le développement économique (« plus de bouches à nourrir ») ou que l'essor démographique est un moteur important de la croissance économique (« plus de bras pour travailler »). Les scénarios à long terme de l'IIASA-CME ne permettent pas de trancher sur cette question. Tant le scénario de croissance forte que celui de croissance faible des revenus pourraient être compatibles avec des transitions démographiques rapides ou lentes, mais d'après les connaissances actuelles, il y a plus de chances qu'une évolution démographique (baisse des taux de fécondité et allongement de l'espérance de vie) rapide soit liée, toutes choses égales par ailleurs, à une amélioration accélérée de la productivité et, partant, à un essor économique.

En revanche, deux autres tendances démographiques peuvent être considérées comme une quasi-certitude. La première est la concentration de la croissance

Figure 4. Population mondiale, évolution passée de 1850 à 1990 et projection démographique médiane à l'horizon 2100 utilisée dans les scénarios de l'IIASA-CME
 A gauche : population rurale-population urbaine ; à droite : par macrorégion



Source : Auteur.

de la population dans les pays en développement, et la seconde est l'urbanisation (voir figure 4). La première tendance, un aspect décisif de l'accroissement de la population mondiale, est bien connu et il n'est guère nécessaire de l'expliquer davantage. En 2100, la population des États-Unis, du Canada et de l'ensemble de l'Europe confondus tombe à moins de 10 pour cent du total mondial, selon tous les scénarios médians de la Banque mondiale, de l'IIASA et des Nations Unies : c'est le chiffre retenu dans les scénarios de l'étude de l'IIASA-CME.

L'urbanisation croissante est le second aspect décisif de la démographie à long terme; or, il est fréquemment laissé de côté dans les études sur l'énergie. Plus de 80 pour cent de la population des pays industrialisés est urbaine, et nombre de pays en développement enregistrent des taux d'urbanisation tout aussi élevés. Selon les Nations Unies, sur 5.3 milliards d'habitants, 2.2 milliards vivaient dans des agglomérations en 1990. Dans les 35 prochaines années, les populations urbaines devraient atteindre 5.2 milliards d'habitants, chiffre égal à la population totale de la planète en 1990. Cet accroissement de 3 milliards d'habitants égale presque l'augmentation de 3.2 milliards prévue d'ici à 2025 (Nations Unies, 1994). Donc, l'accroissement démographique mondial concernera presque intégralement des populations urbaines. Selon les Nations Unies, 60 pour cent de la population de la

planète résidera dans des zones urbaines en 2025 et, si les tendances passées persistent, la proportion habitant dans des agglomérations atteindra les trois quarts du total (soit environ 8 milliards de personnes) en 2050. Une part de plus en plus grande de la population sera établie dans des « mégalo-poles » de plus de 10 millions d'habitants. Selon les estimations, peu après l'an 2000, huit villes compteront plus de 15 millions d'habitants chacune – et seulement deux, Tokyo et New York, se trouvent dans des pays très industrialisés. Les six autres (Pékin, Bombay, Calcutta, Mexico, Sao Paulo et Shanghai) sont dans des pays actuellement en voie de développement. Ce sera une véritable gageure d'assurer des services énergétiques suffisants et propres dans un monde surtout peuplé dans les zones urbaines, en raison des besoins d'infrastructures (c'est-à-dire de capitaux) et de l'extrême concentration géographique de la demande d'énergie. Et les vecteurs énergétiques *devront* être propres afin que cesse la création du « smog urbain » dû à la combustion de charbon et de bois de feu ou à la forte densité du trafic motorisé, fléau actuel de la plupart des mégalo-poles.

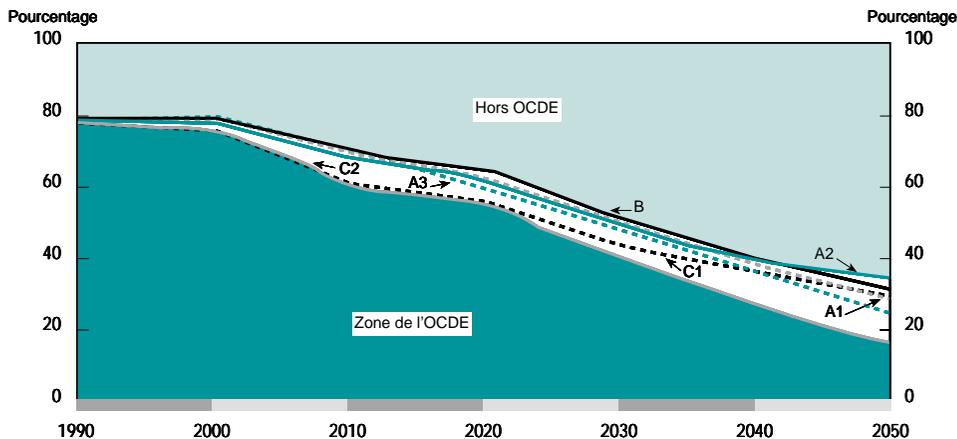
Développement et géopolitique

En examinant la démographie en relation avec le développement économique, il devient clair qu'il y aura, à long terme, un recentrage géographique de la consommation d'énergie. En 1990, les pays en développement consommaient 26 pour cent des formes d'énergie modernes (37 pour cent si l'on tient compte, dans les statistiques, des utilisations de l'énergie non commerciale). En 2050, la part des pays en développement se situe dans une fourchette comprise entre 58 et 67 pour cent, laquelle pourrait s'établir entre 72 et 83 pour cent à la fin du *xx*^e siècle : c'est un renversement complet du paysage géopolitique de l'énergie en regard de la situation actuelle.

La figure 1 illustre comment le poids de l'activité économique mondiale et, par conséquent, de la consommation d'énergie pouvait se déplacer vers le Sud. En fait, la plupart des scénarios à court terme tablent sur une poursuite de l'évolution actuelle prévoient aussi une croissance de la demande plus rapide dans les pays en développement. Néanmoins, il faut aussi réfléchir à la façon dont ces tendances à court terme peuvent entraîner des changements généralisés à long terme dans les systèmes énergétiques et la géopolitique de l'énergie, ce qui n'est possible qu'en situant l'horizon temporel des prévisions en l'an 2050, voire au-delà.

Un basculement radical en faveur des pays en développement de la donne géopolitique mondiale dans le domaine de l'énergie pourrait avoir notamment pour conséquence de renforcer leur aptitude à se procurer et à conserver les formes d'énergie faisant l'objet d'échanges internationaux. A l'heure actuelle, les échanges mondiaux de produits énergétiques sont dominés par les importateurs voraces de la zone de l'OCDE, ainsi que par quelques grands exportateurs d'éner-

Figure 5. Parts (en pourcentage) de pays Membres et non membres de l'OCDE dans les échanges mondiaux de produits énergétiques entre 1990 et 2050, correspondant aux six scénarios de l'IIASA-CME



Note : La partie blanche où se superposent les différentes courbes fait ressortir les variantes selon les scénarios.
Source : Tiré de la base de données pour les scénarios de l'IIASA-CME, accessible sur l'Internet (<http://www.iiasa.ac.at>).

gie – lesquels sont depuis longtemps au cœur des préoccupations géopolitiques touchant à l'énergie.

Les scénarios de l'IIASA-CME laissent prévoir que les préoccupations des pays de l'OCDE relatives aux importations et à la sécurité énergétiques à long terme seront de plus en plus partagées par nombre de pays en développement. En témoigne la figure 5, qui présente les parts relatives des régions de l'OCDE (Amérique du Nord, Europe occidentale et Asie-Pacifique) dans les importations mondiales d'énergie, dans tous les scénarios de l'IIASA-CME d'ici à 2050. De ce point de vue, les institutions ayant pour vocation de préserver la sécurité des approvisionnements énergétiques à long terme devraient rechercher l'adhésion de nouveaux pays comme la Chine ou l'Inde, et favoriser des alliances stratégiques avec les grands exportateurs de produits énergétiques à long terme, par exemple la Russie et le Moyen-Orient.

Infrastructures

En dépit de la mondialisation du secteur de l'énergie, l'exclusion du marché demeure un grave problème. Jusqu'à ce jour, 2 milliards de personnes environ n'ont pas accès aux services énergétiques modernes en raison de la pauvreté et du

manque d'infrastructures énergétiques. Nombre de régions accusent une dépendance excessive à l'égard d'une ressource unique, disponible à l'échelon local, par exemple le bois de feu ou le charbon classiques, et ont un accès limité à des formes d'énergie propres et souples, nécessaires au développement économique et social. Les politiques visant à déréglementer les marchés et à parvenir au « juste prix » font abstraction des populations défavorisées. Même les marchés énergétiques qui fonctionnent le mieux sont inaccessibles pour ceux qui ne peuvent pas payer.

Les infrastructures sont la clé de voûte du système énergétique, et l'étude de l'IIASA-CME montre que les besoins en infrastructures nouvelles seront réellement

Figure 6. Échanges de gaz naturel en Eurasie en 2050, dans l'hypothèse d'une forte croissance de la demande et de l'existence de réseaux d'infrastructures transcontinentaux



Note : Les flux correspondent au gaz transporté par gazoducs (noirs) et acheminé sous forme de GNL (gris). La largeur des « flèches » représentant les échanges est proportionnelle aux flux de gaz (en Mtep) ; les surfaces des régions sont proportionnelles à la consommation d'énergie primaire en 2050.

Source : Nakićenović, 1998.

considérables. Pour avoir accès aux services énergétiques modernes, les populations urbaines et rurales défavorisées doivent être raccordées aux réseaux d'énergie. De nouveaux moyens décentralisés de production d'énergie peuvent contribuer à réduire les coûts dans les zones rurales. En effet, il faut les faire baisser, car ils sont encore élevés à l'heure actuelle, en menant des activités de RD-D et en intensifiant l'acquisition d'expérience d'applications dans certains créneaux du marché. L'amélioration des interconnexions des réseaux énergétiques pour le transport du gaz naturel et de l'électricité à l'échelle continentale reste à accomplir dans de nombreuses régions, notamment l'Asie, l'Amérique latine et, à plus long terme, l'Afrique également.

Une étude récente de l'IIASA (Nakićenović, 1998) analyse les besoins en infrastructures énergétiques en Eurasie, à partir des prévisions de la demande des scénarios de l'IIASA-CME. Il en faut de nouvelles pour relier notamment la région de la mer Caspienne et la Sibérie, où les ressources pétrolières et gazières sont disponibles en abondance, aux nouveaux centres émergents de consommation d'énergie en Asie. La figure 6 fait ressortir les implications, pour les échanges, de la mise en œuvre de nouvelles infrastructures énergétiques en Eurasie pour acheminer le gaz naturel à l'horizon 2050. Afin de mettre en perspective ces courants d'échanges pris pour exemple, il est à noter que les importations de gaz à destination de l'Europe occidentale représentaient quelque 90 millions de tonnes d'équivalent-pétrole (Mtep) en 1995, alors que la création de nouvelles infrastructures gazières continentales permettrait d'acheminer des courants d'échanges pouvant atteindre 500 Mtep (Europe) et 700 Mtep (Asie); cependant, leur construction réclamera plusieurs décennies et de très lourds investissements (de l'ordre de plusieurs milliards). Faute d'adopter un horizon très lointain, l'étude des possibilités qu'offrent des projets d'infrastructures énergétiques d'une telle ampleur, et des échéances de leur réalisation, est impossible.

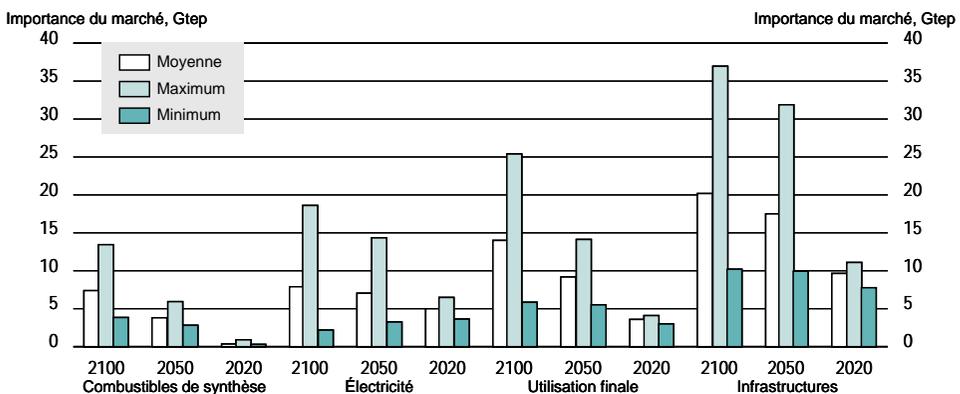
Technologie

La technologie est le déterminant clé du développement économique, et elle est essentielle pour élever les niveaux de vie et alléger le fardeau que l'humanité fait peser sur l'environnement (Grübler, 1998). Le progrès technologique repose sur l'ingéniosité de l'homme et c'est donc une ressource humaine véritablement renouvelable tant qu'elle est correctement entretenue. Elle a pourtant un prix. L'innovation, en particulier la commercialisation de procédés et de technologies entièrement nouveaux, exige en permanence des investissements de moyens et de ressources financières dans les activités de RD-D. Ensuite, la diffusion des technologies dépend aussi bien de la RD-D que des progrès régulièrement accomplis grâce à l'apprentissage par la pratique et l'utilisation. Aucun perfectionnement des technologies à long terme n'est envisageable en l'absence d'investissements effectifs et d'expérience concrète.

Pour que l'innovation et la diffusion des technologies se matérialisent, il faut à la fois que l'on puisse en déceler les débouchés et qu'il existe un esprit d'entreprise pour les mettre à profit. Les scénarios à long terme ne peuvent pas prévoir quelles seront les « meilleures » des technologies de l'avenir, mais ils permettent de cerner les domaines offrant des perspectives technologiques favorables. La figure 7 présente le potentiel commercial mondial, en 2020, 2050 et 2100, calculé dans les scénarios de l'IIASA-CME pour quatre catégories de technologies de l'énergie : la production de combustibles de synthèse (à partir de biomasse, de charbon et de gaz naturel); les centrales électriques; les nouveaux dispositifs d'utilisation finale de l'énergie (par exemple, photovoltaïque, piles à combustible, pompes à chaleur); et les infrastructures de transport, de transmission et de distribution de l'énergie. Pour chacune des quatre catégories, le potentiel commercial minimum, maximum et moyen est indiqué pour les six scénarios.

Dans tout l'éventail des évolutions possibles de la situation énergétique décrites dans les six scénarios, les infrastructures énergétiques jouent un rôle de plus en plus important. Même dans les scénarios de faible demande de l'hypothèse C, elles servent à fournir au moins 10 Gtep par an en 2050. A la fin du siècle, ce chiffre représente en moyenne 20 Gtep par an dans les six scénarios, voire près de 40 Gtep annuels dans les scénarios aux hypothèses les plus élevées. Les marchés des technologies du secteur de l'électricité prennent aussi beaucoup

Figure 7. Potentiel commercial mondial pour quatre catégories de technologies énergétiques : production de combustibles de synthèse, centrales électriques, nouveaux dispositifs d'utilisation finale de l'énergie et infrastructures énergétiques



Note : Minimums, maximums et moyennes dans les six scénarios de l'IIASA-CME, en 2020, 2050 et 2100, en Gtep.
Source : Auteur.

d'ampleur, avec un écart important entre les scénarios maximum et minimum. En 2050, la fourchette se situe entre 3 et 14 Gtep (d'énergie fournie) par an. L'écart tient, pour une part, aux incertitudes concernant la croissance de la demande, mais il découle aussi des innovations dans le domaine de l'utilisation finale de l'énergie qui se concrétisent par de nouvelles technologies de production d'électricité décentralisée locale, par exemple la photovoltaïque ou les piles à combustible. A long terme, le potentiel des technologies d'utilisation finale ne se cantonne plus au secteur de l'électricité, puisque l'essentiel de la clientèle ne se compose plus d'un nombre restreint d'entreprises de services publics, mais plutôt de millions de consommateurs d'énergie dans le monde entier. De même, un grand marché se fait jour à long terme pour les technologies dans le domaine des combustibles de synthèse. Une transition harmonieuse faisant passer le pétrole et le gaz classique au second plan se traduit par d'importants débouchés technologiques pour les combustibles liquides et gazeux de synthèse ainsi que, dans un avenir plus lointain, pour l'hydrogène produit à partir de combustibles fossiles (charbon et gaz naturel) et d'énergies renouvelables (biomasse). A la fin du ^{xxi}e siècle, le marché mondial des combustibles de synthèse pourrait atteindre, pour le moins, 4 Gtep par an, volume comparable à celui du marché pétrolier actuel.

Ainsi qu'il est noté plus haut, le progrès technologique a un prix – il faut investir sans discontinuer dans les activités de RD-D. Tous les perfectionnements technologiques envisagés dans les scénarios, dont témoigne l'expansion de toutes les catégories présentées à la figure 7, supposent des investissements soutenus dans la RD-D. Il est donc préoccupant que les dépenses qui y sont consacrées à l'heure actuelle soient en baisse, compte tenu de leur importance stratégique. Elles ne diminuent pas seulement dans un pays ou groupe de pays en particulier, mais apparemment dans tous les pays industrialisés; or, ce sont eux qui mènent la plupart des travaux de RD-D dans le monde. La RD-D conduite dans le secteur privé se réduit parallèlement à celle du secteur public : les investissements privés dans la RD-D énergétique, par exemple, ont chuté de près d'un tiers aux États-Unis au cours des cinq dernières années. A l'évidence, les dépenses de RD-D, qui sont certes considérables au départ, sont considérées de plus en plus comme étant excessivement élevées dans l'optique des marchés pour lesquels le souci de maximiser le patrimoine des actionnaires à court terme l'emporte sur le développement socio-économique et la protection de l'environnement à plus long terme.

Au niveau de la consommation finale d'énergie, les scénarios de l'IASA-CME s'attendent à des améliorations technologiques majeures. Cette conclusion entraîne deux conséquences supplémentaires. D'une part, elle affaiblit les arguments en faveur d'investissements massifs dans la RD-D portant sur des technologies lourdes, complexes, « monolithiques » et manquant de souplesse comme la fusion nucléaire et les centrales héliothermiques centralisées. Les perfectionnements des technologies d'utilisation finale, qui impliquent la production et l'uti-

lisation de millions plutôt que de centaines d'unités, se prêtent davantage à la normalisation, à la modularisation, à la production en série et, partant, à l'exploitation des effets de la courbe d'apprentissage (c'est-à-dire des réductions de coûts et des améliorations des performances). D'autre part, les dispositions institutionnelles qui régissent la consommation finale et l'approvisionnement en énergie jouent un rôle décisif. La déréglementation et la libéralisation des marchés de l'électricité sont susceptibles d'encourager ce mouvement, étant donné que les offres globales de services sont adaptées aux diverses préférences des consommateurs et que, en particulier, le consommateur ordinaire peut revendre de l'électricité au réseau. Cependant, on craint par ailleurs que la libéralisation, en privilégiant les profits à court terme, ne dissuade d'entreprendre des activités de RD-D à long terme.

Environnement

Les incidences sur l'environnement de la production et de l'utilisation de l'énergie se font sentir à des échelles temporelles et spatiales très différentes : depuis l'échelon local jusqu'au niveau mondial, depuis le court terme (de l'ordre d'heures ou de jours s'agissant des épisodes de smog) jusqu'au très long terme (pouvant aller jusqu'à un siècle ou plus dans le cas du changement climatique). Même lorsque les phénomènes se produisent dans un très bref laps de temps, par exemple les émissions de particules à l'intérieur des bâtiments ou en milieu urbain dans les pays en développement, il faudra plusieurs décennies pour remédier à ces effets. Quant aux décisions des pouvoirs publics relatives au changement climatique, elles sont d'une complexité encore plus grande. Procéder à la restructuration massive des systèmes énergétiques peut prendre un siècle, c'est-à-dire la même durée que la concrétisation des incidences à grande échelle d'un changement climatique éventuel. Il est donc évident que l'attentisme n'est pas une stratégie viable. Au demeurant, le changement climatique est un problème d'environnement à long terme qui appelle des stratégies de longue haleine, et non des mesures à court terme uniquement. De prime abord, par exemple, on peut affirmer que les émissions de carbone cumulées pendant le siècle prochain importent davantage que les réductions des émissions à court terme. L'action politique et les institutions doivent encore apporter des réponses à la question épineuse de savoir comment inscrire les travaux analytiques et l'élaboration des politiques dans la perspective à long terme qui s'impose.

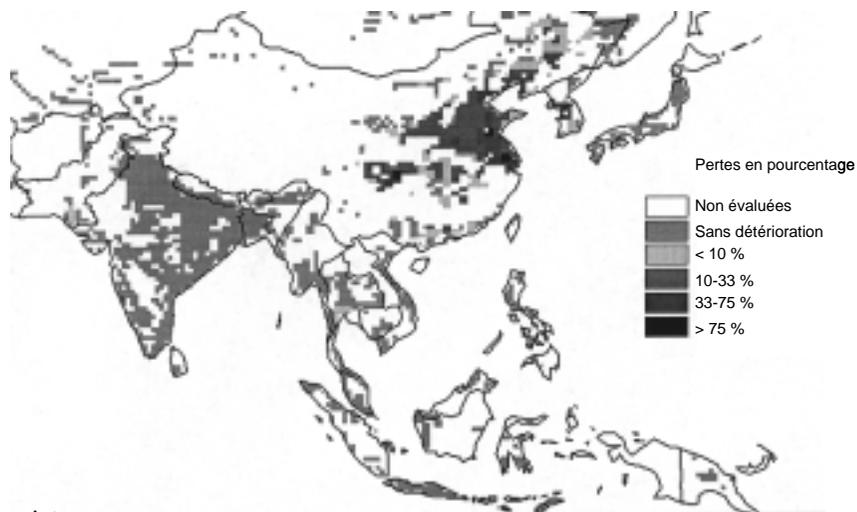
On abordera ici deux problèmes d'environnement à long terme qui sont représentatifs : les incidences de l'acidification en Asie et le changement climatique planétaire.

Dans les économies en expansion rapide d'Asie qui continuent à utiliser massivement le charbon, les émissions de soufre et les problèmes d'acidification qui y

sont associés représentent l'une des principales menaces à moyen terme pour l'environnement. Si rien n'était fait pour limiter les émissions de SO₂ en Asie, elles pourraient presque tripler dès 2020 et la qualité de l'air ambiant en Asie du Sud et de l'Est pourrait se détériorer considérablement dans les zones urbaines et rurales. Les dépôts de soufre pourraient atteindre le double des plus hauts niveaux enregistrés dans les zones les plus polluées d'Europe centrale et orientale. Une conséquence critique est pour les cultures vivrières en Asie : des émissions de soufre inchangées provoqueraient un dépassement des seuils critiques par un facteur de 10, ce qui risque d'entraîner des sévères pertes de la production vivrière sur de grandes superficies (la figure 8).

Compte tenu de ces résultats, tous les scénarios de l'IIASA-CME tablent sur l'adoption de mesures de lutte contre les émissions de soufre. Pour l'Amérique du Nord et l'Europe, les scénarios tiennent compte des textes de lois les plus récents stipulant de réduire encore plus les émissions de soufre – en particulier, les Amendements de 1990 à la Clean Air Act des États-Unis et le Deuxième protocole sur le soufre de la CEE-ONU. Pour les économies en développement, notamment en Asie, les scénarios postulent que des mesures de lutte contre les émissions de soufre seront prises progressivement, applicables en particulier aux grandes

Figure 8. **Pertes de production vivrière en Asie dues aux émissions de soufre pour un scénario de forte croissance, à forte intensité de consommation de charbon, sans dépollution (en pourcentage)**

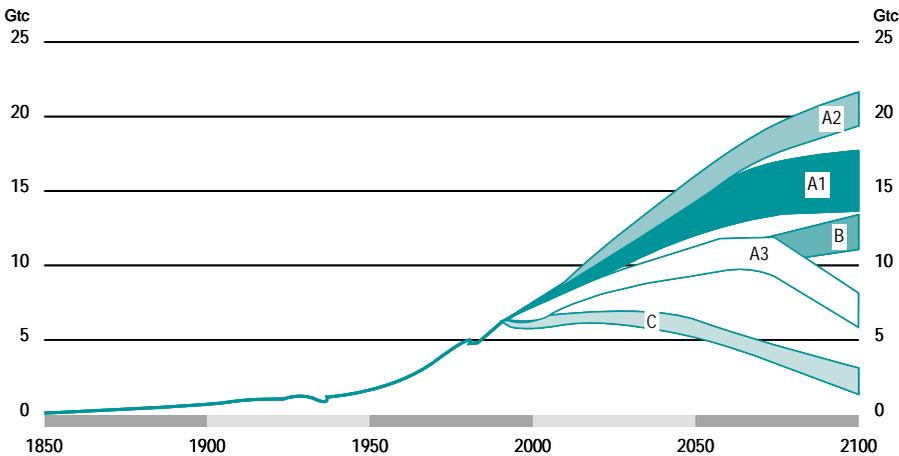


sources fixes implantées à l'intérieur ou à proximité des grandes agglomérations. Après 2005, toute la nouvelle production d'électricité à partir de charbon prévue dans les scénarios est exclusivement assurée au moyen de technologies avancées, équipées de systèmes de dépollution. C'est dans les scénarios de l'hypothèse C, inspirée par le souci de l'environnement, que les mesures de lutte contre la pollution par le soufre sont les plus strictes. Dans les autres scénarios, elles sont introduites plus graduellement. Néanmoins, même dans le cas précédent, il faudra attendre 2050 pour que celles-ci reviennent à leur niveau de 1990 en Asie. D'après ces résultats, on peut penser que les préoccupations concernant ces émissions et leur impact régional potentiel sur la sécurité alimentaire prendront le pas, en Asie, sur des problèmes à long terme de l'environnement mondial, tel le changement climatique.

L'ampleur des enjeux du changement climatique à long terme dépend essentiellement de deux variables : le niveau de la consommation d'énergie et la structure des approvisionnements énergétiques. La figure 9 présente les émissions de carbone liées à l'énergie, exprimées en émissions brutes et nettes imputables à l'utilisation des combustibles fossiles.

Les émissions varient beaucoup d'un scénario à l'autre ; la fourchette is particulièrement large dans les trois scénarios de l'hypothèse A en fonction de la dis-

Figure 9. Émissions mondiales de carbone dues à l'utilisation de combustibles fossiles, entre 1850 et 1990, et dans les scénarios de l'IIASA-CME jusqu'à 2100, en GtC

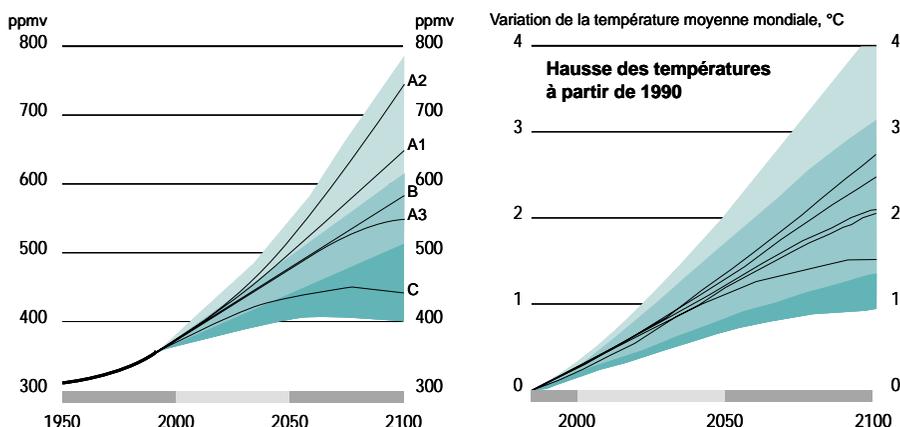


Note : Pour chaque scénario, la fourchette traduit la différence entre les émissions brutes et les émissions nettes.
Source : Auteur.

ponibilité des technologies et des ressources à long terme. Entre 1990 et 2100, les scénarios de l'hypothèse C aboutissent à moins de 540 GtC d'émissions cumulées nettes liées à l'utilisation de l'énergie. Dans les autres cas, les émissions cumulées nettes représentent 1 210 GtC dans le scénario A1, 1 490 GtC dans le scénario A2, 910 GtC dans le scénario A3 et 1 000 GtC dans l'hypothèse B³.

Il faudrait souligner que les émissions prévues dans les six scénarios sont, dans la plupart des cas, inférieures aux niveaux retenus pour les scénarios-type de «référence» ou de «poursuite de l'évolution actuelle» élaborés dans les milieux qui étudient l'évolution du climat. C'est seulement dans le scénario A2 que les émissions cumulées de carbone (1990 à 2100) dépassent celles du scénario de référence IS92a du GIEC. Dans les hypothèses A et B, les émissions cumulées de carbone donnent lieu à des estimations médianes des concentrations de CO₂ comprises entre 550 et 750 parties par millions en volume (ppmv) en 2100 (figure 10). Ce chiffre est à mettre en regard des concentrations de 280 ppmv enregistrées vers 1800 (le début de l'ère des combustibles fossiles) et des concentrations actuelles de 368 ppmv. Dans l'hypothèse B et le scénario A1, les concentrations de CO₂ avoisinent respectivement 600 et 650 ppmv en 2100. Dans le scénario A3, qui table sur le recours à la bioénergie et au nucléaire, les concen-

Figure 10. Concentrations atmosphériques de CO₂, en ppmv – évolution passée entre 1950 et 1990 et dans les scénarios de l'IIASA-CME jusqu'à 2100



Note : Le graphique à droite présente les variations de la température moyenne mondiale par rapport à 1990, en degrés Celsius. Les incertitudes (importantes) du modèle sont également indiquées.

Source : Auteur.

trations sont inférieures et se stabilisent à 550 ppmv (en supposant que la tendance à la baisse des émissions se poursuive après 2100) et dans le scénario A2, qui implique une forte intensité de consommation de charbon, elles sont supérieures et atteignent 750 ppmv (l'augmentation persistant après 2100).

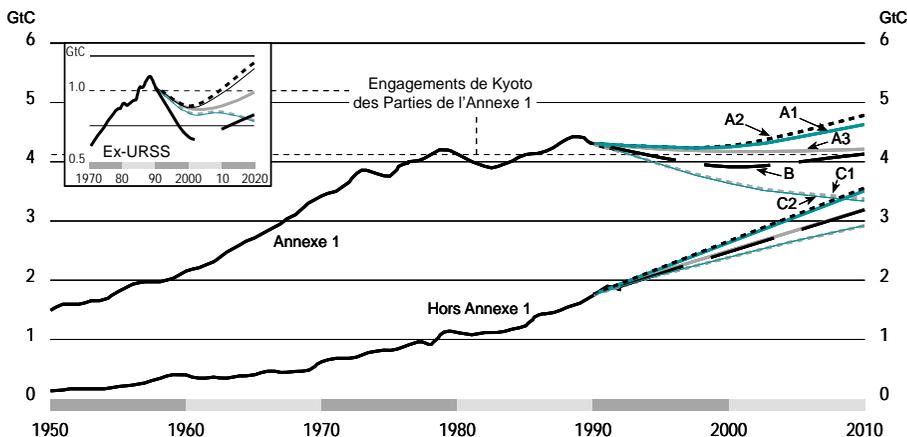
Ainsi, tous les scénarios à l'exclusion de l'hypothèse C atteignent des niveaux proches du doublement des concentrations de CO₂ de l'ère préindustrielle, qui sont la référence de la plupart des calculs de modélisation du climat. Et, encore à l'exception de l'hypothèse C, tous prévoient que les concentrations continueront de croître pendant tout le XXI^e siècle. (Le scénario A3 pourrait parvenir à une stabilisation à 550 ppmv après 2100.) Compte tenu des connaissances actuelles, si les concentrations de CO₂ atteignaient 600 ppmv à la fin du XXI^e siècle, la température moyenne mondiale pourrait augmenter de quelque 2.5 °C et l'élévation du niveau de la mer pourrait atteindre 0.5 mètre.

Malgré les grandes incertitudes qui subsistent à propos du changement climatique, les six scénarios de l'étude de l'IIASA-CME confirment tous que le secteur de l'énergie en est réellement l'un des principaux responsables. Dans les scénarios de forte croissance, le secteur de l'énergie entraînerait à lui seul de 65 pour cent (scénario A3) à 80 pour cent (scénario A2) de toutes les variations du forçage radiatif imputables aux activités humaines, notamment le déboisement, l'agriculture ainsi que la production et l'utilisation de CFC. Même dans les scénarios de l'hypothèse C, qui envisagent une politique ambitieuse, le secteur de l'énergie serait à l'origine de 45 pour cent des variations à long terme du forçage radiatif – malgré des actions draconiennes pour améliorer l'efficacité énergétique et une évolution déterminée vers des formes d'énergie à émissions nulles de carbone.

Cependant, comme le montre la figure 10, de grandes incertitudes scientifiques entourent ces estimations. En fait, les variations possibles de la température moyenne mondiale de l'hypothèse B se situent dans une fourchette si large qu'elle englobe les estimations médianes de tous les autres scénarios de l'hypothèse C jusqu'au scénario A2 (et au-delà). Cela met nettement en évidence l'un des enjeux les plus fondamentaux de la politique relative au climat. Les incertitudes scientifiques sont en fait si importantes et les intervalles de temps si longs que l'on ne peut guère indiquer d'orientations pour l'action concernant les objectifs d'émissions à court terme. Les objectifs de réduction des émissions à court terme procèdent donc encore essentiellement d'un raisonnement politique, comme le Protocole de Kyoto en donne l'exemple.

Si l'on compare les scénarios sur l'énergie et les émissions à long terme de l'IIASA-CME aux limites à court terme du Protocole de Kyoto (la figure 11), on en déduit principalement que les scénarios de l'hypothèse C sont tout à fait en conformité avec le Protocole, tandis que les scénarios A1 et A2, de forte croissance et de forte intensité de consommation de combustibles fossiles, à l'évidence, *ne le*

Figure 11. Émissions nettes de carbone liées à l'énergie, en GtC – évolution passée de 1950 à 1990 et dans les six scénarios de l'IIASA-CME jusqu'à 2010



Note : La limite globale des émissions des Parties figurant à l'Annexe 1 dont il est convenu dans le Protocole de Kyoto est également indiquée. Le graphique encadré présente les émissions en ex-Union soviétique par rapport à 1990. Les émissions de 1990 de la Fédération de Russie et de l'Ukraine sont égales aux limites applicables à ces pays au titre du Protocole de Kyoto.

Source : Auteur.

sont pas. Il est en revanche rassurant de constater que le scénario A3, de même que le scénario intermédiaire de l'hypothèse B, peuvent être en conformité avec le Protocole de Kyoto, sous réserve que tous les droits d'émission soient échangés entre les Parties de l'Annexe I (c'est-à-dire qu'il soit permis de négocier la totalité des droits de ce qu'il a été convenu d'appeler la bulle russe)⁴.

On peut en tirer une autre conclusion importante dans une perspective à long terme. Afin de s'attaquer avec succès aux problèmes de l'environnement mondial, de nouvelles formes de coopération internationale seront nécessaires. Dans un premier temps, entre les pays de l'OCDE et les pays en transition économique, mais aussi, ultérieurement, entre *tous* les pays. Sans la participation des pays en développement, les objectifs déclarés de la CCNUCC, à savoir une stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre (GES), ne peuvent pas être atteints. Le Protocole de Kyoto n'est donc qu'une première étape dans un long processus vers la maîtrise du changement climatique. Tant l'hypothèse C que le scénario A3 mettent en lumière des stratégies possibles de coopération internationale dans ce but. Dans l'hypothèse C, les politiques d'environnement sont directement liées aux questions d'équité économique internationale, ce qui donne lieu à des transferts

importants de ressources du Nord au Sud, visant un développement durable, des économies d'énergie et le déploiement de systèmes énergétiques à émissions faibles ou nulles. Le scénario A3 accorde moins d'importance à des modèles nouveaux de coopération économique internationale pour décrire plutôt une trajectoire de «transition harmonieuse» vers l'abandon des combustibles fossiles, dont l'utilisation prédomine à l'heure actuelle, à la faveur d'une évolution technologique accélérée. Cependant, là aussi, des investissements à court terme et financés d'avance sont nécessaires pour soutenir les efforts de RD-D et produire les effets d'apprentissage par la pratique dans la nouvelles technologies énergétiques qui sont nécessaires pour rendre ces technologies compétitives à long terme. Un pareil scénario pourrait devenir réalisable, par exemple, si les recettes tirées des échanges de droits d'émission au titre du Protocole de Kyoto étaient investies avec prudence dans des technologies et des infrastructures pour l'ère d'après l'énergie fossile. Plus précisément, en consacrant les recettes provenant des échanges de droits d'émission à des objectifs d'environnement à long terme de cette nature, on pourrait aussi rendre plus politiquement acceptables à court terme les échanges de droits d'émission et les transferts des ressources.

Notes

1. Cette étude, publiée sous forme de livre, est la source de tous les chiffres dans ce chapitre, sauf si une autre source est spécifiée : N. Nakićenović, a. Grubler et A. McDonald (directeurs de publication), 1998, *Global Energy Perspectives*, Cambridge University Press.
2. Les prix de l'énergie sont un facteur déterminant important à court et à moyen termes. Cependant, à long terme, la technologie et les politiques jouent un plus grand rôle, bien qu'il se produise des mécanismes de rétroaction d'une certaine ampleur, par exemple l'évolution technique induite.
3. Les émissions cumulées brutes varient entre moins de 630 GtC (dans les scénarios de l'hypothèse C) à 1 140 GtC (l'hypothèse B) à entre 1 070 (scénario A3) et 1 630 GtC (A2).
4. «La bulle russe» fait référence à la différence entre la limite prescrite par le Protocole de Kyoto (stabilisation au niveau d'émissions de 1990) et les niveaux effectifs des émissions qui ont brutalement diminué avec la dépression économique dans les pays en transition vers une économie de marché.

Bibliographie

- GRÜBLER, A. (1998),
Technology and Global Change, Cambridge University Press.
- LUTZ, W., W. SANDERSON et S. SCHERBOV (1997),
«Doubling of World Population Unlikely», *Nature*, 387 (6635), pp. 803-805.
- NAKIĆENOVIĆ, N. (1998),
«Energy Perspectives for Eurasia in the Global Context», IIASA, Laxenburg, Autriche (polycopié).
- NATIONS UNIES (1994),
World Urbanization Prospects, Division de la population, New York.

Vers un avenir énergétique durable

par

Dieter M. Imboden

École polytechnique fédérale
Suisse

Carlo C. Jaeger

Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux
Suisse

1. Introduction¹

Dans le débat actuel sur l'énergie, les prédictions apocalyptiques ont de moins en moins cours. *Grosso modo*, celles-ci s'articulaient autour de quatre grands axes : appauvrissement des réserves de combustibles fossiles, pollution radioactive résultant d'accidents dans la production d'énergie nucléaire, usage d'armes nucléaires dont la prolifération est permise par la généralisation de la production d'énergie nucléaire, et modification catastrophique du climat provoquée par l'utilisation de combustibles fossiles.

A plusieurs reprises, on a annoncé l'imminence d'une pénurie de pétrole et de combustibles fossiles, mais sans jamais en apporter la preuve. En fait, la hausse drastique des prix intervenue lors du premier choc pétrolier – considéré par certains comme le premier signe de la limite de la croissance – s'est depuis inversée et des réserves considérables ont entre-temps été découvertes. Certes, de graves accidents se sont produits dans des centrales nucléaires, notamment à Tchernobyl, mais, dans le monde entier, des milliers de personnes vivent toujours aux abords de centrales de ce type. Par ailleurs, la prolifération nucléaire constitue un problème sérieux, et nous ne parlons pas ici uniquement du nucléaire militaire, mais même les essais conduits par l'Inde et le Pakistan ont eu moins d'échos dans la presse que, par exemple, la Coupe du monde de football. Enfin, la modification du climat figure désormais en bonne place dans les questions d'environnement abordées par la diplomatie internationale, et les médias présentent l'amplification du

phénomène El Niño comme l'un des symptômes des dérèglements liés au changement climatique. Quoiqu'il en soit, ni le monde scientifique, ni l'opinion publique n'incitent actuellement les gouvernements à entreprendre une stratégie en faveur du climat mondial qui aurait pour effet de réduire les émissions de carbone au cours des décennies à venir.

Alors, faut-il en conclure que les choses ont repris leur cours normal? Les habitants d'Amérique du Nord consomment² environ 10 kilowatts (kW) d'énergie commerciale par habitant, les Européens environ 5 kW, les habitants des régions nouvellement industrialisées environ 2 kW, et la majeure partie des habitants de la planète beaucoup moins. Au plan mondial, la moyenne s'établit à 2 kW, mais elle devrait augmenter lorsque des milliards de personnes accéderont à un mode de vie «à l'américaine». D'ici cinquante ans, la moyenne mondiale pourrait bien atteindre 3 kW par habitant, pour une population multipliée par deux, si bien que la consommation d'énergie commerciale devrait être multipliée par trois par rapport à aujourd'hui.

Actuellement, 95 pour cent de la production d'énergie commerciale est tirée des combustibles fossiles. Si le pétrole tient toujours un rôle central, son remplacement graduel par le gaz est déjà en cours. A long terme, le charbon et d'autres combustibles fossiles pourraient prendre le relais. En revanche, il paraît peu probable que l'on puisse ramener le coût des autres sources d'énergie commerciale à un niveau qui leur permette de concurrencer les combustibles fossiles. Par conséquent, le cours normal des choses pourrait bien se caractériser par une dépendance durable vis-à-vis des combustibles fossiles. Puis dans un avenir plus lointain, une réorientation vers d'autres sources telles que l'énergie solaire ou la fusion, etc., pourrait intervenir.

Le sens commun tient pour acquis que ces évolutions seront en grande partie induites par des hausses de prix traduisant la raréfaction des principales sources d'énergie. Selon ce point de vue, à un certain moment le prix du pétrole ne peut qu'augmenter du fait de l'épuisement des réserves aisément exploitables, avec en parallèle une amélioration des technologies d'exploitation des autres réserves et l'affirmation de la compétitivité des autres sources, qu'il s'agisse du gaz, de la biomasse ou d'autres. Dans ce monde à la Panglosse, les crises énergétiques sont révolues; on peut faire confiance à la main invisible du marché pour assurer l'approvisionnement énergétique à court et à long terme.

Cette étude se propose néanmoins de démontrer que cette approche n'est pas envisageable, et ce pour deux raisons. En effet, elle aurait pour conséquence, premièrement, de limiter considérablement le degré de liberté du système mondial de l'énergie au cours des prochaines années, ce qui l'exposerait à de graves perturbations, et, deuxièmement, de laisser échapper d'immenses débouchés

commerciaux, qui peuvent se concrétiser si le système énergétique mondial s'achemine sur une trajectoire différente.

Dans la deuxième section, nous analyserons les liens entre le système énergétique mondial actuel et l'environnement. Le système énergétique recouvre tous les aspects de la fourniture et de la consommation d'énergie. Les aspects liés à l'environnement seront abordés dans le contexte général de la durabilité, c'est-à-dire au regard de la compatibilité à long terme des activités humaines avec les dimensions écologiques, économiques et sociales. Les carences seront classées en fonction de leur importance géographique et temporelle, mais aussi par rapport à de possibles stratégies de prévention.

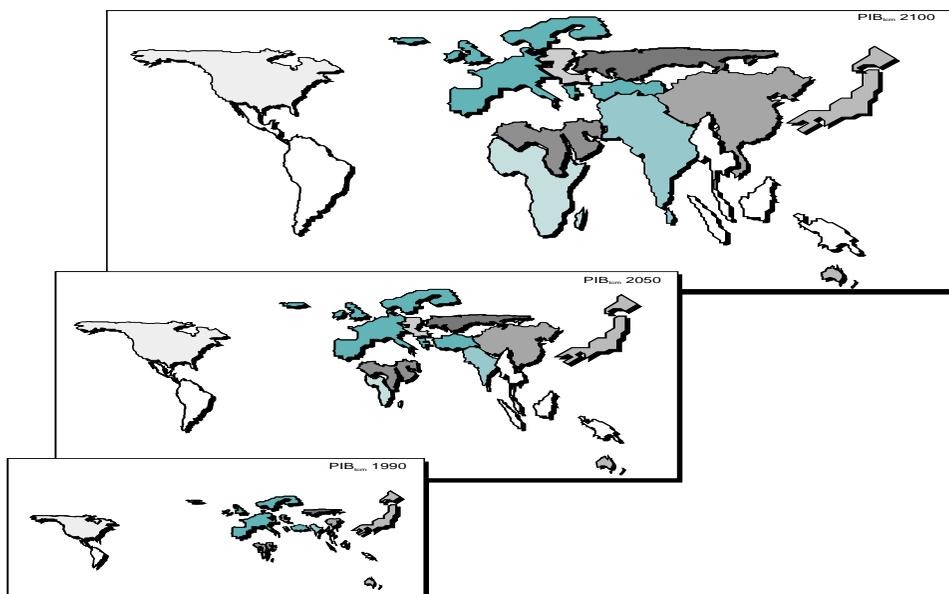
Dans la troisième section, nous comparerons les besoins énergétiques à long terme de la planète aux contraintes qu'imposent à long terme les conditions d'un avenir énergétique durable. Nous verrons alors que, pour importantes qu'elles soient, les évolutions graduelles susceptibles d'intervenir (par exemple, amélioration du rendement et de la « propreté » de certaines méthodes de production et de consommation d'énergie) ne permettront pas à elles seules de parvenir à un système énergétique durable dans les 50 prochaines années.

La quatrième section traitera du potentiel et des priorités des évolutions non marginales. Un niveau durable de consommation d'énergie par habitant sera ainsi défini et nous verrons comment il est possible d'assurer le niveau de production correspondant. L'analyse portera sur les questions d'environnement, mais aussi sur les facteurs socio-économiques, dans l'esprit de la définition retenue pour la notion de durabilité, et présentera certaines actions possibles qui dissocient – dans certaines limites – le niveau de consommation énergétique de celui de la production industrielle, c'est-à-dire de la richesse et de la qualité de la vie.

2. Aspects environnementaux du système énergétique actuel

Entre 1950 et 1992, la consommation mondiale d'énergie primaire commerciale est passée de 76 500 à 311 000 PJ, c'est-à-dire qu'elle a été multipliée par quatre (figure 1). Entre 1950 et 1968, le taux de croissance annuel moyen s'établissait à 4.9 pour cent, avant de tomber à 2.4 pour cent en 1992. Cette année-là, 95 pour cent de la consommation d'énergie primaire était basée sur les combustibles fossiles, le nucléaire et l'hydroélectricité représentant chacun 2.5 pour cent³. S'agissant des autres sources d'énergie (biomasse et énergies solaire, éolienne, marémotrice et géothermique), leur contribution est négligeable à l'échelon mondial ou elles ne sont pas prises en compte comme des ressources commerciales (c'est le cas, par exemple, du bois de chauffage dans les pays en développement); au total, elles majorent de 6 pour cent la consommation énergétique mondiale (tableau 1).

Figure 1. Évolution de la répartition géographique de richesses économiques, hypothèse B de l'IIASA-CME



Note : Les superficies des régions du monde sont pondérées proportionnellement au niveau de leur PIB de 1990 (exprimé aux taux de change du marché [tm]).

Source : Auteur.

La consommation totale moyenne d'énergie (commerciale et non commerciale) par habitant varie grandement entre les pays développés et les pays en développement. Selon les éléments du tableau 1, l'énergie non commerciale (essentiellement de l'énergie renouvelable) peut atteindre 90 pour cent de la consommation totale (Ethiopie); toutefois, sa part est significative uniquement dans les pays où la consommation d'énergie par habitant est inférieure à 1 000 watts. Dans ces pays, du fait du caractère limité des ressources énergétiques non commerciales, toute augmentation substantielle de la demande énergétique ne peut être satisfaite que par l'énergie commerciale.

La production, la distribution et la consommation d'énergie produisent de nombreux impacts sur l'environnement, de gravité extrêmement variable. Certains d'entre eux sont inhérents au système, mais d'autres peuvent être évités par l'adoption de mesures techniques et structurelles appropriées. Si ces mesures sont de nature à entraîner une hausse sensible du prix de la ressource concernée, les impacts qui peuvent être évités ne constituent pas pour autant un obstacle jugé

Tableau 1. **Consommation annuelle mondiale d'énergie (1993)^a**

	Total énergie commerciale	Énergie non commerciale ^c	Variation depuis 1973 de la consommation d'énergie commerciale	Par habitant	
				Total	Évolution depuis 1973
	(en EJ/an) ^b	(% du total)	(%)	(en watts) ^d	(%)
Monde	345.0	6	+49	2 000	+6
Afrique	13.6	35	+144	650	+41
Éthiopie	0.46	90	+104	290	
Nigeria	17.0	59	+420	530	+221
Asie	104.7	9	+185	990	+82
Chine	31.7	6	+179	860	+110
Inde	12.1	23	+258	420	+128
Japon	17.5	~0	+41	4 600	+24
Sri Lanka	0.17	55	+71	290	+15
Europe	109.6	<1	+90	4 800	+73
États-Unis	82.7	1	+13	10 300	-7
Canada	9.3	1	+47	10 400	+12

a) *World Resources 1996/97.*

b) 1EJ = 10¹⁸ joules.

c) Combustibles traditionnels tels que le bois de chauffage, les déjections animales, etc.

d) 1 watt correspond à 32 millions de joules par an ou 8.8 kWh par an.

insurmontable au regard de l'exploitation future de la ressource. Par ailleurs, il est important de faire la distinction entre les incidences locales et mondiales. Le tableau 2 récapitule les impacts les plus importants des principales ressources énergétiques actuelles (combustibles fossiles, énergie nucléaire, hydroélectricité). On pourrait d'ailleurs établir un tableau du même type présentant les impacts classés non pas en fonction des ressources énergétiques, mais selon les activités humaines associées à la consommation d'énergie (logement, alimentation en eau et en produits alimentaires, déplacements, production de biens de consommation, etc.).

Le concept du développement durable, qui bénéficie d'un large soutien (voir, par exemple, OCDE, 1977), permet de formuler un certain nombre de suppositions sur la dimension environnementale du système énergétique mondial actuel. Au regard de la durabilité, les points suivants méritent une attention particulière :

a) Le système est essentiellement fondé sur des ressources non renouvelables (combustibles fossiles).

b) Le déséquilibre majeur entre la répartition géographique des principales ressources pétrolières et gazières et la distribution actuelle de la consom-

Tableau 2. **Impacts sur l'environnement du système énergétique actuel**

	Impacts intrinsèques		Impacts évitables	
	Plan mondial	Plan local	Plan mondial	Plan local
Combustibles fossiles				
Charbon	CO ₂	Exploitation minière (surface)	Pluies acides	Pollution atmosphérique
Pétrole	CO ₂		Pollution des océans	Pollution atmosphérique, ressources en eau locales
Gaz	CO ₂		Gaz à effet de serre dus aux fuites des pipelines	
Hydro-électricité		Écosystèmes aquatiques/concurrence avec les autres modes d'utilisation de l'eau ^a		Écosystèmes aquatiques/concurrence avec les autres modes d'utilisation de l'eau
Énergie nucléaire	Non-prolifération	Accidents, stabilité politique		Déchets radioactifs

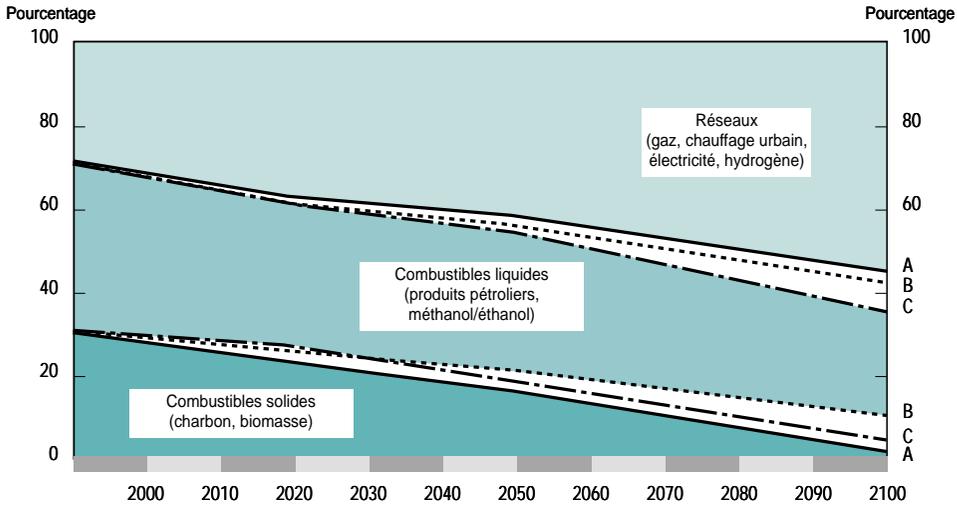
a) Si une part substantielle de la capacité totale estimée de la production d'hydroélectricité (soit environ 50 000 PJ par an) était effectivement exploitée, l'impact sur les écosystèmes aquatiques deviendrait un véritable problème au plan mondial. Actuellement, la production annuelle représente 7 600 PJ par an.

mation laisse entrevoir une menace latente pour la stabilité du système économique mondial (figure 2).

- c) Le système est lié de façon inhérente à l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère et, donc, à l'accélération de la perturbation du climat mondial. Les conséquences locales et mondiales de cette perturbation, qui restent encore mal connues dans le détail, ne pourront sans doute jamais faire l'objet de prévisions totalement fiables.
- d) La consommation énergétique moyenne par habitant varie selon un facteur de 20 entre les pays industrialisés et les pays en développement (tableau 1).
- e) Une solution convaincante et politiquement acceptable en matière de traitement et de stockage des déchets nucléaires reste toujours à trouver, malgré les efforts coûteux menés avec persévérance par différents pays. Si l'énergie nucléaire venait à jouer un rôle majeur dans le futur système énergétique mondial, ce problème deviendrait véritablement aigu.

Un rapide développement de chacun de ces points est présenté ci-après.

Figure 2. Consommation finale mondiale d'énergie sous forme de combustibles solides et liquides, et par réseaux



Note : Les parties grisées qui se superposent correspondent aux variantes dans les hypothèses A, B et C.
 Source : Auteur.

Combustibles fossiles, des ressources non renouvelables

Les décennies écoulées depuis la publication du premier rapport du Club de Rome, *Halte à la croissance*, nous ont appris que les limites des ressources n'étaient pas absolues et que les découvertes pouvaient dépasser en importance les ressources connues déjà exploitées. Mal interprété, cet enseignement pourrait à tort donner à penser que les ressources tels que les combustibles fossiles sont éternelles. Or, même sur la base d'un niveau de production constant, les réserves connues et économiquement exploitables de gaz et de pétrole ne devraient pas durer plus d'une cinquantaine d'années (figure 2). Dans le cas du charbon, les réserves devraient durer au minimum deux siècles, mais peut-être moins si, comme le prévoient plusieurs modèles, la consommation d'énergie augmente. Les estimations des ressources disponibles comportent inéluctablement des incertitudes considérables – or, supposer que toutes les incertitudes seront dissipées de manière optimale est rarement une manière avisée d'envisager les risques⁴.

Compte tenu du fait que nos besoins énergétiques actuels découlent des infrastructures existantes (bâtiments, réseaux de transport, unités de production,

etc.), toute évolution fondamentale du système énergétique mondial ne peut qu'être extrêmement lente. En outre, le niveau absolu de la consommation mondiale d'énergie est aujourd'hui près de deux fois supérieur à ce qu'il était aux alentours de 1970, au moment de la publication de *Halte à la croissance*. Or, à un niveau de consommation supérieur, l'importance relative de toute nouvelle ressource recule en règle générale. Autrement dit, à mesure que le cours normal des choses se poursuit, il devient de plus en plus difficile de faire évoluer la situation face à de nouveaux défis ou de nouvelles possibilités. Plus le niveau de consommation est élevé, plus courte est la «période de pratiques sûres», c'est-à-dire le temps pendant lequel la ligne de conduite (les pratiques) peut être maintenue sans problème majeur. Or, le principe d'une période constante de pratiques sûres suppose que l'élaboration d'autres stratégies et le développement de nouvelles ressources soit au minimum en phase avec l'exploitation des ressources et des réserves de terres (Imboden, 1993).

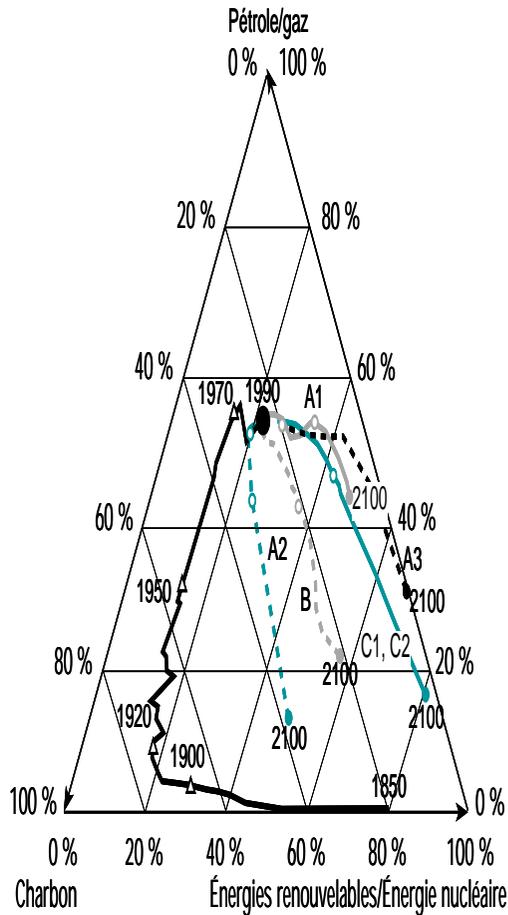
Déséquilibre entre la distribution de la consommation et la répartition géographique des ressources

Selon la figure 2, il semble que l'on puisse bénéficier, à l'échelon mondial, d'un délai suffisant pour développer un nouveau système énergétique mondial – à condition de se mettre à la tâche immédiatement. A l'échelon régional, la situation paraît beaucoup plus inquiétante. Dans la plupart des pays industrialisés dotés de réserves de pétrole et de gaz, ces ressources devraient durer uniquement de 10 à 20 ans. Il est notoire que les estimations concernant les réserves de combustibles fossiles donnent lieu à controverse, mais il a été solidement démontré dans des publications récentes qu'il sera à l'avenir de plus en plus difficile de découvrir des réserves pétrolières bon marché, le gaz ménageant un sursis de quelques décennies seulement. La situation est moins grave pour ce qui est du charbon, mais tout repli majeur sur ce combustible entraînerait une hausse significative de la production de CO₂ atmosphérique par unité d'énergie (voir ci-après).

Augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère

La figure 3 présente les données de base concernant l'impact des activités humaines sur la concentration de CO₂ dans l'atmosphère. Actuellement, les émissions de CO₂ représentent au total environ 22 milliards de tonnes par an. Il est probablement encore trop tôt pour fixer de manière décisive un objectif d'émissions écologiquement viable. Selon les études du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), cependant, le total des émissions doit commencer à baisser dans les deux prochaines décennies si l'on veut atteindre l'objectif d'une stabilisation des niveaux de CO₂ dans un ou deux siècles. Les

Figure 3. Évolution de la structure des énergies primaires



Note : Parts du pétrole et du gaz, du charbon et des sources non fossiles, en pourcentage, de 1850 à 1990 (triangles) et dans les six scénarios de l'IIASA-CME jusqu'en 2050 (losanges) et 2100 (cercles fermés).

Source : Auteur.

émissions de CO₂ par habitant devront reculer d'autant plus fortement que la population mondiale continuera d'augmenter au cours de cette période.

Par exemple, si le niveau à long terme de CO₂ atmosphérique ne doit pas dépasser 450 ppmv (soit un niveau environ 60 pour cent supérieur à celui de l'ère pré-industrielle de 280 ppmv), il faut que les émissions totales reculent à environ 10 milliards de tonnes en 2050 (tableau 3). Avec une population attendue de 10 milliards de personnes, la production annuelle de CO₂ par habitant serait d'environ une tonne (contre près de quatre aujourd'hui) – soit une consommation énergétique moyenne par habitant de quelque 300 watts si toute l'énergie était produite à partir de charbon, ou de 600 watts si elle l'était à partir de gaz. Or, la plupart des modèles tablent sur des émissions totales de CO₂ multipliées par deux ou plus. Cet écart illustre le dilemme qu'engendre le problème de la modification du climat.

De toute évidence, la planète risque fort d'être exposée à un changement climatique provoqué par l'homme, mais il est également probable que cette situation n'entraînera pas de grandes conséquences économiques dans les pays de l'OCDE au cours des prochaines décennies. Toutefois, on pourrait s'attendre que des évé-

Tableau 3. Le CO₂ dans le monde

Émissions de CO ₂ par habitant et par an ^a				
Moyenne mondiale	4 tonnes de CO ₂ par habitant et par an			
États-Unis	21			
Pays de l'OCDE	12			
Inde	0.7			
Total des émissions 1992 :	22 000 millions de tonnes par an			
Scénario Green 2050 :	67 000			
Scénario de croissance soutenable 2050 :	10 000			
État stabilisé (après 2100) :	7 000			
Émissions autorisées par personne et par an ^b				
	Population	Émissions	Production d'énergie possible à base de	
	(en milliards)	(en tonnes par habitant et par an)	Charbon (watts/personne)	Gaz (watts/personne)
Croissance soutenable 2050	10	1.0	300	600
État stabilisé 2100	12	0.6	200	400

a) Source : OCDE (1995), *Réchauffement planétaire. Dimensions économiques et réponses des pouvoirs publics*, et AIE, Statistiques énergétiques, www.iea.org.

b) Source : « Climate Change 1995 », Rapport du Groupe de travail GIEC, OMM/PPNUE.

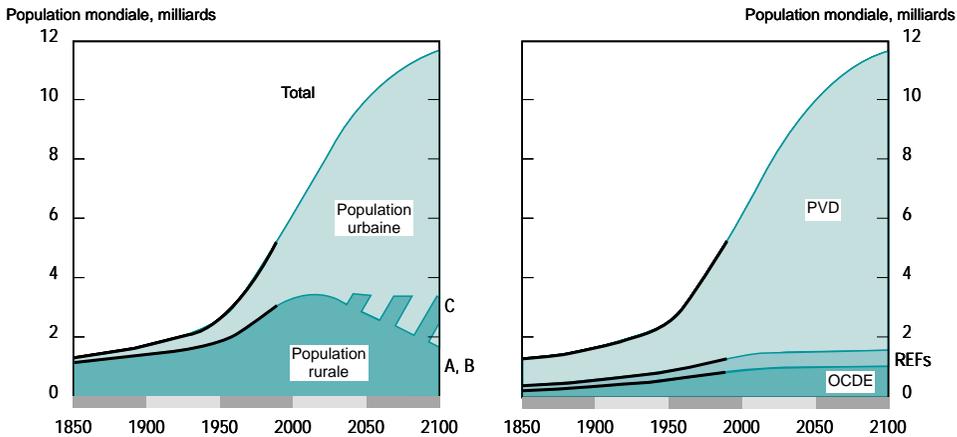
nements climatiques d'une ampleur certaine déclenchent au sein du public une réponse bien plus marquée que celle produite, par exemple, par l'ESB. Au cours du siècle prochain, dans l'hypothèse d'une stratégie inchangée, l'augmentation du niveau des mers, la désertification et de graves perturbations des régimes climatiques mondiaux risquent fort de toucher de vastes zones de la planète. Dans bien des cas, les conséquences directes de la consommation de combustibles fossiles seront détectables uniquement lorsqu'il sera trop tard pour les éviter⁵.

Hétérogénéité des modes actuels de consommation d'énergie dans le monde

Le taux moyen de consommation d'énergie par habitant varie grandement selon les pays (tableau 1), et il en va de même des émissions de CO₂ (tableau 3). La figure 4, qui présente les émissions de deux pays très différents, l'Inde et la Suisse, donne une illustration graphique de cette situation. Cela étant, il est très improbable que ces écarts considérables perdurent. Par conséquent, pour l'avenir, l'alternative est simple. Soit la consommation mondiale d'énergie est multipliée par trois ou plus à mesure que les pays en développement portent leur consommation au moins au niveau actuel des pays européens (environ 5 kW par habitant), soit les pays industrialisés réduisent significativement leurs niveaux actuels de

Figure 4. Population mondiale, évolution passée de 1850 à 1990 et projection démographique médiane à l'horizon 2100 utilisée dans les scénarios de l'IIASA-CME

A gauche : population rurale-population urbaine ; à droite : par macrorégion



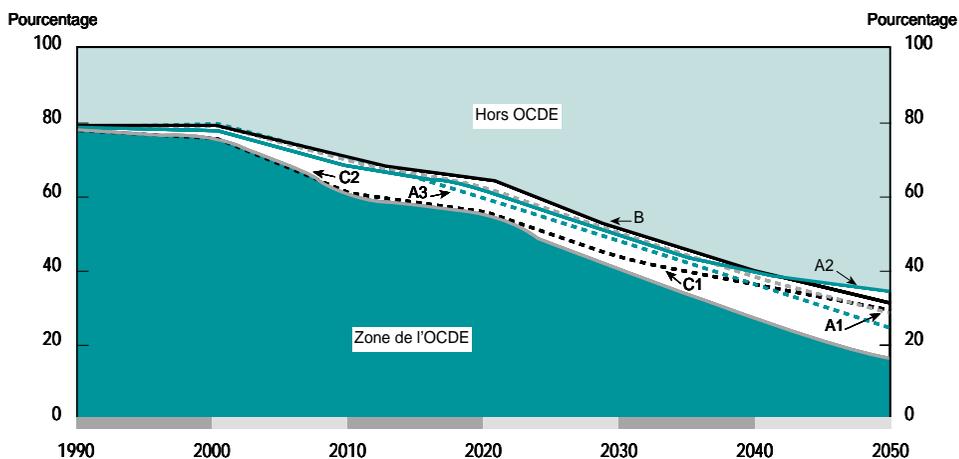
Source : Auteur.

consommation, par exemple de 50 pour cent au moins. Les deux options comportent des risques : la première pourrait mettre en évidence les limites de la capacité d'adaptation de la nature et l'impossibilité de modifier rapidement le système énergétique mondial, et la seconde peut nuire à la mise en œuvre des mesures nécessaires pour transformer le système énergétique mondial.

Déchets radioactifs

Alors que les experts continuent de faire valoir que l'élimination des déchets nucléaires est techniquement faisable, les solutions véritables se font toujours attendre. Il se peut effectivement que ce blocage soit dû essentiellement à des obstacles politiques et sociaux, mais les obstacles techniques n'en sont pas moins impressionnants. Dans l'intervalle, des isotopes radioactifs impliqués dans le cycle du combustible nucléaire, et notamment le plutonium, s'accumulent et le volume des déchets radioactifs s'accroît (figure 5). Selon le Worldwatch Institute (Brown *et al.*, 1995), les réacteurs nucléaires civils ont produit à eux seuls quelque 50 tonnes de plutonium en 1994, soit une quantité suffisante pour construire plus de 6 000 bombes atomiques. De toute évidence, il est extrêmement urgent de s'attacher à trouver une solution pour le contrôle à long terme de ces matières, qui

Figure 5. Parts (en pourcentage) de pays Membres et non membres de l'OCDE dans les échanges mondiaux de produits énergétiques entre 1990 et 2050, correspondant aux six scénarios de l'IIASA-CME



Note : La partie blanche où se superposent les différentes courbes fait ressortir les variantes selon les scénarios.
 Source : Tiré de la base de données pour les scénarios de l'IIASA-CME, accessible sur l'Internet (<http://www.iiasa.ac.at>).

menacent de manière croissante le principe de non-prolifération des matières susceptibles de permettre la fabrication d'armes nucléaires.

Ces cinq problèmes sont autant de questions clés qui donnent à penser que le système énergétique actuel n'est pas viable et qu'une réorientation dans le sens de la durabilité est aujourd'hui une véritable nécessité.

Néanmoins, il convient également de noter que certains de ces problèmes constituent, à l'heure actuelle, une menace moins grande que certains autres problèmes localisés liés à la consommation d'énergie. La pollution atmosphérique (essentiellement imputable à la circulation routière) est le plus grave d'entre eux dans les zones urbaines en rapide expansion des pays en développement.

L'extraction à ciel ouvert du charbon, qui représente aujourd'hui 27 pour cent de l'ensemble des activités minières liées au charbon, peut exercer localement des contraintes importantes sur les écosystèmes. Actuellement, environ 300 kilomètres carrés sont chaque année dévolus à l'extraction du charbon. Ensuite, il faut entre 20 et 30 ans pour que ces surfaces soient à nouveau cultivées.

Localement, la production hydroélectrique peut perturber les écosystèmes aquatiques, mais aussi les autres usages de l'eau, tels que l'alimentation en eau de boisson et l'irrigation.

Avec une demande moyenne en eau de 10 mètres cubes par kilowattheure produit, la production hydroélectrique, actuellement de 7 600 PJ par an, correspond donc à une consommation annuelle d'eau de 17 000 milliards de mètres cubes⁶, soit 40 pour cent des précipitations reçues chaque année par les terres émergées. Par ailleurs, selon les estimations, 15 pour cent seulement du total de la capacité hydroélectrique mondiale est aujourd'hui développée, et la production annuelle d'énergie pourrait passer à 50 000 PJ. Dans un tel contexte, un mètre cube d'eau reçu sur les terres émergées serait utilisée près de trois fois dans la production d'hydroélectricité avant d'atteindre les mers ou d'être évaporé. A un tel niveau d'exploitation, l'hydroélectricité prendrait inévitablement des dimensions mondiales et entraînerait, sous la pression conjuguée d'une hausse des besoins en eau pour l'irrigation, une modification profonde de l'actuel régime hydrologique mondial.

La production de pétrole et de gaz accroît encore les risques pour l'environnement. En effet, environ 0.08 pour cent de la production annuelle de pétrole brut se perd dans l'environnement, notamment dans l'eau. Cela correspond à un volume de 3 millions de tonnes par an, soit l'équivalent du déversement de pétrole que représentent toutes les grandes marées noires survenues jusqu'à présent. Par ailleurs, les pertes survenant dans le cadre de la production et de la distribution de gaz naturel ont une incidence réelle sur la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, puisqu'elles représentent environ 9 pour cent des

rejets atmosphériques de méthane, ce qui correspond à près de 2 pour cent du potentiel d'effet de serre des activités humaines.

3. Vers un avenir énergétique durable – besoins et limites

Dans ce contexte, quelles sont les perspectives d'une transition vers un système énergétique durable? La figure 6 présente l'évolution dans le temps de certains indicateurs clés entre 1990 et 2050, établie à l'aide du modèle Green de l'OCDE. Il en ressort que la demande totale d'énergie devrait augmenter de son niveau actuel de 300 EJ environ par an à plus de 1 000 EJ par an. Ce développement s'accompagnera d'un élargissement du fossé qui existe déjà entre la consommation énergétique par habitant des pays industrialisés et celle des pays en développement. Dans ces derniers, la consommation par habitant devrait progresser de 20 pour cent à environ 100 GJ par habitant et par an (soit environ 3 000 watts par habitant). Dans les pays industrialisés, elle devrait en revanche être multipliée par deux pour dépasser les 400 GJ par habitant et par an (12 000 watts par habitant), soit un niveau supérieur à celui enregistré aujourd'hui aux États-Unis.

A l'évidence, toute prévision de la demande d'énergie s'accompagne implicitement d'une estimation des prix de l'énergie. Or, sur la base d'une demande bien moindre et de prix bien plus élevés, il paraît très simple d'envisager un avenir différent. De plus, outre les prix, les technologies disponibles et les modes de consommation dominants peuvent eux aussi varier. En tout état de cause, il est indispensable de réfléchir de façon plus approfondie à la perspective d'une consommation énergétique mondiale de 1 000 EJ par an en 2050.

Serait-il possible de répondre à une telle demande d'une manière durable? Actuellement, plus de 90 pour cent de l'énergie fournie est produite à base de combustibles fossiles. Pour jouer un rôle significatif à un niveau de consommation énergétique de 1 000 EJ par an, toute nouvelle ressource énergétique doit offrir un potentiel de production de plusieurs centaines d'EJ par an – niveau bien supérieur à ceux que l'on pourrait atteindre avec des sources d'énergie telles que l'énergie éolienne, la géothermie ou les formes d'énergie non commerciale. A une telle échelle, il n'y a fondamentalement que trois options : les combustibles fossiles, l'énergie nucléaire et l'énergie solaire, ou toute combinaison des trois. L'exploitation de la biomasse est comprise dans l'option solaire. Nous analyserons chacune d'elles tant du point de vue du potentiel des ressources que de l'impact sur l'environnement qu'elles auraient à ce niveau de production.

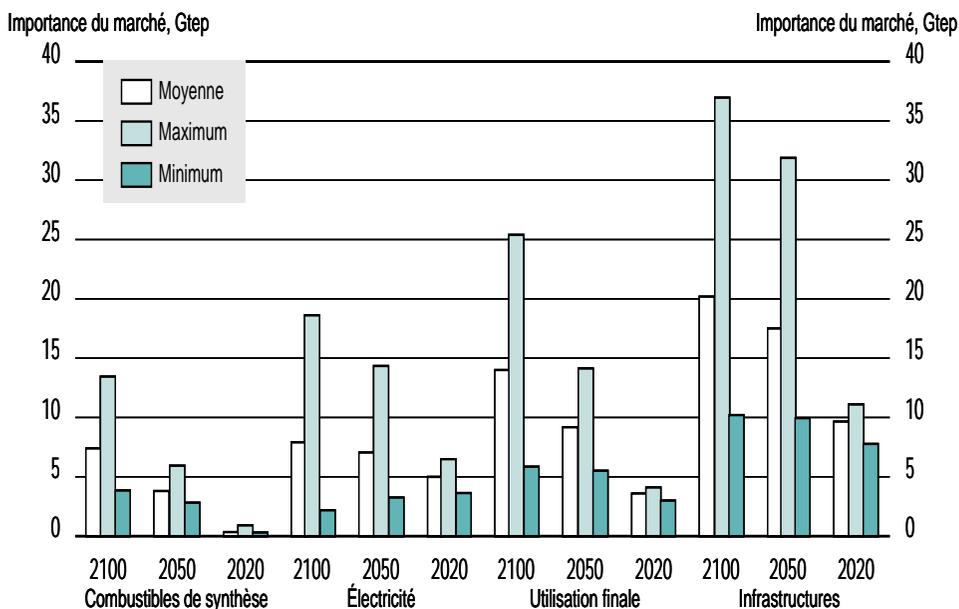
L'option combustibles fossiles

Selon le rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), il faudra à un moment donné au cours du siècle prochain que les émissions de CO₂ toujours en augmentation (figure 3) se stabilisent, puis

retombent à un niveau bien inférieur à celui d'aujourd'hui, qui est d'environ 22 000 millions de tonnes par an. Sur cette question, les seuls points de divergence portent sur le moment du début de la baisse et le niveau maximal que devront en définitive atteindre les émissions totales. La figure 7, qui présente deux scénarios extrêmes, le « maintien du statu quo » et la « croissance durable », montre l'éventail complet des possibilités. Le premier scénario prend en compte les engagements pris par les pays industrialisés à la conférence de Kyoto en 1997, concernant la réduction de leurs émissions atmosphériques de CO₂.

Au vu de cette figure, plusieurs conclusions peuvent être tirées. Tout d'abord, les combustibles fossiles conserveront un rôle de premier plan pendant encore

Figure 7. Potentiel commercial mondial pour quatre catégories de technologies énergétiques : production de combustibles de synthèse, centrales électriques, nouveaux dispositifs d'utilisation finale de l'énergie et infrastructures énergétiques



Note : Minimums, maximums et moyennes dans les six scénarios de l'IIASA-CME, en 2020, 2050 et 2100, en Gtep.

Source : Auteur.

plusieurs décennies. Toutefois, si l'on envisage sérieusement l'objectif défini par le GIEC, la consommation de combustibles fossiles devra, à un moment ou un autre entre 2020 et 2050, être ramenée à des niveaux représentant au maximum la moitié des niveaux actuels. Or, si la consommation mondiale d'énergie connaît la croissance prévue, il faudra, à partir de 2030 environ, que l'on puisse faire appel à d'autres ressources pour couvrir le gros de ces besoins.

Faute d'une telle évolution, et compte tenu des limites des ressources en gaz et pétrole, l'option des combustibles fossiles nous ramènera inévitablement au charbon. Or, sachant que, pour une quantité donnée d'énergie produite, le charbon émet deux fois plus de CO₂ que le gaz et 50 pour cent de plus que le pétrole, cette option pourrait bien déboucher sur une augmentation disproportionnée des émissions de CO₂ dans l'atmosphère. Dès lors, la question qui se pose est de savoir si des solutions permettant d'employer le charbon sans rejets massifs de CO₂ dans l'atmosphère pourront être mises au point. Plusieurs ébauches de solutions techniques existent déjà, mais il reste à savoir si ces concepts sont applicables lorsqu'il s'agit de traiter 20 000 millions de tonnes de CO₂ par an ou plus.

L'option nucléaire

Le tableau 4 présente les conditions limites pour l'option nucléaire. Les analyses optimistes tablent sur une puissance installée d'origine nucléaire comprise entre 1 100 et 1 800 GWe⁷ en 2050, soit une capacité entre trois et cinq fois supérieure à celle d'aujourd'hui. Toutefois, comme l'indique la figure 6, la demande totale d'énergie devrait dans le même temps être multipliée par trois⁸. Par conséquent, au cours des cinquante prochaines années, la part relative de l'énergie nucléaire devrait rester constante ou, au plus, progresser de 100 pour cent. Dans tous les cas, dans une situation inchangée, la contribution du nucléaire à la satisfaction de la demande d'énergie devrait rester modeste en 2050.

Tableau 4. **L'option nucléaire**

	1994	2050
Nombre de centrales nucléaires	431	12 000 ^a
Puissance installée	350 GW _e	12 000 GW _e ^b
Production d'électricité	270 GW _e	10 000 GW _e
Puissance prévue		1 100 à 1 800 GW _e

a) L'entretien d'un parc mondial de 12 000 centrales d'une durée de vie de 40 ans imposerait chaque année le remplacement de 300 centrales.

b) Correspond à la consommation totale d'énergie en 1995 (310 EJ = 310 × 10¹⁸ joules) ;
GW_e = 10⁹ watts d'électricité.

En revanche, pour que le nucléaire devienne une composante majeure de l'offre d'énergie, en atteignant par exemple une production annuelle d'électricité de l'ordre de 300 EJ (correspondant à une puissance moyenne de 10 TW), le nombre des centrales nucléaires devrait être multiplié par 30, pour un total de 12 000 centrales. Avec une durée de vie estimée de 40 ans, quel que soit le type de centrale, il faudrait donc remplacer chaque année quelque 300 centrales pour maintenir la capacité de production. Dans ce contexte, les réserves connues d'uranium ne dureraient pas plus d'une dizaine d'années, à moins que l'on ne remplace d'ici là les réacteurs actuels par des surgénérateurs, qui permettent de multiplier par 50 à 60 le potentiel énergétique de l'uranium. A terme, une réorientation vers la fusion s'imposerait, même s'il est peu probable que cette technologie soit disponible avant les années 2025 à 2045, si d'ailleurs elle le devient jamais. Par ailleurs, la production de déchets radioactifs, la disponibilité d'isotopes permettant de construire des bombes nucléaires, et les risques d'accidents, qui statistiquement surviennent régulièrement, progresseraient en proportion du nombre de nouvelles centrales. Si l'on acceptait ces dangers comme étant inhérents à un système énergétique souhaitable, en raison de leurs conséquences, l'énergie nucléaire deviendrait beaucoup plus onéreuse que les combustibles fossiles.

L'option solaire

L'énergie solaire au sens large est celle qui suscite les plus grandes attentes. Cette option recouvre le développement des biocombustibles, l'installation de cellules solaires pour la production d'électricité et la construction de capteurs héliothermiques pour la production de chaleur à basse température (par exemple, pour le chauffage de locaux). Par endroits et dans certains pays, l'énergie solaire représente assurément une méthode durable et extrêmement prometteuse de production d'énergie. Toutefois, nous nous intéressons ici à la production annuelle de 1 000 EJ d'énergie commerciale et, à cette échelle, la situation est loin d'être simple.

Le tableau 5 présente les flux d'énergie solaire au plan mondial. Ce sont les capteurs solaires à basse température (jusqu'à 50 °C), utilisables pour des besoins tels que le chauffage de locaux et la production d'eau chaude, qui offrent les meilleures perspectives de gains énergétiques. En outre, cette application, qui n'a aucune incidence négative sur l'environnement, pourrait s'imposer comme une composante essentielle de la combinaison énergétique de certains pays. Cependant, à l'échelle mondiale, l'énergie solaire à basse température ne représente qu'une petite partie du volume total d'énergie dont il est ici question.

Une autre possibilité d'utilisation de l'énergie solaire consisterait à exploiter la biomasse, sous la forme soit de combustibles végétaux soit de bois. Selon les informations présentées dans le tableau 5, les zones forestières existantes sont

Tableau 5. Flux d'énergie solaire au plan mondial et utilisation potentielle à grande échelle

	Par unité de surface terrestre (en watts par m ²)	Total (10 ¹² watts)
Rayonnement solaire total à la surface de la terre	240	122 000
Consommation mondiale d'énergie commerciale (1992 : 310×10^{18} J par an)	0.02	10
Demande énergétique physiologique humaine (100 watts par personne)		0.6
Production primaire brute biologique		
Total (terres + océans)	0.25	130
Terres	0.44 ^a	65
Production d'énergie solaire		
Cellules photovoltaïques	3 à 6 ^b	
Capteurs solaires à basse température	30 à 60	
Biomasse : Combustibles végétaux	1 à 2	
Bois	0.1 à 0.2	
Surfaces requises pour couvrir la demande énergétique actuelle (10×10^{12} watts) :		
Cellules photovoltaïques (5 watts/m ²) :	2×10^6 km ²	
Combustibles végétaux (1.5 watt/m ²) :	6.7×10^6 km ² (46 % des terres cultivées)	
Bois (0.15 watt/m ²) :	67×10^6 km ² (160 % des terres boisées)	
a) Terres émergées hors Antarctique (130 x 106 km ²).		
b) En moyenne, 1 m ² de cellules solaires produit de 10 (latitudes médianes) à 20 watts (basses latitudes). Dans les grandes centrales solaires, 1 m ² de cellules solaires occupe un espace d'environ 3 m ² .		

insuffisantes pour répondre à la demande actuelle en énergie, et la solution qui consisterait à cultiver spécifiquement des combustibles végétaux mobiliserait près de la moitié des terres agricoles existantes. De toute évidence, cette solution ne peut être envisagée : avec une croissance démographique mondiale toujours à la hausse, il serait désastreux que les pays les plus pauvres négligent les besoins nutritionnels de leur population pour exporter des combustibles végétaux à la seule fin de répondre aux besoins énergétiques des pays riches. En outre, compte tenu des problèmes d'approvisionnement en eau, la concurrence entre les combustibles végétaux et la production de produits agricoles alimentaires prendrait un tour dramatique : les prix des produits alimentaires augmenteraient spectaculairement et de nombreux pays en développement seraient dans l'impossibilité de nourrir leur population.

Les piles photovoltaïques produisent moins d'électricité par unité de surface que les capteurs héliotechniques, mais leur utilisation est plus souple. Une surface de 2 millions de kilomètres carrés permettrait de couvrir intégralement la demande

actuelle d'énergie commerciale et, du point de vue technique, rien ne donne à penser que cela ne soit pas réalisable dans les cinquante prochaines années. Toutefois, l'électricité produite à partir de piles solaires reste huit fois plus chère environ que l'énergie classique, et le passage à la production d'électricité photovoltaïque entraînerait inévitablement une hausse considérable des prix de l'énergie. Par conséquent, dans l'hypothèse d'une poursuite de l'évolution actuelle, il faudrait à un moment ou un autre choisir entre l'énergie du charbon, bon marché mais responsable de changements climatiques, et l'énergie photovoltaïque, beaucoup plus onéreuse. Par ailleurs, consacrer 2 millions de kilomètres carrés (c'est-à-dire la superficie du Mexique) à la production d'énergie n'irait pas sans poser certains problèmes, sans parler du système de distribution et de stockage qu'il faudrait mettre en place. Inévitablement, la mise en œuvre d'un tel système poserait de grandes difficultés institutionnelles et politiques.

En bref, dans la perspective d'une demande énergétique inchangée, l'option solaire ne pourrait devenir une composante majeure de l'offre d'énergie en 2050 qu'à la condition de construire d'immenses centrales photovoltaïques, par exemple dans les zones désertiques des basses latitudes.

Le dilemme fondamental

Aucune évaluation des contraintes potentielles imputables à la production et l'utilisation d'énergie ne peut être menée sans faire référence à l'argument de l'échelle absolue. Du point de vue tant local que mondial, on pourra éventuellement recourir à une palette élargie de ressources énergétiques si la demande énergétique par habitant n'augmente pas au-delà de son niveau actuel de 2 000 watts environ. Bien évidemment, cela implique un recul significatif de la consommation actuelle d'énergie par habitant dans les pays industrialisés (comprise entre 4 000 et 13 000 watts par personne), pour que les pays dont la consommation reste inférieure à 1 000 watts par habitant puissent disposer d'une certaine marge. Le système énergétique de demain pourrait ainsi devenir une combinaison équilibrée des différentes sources (combustibles fossiles, hydroélectricité, énergie solaire et même énergie nucléaire). En outre, les ressources de moindre importance (énergies éolienne, marémotrice et géothermique) pourraient aussi jouer un certain rôle. L'avantage d'une telle combinaison est qu'elle permet d'éviter la concentration de contraintes environnementales sur quelques éléments seulement de l'écosystème mondial. De plus, comme elle permet l'adoption de solutions sur mesure – par exemple, la production d'énergie thermique à basse température à l'aide de capteurs solaires et d'électricité via des piles photovoltaïques –, elle accroît du même coup le rendement global du système énergétique. Enfin, un système diversifié est sans doute moins vulnérable aux tensions politiques et sociales, au plan autant local que mondial.

En revanche, si la demande mondiale d'énergie devait être multipliée par trois ou même davantage, comme le prévoient la plupart des modèles, le champ des possibles se réduirait à tout juste trois options qui, toutes, présentent leur lot d'inconvénients majeurs. L'option des combustibles fossiles entraînerait une hausse considérable des niveaux de CO₂ atmosphérique (multipliés par trois ou plus) et pourrait déclencher une série de modifications au plan mondial, impossibles à annuler par la suite même si elles présentent une certaine dangerosité. L'option solaire, certainement la moins nocive de toutes, se révélerait onéreuse et mobiliserait des surfaces de terre importantes, et l'option nucléaire, dont la faisabilité technique reste à démontrer, impose une stabilité parfaite de la situation politique mondiale. Par conséquent, il n'est pas exclu que le véritable défi posé à notre génération soit non pas de développer de nouvelles ressources énergétiques majeures, mais plutôt de rechercher des solutions pour dissocier les besoins énergétiques de notre société de sa richesse et son niveau de vie (Jaeger *et al.*, 1997). A l'évidence, une telle évolution touche non pas seulement le système énergétique, mais la société tout entière.

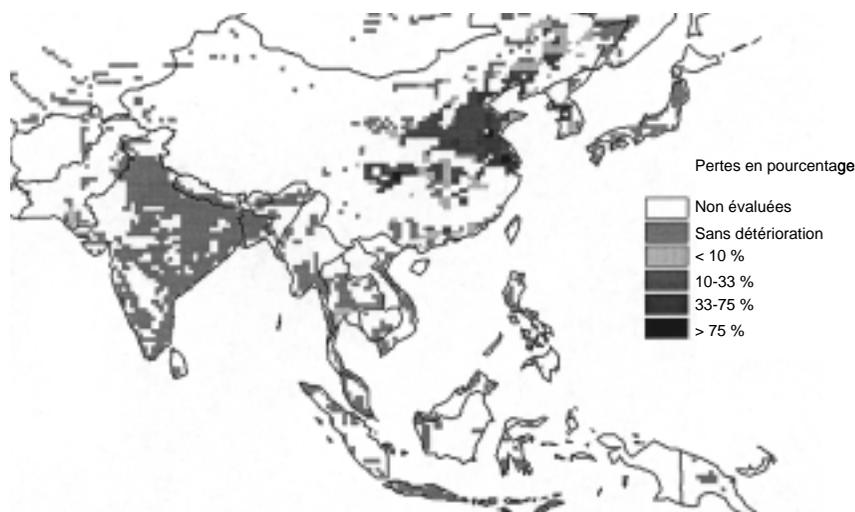
4. Le défi énergétique

Jusqu'ici, nous avons vu que les niveaux actuels de consommation d'énergie posent de sérieux problèmes dans de nombreux domaines, qui ne sont en outre pas exclusivement liés au type d'énergie consommé. Mises en œuvre à une échelle comparable, les autres solutions envisageables posent le même genre de problèmes. Par conséquent, même si elle constitue un pas important, la mise en place d'évolutions graduelles (par exemple, l'amélioration du caractère non polluant et du rendement des modes existants de production et de consommation) ne permettra pas à elle seule de parvenir à un système énergétique durable au cours des 50 prochaines années.

La question qui se pose alors est de savoir comment susciter une évolution non marginale du système énergétique mondial. En préalable à la recherche d'une solution, il paraît important d'examiner attentivement le processus de prise de décisions en matière de consommation d'énergie au plan mondial, dans le contexte actuel de l'économie de marché. La figure 8 permet de s'en forger une certaine idée.

Les personnes et les ménages consomment de l'énergie pour obtenir des services conformément à leurs préférences personnelles, elles-mêmes souvent déterminées par les normes culturelles. Par exemple, songeons au rôle de la viande dans l'alimentation quotidienne et à l'impact considérable qu'il produit sur la consommation d'énergie dans l'agriculture. Bien sûr, les choix des consommateurs sont déterminés par les prix de l'énergie et le budget des ménages, mais également par l'infrastructure existante. (Par exemple, il est extrêmement difficile d'habiter à

Figure 8. **Pertes de production vivrière en Asie dues aux émissions de soufre pour un scénario de forte croissance, à forte intensité de consommation de charbon, sans dépollution (en pourcentage)**



Source : Auteur.

Los Angeles sans utiliser une voiture.) Il en va de même des services énergétiques consommés par les entreprises : ils dépendent largement de l'infrastructure existante qui, elle-même, est le produit des investissements passés. En matière d'investissements, les décisions sont motivées dans une large mesure par les prévisions formulées. C'est le cas des investissements industriels, desquels découlent les routes, tunnels, immeubles, aéroports, etc., et des investissements financiers réalisés par les personnes et investisseurs institutionnels qui choisissent de miser leur argent sur telle ou telle activité.

Ces décisions sont déterminées par les prévisions quant aux prix futurs, et non pas par les prix futurs eux mêmes. Tout simplement, il n'existe pas de marchés à terme pour les centrales électriques d'ici 50 ans, ni pour les routes, les aéronefs, les logements, etc. Dans l'économie d'aujourd'hui, les décisions en matière d'investissements à long terme sont déterminées non pas par des mécanismes de formation des prix, mais par une anticipation de l'action de ces mécanismes. Quels sont donc les facteurs sur lesquels se fondent ces anticipations ? En fait, les investisseurs industriels et financiers n'ont d'autre solution que de tenter de deviner l'avenir en se basant sur leur conviction intime et toute information qu'ils peuvent obtenir par ailleurs. Dans ce contexte, l'un des apports les plus décisifs est fourni

par la communauté scientifique. Quoiqu'il en soit, le résultat final de ce processus ne constitue en rien une prévision scientifique, mais plutôt un consentement à parier sur certains développements.

A l'heure actuelle, les prévisions des investisseurs concernant le développement à long terme du système énergétique tablent dans l'ensemble sur un maintien de l'état actuel des choses. Il y a bien quelques stratégies de couverture sous forme d'investissements consacrés à la préparation d'infrastructures de substitution, mais le gros des paris porte incontestablement sur l'infrastructure existante. Au bout du compte, cela signifie que la dynamique du système énergétique mondial est commandée par une recherche d'améliorations marginales de l'infrastructure existante.

Cette situation soulève quelques questions épineuses au regard de l'élaboration de la politique. D'une part, du fait de l'absence de marchés à terme pour l'infrastructure énergétique, les mécanismes du marché ne peuvent pas prendre en compte les perspectives énergétiques à long terme. D'autre part, il ne faut pas compter sur les pouvoirs publics pour développer des prévisions plus fiables que les investisseurs privés, puisqu'ils ne disposent pas d'informations plus précises et que leur jugement est rendu aussi partial que celui des autres acteurs par leurs préoccupations à court terme. Cela étant, s'agissant des questions d'environnement, certains éclairages scientifiques peuvent contribuer à orienter le processus de formation des prévisions sur les perspectives énergétiques à long terme. L'un d'eux, qui vient d'être formulé, souligne l'importance des évolutions non marginales dans la dynamique future de l'infrastructure énergétique mondiale. D'autres idées présentent un intérêt réel :

- a) Les niveaux de consommation d'énergie dans les pays fortement industrialisés tirent la consommation mondiale d'énergie, via le processus de diffusion à l'échelle mondiale des modes de vie et technologies.
- b) Des évolutions non marginales peuvent déboucher sur un système énergétique durable d'ici une cinquantaine d'années. Un tel système se fonderait sur la dissociation de la consommation d'énergie et de la croissance économique, mais également sur l'amélioration de l'efficacité énergétique par l'adoption de modes d'utilisation intelligents de l'énergie, au niveau tant de la consommation finale que de l'infrastructure.
- c) Les mesures visant à stimuler la transition vers un système énergétique durable ne doivent pas être axées sur les prix des services énergétiques finals, mais sur les signaux des prix dans l'infrastructure énergétique et sur l'amélioration du processus de formation des prévisions concernant la situation énergétique à long terme.

Ces éventualités sont examinées tour à tour ci-après.

Dynamique de l'efficacité énergétique dans une société mondialisée

Pour bien comprendre la dynamique de la consommation d'énergie à l'échelle mondiale, il est essentiel d'admettre que les modes de vie et les technologies se diffusent des pays industrialisés vers les pays en développement. Il s'agit d'un mécanisme fondamental de la société mondiale d'aujourd'hui. Dans un sens très large, trois valeurs essentielles se propagent des pays industrialisés vers les pays en développement depuis plusieurs décennies : le bien-être économique, l'enseignement et l'urbanisation. A cet égard, les médias et les contacts entre les personnes encouragés par la mobilité à l'échelle du globe – sous diverses formes, qui vont du tourisme aux migrations de réfugiés – ont déjà produit des effets irréversibles. Toutefois, les différentes tentatives entreprises dans les pays en développement pour réaliser ces valeurs ont produit des résultats très contrastés. L'urbanisation progresse à un rythme époustouffant, l'enseignement se généralise sensiblement moins vite, et le succès économique est loin d'être au rendez-vous pour tout le monde. Du point de vue de la consommation énergétique, cela signifie que les modes de vie à forte intensité d'énergie se propagent beaucoup plus rapidement que les technologies économes en énergie permettant de les soutenir. En outre, les différences de rythme entre ces trois processus impliquent également que l'espérance de vie progresse beaucoup plus vite que ne recule la croissance démographique, d'où une augmentation massive de la population mondiale.

Les trois valeurs mondiales évoquées ne sont pas les seules, et deux autres méritent qu'on s'y intéresse. Tout d'abord, l'égalité entre les hommes. Autrefois, des empires bâtis sur une inégalité sociale très forte pouvaient traverser les millénaires sans jamais être remis en cause au nom du principe d'égalité. La Chine et l'Égypte anciennes constituent à cet égard des exemples riches d'enseignements. Aujourd'hui, l'inégalité sociale perdure dans le monde entier, mais sa légitimité est largement remise en question. En particulier, l'écart énorme entre la richesse de certaines régions du monde et l'extrême pauvreté d'autres régions est inacceptable aux yeux de la plupart des habitants de la planète. Dans la pratique, cela se traduit par les efforts acharnés de la majorité de l'humanité pour copier les modes de vie et de consommation, et les technologies de la minorité vivant dans les pays hautement industrialisés. Par conséquent, les taux élevés de consommation d'énergie dans les régions les plus riches induisent réellement une hausse de la demande énergétique dans le reste du monde.

Enfin, une valeur mondiale très récente mérite une attention particulière : la valeur du contact avec la nature. Depuis le début des années 70, dans les pays hautement industrialisés, on assiste à un accroissement de la population dans les zones périphériques, proches de la verdure. Parallèlement, la population a tendance à baisser à un rythme plus rapide encore au cœur des grandes aggloméra-

tions. Mais ce n'est pas tout. Pour une bonne part de la population, le souci de l'environnement devient dans le même temps beaucoup plus présent – il se manifeste à l'échelle mondiale –, tandis que le phénomène appelé excentration ne se fait jour que dans les pays très industrialisés.

A l'évidence, la valeur de la proximité à la nature est un moteur important en faveur du développement durable. Rappelons cependant que le lien entre les intentions individuelles et les effets collectifs est rarement direct. En particulier, l'excentration accroît la consommation d'énergie plutôt qu'elle ne la diminue, puisqu'elle a eu pour effet jusqu'à présent d'accroître les distances entre le domicile et le lieu de travail, et même d'allonger les déplacements au titre des loisirs.

Ces valeurs mondiales façonnent les préférences individuelles, les choix de consommation, la formation de la main-d'œuvre, les trajectoires technologiques et les dispositifs institutionnels. Concernant la consommation d'énergie, il faut faire la distinction entre deux grands scénarios : celui de la situation inchangée et celui du développement durable.

La différence entre eux ne porte pas essentiellement sur la dynamique démographique. Par conséquent, nous nous fonderons dans les deux cas sur une même évaluation de la population mondiale. D'ici 50 ans, la population mondiale pourrait bien être deux fois supérieure à celle d'aujourd'hui, aux alentours de 10 milliards de personnes. A l'échelle mondiale, il paraît inévitable qu'il existe alors une certaine stratification sociale. Pour plus de simplicité, supposons qu'il y aura alors quatre couches sociales : une frange supérieure d'un milliard de personnes, une classe moyenne supérieure de deux milliards de personnes, une classe moyenne inférieure de quatre milliards de personnes et une classe inférieure regroupant trois milliards d'individus. (Le mécanisme mis en lumière ne dépend pas de ces chiffres spécifiques.)

Dans le scénario de la situation inchangée, la couche supérieure de la population mondiale consommera plus d'énergie que les habitants de l'Amérique du Nord aujourd'hui, passant de 10 kW environ à, disons, 15 kW. En grande partie, cette hausse résultera de l'accroissement des transports aériens, mais aussi du chauffage et de la climatisation de constructions plus grandes, souvent situées dans des régions climatiques invitant à une climatisation importante. Dans ce scénario, cette frange de la population mondiale (un milliard de personnes) crée la tendance que le reste du monde cherche à imiter. La classe moyenne supérieure devrait y parvenir sans trop de problème, avec une consommation comparable à celle de l'Europe occidentale aujourd'hui, soit 5 kW environ. Ce niveau de consommation concernera environ deux milliards d'individus. Pour les quatre milliards de personnes de la classe moyenne inférieure, la consommation pourra atteindre 3 kW par habitant, soit un peu moins que celle de l'Europe

occidentale aujourd'hui. Enfin, dans 50 ans, la part de la population mondiale qui consomme très peu d'énergie (environ 1 kW) devrait diminuer, passant d'un tiers environ de la population mondiale aujourd'hui à un peu moins d'un tiers, soit 3 milliards d'individus en valeur absolue. Au total, on obtient une moyenne de $[1 \times 15 + 2 \times 7 + 4 \times 4 + 3 \times 1]/10$, soit environ 5 kW par habitant.

L'objectif de cet exercice d'arithmétique n'est pas de produire une valeur précise, mais d'illustrer le mécanisme de diffusion de la classe supérieure vers les classes inférieures. Dans la société mondiale d'aujourd'hui, ce mécanisme s'applique très précisément à la consommation d'énergie en tant que vecteur symbolique et technique de la richesse et de la puissance. En revanche dans la perspective d'un scénario de développement durable, ce rôle est dévolu au rendement énergétique. Dans ce cas, le mode de diffusion, du bas vers le haut et du centre vers la périphérie, serait très probablement remplacé par un modèle plus complexe, dans lequel la classe moyenne supérieure créerait une tendance ensuite adoptée par la société tout entière. Au cours des dernières décennies, des modes de diffusion de ce type ont déjà été observés dans de nombreux domaines, tels que la musique, les biens de consommation durables et les activités de loisirs.

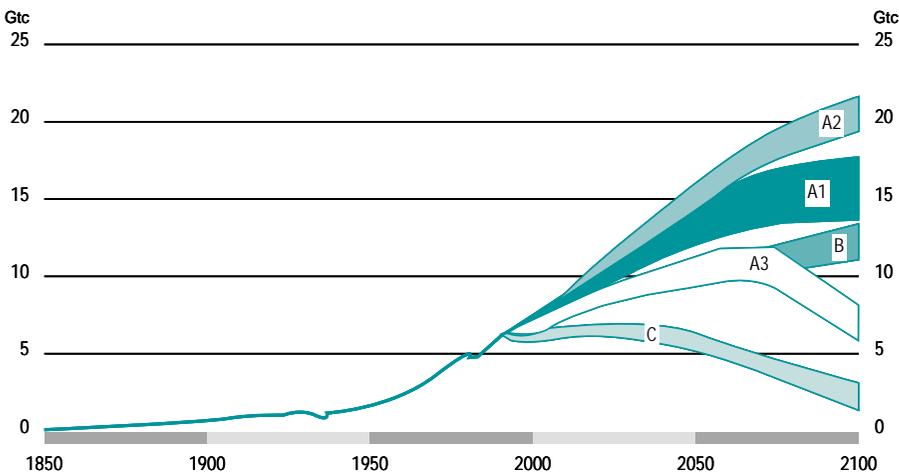
Du point de vue de la consommation d'énergie, la classe moyenne supérieure parviendrait, dans ce scénario, à un rendement énergétique élevé permettant une consommation réduite, de 2 kW par habitant. Nous examinerons ci-après en détail cette perspective. La classe supérieure accroîtrait elle aussi son rendement énergétique, mais dans une mesure moindre, pour une consommation finale de 5 kW. La classe moyenne inférieure augmenterait sa consommation par rapport à aujourd'hui, mais moins que dans l'autre scénario, avec 3 kW. La moyenne ainsi obtenue serait donc de $[1 \times 5 + 2 \times 2 + 4 \times 3 + 3 \times 1]/10$, soit 2.4 kW par habitant.

Ces deux processus de diffusion sont parfaitement compatibles avec une économie de marché animée par des entreprises et des investisseurs à la recherche de profits, et des consommateurs désireux de satisfaire au mieux leurs besoins et leurs desiderata. Toutefois, ces deux processus diffèrent à deux égards. Premièrement, dans la manière dont les consommateurs satisfont leurs besoins et développent leurs envies. Qu'il s'agisse d'alimentation ou de loisirs, tout le monde observe son voisin au moment de faire un choix. En matière de consommation, on suit donc le mouvement et, selon le point de départ de celui-ci, le niveau final de consommation d'énergie peut grandement varier. Deuxièmement, les entreprises et les investisseurs s'épient aussi mutuellement lorsqu'ils formulent les prévisions sans lesquelles ils ne pourraient réaliser d'investissements à long terme. Une fois encore, il y a des effets d'entraînement, mais qui concernent les trajectoires technologiques, et une fois encore le niveau final de consommation d'énergie peut grandement varier.

Évolutions non marginales du système énergétique

Si la consommation mondiale d'énergie est déterminée par un processus de diffusion de la classe supérieure ou de la classe moyenne supérieure vers le reste du monde, il est à l'évidence essentiel de bien cerner la dynamique qui peut caractériser le point de départ de cette diffusion. Bien souvent, on part du principe, sans chercher plus avant, que le marché retient infailliblement l'option optimale spécifique dans l'éventail des technologies proposées. Toutefois, comme le montre la figure 8, ce type d'hypothèse mérite d'être considéré avec circonspection. En effet, il faut encore que des investisseurs industriels et financiers soient en mesure d'établir des prévisions à long terme leur permettant d'identifier et mettre en œuvre non seulement le mode de consommation d'énergie le plus efficace dans le cadre des infrastructures héritées du passé, mais également l'infrastructure la plus efficace. Comme le montre la figure 9, ce n'est pas là une tâche aisée. En effet, l'infrastructure existante engendre des coûts fixes colossaux. Après tout, il s'agit d'autoroutes, d'aéroports, de logements, de bâtiments, de pipelines, d'usines d'automobiles, etc., qui sont autant d'investissements irrécupérables réalisés dans le passé. Aujourd'hui, cette infrastructure est exploitée à une grande échelle, de sorte que les coûts fixes peuvent être répartis sur un très grand nombre de services

Figure 9. Émissions mondiales de carbone dues à l'utilisation de combustibles fossiles, entre 1850 et 1990, et dans les scénarios de l'IASA-CME jusqu'à 2100, en GtC



Note : Pour chaque scénario, la fourchette traduit la différence entre les émissions brutes et les émissions nettes.
Source : Auteur.

énergétiques, qui peuvent donc être bon marché. Si l'on créait une autre infrastructure, il faudrait qu'elle concurrence celle en place tout en fonctionnant à des niveaux bien moindres. Autant dire que l'ancienne infrastructure conserverait une position dominante. Des rendements croissants induits par des coûts fixes élevés produisent un effet de verrouillage de l'infrastructure.

La figure 9 montre la différence entre les évolutions marginales et non marginales du système énergétique. Dans le cadre d'une infrastructure donnée, on peut mettre en œuvre une transition fluide, faite de petites évolutions précisément réalisées, de façon à maximiser le rendement compte tenu des contraintes imposées par l'infrastructure. De toute évidence, le rendement ne se mesure pas uniquement à l'aune des quantités d'énergie fournies aux utilisateurs finals, mais également en termes de services énergétiques assurés aux consommateurs. Il ne fait aucun doute qu'il y a encore là d'importants gisements d'économies d'énergie à réaliser. Au cours des dernières décennies, les voitures, les avions, les systèmes de chauffage et de climatisation, les ordinateurs, etc., ont tous vu leurs rendements énergétiques s'améliorer, et cette tendance pourrait bien se poursuivre dans les décennies à venir.

Cela étant, les effets de cette méthode d'amélioration de l'efficacité énergétique sont inévitablement contrecarrées par la tendance à consommer toujours plus d'énergie. A mesure que le rendement énergétique des aéronefs s'améliore, on prend de plus en plus souvent l'avion; à mesure que celui des appareils de chauffage et de climatisation s'améliore, on construit des maisons de plus en plus grandes; à mesure que celui des ordinateurs s'améliore, on utilise de plus en plus d'ordinateurs, etc. Au bout du compte, les évolutions marginales apportées au système énergétique actuel permettent peut-être de ralentir la progression de la consommation d'énergie par habitant, mais elles ne suffisent même pas à la maintenir constante.

Par conséquent, le passage à un système énergétique durable impose des évolutions non marginales, c'est-à-dire des modifications de l'infrastructure. Au vu de l'analyse développée dans les sections précédentes, il est clair que les évolutions déterminantes ne portent pas sur la production d'énergie, mais sur la consommation. De ce point de vue, l'infrastructure de loin la plus importante est le tissu urbain. Trois éléments revêtent un intérêt particulier : l'isolation thermique, la distance de migrations alternantes et les possibilités de loisirs.

Concernant l'isolation thermique, il est aujourd'hui techniquement faisable de concevoir des bâtiments qui consomment de faibles quantités d'énergie commerciale pour le chauffage et la climatisation, tout en offrant un confort supérieur à celui des autres constructions. En particulier, la régulation de l'humidité est très médiocre dans la plupart des immeubles urbains de la planète. Outre l'inconfort, ce pro-

blème est à l'origine de nombreuses affections respiratoires. Sachant que les technologies adaptées ne sont compétitives qu'à une grande échelle de production, un problème de verrouillage se pose de nouveau.

La question de la distance des migrations alternantes pose plusieurs problèmes différents. La configuration spatiale des zones urbaines a évolué selon deux schémas : la forme classique de la ville, avec un centre entouré de quartiers de plus en plus périphériques, et la zone industrielle, dans laquelle le secteur des unités de fabrication est logiquement séparé de celui des habitations. Aujourd'hui, l'emplacement du lieu de travail est en grande partie déterminé par les technologies de l'information. Dans le même temps, l'économie actuelle, basée sur les services, accorde une importance particulière aux réseaux de contacts personnels. Ces caractéristiques ont donné naissance à des zones urbaines polycentriques, où les automobiles, le principal mode de transport, couvrent des distances de plus en plus grandes dans toutes les directions. Toutefois, il serait tout à fait possible de développer une culture du travail dans laquelle les personnes travaillant ensemble ne seraient présentes physiquement au même endroit que pendant une partie du temps de travail. Le reste du temps, elles travailleraient chez elles ou dans des bureaux décentralisés très proches de leur domicile. Ces concepts pourraient être mis en œuvre de bien des manières mais, une fois encore, ils ne sont compétitifs qu'à grande échelle.

A bien des égards, les possibilités de loisirs sont des facteurs déterminants de la consommation d'énergie qui jouent un rôle important. Dans une économie de services, rien n'empêche de proposer des possibilités de loisirs attrayantes à proximité de là où les gens vivent; une telle initiative permettrait de réduire considérablement la consommation d'énergie. Bien sûr, l'homme a un besoin vital de bouger qu'aucune installation de loisirs toute proche ne saurait satisfaire dans notre société mondiale. Mais, une fois encore, rien ne nous oblige à conserver à tout prix une infrastructure dans laquelle de longs déplacements en voiture et en avion sont les seuls moyens de satisfaire ce besoin. Demain, les niveaux de consommation d'énergie dépendront dans une grande mesure de notre capacité à créer une nouvelle infrastructure pour les activités de loisirs.

Quoiqu'il en soit, ces modifications non marginales apportées à l'infrastructure urbaine représentent des actions de longue haleine. Dans les pays industrialisés – probablement ceux qui définiront les tendances en matière de consommation d'énergie – les vastes infrastructures urbaines en place sont rénovées à un rythme d'environ 2 pour cent par an. Autrement dit, dans cinq décennies, l'infrastructure urbaine pourra avoir été complètement révisée sans effort supplémentaire. Le défi n'est donc pas de trouver comment créer une nouvelle ville à partir de zéro, mais de trouver comment remodeler les villes existantes en donnant une nouvelle orientation à leur processus de rénovation des infrastructures.

Une telle évolution serait nécessairement accompagnée d'une transformation profonde de la production et du traitement de l'énergie. Comme nous l'avons vu dans la section 3, tout système énergétique durable s'appuie sur un taux de consommation d'énergie suffisamment bas pour autoriser le recours à un large éventail d'énergies primaires. Cette optique correspond à la stratégie de gestion dite de «l'action décidée» : atteindre des objectifs à court terme tout en ménageant les possibilités des options à long terme. Concernant le système énergétique, il pourrait en l'occurrence s'agir du principe de la période constante de pratiques sûres. Entamer aujourd'hui une refonte du processus de rénovation des villes dans les pays industrialisés peut permettre de transformer le système énergétique mondial tout en maintenant un niveau raisonnable de flexibilité. Tel ne serait probablement pas le cas si l'on maintenait en l'état la trajectoire du système énergétique actuel.

Mesures gouvernementales

Quelles mesures préconiser pour relever le défi énergétique du siècle prochain? La réponse classique consiste à proposer une hausse des prix de l'énergie par le biais de la fiscalité.

En règle générale, on justifie cette approche en faisant valoir que la consommation d'énergie produit des effets externes négatifs que le marché ne peut pas prendre en charge sans mesures spécifiques visant à les internaliser. Par exemple, la modification du climat touchera de vastes régions du monde, et le prix des combustibles fossiles doit être augmenté pour tenir compte de ces effets. Pour ce faire, on peut recourir à une taxe ou à un système de permis négociables. S'agissant de la solution fiscale, il ne faut pas oublier que le pétrole est déjà l'un des produits les plus taxés au monde et l'une des principales sources de recettes pour nombre de gouvernements. Lors de l'examen de tout projet de taxe visant à internaliser les effets négatifs sur l'environnement, il convient donc de se demander si cette internalisation justifie effectivement une hausse de la fiscalité. Concernant les permis négociables, la question est de savoir quelles quantités de combustibles fossiles peuvent être autorisées. Il n'est facile de répondre à l'une ou l'autre de ces deux questions, mais l'on peut néanmoins formuler des estimations éclairées. En revanche, pour le reste, il n'est d'autre solution que de procéder par tâtonnements.

Un raisonnement comparable peut être tenu concernant la production d'électricité nucléaire. En effet, dans ce cas également, il existe des effets externes sous la forme de risques et de préjudices supportés par des personnes qui ne sont pas équitablement indemnisées et qui, bien souvent, ne peuvent pas l'être (par exemple, en cas d'accidents graves ou s'agissant des générations futures). Ici encore, on peut plaider pour une internalisation de ces effets, par le biais de la fiscalité ou des permis négociables, mais la question du niveau approprié de ces instruments reste

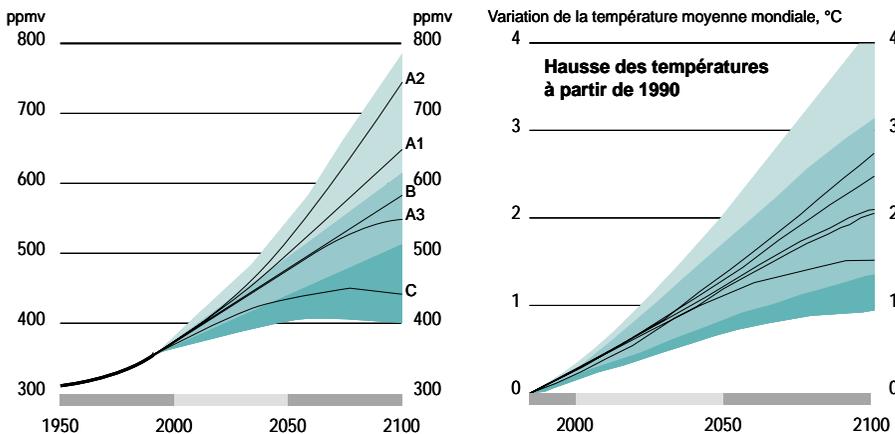
posée. Le cas échéant, même les gouvernements qui optent pour une élimination progressive du nucléaire peuvent envisager de recourir à ces instruments pour la mise en œuvre de cette option.

Dans la pratique, cette vision des marchés de l'énergie a débouché sur plusieurs propositions d'impôt sur les produits énergétiques, qui donnent lieu à des négociations et des activités de lobbying. Toutefois, il est peu probable qu'elles soient mises en œuvre à une grande échelle, à moins que les effets externes négatifs de la consommation d'énergie ne prennent un relief beaucoup plus marqué qu'aujourd'hui.

Si l'on considère que le système énergétique mondial est capable de s'ajuster en douceur à des hausses importantes et irréversibles des prix, alors la politique de l'énergie perd beaucoup de son importance et peut devenir une simple question à gérer discrètement et de manière routinière, avec des ressources limitées. Bien sûr, le SI prend ici une importance considérable.

La figure 10 propose quelques éclaircissements à ce sujet. Les ajustements de la consommation d'énergie aux variations des prix de l'énergie sont déterminés par l'élasticité de la demande. Dans les circonstances actuelles, une augmentation de

Figure 10. Concentrations atmosphériques de CO₂, en ppmv – évolution passée entre 1950 et 1990 et dans les scénarios de l'IIASA-CME jusqu'à 2100



Note : Le graphique à droite présente les variations de la température moyenne mondiale par rapport à 1990, en degrés Celsius. Les incertitudes (importantes) du modèle sont également indiquées.

Source : Auteur.

10 pour cent des prix de l'énergie entraîne une baisse de la consommation bien inférieure à 10 pour cent. Dans une large mesure, ce phénomène est à mettre au compte de l'infrastructure existante.

Il apparaît donc que, selon l'infrastructure en place, un même prix de l'énergie peut déboucher sur deux niveaux très différents de consommation. Ce que l'on considère généralement comme l'élasticité de la demande d'énergie se rapporte toujours à une infrastructure donnée. Le même raisonnement vaut pour l'élasticité de l'offre de différents types d'énergie commerciale.

A l'évidence, les prix sont les outils appropriés pour contrôler la consommation d'énergie au sein d'une infrastructure donnée. Mais constituent-ils les outils voulus pour exercer une influence sur l'infrastructure de l'énergie? Sur ce point, les éléments présentés dans les figure 8 et 9 incitent à la prudence.

Les villes et les réseaux de transport existent et ils créent des besoins en matière de chauffage et de déplacement qu'il serait difficile de modifier à court terme. Dans le cadre de l'infrastructure actuelle, les possibilités d'économies d'énergie sont légion et, face à une hausse des prix, des millions d'entreprises et de ménages pourraient les exploiter avec profit. C'est d'ailleurs ce qui s'est produit après les deux chocs pétroliers des années 70 et 80, à ceci près que l'infrastructure de base a été conservée : les villes sont toujours aménagées de façon à privilégier les transports routiers, les habitations font toujours appel à des équipements de chauffage et de climatisation énergivores, etc. On aurait très bien pu concevoir une infrastructure fondée sur un meilleur rendement énergétique, mais les hausses de prix des deux chocs pétroliers ont été absorbées sans en favoriser l'émergence.

La dynamique de l'infrastructure de l'énergie est déterminée avant tout par les prévisions des investisseurs industriels et financiers concernant l'avenir⁹. Celles-ci ne se fondent pas de manière prédominante sur l'évolution antérieure des prix de l'énergie. Certes, ces données sont connues de tous et l'on en tient compte, mais ce qui est véritablement important, ce sont les prévisions concernant la dynamique des technologies, des modes de vie et des ressources naturelles. Par ailleurs, les décisions concernant les investissements infrastructurels sont fortement influencées par les prix des éléments essentiels de cette infrastructure. Ainsi, le prix des autoroutes, des habitations, des voitures, etc., réagissent très peu aux prix de l'énergie, puisqu'ils dépendent de nombreux autres facteurs.

Pour que les prix de l'énergie deviennent le meilleur moyen de peser sur le système énergétique mondial, il faudrait que l'économie mondiale dispose d'une information parfaite sur tous les paramètres pertinents, que les marchés s'adaptent instantanément à cette information, qu'il existe des marchés à terme pour la plupart des biens sur les deux ou trois siècles à venir, et que les technologies ne présentent jamais de coûts fixes et des rendements croissants. Il est de notoriété

publique qu'une telle perspective est un conte de fée et ne correspond pas à l'économie de marché dans laquelle nous vivons.

Compte tenu du rôle des effets de verrouillage et des prévisions subjectives concernant la dynamique à long terme de l'infrastructure énergétique mondiale, toute politique axée sur la fiscalisation de l'énergie peut avoir pour effet de passer à côté d'importantes possibilités économiques¹⁰. Pour saisir ces possibilités, il faut envisager des modifications non marginales de l'infrastructure énergétique mondiale. Il est arrivé que cet argument soit utilisé pour justifier les interventions de l'État dans la planification de l'infrastructure. Toutefois, ce type d'avancées soudaines ne vont pas sans risques.

Comme nous l'avons vu dans les commentaires de la figure 8, rien ne permet de penser que les gouvernements disposent de prévisions plus précises que les investisseurs privés concernant les contraintes et les opportunités des systèmes énergétiques futurs. D'ailleurs, compte tenu du rôle joué dans ce domaine par les rendements croissants et le progrès technique, les pouvoirs publics ne peuvent même pas savoir si l'amélioration de l'efficacité énergétique entraînera, à long terme, une hausse ou une baisse des prix de l'énergie. Après tout, il est tout à fait possible que l'on parvienne à une infrastructure plus économe en énergie pour des raisons totalement indépendantes des prix de l'énergie, avec à la clé une baisse de la demande d'énergie commerciale. Les ordinateurs ont bien supplanté les machines à écrire sans que le prix de ces dernières n'ait jamais augmenté. Notre propos n'est pas ici de préconiser l'abandon de la fiscalisation de l'énergie en tant que moyen d'action, mais de suggérer avec force que cette fiscalisation ne doit pas être considérée comme le principal instrument d'action.

Néanmoins, si l'on souhaite opter pour la solution fiscale, il peut s'avérer tout aussi judicieux, voire avantageux, d'appliquer l'impôt aux équipements consommant l'énergie. A cet égard, l'application d'un droit spécifique sur les automobiles est un exemple intéressant. Cette redevance très modeste (20 dollars, par exemple), perçue sur la vente de chaque véhicule classique, finance ensuite une remise consentie sur la vente, par exemple, de véhicules urbains consommant moins de 3 litres aux 100 km. Dans un premier temps, cette remise pourrait plus ou moins couvrir l'intégralité du prix du véhicule urbain. Ensuite, à mesure que le nouveau produit s'imposerait sur le marché, la remise serait graduellement diminuée jusqu'à disparaître une fois l'ancien produit éliminé. L'avantage de cet instrument est qu'il convient parfaitement aux technologies caractérisées par des rendements croissants et des effets de verrouillage, soit précisément la situation des systèmes énergétiques.

A l'exemple de la fiscalité, les permis négociables peuvent se révéler beaucoup plus efficaces s'ils portent non pas sur l'énergie en tant que telle, mais plutôt sur l'infrastructure associée. Ce point est tout particulièrement important au regard

du développement urbain. La conception traditionnelle de l'aménagement des villes est morte depuis longtemps : il n'existe tout simplement pas d'autorité capable de concevoir et de contrôler de manière centralisée les zones urbaines d'aujourd'hui. C'est uniquement en employant les mécanismes dans une optique de développement durable, et non plus dans le carcan de l'aménagement classique, que l'on pourra entreprendre et mener à bien une transformation des infrastructures urbaines. Un tel objectif impliquera de fractionner l'actuel régime de propriété foncière en différents éléments, qui pourront ensuite être négociés. Par exemple, on pourrait créer des permis négociables pour l'exploitation des terrains à des fins industrielles, et d'autres encore pour la circulation ou les usages privés, etc. En limitant la durée dans le temps de ces permis et leur nombre en fonction des objectifs locaux de durabilité, la rénovation urbaine pourrait être stimulée par des mécanismes de marché s'inscrivant dans la perspective du développement durable.

Ces quelques exemples démontrent certainement toute la complexité du processus de transition vers un système énergétique durable, qui nécessitera un éventail de mesures sophistiquées et non pas une simple « solution miracle ». Certaines des mesures les plus efficaces seront peut-être des dispositifs « légers » axés sur les opportunités offertes par une société fondée sur la connaissance, et non plus sur les mécanismes de la société industrielle. En particulier, les gouvernements peuvent et doivent entreprendre un effort déterminé pour améliorer le processus de formation des prévisions des investisseurs privés, mais aussi de la société dans son ensemble. Il est essentiel de bien identifier les possibilités économiques associées à la transformation des infrastructures urbaines et aux changements des systèmes de production et de consommation d'énergie au cours des prochaines décennies, et de favoriser l'épanouissement de l'esprit d'entreprise dans ces activités.

A cet égard, il est essentiel de mettre en place les conditions d'un dialogue continu entre les investisseurs financiers et industriels concernés par l'infrastructure de l'énergie, les représentants des pouvoirs publics et les scientifiques capables d'évaluer les options dans ce domaine. L'expérience démontre la nécessité des relations personnelles à long terme entre des personnes hautement qualifiées dans les processus de formation des prévisions. A l'évidence, une organisation telle que l'OCDE peut jouer un rôle important dans ce domaine stratégique.

Notes

1. La rédaction de ce rapport aurait été impossible sans l'aide experte de INFRAS Consulting, Zurich. Les travaux de recherche sur lesquels se fonde cette étude ont été conduits dans le cadre des projets ULYSSES et VISIONS, financés par le quatrième programme-cadre de l'Union européenne; dans le cadre du projet CLEAR, financé par le «Programme prioritaire environnement» suisse, et sous couvert du projet «2000 Watt-Gesellschaft» (Société 2000 watts) mené au sein de l'École polytechnique fédérale. Les auteurs tiennent à exprimer leur reconnaissance à Hadi Dowlatabadi, Ottmar Edenhofer, Larry Goulder, Jean-Charles Hourcade, Bernd Kasemir, Claudia Pahl et Christoph Schlumpf, qui ont stimulé les débats. Comme il est d'usage, le présent chapitre n'engage que la responsabilité des auteurs.
2. Dans ce chapitre, l'énergie est mesurée en joules et les flux d'énergie en watts. Un watt correspond à un flux d'énergie d'un joule par seconde; un kWh (kilowattheure) représente la même quantité d'énergie que 3.6 millions de joules. Il y a, dans une année, 31.5 millions de secondes, soit environ 8.8 milliers d'heures. Par conséquent, un flux d'énergie de 1 kWh correspond à une consommation annuelle d'énergie de quelque 8 800 kWh ou 31.5 milliards de joules. Les abréviations sont les suivantes :
1 PJ = 1 pétajoule = 10^{15} joules, et 1 EJ = 10^{18} joules = 1 trillion de joules.
3. Par convention, l'énergie primaire de l'énergie nucléaire correspond à la quantité totale d'énergie thermique produite par la fission du combustible nucléaire. Un tiers seulement environ est transformé en électricité. En revanche, dans les centrales hydroélectriques, de 80 à 90 pour cent de la puissance hydraulique sont transformés en électricité. Ainsi, bien que les parts revenant à l'énergie nucléaire et à l'hydroélectricité représentent, dans un cas comme dans l'autre, quelque 2.5 pour cent de la consommation mondiale d'énergie primaire, la contribution de l'hydraulique à la production d'électricité est trois fois plus grande que celle de l'énergie nucléaire. Un raisonnement analogue est valable pour l'énergie solaire.
4. Pour une tentative d'évaluation des perspectives à long terme du changement climatique prenant explicitement en compte le problème de l'incertitude, se reporter à 6dRothmans et de Vries, 1997, ainsi qu'à Hammond, 1998.
5. L'attentisme est assurément une démarche moins judicieuse que des politiques qui ne négligent ni l'inertie ni la viabilité dans un contexte dynamique. Se reporter à Hourcade et Chapuis, 1998.

6. L'eau peut être réutilisée à plusieurs reprises, comme c'est le cas lorsque plusieurs centrales hydroélectriques sont implantées le long du même cours d'eau.
7. GWe = gigawatts d'électricité = 10^9 watts d'électricité.
8. On peut faire valoir que le choix du nucléaire pourrait améliorer l'efficacité énergétique parce que le dosage entre électricité et énergie thermique qui en découlerait y serait propice. Cependant, on ne voit pas bien comment ce facteur pourrait atteindre l'ordre de grandeur nécessaire pour que l'énergie nucléaire représente une fraction importante des approvisionnements énergétiques totaux d'ici à quelques décennies.
9. Edenhofer et Jaeger proposent (dans un ouvrage à paraître) un modèle évolutif de la dynamique de la consommation d'énergie.
10. On trouvera une tentative de définition des mécanismes de formation de l'opinion des opérateurs financiers dans ce domaine dans Toth *et al.*, 1998.

Bibliographie

- BROWN, L.R., N. LENSSEN et H. KANE (1995),
Vital Signs 1995: The Trends That Are Shaping Our Future, Worldwatch Institute, New York/
Londres.
- EDENHOFER, O. et C.C. JAEGER (à paraître),
«Power Shifts: The Dynamics of Energy Efficiency», *Energy Economics*.
- HAMMOND, A. (1998),
Which World? Scenarios for the 21st Century, Island Press, Washington.
- HOURCADE, J.C. et T. CHAPUIS (1995),
«No-regret Potentials and Technical Innovation: A Viability Approach to Integrated
Assessment of Climate Policies», *Energy Policy*, 23, 4/5, pp. 433-445.
- IMBODEN, D.M. (1993),
«The Energy Needs of Today Are the Prejudices of Tomorrow», *GAIA* 2, pp. 330-337.
- JAEGER, C.C. *et al.* (1997),
«Procedural Leadership in Climate Policy: A European Task», *Global Environmental Change*,
7, 3, pp. 195-203.
- OCDE (1997),
Sustainable Development: OECD Policy Approaches for the 21st Century, Paris.
- ROTMANS, J. et B. de VRIES (1997),
Perspectives on Global Change: The TARGETS Approach, Cambridge University Press.
- TOTH, F.L., B. KASEMIR et V. MASING (1998),
«Climate Policy as a Business Opportunity for Venture Capital in Europe», Ulysses
WP-98-2, Center for Interdisciplinary Studies in Technology, Darmstadt (peut être télé-
chargé depuis «<http://www.zit-tu-darmstadt.de/ulysses/>»).

Les structures de la demande d'énergie vers l'an 2050

par

*Martin Bekkeheien, Øystein Håland, Reidulf Klovening
et Roar Stokholm*
Statoil, Norvège

1. Introduction

Les populations utilisent l'énergie en appliquant des technologies pour faire face à leurs besoins de confort, d'éclairage, de mobilité, de produits transformés, etc. Ce rapport entre l'utilisation d'énergie et les besoins essentiels de l'homme font de l'énergie une ressource fondamentale pour presque tous les aspects de l'activité économique humaine, qu'il s'agisse d'une composante nécessaire à tous les équipements ménagers de chauffage et de climatisation, d'un carburant pour le parc mondial de voitures, camions, navires ou avions, ou encore du préalable indispensable à tout procédé industriel. Par le passé, la relation entre l'énergie et la croissance économique suivait un principe bien connu, selon lequel 1 pour cent de croissance économique entraîne 1 pour cent environ de croissance de la demande d'énergie.

Cependant, tous les modes de transformation et de consommation de l'énergie impliquent une forme ou une autre de pollution et de détérioration de l'environnement. Malheureusement, l'avenir n'étant pas utopique, améliorer la qualité de l'environnement aura généralement un coût économique; il faudra trouver un compromis entre la prospérité et la protection de l'environnement. Il s'offre cinq possibilités fondamentales d'améliorer l'état de l'environnement :

- *Substitution de combustibles* – Privilégier des formes d'énergie plus respectueuses de l'environnement, mais plus onéreuses. A l'heure actuelle, les énergies renouvelables représentent une option extrêmement intéressante, même si elles posent aussi certains problèmes d'environnement.
- *Combustibles et carburants moins polluants* – Améliorer les caractéristiques écologiques du produit énergétique, comme l'a fait l'industrie du raffinage pour les

- carburants pendant longtemps, en supprimant progressivement le plomb, en réduisant la teneur en soufre, en employant moins d'aromatiques, etc.
- *Réduction des émissions* – Consacrer des investissements supplémentaires pour dépolluer les émissions produites, comme dans le secteur de la production d'électricité par la désulfuration des gaz de combustion et dans l'industrie automobile grâce au pot catalytique.
 - *Améliorations de l'efficacité énergétique* – Réaliser des investissements d'équipement pour accroître le rendement de la production d'énergie ou favoriser une utilisation plus rationnelle de celle-ci, par exemple, amélioration de l'isolation des bâtiments, pompes à chaleur, etc.
 - *Sacrifices au plan du confort* – Consentir des sacrifices au plan du confort, par exemple en acceptant de réduire la mobilité, de moins chauffer ou climatiser les locaux, ou encore de rouler dans des automobiles un peu moins performantes en contrepartie d'une meilleure efficacité énergétique.

Toutes ces possibilités entraînent des coûts, parfois assez considérables, mais dans un monde où la richesse augmente régulièrement, les exigences en matière de qualité de l'environnement se feront sans doute plus pressantes. En outre, le progrès et les innovations technologiques permettront d'abaisser le coût de l'amélioration de l'état de l'environnement, ce qui transformera les perspectives d'avenir de notre monde à tous. Cependant, nous ne devons jamais oublier qu'aucune arme infallible ne résoudra tous nos problèmes. La technologie aura, assurément, une importance primordiale pour relever les défis auxquels nous sommes confrontés, mais si nous ne prenons pas en compte le facteur humain, nous échouons lamentablement dans notre quête d'un avenir meilleur.

Dans le présent chapitre, nous examinerons succinctement comment les moteurs de l'évolution technologique et sociale pourraient provoquer une rupture de tendances et remettre en question les scénarios tablant sur une poursuite de l'évolution actuelle des structures de la demande d'énergie après 2020. Nous ne présenterons pas de scénarios de bouleversement total assortis d'estimations chiffrées, ou fondés sur une série cohérente d'hypothèses et de relations fondamentales, mais plutôt les facteurs susceptibles de provoquer une inflexion décisive des tendances ainsi que des conjectures quant à leur rôle spécifique. Pour commencer, nous aborderons les évolutions et les enjeux très différents des pays riches et des pays pauvres du monde, avant d'analyser comment les modes de vie et les habitudes d'achat des consommateurs influencent la structure économique de la société et, de ce fait, la demande d'énergie. Nous poursuivrons par une réflexion sur les possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique découlant de l'application de technologies avancées économes en énergie, pour conclure en sortant l'«atout maître» de l'avenir : les technologies de l'information, dont les progrès peuvent transformer notre mode de vie et nos habitudes de travail.

2. La demande des consommateurs : saturation ou essor?

La situation économique présente de très grandes disparités dans les différentes régions du monde. Pour 1 milliard environ de personnes qui résident dans les pays à revenu élevé de l'OCDE, le PIB par habitant représente en moyenne environ 25 000 dollars¹, alors que pour la population des pays à faible revenu, qui dépasse 3 milliards, le PIB moyen par habitant est inférieur à 2 500 dollars².

Ces inégalités se retrouvent dans la consommation d'énergie, mais la part du total qui revient aux pays à faible revenu est plus importante en raison de la consommation considérable de la Chine. La population des pays de l'OCDE consomme 4.5 tonnes d'équivalent pétrole (tep) par habitant, le chiffre correspondant pour les pays du reste du monde étant de quelque 0.8 tep chacun, ce qui souligne, une fois encore, un déséquilibre extrême. Environ 39 pour cent de la consommation mondiale d'énergie intervient dans le secteur industriel, 27 pour cent dans le secteur des transports, 19 pour cent dans le secteur résidentiel et 8 pour cent dans le secteur commercial, le reste correspondant à l'agriculture et aux utilisations énergétiques non spécifiées³.

Les besoins essentiels d'alimentation et de logement de la majeure partie de la population des pays riches de l'OCDE sont satisfaits depuis longtemps, et ce sont maintenant des aspirations liées au mode de vie qui prennent le pas sur les autres. La demande de mobilité est allée en augmentant pendant une longue période quoique, parallèlement, les effets sur la santé de la pollution et la possibilité que le climat mondial soit bouleversé à cause des émissions anthropiques de gaz à effet de serre se trouvent de plus en plus au cœur des préoccupations. Il est impossible de prévoir à quel équilibre l'on aboutira, à long terme, entre ces craintes et ces aspirations. Il dépendra notamment de l'importance que le public accordera au changement climatique, des sacrifices à consentir concernant les modes de vie afin d'améliorer la situation et des solutions technologiques existantes.

Le panorama est radicalement différent, en revanche, dans les pays moins riches du monde en développement, où il est encore urgent de répondre aux besoins les plus essentiels, à savoir l'alimentation, le logement, l'eau propre et les soins de santé primaires. Il importe d'améliorer l'état de l'environnement local pour que la qualité de vie de la population soit meilleure, et ce sera un domaine qui retiendra de plus en plus l'attention. On peut toutefois atténuer les effets préjudiciables de la consommation et de la transformation de l'énergie grâce à des améliorations relativement simples de la qualité des combustibles et à la substitution interénergétique. Il ne sera pas nécessaire d'imposer des changements radicaux dans les modes d'utilisation de l'énergie, étant donné que, de toute façon, des évolutions importantes découleront naturellement de la modernisation de l'économie et du renouvellement du parc d'équipements.

Les enjeux, contraintes, possibilités et compromis sont par conséquent fondamentalement différents dans ces deux parties du monde, d'où des évolutions elles aussi radicalement divergentes. La suite de la présente section est donc divisée en deux parties, la première passant en revue les pays de l'OCDE et la seconde le reste du monde.

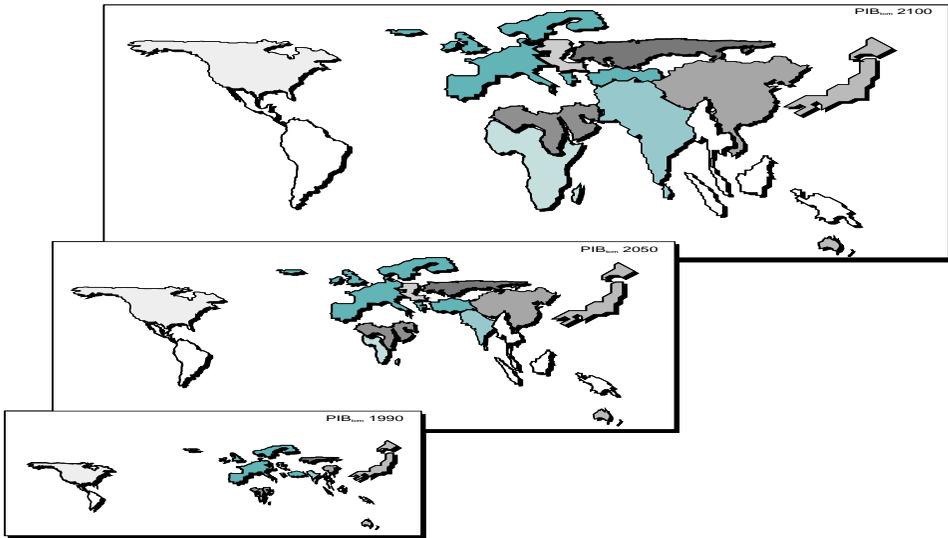
Pays de l'OCDE – problèmes d'environnement et saturation ?

Dans les pays de l'OCDE, les possibilités de saturation de la demande sont étudiées de longue date : il y a une limite au nombre de voitures, ou à l'intensité de chauffage et de climatisation, dont une personne a réellement besoin. Initialement, de l'avis général, le niveau de saturation du taux de motorisation serait atteint lorsqu'on dénombrerait une voiture par ménage. Une fois ce niveau dépassé, sans qu'aucun signe de ralentissement du taux de croissance ne se manifeste, on a supposé qu'un fléchissement, voire une recul, s'amorcerait sûrement lorsqu'il y aurait une automobile par permis de conduire délivré. Néanmoins, la relation économique entre la croissance des revenus et celle de la demande a fait que le nombre de voitures n'a jamais cessé de croître dans tous les pays, même si l'essor s'est quelque peu ralenti.

En principe, ce développement ininterrompu du parc automobile ne devrait pas avoir d'incidences sensibles sur la demande d'énergie – une personne ne peut conduire qu'une voiture à la fois –; cependant, même ce facteur de saturation n'a pas produit son effet : la demande d'essence aux États-Unis continue d'augmenter presque au même rythme que la croissance économique. Certes, les progrès technologiques ont permis de réduire la consommation de carburant de certains modèles d'automobiles, mais les consommateurs préfèrent de plus en plus les voitures plus grandes avec la climatisation et d'autres accessoires qui consomment de l'énergie. La figure 1 montre comment cette tendance à utiliser des voitures de plus en plus grandes a neutralisé l'effet des avancées technologiques en matière de consommation de carburant dans sept pays d'Europe occidentale au cours de la décennie écoulée.

En 1994, la consommation de carburant sur route était comprise entre 8 et 11 litres aux 100 km en Europe occidentale et entre 13 et 14 litres aux 100 km aux États-Unis. Dans ce pays, la tendance à privilégier des véhicules compacts à la suite de la première crise pétrolière s'est inversée et on a assisté à un regain d'intérêt des consommateurs pour des modèles plus grands et plus luxueux. La baisse de la part de marché des petites voitures, qui est passée de 33 pour cent en 1992 à 26 pour cent en 1997, témoigne de cette tendance. Un autre facteur qui a contribué à la perte d'efficacité énergétique aux États-Unis a été l'utilisation croissante d'utilitaires légers, notamment les petits pickups et les minibus à usage privé. En 1990, ces utilitaires légers représentaient 32 pour cent du marché des véhicules parti-

Figure 1. Évolution de la répartition géographique de richesses économiques, hypothèse B de l'IIASA-CME



Note : Les superficies des régions du monde sont pondérées proportionnellement au niveau de leur PIB de 1990 (exprimé aux taux de change du marché [cm]).

Source : Auteur.

culiers aux États-Unis et leur consommation de carburant par km dépasse de 36 pour cent environ celle des autres voitures. Toutefois, cette préférence pour des automobiles toujours plus grandes n'est pas immuable. La plupart des objectifs essentiels de la mobilité peuvent être atteints avec une voiture compacte aussi bien qu'avec un pickup – si ce n'est mieux. On trouve dans l'histoire de multiples exemples d'évolutions rapides des modes de vie et des préférences des consommateurs et le secteur des transports ne fait pas exception à cet égard. Les préoccupations grandissantes concernant l'environnement pourraient amener à privilégier beaucoup plus les modes et technologies de transport économes en énergie dont les possibilités sont abordées de façon plus détaillée dans les sections suivantes.

Pays non membres de l'OCDE : développement économique et essor de la demande?

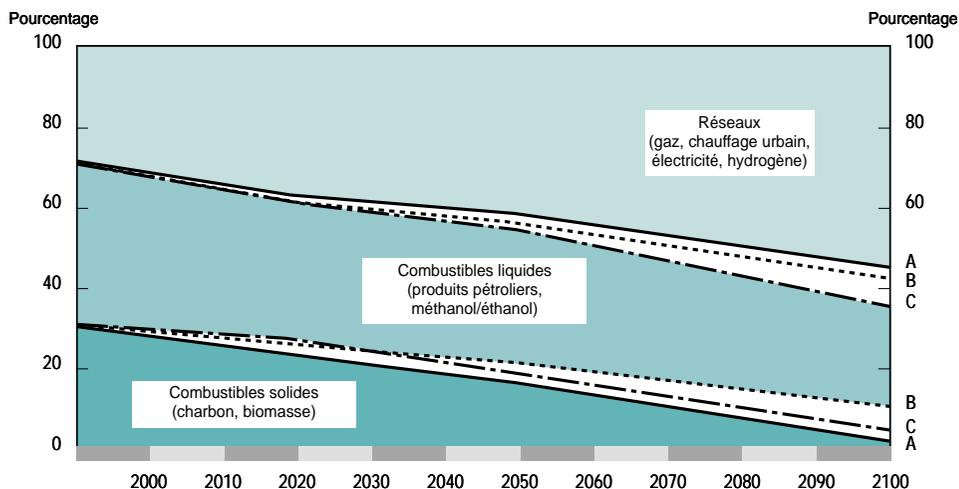
La situation est totalement différente dans les pays en développement. Dans ceux à très forte densité de population comme l'Inde et la Chine, les revenus n'ont atteint que récemment des niveaux permettant à un citoyen ordinaire d'acheter une voiture particulière. Dans le même temps, ces pays ont connu une longue période de très forte expansion économique, donnant lieu à une envolée spectaculaire de la demande d'énergie. Nombre de ces pays dynamiques d'Asie éprou-

vent actuellement de graves difficultés économiques, et le déclin de l'activité économique entraîne une réduction de la demande d'énergie. Il faudra certes du temps pour que ces économies sortent de la crise, mais les auteurs ont la ferme conviction que la reprise d'une croissance dynamique est possible dans ces pays, quoiqu'à un rythme légèrement plus lent.

La croissance économique prévue étant appelée à améliorer encore les conditions de vie des populations de ces pays, une part importante de leurs revenus accrus sera sans doute destinée à acheter des équipements qui consomment de l'énergie. La figure 2 montre l'effet produit par cette évolution sur le marché de l'énergie pendant la décennie écoulée. Ce graphique met en lumière le rapport entre la croissance de la demande d'énergie et la croissance économique dans 71 pays ne faisant partie ni de l'OPEP ni des pays à économie planifiée pendant la période 1986-1994, laquelle était caractérisée par des prix de l'énergie suivant à peu près la même évolution que l'on prévoit pour les deux prochaines décennies.

On y constate clairement l'importance de la consommation d'énergie dans le secteur résidentiel dans les pays à revenu faible et intermédiaire. Une fois que les revenus dépassent la barre des 10 000 dollars par habitant, les besoins essentiels pour le chauffage, l'éclairage et la cuisson des aliments sont couverts dans la plu-

Figure 2. **Consommation finale mondiale d'énergie sous forme de combustibles solides et liquides, et par réseaux**



Note : Les parties grisées qui se superposent correspondent aux variantes dans les hypothèses A, B et C.
Source : Auteur.

part des cas et le rapport entre la croissance économique et la demande d'énergie s'affaiblit notablement dans ce secteur de consommation d'énergie. En revanche, dans le secteur des transports, la demande d'énergie amorce une tendance à la hausse lorsque l'achat d'une voiture particulière devient abordable, c'est-à-dire lorsque les revenus avoisinent 3 000 dollars par habitant. Quand les revenus atteignent des niveaux intermédiaires et élevés, le rapport se resserre encore plus car le transport aérien à longue distance et d'autres activités de loisirs commencent à occuper une place de plus en plus grande dans les structures de la consommation. Il importe de noter que la demande d'énergie des catégories à faible revenu augmente plus vite que la croissance économique dans ces deux secteurs, ce qui laisse à penser qu'en cas de poursuite des tendances actuelles, la croissance de la demande d'énergie dans ces pays ne fait que commencer.

Une autre caractéristique importante de la demande d'énergie dans les pays en développement est la proportion importante de la consommation de combustibles non commerciaux, comme la biomasse, le fumier, etc. En Asie, quelque 80 pour cent de la demande d'énergie du secteur résidentiel et environ 35 pour cent de la demande totale d'énergie sont couverts par cette source d'énergie, contre environ 7 pour cent et 3 pour cent respectivement dans les pays de l'OCDE⁴. Cette forte proportion d'utilisation des formes d'énergie non commerciales tient surtout au fait que les populations rurales sont importantes dans ces pays⁵. La part revenant à ces combustibles traditionnels dans le dosage des sources d'énergie utilisées ira en diminuant en raison des problèmes logistiques que pose leur emploi, à mesure que progressera la transition économique entre une société rurale traditionnelle et une société urbaine plus industrialisée et axée sur les services. Autrement dit, la croissance de la demande de formes d'énergie commerciale sera sans doute encore plus forte que celle de la demande d'énergie en général, qui est déjà rapide.

Il y aura donc des différences radicales d'évolution entre les pays de l'OCDE arrivant à maturité et les pays émergents non membres de l'OCDE. L'essor de la demande des économies émergentes devancera de loin, selon toute vraisemblance, toutes les tendances à la saturation que l'on observera dans les économies parvenant à maturité. Nonobstant, ce n'est pas inévitable, et nous examinerons dans la section ci-après certaines des options technologiques envisageables qui pourraient provoquer une rupture de tendance.

3. Facteurs d'inflexion des tendances

Technologies économes en énergie

Comme on l'a évoqué dans l'introduction, la demande d'énergie des consommateurs est liée à leurs besoins de chauffage, d'éclairage et d'électricité. De nos

jours, l'énergie destinée à ces utilisations finales provient essentiellement de la transformation d'énergie chimique en énergie électrique et mécanique, par la combustion de différents types de combustibles fossiles et de biomasse. La quantité d'énergie finale fournie à partir d'une quantité donnée d'énergie primaire est déterminée par les lois de la thermodynamique. Pour accroître la quantité d'énergie finale obtenue, il faut augmenter la température de combustion ou récupérer, d'une façon ou d'une autre, la chaleur résiduelle. Dans une centrale moderne alimentée au gaz, 60 pour cent environ de l'énergie primaire sont transformés en électricité en utilisant des turbines à gaz couplées à des turbines à vapeur, celles-ci étant actionnées par les rejets thermiques provenant des turbines à gaz. Cette solution technologique n'est pas applicable directement dans les centrales à charbon, d'où un rendement de la transformation en électricité limité à quelque 40 pour cent. Une automobile moderne peut atteindre des rendements de transformation légèrement supérieurs à 30 pour cent dans des conditions optimales de fonctionnement. Outre les pertes d'énergie pendant la transformation d'énergie chimique en énergie électrique ou mécanique, on constate des déperditions considérables dans les bâtiments, par la ventilation et la transmission de chaleur à travers les murs, les toits et les fenêtres. La section ci-après analyse les solutions technologiques envisageables pour améliorer le rendement de la transformation et réduire les pertes de chaleur dans les bâtiments.

Véhicules économes en énergie⁶

Les facteurs qui déterminent la consommation spécifique de carburant des véhicules routiers sont principalement la conception du moteur, le poids du véhicule et ses caractéristiques aérodynamiques, sans compter les accessoires qui consomment de l'énergie, la climatisation par exemple. Dans un parcours représentatif, les pertes d'énergie sont imputables à des pertes thermodynamiques importantes dans le moteur, à la consommation d'énergie des accessoires ainsi qu'à l'énergie absorbée par les frottements internes et au niveau de la transmission. La puissance effectivement transmise doit en outre servir à vaincre des forces extérieures telles que la traînée aérodynamique, qui augmente de façon exponentielle avec la vitesse.

La plupart du temps, les voitures roulent en utilisant peu de leur puissance, alors que le moteur est normalement conçu pour la charge maximum envisageable. On peut citer, à titre d'exemple, le fait que la puissance maximale de la plupart des nouvelles voitures particulières est supérieure à 130 chevaux, tandis que la puissance moyenne effectivement utilisée n'est que de 8 chevaux. A ce niveau de puissance, le rendement du moteur est de 17 pour cent seulement, or il pourrait être beaucoup plus élevé si la conception des moteurs était alignée plutôt sur la puissance moyenne que sur la puissance maximale. On peut citer les technologies

ci-après, qui permettent d'accroître le rendement moteur à faible régime (Mendler, 1992) :

- Les *ensembles motopropulseurs hybrides* qui associent un moteur thermique et un (ou plusieurs) moteur(s) électrique(s) et permettent d'optimiser la charge et le régime, comme dans le nouveau modèle Prius de Toyota, pour lequel cette technologie autorise un doublement du rendement énergétique selon le constructeur.
- Les *transmissions avancées* et la transmission à variation continue : elles permettent au moteur de tourner dans une plage optimale de puissance et de régime, d'où une amélioration de quelque 10 pour cent du rendement énergétique.
- Le *calage variable de la distribution* : il réduit les pertes à l'accélération. L'élimination pure et simple des variations de régime permettrait un gain de consommation globale de carburant pouvant atteindre 20 pour cent.

Indépendamment de l'optimisation de la charge, les facteurs ci-après peuvent aussi améliorer sensiblement l'efficacité énergétique :

- *Moteurs à combustion pauvre*. Les moteurs actuels à allumage commandé associés à des pots catalytiques doivent brûler un mélange air-carburant stœchiométrique. On peut améliorer le rendement du moteur en augmentant la proportion d'air et le taux de compression : il en résulte une économie de carburant de quelque 10 pour cent, comme dans le nouveau modèle GDI de Mitsubishi.
- *Préchauffage du moteur ou conservation de la chaleur du moteur*. Une bonne partie des trajets effectués en voiture le sont avec le moteur encore froid. Aux États-Unis, pour une distance moyenne de 12.5 km (7.8 miles) parcourue en voiture particulière, la mise en température du moteur réduit la consommation de carburant de 12 pour cent à une température ambiante de 21 °C, et de 16 pour cent à 7 °C.
- En théorie, *la variation du taux de compression* peut augmenter le rendement thermodynamique du moteur de 30 pour cent, mais cette affirmation relève encore de la spéculation.

Outre les économies de carburant découlant du perfectionnement de la conception du moteur, l'amélioration de l'aérodynamique a permis de réaliser des progrès notables ces dernières années. Au cours des 25 dernières années, les coefficients moyens de pénétration dans l'air des voitures européennes standard ont été ramenés de 0.45 à 0.30 ce qui a permis une économie de carburant de quelque 30 pour cent. De surcroît, l'utilisation croissante d'alliages métalliques et de matériaux composites légers – allant de pair avec une meilleure conception des

pièces mécaniques – a entraîné une amélioration ininterrompue du rendement énergétique.

Il faut espérer que toutes ces solutions envisageables seront appliquées, ce qui aura pour effet d'améliorer régulièrement l'efficacité énergétique à très long terme. Cependant, au-delà des cinquante prochaines années, il sera de plus en plus difficile d'accroître le rendement des moteurs à combustion interne et il faudra revoir complètement la conception de l'ensemble motopropulseur.

On peut avancer que les piles à combustible sont la plus intéressante de ces nouvelles options pour améliorer l'efficacité; depuis cinq ans, le développement de cette technologie s'est accéléré nettement. L'hydrogène est le combustible le mieux adapté pour les piles à combustible, mais le méthanol, les naphas, l'essence et le gaz naturel s'y prêtent également, après reformage à bord du véhicule. Le constructeur Daimler-Benz, grâce à ses travaux internes de développement de technologies et à son alliance avec Ballard, se trouve dans le peloton de tête dans ce domaine. A l'heure actuelle, la pile à combustible à membrane échangeuse de protons (PEM) offre les perspectives les plus intéressantes car elle allie une conception simple, un rapport poids/puissance élevé et une basse température de fonctionnement. Il est prévu que le rendement d'une pile à combustible PEM fonctionnant à l'hydrogène sera d'environ 40 pour cent⁷.

Aéronefs à faible consommation de carburant

A l'époque où les prix du pétrole étaient élevés, dans les années 80, les coûts de l'énergie représentaient près d'un tiers des dépenses d'exploitation des aéronefs civils. Bien que cette part soit allée en diminuant parallèlement à la baisse des prix du pétrole, l'amélioration de la consommation de carburant des avions n'a pas cessé d'être l'un des premiers objectifs des exploitants et des aviateurs. L'évolution observée aux États-Unis donne un exemple de progrès au cours des décennies écoulées. Depuis 1970, le trafic passagers a plus que triplé dans ce pays, son taux de croissance annuel étant de 6.6 pour cent. Au cours de la même période, la consommation d'énergie ne s'est accrue que de 43 pour cent, soit à un taux d'à peine plus de 2 pour cent par an en moyenne; en conséquence, le nombre de sièges-miles par gallon a doublé. Cette amélioration spectaculaire de l'efficacité énergétique tient à trois facteurs :

- Les moteurs sont plus économes en carburant.
- Les avions sont plus grands et ont plus de sièges.
- Les coefficients de remplissage passagers ont augmenté par suite de la déréglementation du transport aérien.

Comme le parc aérien est progressivement renouvelé, des moteurs et des cellules plus récents, qui entraînent des économies de carburant, remplacent les équipements plus anciens et moins performants.

Depuis son adoption dans les avions commerciaux dans les années 60, le moteur à réaction est passé du turboréacteur au réacteur à turbosoufflante, puis au réacteur à taux élevé de dilution (HB), dont les rendements n'ont cessé d'augmenter. Les turbosoufflantes à taux élevé de dilution consomment maintenant 40 pour cent de moins de carburant que les premiers turboréacteurs. L'emploi de matériaux améliorés résistant à des températures de combustion plus élevées a également joué un rôle à cet égard (Greene, 1990).

Le concept du taux de dilution très élevé [Ultra High Bypass (UHB)]⁸ offre la possibilité de progrès considérables des performances de propulsion des avions subsoniques. Il a été démontré que les turbosoufflantes UHB carénées permettaient d'accroître le rendement de 10-20 pour cent. Les moteurs à hélices transsoniques (propfan) non carénés utilisant des hélices de conception avancée ont affiché une augmentation du rendement de 20-30 pour cent par rapport aux moteurs à turbosoufflante actuels. Les nouveaux types d'hélices contrarotatives ont permis de surmonter la limitation de vitesse des turbopropulseurs et d'atteindre, avec les propfans, une vitesse de Mach 0.8-0.9. Cependant, elles présentent l'inconvénient d'être très coûteuses à l'heure actuelle et le prix du carburant devrait augmenter sensiblement pour qu'elles deviennent rentables pour les compagnies aériennes. Après 2010, il faudra adopter de nouveaux concepts de moteurs pour améliorer la consommation de carburant. Il pourrait s'agir, par exemple, de moteurs équipés d'échangeurs de chaleur légers pour le refroidissement de la charge et la récupération de chaleur à l'échappement du moteur. Si ces technologies pouvaient être appliquées dans l'aviation, elles permettraient théoriquement d'économiser 20-25 pour cent d'énergie. Tout compte fait, un accroissement supplémentaire du rendement moteur de 40 pour cent est théoriquement possible sans aucune perte de performances.

Le rendement technique des avions peut aussi être amélioré en utilisant des matériaux plus légers. Les matériaux composites légers modernes offrent la possibilité de réduire de 30 pour cent le poids de la cellule, sans entamer sa résistance structurale, voire en l'améliorant. Pour mettre en relief la nécessité de cet allègement de la cellule, on peut dire qu'il faut environ 1 tonne de carburateur pour mettre en vol un avion de 100 tonnes à une altitude de croisière de 10 000 mètres, en prenant pour hypothèse un rendement de conversion de 25 pour cent. Pour un voyage aller-retour type, cela correspond à une forte proportion de la consommation totale d'énergie.

Enfin, le manège improductif d'avions en attente d'atterrissage représente un gaspillage d'énergie qui pourrait être réduit à l'aide d'outils perfectionnés de pla-

nification et de contrôle de la circulation aérienne dans les aéroports. Selon certaines études, des outils automatiques d'établissement de plans de vol, de planification de l'exploitation des aéroports et de contrôle de la circulation aérienne pourraient faire baisser de 6 pour cent la consommation de carburant; par ailleurs, en augmentant encore la taille des aéronefs, on pourrait aussi réaliser des économies d'énergie substantielles (Greene, 1990).

Néanmoins, tous les efforts déployés en vue de mettre au point des technologies plus efficaces ne garantissent pas que le système de transport aérien de l'avenir sera moins énergivore que le système actuel. Une relance du transport aérien supersonique pourrait bien inverser la tendance actuelle à utiliser des aéronefs toujours plus économes en énergie. Bien que le parc actuel d'avions Concorde, vieillissants et gros consommateurs d'énergie, ne permette nullement de présumer de l'efficacité énergétique d'un parc futur d'aéronefs supersoniques, ces derniers consommeront certainement beaucoup plus de carburant que les aéronefs subsoniques. Selon certaines prévisions du marché, un parc de quelque 300-1 200 avions commerciaux supersoniques sera en service dans les 10 à 30 prochaines années (Archer, 1993). Dans cet ordre d'idées, il est important de rappeler que presque toutes les innovations concernant les transports dans l'histoire de l'humanité ont entraîné une plus forte consommation d'énergie que la technologie remplacée, mais aussi des gains de temps.

Bâtiments économes en énergie

Les bâtiments sont forcément exposés à toutes sortes de conditions climatiques. Une tâche qui devient de plus en plus importante pour les architectes et les ingénieurs dans le domaine du chauffage, de la ventilation et du conditionnement d'air consiste à créer un milieu ambiant acceptable à l'intérieur des bâtiments pour un coût d'investissement et de fonctionnement raisonnable. En outre, la multiplication spectaculaire du nombre d'ordinateurs et autres équipements électroniques a lancé un nouveau défi aux ingénieurs en climatique (ceux qui sont mentionnés dans la phrase précédente), consistant à trouver les moyens d'«exporter» la chaleur dégagée par ces appareils⁹.

La consommation d'énergie pour chauffer ou refroidir les bâtiments est directement tributaire des flux thermiques circulant entre l'intérieur et l'extérieur. Ceux-ci peuvent être classés dans les trois catégories suivantes, qui doivent toutes être prises en compte pour améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments :

- le rayonnement solaire qui produit un flux thermique vers l'intérieur du bâtiment;
- les pertes d'énergie dues à la transmission de chaleur à travers les murs, les toits et les fenêtres;

- les pertes dues au renouvellement de l'air par la ventilation et la consommation d'énergie des ventilateurs utilisés à cet effet, etc.

Le rayonnement solaire – Un moyen important d'agir sur le flux thermique qui s'introduit dans le bâtiment passe par la mise au point de fenêtres «intelligentes», comportant un revêtement qui empêche ou permet le passage de l'énergie du rayonnement solaire, en fonction des conditions à l'intérieur des locaux. Ce type de fenêtre permet de réduire la quantité d'énergie nécessaire au chauffage, puisqu'elle laisse entrer un flux thermique important dans le bâtiment par temps froid. Les besoins de climatisation seraient moindres également, car la majeure partie du flux de chaleur entrant dans le bâtiment passe par les vitrages à une intensité d'environ 1 kW/m².

Les pertes dues à la diffusion thermique à travers les murs, les toits et les fenêtres sont proportionnelles à l'écart de température entre l'intérieur et l'extérieur. De même que pour mettre à profit le flux entrant d'énergie solaire, le perfectionnement des fenêtres est le meilleur moyen de réduire les besoins en énergie des bâtiments¹⁰. La mise au point de matériaux d'isolation transparents à placer dans le vitrage peut remplacer les systèmes actuels où deux vitres, avec des surfaces réfléchissantes, sont séparées par une lame d'air ou de gaz. On peut ainsi ramener ces déperditions de chaleur à un niveau aussi faible qu'à travers les murs. Pour réduire les pertes à travers les murs et le toit, on peut insérer une couche de matériau isolant, ce qui augmente leur épaisseur. Cette méthode est plus coûteuse et réduit la surface utilisable au sol. Pour les nouveaux bâtiments, il faut donc trouver un équilibre entre le coût d'investissement dans l'isolation des parois et le coût de l'énergie.

Les pertes dues à la ventilation sont en rapport avec les rejets d'air chauffé, mais aussi avec la quantité d'énergie nécessaire pour actionner les ventilateurs. Les échangeurs de chaleur utilisés pour transférer le contenu énergétique de l'air rejeté à celui qui entre dans les locaux est une technologie bien connue et parvenue à maturité : si elle était employée de façon plus généralisée, des économies d'énergie substantielles pourraient être réalisées. En outre, on peut diminuer de beaucoup la consommation d'énergie des gros ventilateurs actuels en tirant davantage parti du vent et des forces de convection naturelle pour actionner le système de ventilation. Cette solution offrirait, en prime, l'avantage de réduire sensiblement les niveaux de bruit.

- Production décentralisée d'électricité

Les petites unités de cogénération, qui permettent de produire de l'électricité sur le lieu de consommation et d'utiliser de la chaleur résiduelle à basse température pour chauffer l'eau destinée à des applications résidentielles et commerciales, est sans doute appelée à jouer un rôle important dans les appro-

visionnements énergétiques futurs des bâtiments. Ces unités devraient être conçues en fonction de la demande de chaleur des bâtiments et couplées au réseau électrique afin d'assurer la compensation des charges selon les besoins. Pour ces dispositifs, un certain nombre de technologies de moteurs différentes sont actuellement à l'étude :

- moteurs classiques fonctionnant au diesel, au gaz naturel ou aux énergies renouvelables;
 - petites turbines à gaz ou au gazole;
 - moteurs Stirling fonctionnant avec plusieurs carburants;
 - piles à combustible fonctionnant au gaz naturel et même, dans un avenir plus lointain, à l'hydrogène.
- Pompes à chaleur

La technologie des pompes à chaleur est celle dont on peut affirmer qu'elle offre les plus grandes possibilités d'utilisation plus rationnelle de l'énergie dans les bâtiments. Elle permet de transformer de l'énergie provenant de sources de chaleur extérieures, par exemple l'eau de mer et les aquifères, qui serait inutilisable autrement, en énergie utile pour chauffer les locaux au moyen d'un fluide caloporteur¹¹. Dans les pompes à chaleur, l'énergie à basse température est transmise au fluide caloporteur en le vaporisant dans un échangeur de chaleur à basse pression, vapeur qui est alors comprimée pour augmenter la température de condensation, à laquelle l'énergie absorbée par le fluide caloporteur est libérée lorsqu'il se condense. Le seul apport d'énergie nécessaire au fonctionnement de la pompe à chaleur est l'énergie mécanique pour actionner les compresseurs, généralement produite par des moteurs électriques. Le rendement de la pompe à chaleur, ou coefficient de performance, subit l'influence de l'écart de température entre le milieu où est captée l'énergie et le milieu de dissipation. Les coefficients de performance caractéristiques avoisinent 3 pour les usages domestiques et 25 pour les grandes installations industrielles. Grâce aux pompes à chaleur, l'eau de refroidissement industrielle à basse température – en général, entre 10 et 20 °C – peut être mise à profit pour chauffer des zones résidentielles, des centres commerciaux, etc. A cette température, l'eau peut être transportée par des tuyauteries sur de grandes distances, avec très peu de déperditions thermiques, jusqu'à des pompes à chaleurs installées dans des logements, immeubles de bureaux, hôpitaux, piscines couvertes, etc., où la température est portée au niveau souhaité.

Le marché de la chaleur en Norvège illustre bien comment les pompes à chaleur permettent de réduire sensiblement la consommation d'énergie dans les bâtiments. Actuellement, le chauffage représente environ 60 pour cent du total de la consommation énergétique des bâtiments norvégiens, soit 30 TWh. Même dans un pays où les prix de l'électricité sont très bas, comme c'est le cas en Norvège, on a

estimé qu'il est possible de produire dans de bonnes conditions économiques 25 TWh par an au moyen de pompes à chaleur, avec un taux de rendement de 7 pour cent. Il en découlerait des économies d'énergie nettes de 17 TWh par an¹². Le centre de R-D de Statoil, à Trondheim, est un exemple d'immeuble de bureaux où un système de pompe à chaleur captant l'énergie thermique de l'eau de mer a été installé avec succès et fournit à présent quelque 70 pour cent des besoins totaux en chaleur.

En résumé, les avancées technologiques dans les transports, par exemple les ensembles motopropulseurs hybrides et les piles à combustible, feront probablement plus que doubler le rendement énergétique des voitures, sans perte de performances, dans les deux prochaines décennies. S'agissant des avions, des gains de rendement analogues seront sans doute imputables au perfectionnement ininterrompu de la technologie des moteurs, à l'utilisation de matériaux plus légers et à l'augmentation des dimensions des avions. Le recours généralisé à des solutions associant le chauffage urbain à basse température issu de la chaleur résiduelle des centrales électriques, entre autres, avec, au niveau local, les pompes à chaleur et les unités de cogénération – ainsi que les systèmes «intelligents» qui optimisent le flux d'énergie solaire entrant dans les bâtiments – entraîneront aussi une réduction sensible des besoins en énergie.

La structure économique en évolution

Les sociétés se transforment au fur et à mesure que l'homme continue à renforcer sa capacité d'innovation et à améliorer la productivité. L'une des mutations observées a été le passage des sociétés agricoles aux sociétés industrielles, qui est allé de pair avec les innovations permettant d'accroître la productivité dans l'agriculture, d'où des effectifs en surnombre qui ont pu être employés dans les secteurs industriels émergents. Après avoir assisté à la transformation d'une société industrielle en une société de services, il nous est donné de voir maintenant le passage au numérique, qui ne nécessite plus de «contact physique» pour concrétiser une transaction. Étant donné que la création d'une unité de valeur dans le secteur industriel consomme environ dix fois plus d'énergie que celle d'une unité de valeur dans le secteur des services¹³, le développement de ce dernier influencera les structures futures de la consommation d'énergie de la société. Avec la dématérialisation de l'économie, il se dessinera une tendance de plus en plus prononcée à la baisse des besoins en énergie par unité de PIB.

En outre, le passage à l'économie du numérique, dans laquelle l'Internet est le fruit de la convergence des progrès des télécommunications et de l'informatique, ouvre de nouvelles possibilités au commerce et à la distribution électroniques. A brève échéance, presque tous les investissements dans les technologies de l'information s'inscriront dans un contexte caractérisé par des systèmes de communica-

tions interconnectés, que ce soit à l'intérieur des entreprises, entre entreprises, entre des particuliers et des entreprises ou entre particuliers. Aux États-Unis, le secteur de la micro-informatique est à l'origine de 25 pour cent de la croissance économique et de 8 pour cent de l'activité économique, les sociétés de logiciels y contribuant pour une bonne part.

La distribution de cette production par les circuits classiques de distribution n'a pas de raison d'être, puisque le commerce électronique peut l'assurer de manière plus efficiente en utilisant des liaisons à haut débit. Le commerce électronique peut prendre plusieurs formes différentes :

- Commerce électronique entre entreprises : les sociétés utilisent l'Internet pour réduire les coûts d'achat, les stocks et la durée des cycles, offrir des services plus efficaces et plus efficaces à leur clientèle, abaisser les coûts de vente et de commercialisation, et trouver de nouveaux débouchés.
- Distribution de biens et de services aux consommateurs finals au moyen du numérique : logiciels, journaux, billets d'avion et disques compacts audio ne doivent plus nécessairement être emballés et livrés aux magasins, à domicile ou aux kiosques à journaux pour leur distribution ultérieure, puisqu'ils peuvent être livrés par voie électronique sur l'Internet.
- Commandes interactives de biens matériels au détail : les pratiques de travail de plus en plus stressantes conduisent à attacher une importance grandissante au temps de loisir, d'où l'élan acquis par les achats sur catalogue dans les années 80 et 90, service qui est actuellement transféré sur l'Internet.

Bien que le commerce électronique en soit encore à un stade très précoce de développement, son chiffre d'affaires à l'échelle mondiale, qui regroupe les trois catégories ci-dessus, devrait passer de quelque 6 milliards de dollars en 1996 à 150 milliards de dollars en l'an 2000¹⁴. Aux États-Unis, les ventes interactives au détail devraient, selon les prévisions, croître rapidement pour atteindre 56 milliards de dollars en l'an 2000, les taux de croissance se stabilisant quelque peu après cette date, pour aboutir à un chiffre d'affaires de 115 milliards de dollars en 2005¹⁵. Aux États-Unis, environ 25 pour cent des déplacements des particuliers sont consacrés à faire des courses. Avec l'adoption à grande échelle du commerce électronique de détail, il faudra beaucoup moins souvent se rendre en personne dans les magasins, d'où une réduction des volumes de transport. Il ne sera plus nécessaire non plus de distribuer les marchandises dans les points de vente, et les volumes de fret diminueront encore plus.

Il ne faut pas oublier, par ailleurs, que le tourisme, branche d'activité à très forte intensité énergétique, est l'un des secteurs en plus forte expansion au niveau mondial, et que l'essor du transport aérien à longue distance constitue l'un des faits marquants observé sur les marchés de l'énergie à partir des années 70. Les volumes du transport aérien n'ont pas cessé de croître à un rythme environ deux

fois plus rapide que l'économie dans son ensemble depuis 1970. En Norvège, la part des dépenses des consommateurs liées aux déplacements et aux transports est passée de 7 pour cent en 1958 à 20 per cent en 1994¹⁶.

Le rôle moteur des technologies de l'information et des communications dans le domaine du télétravail

Nous avons déjà évoqué comment l'utilisation de plus en plus répandue des technologies de l'information et des communications (TIC) dans les automobiles, les avions et les bâtiments permet de réduire la consommation d'énergie, et comment la révolution du numérique est porteuse d'une transformation de la structure économique de nos sociétés par laquelle les besoins de transports classiques seront considérablement réduits. Cette partie du présent chapitre porte essentiellement sur la façon dont les TIC sont susceptibles de favoriser de nouvelles pratiques professionnelles et commerciales – en permettant, dans certains cas, de se passer complètement des moyens de transport classiques. A cet égard, la question cruciale est, bien entendu, le facteur humain : les travailleurs et les consommateurs exploiteront-ils pleinement les possibilités des TIC pour remplacer le transport classique, ou bien les modes de vie et les pratiques de travail resteront-ils inchangés ?

TI et télécommunications – état d'avancement et évolution des technologies

Dans le domaine des TI et des télécommunications, les technologies ont progressé à un rythme apparemment impossible à freiner, ce dont témoignent deux exemples. Pendant une longue période, la puissance des puces électroniques a doublé tous les 18 mois. Chaque année, depuis 1985, on assiste à un doublement de la capacité des dispositifs de stockage (disques). Ces avancées techniques ont entraîné des réductions de coûts. Il y a, certes, des limites matérielles à la croissance qui conditionneront l'ampleur des possibilités dans ce sens, mais on ne les atteindra pas dans la prochaine décennie, d'après les recherches actuelles.

Dans leurs débuts, les télécommunications ne servaient qu'à la transmission de signaux vocaux. Cette époque est révolue. A l'heure actuelle, la part globale du trafic vocal est tombée à 50 pour cent, non pas à cause d'un recul des communications orales, mais plutôt de l'augmentation spectaculaire du transfert de données par suite de la baisse des coûts dans le secteur des télécommunications. Cette baisse, plus rapide encore que celle observée dans le secteur de l'informatique, a induit cette inflexion notable. Vu que l'on prévoit que les coûts des télécommunications ne cesseront de diminuer, le trafic données continuera de croître à une vitesse impressionnante; si les tendances actuelles persistent, sa part atteindra 90 pour cent en 2003. Nous nous acheminons très rapidement vers un monde où la distance perd son importance. A la faveur du progrès technologique, la capacité de

transmission visuelle, c'est-à-dire la transmission en ligne d'images vidéo animées et de documents graphiques, vient s'ajouter à la technologie des télécommunications dont l'usage est déjà généralisé, d'où la possibilité d'une transformation radicale des pratiques de travail et des modes de vie¹⁷.

La baisse des coûts des télécommunications conjuguée à la commercialisation massive des ordinateurs personnels a ouvert la voie à des produits et services novateurs et inédits, dont la portée était impossible à prévoir. L'Internet en est le principal exemple : après 25 ans d'existence insignifiante, la simplicité de l'interface avec l'utilisateur de son logiciel de navigation a soudainement engendré un marché de masse, où le nombre d'utilisateurs a atteint 100 millions dans les cinq années qui ont suivi son lancement. Pour bien mesurer l'ampleur du phénomène, il est à noter que le téléphone a mis 40 ans pour compter 10 millions d'abonnés.

Néanmoins, le passage à une société des télécommunications n'ira pas sans difficultés. On peut s'attendre que la croissance rapide de la demande de capacité de télécommunications donne lieu à d'importants goulets d'étranglement, et il faudra d'immenses investissements pour les résorber. Pour réussir une expansion rapide et efficace de la capacité, il faudra mettre en place une série de services infrastructurels normalisés, solidement ancrés et sécurisés, notamment dans les domaines de la gestion des paiements et des droits de propriété intellectuelle. En outre, il est possible que cette technologie creuse encore plus le fossé entre les pays en développement et les pays industrialisés, du fait des mutations structurelles qu'elle provoquera dans de l'économie mondiale. Les pays en développement risquent de ne pas pouvoir aller au-delà du stade d'une économie industrielle à forte intensité de main-d'œuvre à bas salaire, tandis que les pays industrialisés privilégieront les secteurs à forte intensité de savoir et à salaires élevés. Même s'il est réaliste d'envisager cette éventualité, le vif essor d'une industrie de logiciels concurrentielle à l'échelon international dans des pays comme l'Inde donne à penser que l'on sous-estime ce risque. Nous devons aussi garder présent à l'esprit que l'une des principales conséquences des TIC est la réduction, voire l'élimination parfois, des inconvénients liés à la situation géographique des économies émergentes.

Production de biens et de services

La révolution des TIC a également eu pour effet d'améliorer remarquablement les systèmes de coordination et de gestion du savoir. Ce fait, et le rôle de plus en plus important du savoir dans les biens et services, ont ouvert la voie à des systèmes de production toujours plus flexibles, à des échelles de plus en plus réduites. Dans le même temps, la libéralisation et la mondialisation en cours font naître d'intenses pressions concurrentielles qui poussent inéluctablement à adopter de nouvelles structures organisationnelles, dans la quête permanente de l'efficacité.

Par exemple, les TI ont facilité l'apparition de nouveaux moyens de coordonner les activités qui ont donné lieu à des structures organiques moins hiérarchisées et plus décentralisées, où un grand nombre d'équipes et de ressources sont en rapport direct avec la direction centrale. La spécialisation fonctionnelle classique s'inverse : chacune de ces petites unités autonomes réalise nombre des différentes tâches qui étaient généralement réparties entre des services distincts. En outre, les innovations récentes dans le domaine des TIC permettent de renforcer toujours plus l'intégration et le transfert d'expériences entre les activités de conception, d'ingénierie et de fabrication, sans pour autant qu'elles soient implantées au même endroit. Par ailleurs, la réduction simultanée des frais de premier établissement et de rééquipement autorise une production par lots plus réduits, des cycles de production plus courts et de plus brefs délais de livraison, d'où la disparition de nombre d'économies d'échelle dans plusieurs industries manufacturières.

Toutes ces évolutions parallèles permettront de décentraliser davantage les processus de production et, par conséquent, d'implanter les lieux de travail dans les zones résidentielles ou à proximité de celles-ci. Par contre, il faut souligner que cette décentralisation accroîtra les besoins internes de transport de marchandises et de personnel des entreprises, transport qui s'effectue souvent par petits lots dans le cas des marchandises ou en nombre réduit lorsqu'il s'agit des personnes employées, ce qui nuit effectivement à l'efficacité énergétique du système de transport.

*Télétravail*⁸

L'un des aspects importants du développement des TIC tient à ce qu'elles multiplient les possibilités du télétravail, qui permet d'éviter le recours aux moyens de transport classiques. Ce n'est nullement une idée nouvelle : ce terme est apparu pour la première fois dans les années 70, lorsque des auteurs comme Alvin Toffler (1970, 1980) ont écrit avec enthousiasme sur le «village électronique», lieu de travail du futur. Les potentialités du travail à distance ont toujours, depuis lors, donné lieu à des prévisions optimistes, mais c'est seulement ces dernières années que les progrès des télécommunications ont suffisamment réduit les obstacles dressés par les coûts et la technologie pour ouvrir des possibilités de généralisation des pratiques de télétravail. La notion de télétravail recouvre trois approches différentes à l'égard des nouvelles pratiques professionnelles :

- prolonger les horaires de travail, généralement à domicile et ponctuellement, le soir et le week-end;
- travailler à distance, d'ordinaire une partie de la semaine;
- travailler dans des bureaux virtuels, à domicile ou «sur la route», et ne retourner au bureau que pour des réunions occasionnelles.

Ces trois modes de travail à distance présentent des similarités, mais ne sont pas identiques. A la base, ils se distinguent par les différences de ce qui constitue l'essentiel de la vie professionnelle des travailleurs. En général, ceux qui effectuent des heures supplémentaires à domicile ou qui travaillent à distance mènent leur activité professionnelle principale «au bureau». Quant à ceux qui travaillent dans des bureaux virtuels, l'essentiel de leur vie professionnelle se déroule n'importe où. Étant donné que les travailleurs de la première catégorie effectuent des déplacements domicile-travail quotidiennement, l'utilisation des télécommunications ne se substitue pas aux déplacements, elle est en fait complémentaire. En revanche, on peut considérer que le travail à distance et dans des bureaux virtuels permet de remplacer le transport classique par les télécommunications.

Selon toutes les études disponibles, les gains de productivité sont un grand avantage du télétravail. Par exemple, en 1985, la National Academy of Science a mené une étude expérimentale aux États-Unis montrant que le travail à distance faisait augmenter la productivité de 15 à 25 pour cent¹⁹. Il aide aussi de plus en plus les employés et les employeurs à faire face à des événements imprévus qui empêchent les travailleurs de se rendre au bureau, allant du mauvais temps aux catastrophes naturelles. A cet égard, il est intéressant de noter qu'en Californie, après le tremblement de terre de 1994, la productivité moyenne s'est accrue de 12 pour cent, alors que les gens ne pouvaient pas aller travailler. En 1994 déjà, le nombre total d'Américains travaillant à distance officiellement ou non, à temps partiel ou à temps complet, était compris, selon les estimations de diverses études, entre 4 et près de 9 millions de personnes²⁰, soit 3-7 pour cent de la population active totale.

Si le développement le plus rapide du télétravail est observé aux États-Unis, la tendance ne se cantonne pas à ce pays. Une étude menée par le Gartner Group décrit un scénario optimiste de croissance mondiale du nombre de personnes pratiquant le télétravail, lequel devrait passer de 15 millions en 1996 à 105 millions en 2002²¹. Cet essor est inégalement réparti dans le monde : les télétravailleurs aux États-Unis, qui sont actuellement 4-9 millions, atteindraient le chiffre de 65 millions en 2002 – ce qui suppose que près de 50 pour cent de la population pourrait exercer alors une activité professionnelle sous cette forme. En Europe, ce chiffre devrait passer de 4 millions à 30 millions et, dans le reste du monde, il passera probablement de 1 million à 10 millions au cours de cette période de cinq ans.

Pour mettre en lumière comment le développement du télétravail peut agir sur les structures de transport et la demande d'énergie, un rapport norvégien²² a évalué dans quelle mesure il pourrait réduire les déplacements nécessaires en voiture. Étant donné que le télétravail peut s'y substituer ou s'y ajouter, un scénario a été mis au point pour chacune de ces deux possibilités. Dans le cas où le télétravail est complémentaire des déplacements classiques, son développement est peu encouragé et seulement 10 pour cent de la population sont supposés travailler à

domicile pendant plus d'un jour par semaine. Dans le cas où le télétravail se substitue aux déplacements classiques, les entreprises et les pouvoirs publics, à tous les niveaux, coopèrent pour mettre en place des politiques plus explicites et coordonnées afin d'encourager et de stimuler le télétravail. Dans ce scénario, 20 pour cent de la population active travaillerait à domicile un jour par semaine ou davantage. À l'aide de ces scénarios et des connaissances actuelles sur la démographie, on a calculé les effets produits sur les déplacements domicile-travail en voiture dans les grandes régions urbaines d'Oslo et de Bergen. L'analyse démontre que le télétravail permet d'y réduire les déplacements ainsi que la pollution qu'ils entraînent. Bien que son incidence sur l'usage de l'automobile ne représente qu'un pourcentage compris entre 3 et 6 per cent, son impact sur la consommation d'énergie sera beaucoup plus important, compte tenu des effets produits sur les volumes du trafic et le gaspillage d'énergie aux heures de pointe.

Si l'on s'attend à surmonter dans un délai de 20 ans tous les obstacles technologiques à la pénétration accrue des pratiques de télétravail, la plupart des études et analyses laissent toutefois présager qu'il faudra venir à bout d'importants problèmes sociaux, organisationnels et politiques pour que le télétravail puisse se généraliser. Du point de vue individuel, les télétravailleurs citent souvent une plus grande souplesse dans leur vie personnelle comme étant son effet le plus positif en général²³. Par contre, les contacts directs limités du télétravailleur avec la direction risquent souvent de susciter chez lui l'inquiétude de passer à côté des possibilités de promotion. Les rapports plus réduits avec des collègues et le fait que l'espace de travail et de loisirs soit le même sont souvent évoqués comme étant des aspects sociaux négatifs du télétravail. Les résultats de l'enquête de Statoil auprès de ses employés font ressortir que les effets nuisant aux perspectives de carrière sont exagérés; la grande majorité des salariés qui y ont répondu ont fait savoir que les relations avec la direction n'avaient pas changé ou s'étaient améliorées à la suite de l'installation de bureaux au foyer²⁴.

Dans l'optique d'une gestion d'entreprise traditionnelle, la principale prévention à l'égard du télétravail semble être la crainte de perte d'autorité d'encadrement sur les employés. C'est toutefois un problème commun aux entreprises contemporaines, dotées d'équipes remplissant plusieurs fonctions, et qui n'est pas spécifiquement lié au télétravail. En outre, il est probable que l'évolution de nombre d'aspects organisationnels conduise à l'adoption de critères de performance davantage axés sur des objectifs, s'appliquant aussi bien aux télétravailleurs qu'aux autres, ce qui réduirait encore plus le poids de cet argument.

Compte tenu des avantages notables du télétravail, tant pour les employeurs que pour les employés, il parviendra à maturité et deviendra une composante des activités normales des entreprises dans les pays de l'OCDE à l'horizon 2010. Ces dernières devront repenser les anciennes conceptions concernant les immeubles

L'expérience du travail à domicile à Statoil

Toile de fond

Statoil considère que la poursuite du passage à la société du savoir est une composante prédéterminée de notre environnement commercial. De ce fait, centrer davantage l'attention sur la technologie et les connaissances constitue, estime-t-on, le principal moyen de gagner un avantage concurrentiel. Cette vision de l'avenir a conduit à lancer, il y a un an, l'«IT-step» («Opération TI»). Ce programme éducatif est une vaste initiative visant à améliorer les connaissances des salariés de l'entreprise dans le domaine des TIC et à développer leur aptitude à les utiliser ultérieurement à leur avantage personnel et professionnel. L'initiative «IT-step» est entièrement financée par Statoil et comprend la distribution d'ordinateurs personnels domestiques multimédias les plus modernes, avec imprimante et raccordement gratuit à l'Internet. Les employés s'engagent à suivre un programme de formation informatique pendant leur temps libre, axé sur des compétences génériques en utilisation du PC et de l'Internet, sur d'autres aspects de la société de l'information, ainsi que sur l'histoire et l'environnement commercial de Statoil. L'ordinateur est mis à la disposition du salarié et de sa famille. Ce programme a été présenté comme une offre faite aux 14 000 travailleurs employés par Statoil à l'époque. Plus de 90 pour cent des effectifs y ont déjà participé. C'est une grande réussite jusqu'à présent, ce dont témoigne le record absolu de l'enquête annuelle de Statoil sur le degré de satisfaction du personnel et les conditions de travail. Il est à noter aussi qu'un an après, plus de 75 pour cent des participants déclarent préférer cette forme d'apprentissage assisté par la technologie à l'enseignement présentiel classique. En outre, le programme «IT-step» est avantageux car il a donné à Statoil une grande notoriété et une image d'entreprise pionnière.

Expériences de télétravail

Statoil manifeste également un vif intérêt pour l'étude des avantages potentiels du télétravail et elle vient d'achever un premier projet officiel en la matière. Compte tenu de l'infrastructure en place grâce au programme «IT-step», il était facile d'étoffer les applications du logiciel de l'ordinateur personnel domestique pour en faire un poste de travail au domicile de ceux qui participaient au projet. Les résultats de cette phase pilote montrent que près de 40 pour cent des employés ont moins utilisé leur automobile, quoique non moins de 50 pour cent aient affirmé ne pas avoir constaté de différence²⁵. En ce qui concerne la fréquentation des transports publics, plus de 80 pour cent ont répondu que cette expérience n'a pas influencé leur comportement. Il importe de souligner que ce changement de comportement à l'égard des transports est intervenu dans un contexte où la plupart des gens avaient moins de 30 minutes de temps de trajet jusqu'à leur lieu de travail. On en a pour preuve le fait qu'une part importante de la réduction de l'usage de l'automobile tenait au fait que le personnel avait moins de travail à réaliser le soir au bureau et moins de trajets à effectuer pour s'y rendre à la fin d'une longue journée en déplacement.

de bureaux et leur localisation, ce qui risque d'avoir des incidences importantes sur l'évolution future des zones urbaines. Même si certains facteurs font augmenter les volumes de transport par suite des pratiques du télétravail, la consommation d'énergie liée aux migrations alternantes diminuera sans doute aussi, dans une certaine mesure. A moyen terme, il n'est pas irréaliste de tabler sur le fait que le travailleur moyen effectuera des déplacements domicile-travail un jour par semaine dans l'année suivante. Vu que les migrations alternantes représentent quelque 25 pour cent de l'ensemble des activités de transport du secteur privé, il en découlera une réduction de 5 pour cent des volumes de transport, toutes choses égales par ailleurs.

Des systèmes de distribution plus efficaces

Ainsi qu'il est mentionné plus haut, nous assistons à un vif essor de la distribution électronique de biens et de services sur l'Internet, ce qui laisse présager des possibilités importantes de réduction des besoins de transport classique. Dans cette section, nous analyserons l'influence que pourrait avoir l'utilisation de systèmes de distribution plus efficaces sur les structures des transports.

Dans cette optique, il y a deux grands défis à relever. Dans le système de distribution lui-même, de graves difficultés sont liées aux goulets d'étranglement et aux encombrements occasionnés par les flux de trafic – problème qui pourrait être sensiblement atténué grâce à l'adoption des systèmes de routes et véhicules «intelligents». C'est une application technique importante pour tous les usagers des infrastructures de transport, ainsi que pour les installations industrielles ou les centres commerciaux. Cependant, le principal sujet de préoccupation est le fonds de roulement considérable bloqué dans les stocks en souffrance. Au cours des 25 dernières années, les entreprises ont eu recours, de plus en plus, aux livraisons «juste à temps», car c'est un moyen efficace de limiter l'immobilisation de fonds de roulement. L'un des effets secondaires de cette tendance est la fréquence accrue du transport routier des marchandises livrées par petits lots, ce qui accroît dans des proportions spectaculaires l'activité de transport.

Systèmes de routes et véhicules «intelligents»

Les encombrements et les mauvaises conditions de circulation entraînent de nos jours un gaspillage substantiel d'énergie et de temps. Par exemple, l'aggravation de la congestion sur les routes françaises au cours de la période 1973-1988 a fait augmenter de 20 pour cent la consommation d'énergie du secteur des transports (Hourcade, 1993). On s'est efforcé, au cours du temps, de résoudre ces problèmes en construisant de nouvelles routes, mais cette tentative de solution s'est

soldée jusqu'ici par des résultats mitigés. Les systèmes de véhicules et routes «intelligents» constituent une autre méthode prometteuse d'améliorer les flux de circulation, en intégrant une gestion automatisée du trafic et des systèmes de contrôle des infrastructures physiques, ainsi que des systèmes d'information des conducteurs, la commande automatique des véhicules et des systèmes d'exploitation des véhicules utilitaires²⁶. Le coût d'implantation de ces systèmes aux États-Unis, où ils sont appelés IVHS (Intelligent Vehicle/Highway Systems), est estimé²⁷ à 40 milliards de dollars pour les 20 prochaines années, en sus d'un coût de 170 milliards de dollars correspondant à l'installation des équipements nécessaires dans les voitures et les camions qui vont circuler sur le réseau routier. Les inefficiences du réseau²⁸ coûtent environ 300 milliards de dollars par an, et les systèmes de véhicules et routes «intelligents» permettraient de réduire ce coût de non moins de 25 pour cent. Pour pouvoir mettre en œuvre à grande échelle et rationnellement ces systèmes, il faudra trouver un accord sur une série de normes communes et établir une coopération à l'échelle internationale, afin de s'assurer de la compatibilité des systèmes utilisés. Il faut rappeler aussi que l'efficacité de leur application exigera du conducteur qu'il abandonne une bonne part du contrôle du véhicule au profit du système de l'infrastructure. Il ne faudrait pas sous-estimer les problèmes psychologiques qui s'y rattachent, encore que les essais réalisés par Volvo en Suède montrent que les conducteurs acceptent volontiers, en général, de renoncer à contrôler totalement leur véhicule, dans certaines limites, et contribuent ainsi activement au respect des limitations de vitesse.

Les systèmes appelés IVHS peuvent être adoptés graduellement en mettant sur le marché des véhicules de plus en plus «intelligents», phénomène déjà amorcé à la faveur de l'introduction de la technologie des réseaux locaux par zone reliant la myriade de processeurs embarqués dans les voitures. Tout aussi intéressants sont les premiers prototypes de voitures particulières équipées de radars anticollision, qui permettent de réduire les distances entre les voitures et de mieux exploiter la capacité du réseau routier. Au fur et à mesure que ces prototypes seront testés en vraie grandeur, la révolution des TIC fera baisser le coût de la technologie, de sorte que les techniques les plus modernes seront incorporées aux modèles courants de voitures à très brève échéance.

Les techniques de production «juste à temps»

La production «juste à temps» repose sur un système logistique complexe dont l'objectif primordial est de limiter le capital bloqué dans l'entreprise en réduisant au minimum les niveaux des stocks. Elle a notamment pour effet de déplacer l'«installation» de stockage de l'usine ou de l'entrepôt à la route, ce qui accroît le nombre de véhicules en circulation et aggrave les problèmes d'encombrements – effet accentué par les efforts visant à réduire le plus possible le volume

des lots expédiés, d'où des livraisons plus réduites et plus fréquentes. Elle entraîne aussi une plus grande vulnérabilité aux perturbations, les grèves par exemple, en raison du faible volume des stocks.

On ne peut pas se passer complètement des stocks; de nombreuses entreprises en ont besoin pour parer rapidement à des problèmes d'exploitation ou à des urgences. Elles disposent d'installations centralisées de stockage à grande échelle, d'ordinaire une ou deux pour l'ensemble de l'Europe, souvent situées dans des aéroports-pivots ou à proximité. Du point de vue de la gestion des stocks, c'est une méthode efficace par rapport aux coûts, mais ces circuits de distribution en étoile augmentent les besoins de transport.

Les installations de production elles-mêmes connaissent une évolution analogue : les progrès des TIC favorisent un développement rapide de la production sur commande à grande échelle. L'une des entreprises pionnières en la matière est Dell, qui ne produit que sur commande. Elle possède une usine en Irlande qui fournit toute l'Europe, avec la possibilité de livrer une commande en cinq jours. Le fondateur de cette entreprise, Michael Dell, a affirmé que la question n'est pas de savoir de quels stocks vous disposez mais à quelle vitesse ils se déplacent. Cette méthode, qui repose sur des techniques de production flexibles et des outils efficaces pour traiter les commandes²⁹, s'est révélée une solution optimale, mais elle accroît le nombre de livraisons et, par conséquent, les besoins de transport.

Cette tendance à raccourcir les cycles de livraison, ainsi que l'importance grandissante des produits de haute valeur peu encombrants, a entraîné de grands changements dans la répartition modale du transport de marchandises dans les pays de l'OCDE. Jusqu'à présent, le rail ne répond pas aux exigences de souplesse et de rapidité de livraison qu'implique cette conception de la distribution. Ainsi, en Europe occidentale, on a constaté une modification notable des structures du fret : le volume de marchandises transportées par rail a diminué, alors que celui des marchandises transportées par route augmentait de 50 pour cent au cours de la période 1970-1992³⁰. L'essor du transport aérien de marchandises est encore plus impressionnant, son taux de croissance annuel atteignant globalement près de 7 pour cent à l'échelle mondiale.

Jusqu'à présent, la révolution des TIC a permis d'appliquer de nouvelles techniques de production et de distribution (la production « juste à temps », etc.) qui font augmenter les besoins de transport. On prévoit pour l'avenir que le passage de l'économie au numérique, de même que les nouvelles pratiques de télétravail, offriront la possibilité de briser cette tendance. En outre, le déploiement futur des systèmes de véhicules et routes « intelligents », conjugué éventuellement à des systèmes de tarification routière, pourrait donner un nouvel élan à la mise en place d'un système de transports plus économe en énergie – qui réduira peut-être de

non moins de 20 pour cent les besoins énergétiques, par rapport au niveau qui découlerait de la poursuite des tendances actuelles.

4. Résumé et conclusions

Le rôle joué par le secteur de l'énergie est double : il contribue à la richesse et à la prospérité de tous les citoyens et il aggrave les problèmes de l'environnement mondial. Il ne serait pas écologiquement viable d'envisager un développement visant exclusivement à obtenir un maximum de richesses et le bien-être à court terme. En revanche, un développement reposant uniquement sur le souci de réduire au minimum les atteintes à l'environnement serait insoutenable du point de vue social. Cette fois encore, il n'y a pas de formule magique.

Au vu des tendances de la consommation qui sont le moteur du marché de l'énergie, la forte croissance sous-jacente de la demande énergétique se poursuivra probablement dans un avenir prévisible. Certes, les effets de saturation de la demande exerceront progressivement leur influence dans les pays de l'OCDE, mais l'immense demande non encore exprimée de 3 milliards de personnes aspirant à couvrir leurs besoins essentiels sera écrasante par rapport aux éventuelles tendances localisées de saturation de la demande.

Si les tendances actuelles annoncent un avenir de croissance persistante de la consommation d'énergie, une rupture de tendance est possible³¹. Cela dépendra d'une série de facteurs, dont les plus importants sont les suivants :

- la vitesse des progrès technologiques;
- les évolutions des goûts et des modes de vie des consommateurs;
- le cadre réglementaire.

Dans le présent chapitre, nous avons précisé que la technologie des pompes à chaleur peut révolutionner l'efficacité de la production de chaleur dans le secteur des applications fixes. Dans le secteur des transports, une série d'évolutions parallèles sont envisagées; tant les voitures à piles à combustible que les voitures hybrides, conjuguées à une meilleure conception des véhicules, pourraient offrir la possibilité de doubler le rendement énergétique dans les transports. Parallèlement, les TIC sont susceptibles de changer radicalement les systèmes d'infrastructures, les modes de travail et les déplacements qui y sont associés, ainsi que les comportements d'achat. Ce sont autant de possibilités qui peuvent entrer en ligne de compte dans la conception des technologies finalement mises sur le marché et, en tout état de cause, il faut s'attendre à voir apparaître aussi de nouveaux produits que l'on n'a pas encore imaginés.

Les possibilités d'amélioration de l'efficacité à la faveur des progrès technologiques sont importantes, mais il ne faut jamais perdre de vue que l'énergie est utilisée en appliquant des technologies destinées à répondre aux besoins essen-

tiels des populations, à savoir, le confort, la mobilité, etc. Les modes de vie et les goûts des consommateurs joueront, par conséquent, un rôle essentiel dans l'évolution du bilan énergétique de l'avenir.

Les autorités souhaitant encourager le passage à une économie utilisant plus rationnellement l'énergie devront donc adopter des politiques et un cadre réglementaire ciblés à la fois sur la technologie et les modes de vie des consommateurs. Il faudra, par conséquent, déployer sans relâche des efforts concertés de recherche afin d'approfondir encore nos connaissances de la nature et de l'ampleur des défis à relever, eu égard à la consommation d'énergie, dans un souci de durabilité. Néanmoins, pour que ces efforts de recherche soient politiquement viables, toutes les parties prenantes doivent être associées aux débats sur l'action à mener. En outre, quelles que soient les mesures adoptées, elles doivent laisser libre cours aux forces d'innovation, en favorisant un accès aux marchés libre et sans discrimination pour les inventeurs et entrepreneurs, porteurs d'idées nouvelles riches de promesses. Enfin, le cadre réglementaire régissant l'ensemble de l'activité économique doit encourager une plus large diffusion des pratiques de travail flexibles, propice à une adoption plus généralisée du télétravail et du télécommerce.

Notes

1. Compte tenu des parités de pouvoir d'achat.
2. Source : Banque mondiale, Indicateurs du développement dans le monde, 1998.
3. Source : Bilans énergétiques mondiaux de l'AIE pour 1995.
4. Source : Bilans énergétiques de l'AIE, 1997.
5. Selon les Nations Unies, moins de 30 pour cent de la population de la Chine et de l'Inde résident dans les zones urbaines.
6. Même si l'utilisation de véhicules électriques entraînera un emploi plus rationnel de l'énergie dans le secteur des transports, car le rendement de transformation des centrales est plus élevé que celui des moteurs automobiles, les auteurs ont décidé de ne pas s'étendre ici sur ce thème.
7. Si l'hydrogène est produit à bord du véhicule dans un reformeur qui transforme l'essence ou le méthanol en hydrogène, on peut s'attendre à un rendement de 70 pour cent. Avec un rendement électrique de 90 pour cent, le rendement total serait le produit des trois rendements, soit 25 pour cent. Ce chiffre n'est pas très supérieur au rendement des moteurs des voitures particulières actuelles et il est légèrement inférieur à celui des véhicules hybrides futurs, dotés d'un petit moteur dont le régime et la vitesse seraient optimisés.
8. Les moteurs UHB ont un taux de dilution de 15-20, contre 6-7 pour les moteurs HB.
9. Les bureaux du siège de Statoil offrent un exemple de l'importance de cette source d'énergie : celle que dégagent les personnes, les équipements électroniques et l'éclairage est suffisante pour pouvoir se passer de chauffage à l'intérieur des locaux lorsque la température extérieure est supérieure à 0 °C.
10. Selon les normes de construction norvégiennes, les pertes dues à la transmission à travers les fenêtres représentent cinq fois environ la déperdition thermique à travers une surface de mur équivalente.
11. Selon les lois de la thermodynamique, la seule façon de faire passer de l'énergie à basse température à une température plus élevée est d'utiliser un fluide caloporteur.
12. Source : Energidata a.s., anvendelse av varmepumper – rammebetingelser, 1990.
13. A l'exception des services de transport.
14. International Data Corporation (IDC), février 1997.

15. Morgan Stanley.
16. Source : Statistics Norway, Norges Offisielle Statistikk, Forbruksundersøkelsen 1994.
17. Le présent rapport a été rédigé, en grande partie, grâce au partage en ligne des communications et des applications entre les services de Statoil de Stavanger et de Trondheim.
18. Il n'existe pas de définition bien arrêtée du télétravail, c'est pourquoi les estimations de son ampleur varient considérablement selon les sources. La définition donnée par le Bureau international du travail est imprécise, car elle se borne à associer les TIC au concept de lieu de travail variable.
19. *Business Quarterly*, printemps 1993.
20. The Institute for the Study of Distributed Work a avancé une estimation de 4-5 millions, LINK Resources, de 6.6 millions et le Yankee Group, de 8.8 millions.
21. Gartner Group, «Key Trends and Drivers of Telecommuting», 6 mai 1998.
22. J.Kr. Steen Jacobsen, T.E. Julsrud, J.I. Lian : «Telework and potential reduction in work travel», TØI working report 1024/1996, 1996.
23. *Business Quarterly*, printemps 1993.
24. Étant donné que le programme d'installation de bureaux à domicile a été qualifié de projet pilote, ces résultats ne sauraient être totalement représentatifs et il faudrait donc analyser la question plus en détail.
25. L'un des résultats intéressants de l'enquête est que près de 50 pour cent de ceux qui y ont répondu ont affirmé avoir une meilleure productivité parce qu'ils pouvaient travailler chez eux.
26. Ces systèmes permettraient d'utiliser différents types de systèmes de tarification routière, bien que ces derniers n'en fassent pas partie intégrante.
27. D'après le Diebold Institute for Public Policy Studies, 1992.
28. Surtout liées aux problèmes d'encombrements.
29. La majeure partie des commandes sont actuellement passées par l'Internet.
30. Source : Conférence Européenne des Ministres des Transports (CEMT).
31. Bien que conscients du fait qu'une guerre ou un conflit à grande échelle auraient des incidences sur l'activité économique et la demande d'énergie, nous n'avons pas pris en compte un pareil scénario dans la présente analyse.

Bibliographie

- ARCHER, L.J. (1993),
Aircraft Emissions and the Environment, Oxford Institute for Energy Studies.
- CONSEIL MONDIAL DE L'ÉNERGIE (1995),
Transport Sector Energy Demand Towards 2020.
- GREENE, D.L. (1990),
Commercial Aircraft Fuel Efficiency : Potential Through 2010, Oak Ridge National Laboratory.
- HOURCADE, J.C. (1993),
«Modelling Long Run Scenarios», *Energy Policy*, mars.
- MENDLER, C. (1992),
«Improving the Light Load Efficiency of Automobile Engines», présentation effectuée à la Conference on Next Generation Technologies for Efficient Energy End Uses and Fuel Switching, Dortmund, 7 avril.
- OCDE (1997),
Cohésion sociale et mondialisation de l'économie. Ce que l'avenir nous réserve, OCDE, Paris.
- TOFFLER, A. (1970),
Future Shock, réédité en 1991 par Bantam Books.
- TOFFLER, A. (1980),
The Third Wave, réédité en 1991 par Bantam Books.

Les options systémiques pour le développement durable¹

par

Chihiro Watanabe

Professeur, Département d'ingénierie et de gestion industrielles
Institut technologique de Tokyo²
Japon

1. Introduction

Le déséquilibre qui existe actuellement au niveau mondial entre l'offre et la demande d'énergie, associé aux conséquences des émissions de carbone pour l'environnement, suscite des préoccupations grandissantes quant à la durabilité de notre développement futur. Si la croissance économique rapide des pays en développement stimule l'économie mondiale, elle a aussi pour effet d'augmenter les pressions qui s'exercent sur les approvisionnements énergétiques et l'environnement. En réponse à cette situation difficile, on peut notamment rechercher des solutions adaptées fondées sur les options systémiques, intégrant des technologies de pointe, qui peuvent contribuer à surmonter les contraintes énergétiques et écologiques tout en assurant la poursuite d'un développement durable.

New Earth 21, le programme d'action pour le ^{xxi}e siècle proposé en 1990 par le Japon, propose des options systémiques complètes et à long terme, qui visent à rétablir des conditions d'environnement mondiales équivalentes à celles qui régnaient au dix-huitième siècle, avant la révolution industrielle. En outre, ce programme suggère certaines évolutions vers des options « sans regrets ». Si de nombreuses études sont consacrées à ces problèmes, elles se concentrent en majorité sur les dimensions techniques de telle ou telle technologie énergétique. En revanche, aucun travail d'envergure ne s'est jusqu'à présent attaché aux dimensions *système*ques.

Eu égard à l'importance grandissante accordée à l'identification des options systémiques les plus appropriées, le présent chapitre analyse l'avenir des technologies énergétiques sur la base du concept proposé par le programme New Earth 21.

Lorsqu'on procède à une analyse de cette nature, il importe en premier lieu de reconnaître que la question considérée se pose à l'intersection entre énergie et technologie. Les décisions technologiques ne devront pas seulement tenir compte de l'incertitude croissante qui caractérisera l'offre et la demande d'énergie dans le contexte géopolitique du *xxi*^e siècle, mais aussi de la complexité des interactions entre des facteurs sociaux, économiques, culturels et institutionnels. En fait, le point d'intersection entre technologie et énergie n'est pas un point pur et simple, mais un système dynamique qui met en jeu tant l'économie que l'environnement. En outre, le système où s'exerce cette dynamique est aujourd'hui un domaine critique qui donne lieu à de vifs débats.

La section 2 du présent chapitre examine brièvement les technologies énergétiques futures, classées dans six catégories qui constituent les volets principaux du programme New Earth 21. Sur la base des enseignements de cet examen, la section 3 met ensuite en lumière certaines dimensions essentielles des stratégies en matière de technologie de l'énergie pour le *xxi*^e siècle. Puis, en exposant la réussite des options systémiques au Japon, la section 4 s'efforce de mettre en rapport ces dimensions avec des stratégies d'options systémiques qui sont primordiales pour atteindre l'objectif du programme New Earth 21. Enfin, la section 5 résume les principaux enseignements tirés de cette analyse.

2. Examen succinct des technologies énergétiques futures

Le présent examen a été réalisé dans l'optique des options systémiques. Les technologies ont été ventilées selon six catégories qui constituent les éléments clés du programme New Earth 21, répertoriés dans la figure 1 et le tableau 1. Ces six catégories sont : *i*) l'utilisation finale de l'énergie; *ii*) les énergies renouvelables; *iii*) la fission nucléaire; *iv*) l'utilisation moins polluante des combustibles fossiles; *v*) les procédés novateurs de traitement du CO₂; et *vi*) la fusion nucléaire.

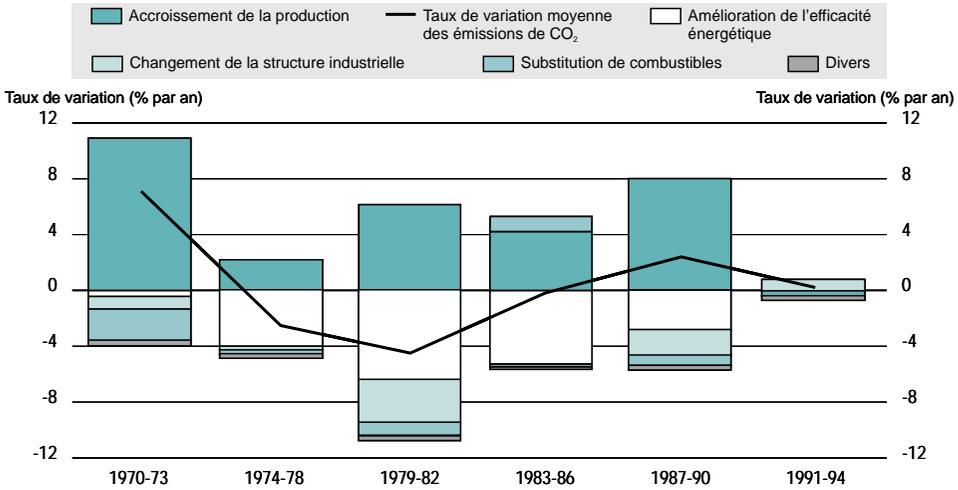
L'examen repose principalement sur le rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) concernant les technologies énergétiques pour le *xxi*^e siècle (AIE, 1997). Il se concentre sur les priorités technologiques, sur les perspectives technologiques et les tendances possibles des marchés, ainsi que sur l'importance des percées technologiques et des effets d'entraînement ultérieurs à l'échelle internationale.

Technologies d'utilisation finale de l'énergie

Potentiel

De plus en plus, l'amélioration de l'efficacité énergétique, du point de vue de la productivité énergétique, des économies d'énergie ou des deux à la fois, est

Graphique 1. Tendances et importances des facteurs contribuant à l'évolution des émissions de CO₂ dans l'industrie manufacturière japonaise (1970-94)



Source : Auteur.

considérée comme une stratégie prometteuse pour atteindre les objectifs de sécurité énergétique, de protection des l'environnement et de croissance durable. Bien que la marge technique d'amélioration de l'efficacité énergétique reste importante, on constate une stagnation tendancielle en la matière dans les pays déve-

Tableau 1. Concept général du programme New Earth 21
Actions et grands domaines d'avancées technologiques

Actions de New Earth 21	Grands domaines d'avancées technologiques
A. Amélioration mondiale de l'efficacité énergétique	1. Utilisation finale d'énergie
B. Essor notable des sources d'énergie non polluantes	2. Énergies renouvelables
	3. Fission nucléaire
	4. Utilisation moins polluante des combustibles fossiles
C. Développement de technologies innovantes respectueuses de l'environnement	5. Procédés innovants de traitement du CO ₂ (piégeage, élimination et recyclage)
D. Renforcement des puits de CO ₂	
E. Développement de technologies énergétiques de prochaine génération	6. Fusion nucléaire

loppés en raison de l'orientation à la baisse de la productivité marginale de l'énergie et de la diminution progressive des prix du pétrole sur le marché international. Par ailleurs, le mécanisme d'intégration des améliorations de l'efficacité énergétique dans les sociétés et les économies des pays en développement s'est révélé insuffisant. Des démarches radicales et innovantes sont nécessaires si on souhaite concrétiser pleinement le potentiel technique et économique de ces améliorations.

Priorités

Les objectifs technologiques prioritaires sont les suivants :

1. renforcer la démonstration et la mise sur le marché des technologies existantes afin d'améliorer l'efficacité, les caractéristiques économiques et la souplesse de l'utilisation d'énergie;
2. encourager le développement et l'application de technologies de prochaine génération dans une optique de maximisation de leurs avantages potentiels pour l'environnement, y compris la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Perspectives

Les marchés de l'énergie fonctionnent mieux en situation de concurrence et lorsque les distorsions des échanges et des investissements sont limitées. Néanmoins, de nombreux obstacles techniques et institutionnels peuvent décourager les efforts de R-D et freiner le progrès technologique. Il est peu probable que les forces du marché permettent à elles seules d'améliorer l'efficacité énergétique dans la mesure que fixent implicitement la plupart des politiques énergétiques axées sur l'environnement qui visent à stabiliser et réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Retombées

Les pouvoirs publics ont une mission essentielle à remplir : éliminer les obstacles et rapprocher les possibilités techniques des décisions individuelles des consommateurs. Il convient notamment d'encourager les projets conjoints pouvoirs publics-industrie centrés sur la démonstration de procédés novateurs à haut rendement énergétique dans les industries grosses consommatrices d'énergie.

Les effets des améliorations de l'efficacité énergétique pourraient être maximisés à la faveur de retombées technologiques intersectorielles, notamment des industries de haute technologie vers les industries à forte intensité énergétique. Des projets conjoints pouvoirs publics-industrie pourraient et devraient stimuler ces retombées.

A l'échelon mondial aussi, il faudrait concrétiser des retombées semblables. Les gouvernements des pays développés pourraient ainsi encourager l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les pays en développement.

Technologies des énergies renouvelables

Potentiel

Certes, le potentiel des technologies des énergies renouvelables varie d'un domaine à l'autre, mais la plupart offrent toutefois de vastes possibilités – précisément parce qu'elles emploient des ressources qui, en général, ne s'épuisent pas.

Des technologies nouvelles et améliorées, qui diffèrent les unes des autres par leurs caractéristiques techniques et économiques, leur degré de maturité et leur utilité potentielle pour les systèmes énergétiques futurs, sont en cours de développement et d'essai.

Les travaux approfondis menés sous l'égide des pouvoirs publics et par l'industrie, notamment au cours des 15 dernières années, ont sans cesse amélioré le rendement des systèmes de conversion des énergies renouvelables, permettant une baisse spectaculaire de leur coût. Certaines de ces technologies pourraient devenir compétitives face aux technologies classiques. En outre, si l'on réussissait à construire, à moyen ou à long terme, un réseau international d'énergie non polluante fondé sur la conversion de l'hydrogène, le rôle des énergies renouvelables devrait prendre une ampleur spectaculaire dans le monde.

Priorités

Pour exploiter au mieux le potentiel, les objectifs technologiques prioritaires suivants ont été définis :

1. améliorer le rendement et la viabilité économique des systèmes utilisant les énergies renouvelables;
2. assurer plus largement leur diffusion et leur intégration efficace dans les systèmes énergétiques existants ou en développement;
3. créer un cercle vertueux entre l'amélioration de la viabilité économique et une plus grande diffusion de l'application;
4. mettre en place un réseau international d'énergie non polluante, avec l'hydrogène comme vecteur, par exemple.

Perspectives

Bien qu'elles présentent un potentiel technique considérable, les énergies renouvelables ne contribuent que dans une mesure relativement faible à la pro-

duction d'énergie. Cela s'explique certes par l'état actuel de leur développement, mais aussi par les caractéristiques économiques actuelles du secteur de l'énergie, par des facteurs propres au marché et par des contraintes institutionnelles. En règle générale, l'accès au marché de ces énergies est entravé par d'importants obstacles : le manque d'infrastructure, leur relative immaturité technique et économique, leur fiabilité et leur durabilité insuffisamment démontrées, ainsi que la nécessité d'économies d'échelle dans la fabrication des composants et dans les techniques d'utilisation.

Toutefois, si les facteurs nationaux et sociaux tels que les problèmes d'environnement et de sécurité étaient internalisés dans les coûts des systèmes énergétiques, le potentiel économique des énergies renouvelables s'en trouverait amélioré et leur contribution progresserait sensiblement.

En outre, une approche systémique qui s'efforcerait de faire la synthèse de toute une palette de technologies novatrices possibles, comme le réseau international d'énergie non polluante fondé sur la conversion de l'hydrogène, pourrait donner lieu à une avancée extrêmement spectaculaire.

Retombées

L'action des pouvoirs publics doit se concentrer sur les aspects suivants : *i)* créer un cercle vertueux en sélectionnant et en poursuivant les efforts de R-D visant à réduire les coûts et à améliorer les performances et le rendement des technologies et systèmes nouveaux utilisant les énergies renouvelables; *ii)* procéder à des améliorations institutionnelles; *iii)* stimuler l'implication de l'industrie dans ces efforts; et *iv)* faciliter la coopération internationale, par exemple en vue de mettre en place un réseau international d'énergie non polluante.

Technologie de la fission nucléaire

Potentiel

La fission nucléaire contribue toujours dans une large mesure à la diversification des approvisionnements énergétiques. Les réserves d'uranium sont abondantes et disponibles un peu partout dans le monde. Cette technologie ne rejette pas de gaz à effet de serre lors de la production d'électricité et respecte donc une série d'impératifs écologiques.

Pendant, la crainte d'accidents et les préoccupations que suscitent les déchets et la prolifération nucléaires peuvent limiter l'exploitation des avantages de la fission nucléaire. Il importe de répondre à ces interrogations si l'on souhaite que le nucléaire continue à faire partie des possibilités énergétiques et que ses perspectives d'exploitation s'améliorent.

Priorités

Les objectifs prioritaires en matière de fission nucléaire sont les suivants :

1. développer et mettre en place des technologies économiquement compétitives de production d'électricité d'origine nucléaire, de conception standard ou modulaire, qui garantissent et améliorent la sûreté;
2. développer et mettre en place des technologies et systèmes acceptables de gestion des déchets nucléaires;
3. élargir les possibilités d'application sûre de la fission nucléaire, et en augmenter les ressources de base.

Perspectives

Les efforts de R-D entrepris pour améliorer encore les aspects économiques et la sûreté, assurer une évacuation sûre des déchets nucléaires et mettre au point des technologies mieux acceptées par le public pour le déclassement des centrales nucléaires se poursuivent et laissent apparaître de bonnes perspectives techniques. Néanmoins, en matière d'adoption et de développement de l'énergie nucléaire, ce n'est pas le potentiel technique et économique qui constitue le facteur décisif, mais bien l'acceptation par le public. C'est pourquoi, les tendances futures du marché de l'énergie nucléaire dépendent de la façon dont on parviendra à la rendre plus acceptable par le public, à la faveur du développement technique et économique ainsi que des résultats d'exploitation.

Retombées

L'avenir de l'énergie nucléaire est largement tributaire de l'action des pouvoirs publics, c'est-à-dire de leurs efforts visant à réduire les risques de marché liés à la démonstration de nouvelles technologies, de leur aide directe à des projets spécifiques et de leur soutien indirect par des mesures telles que la rationalisation des principes et pratiques réglementaires et leur harmonisation internationale.

Néanmoins, l'action des pouvoirs publics et les réglementations ne peuvent pas garantir seules que l'énergie nucléaire restera viable. Il incombe à l'industrie de s'assurer que les centrales nucléaires sont exploitées de façon sûre et économiquement rentable, et que le public a accès à toutes les informations concernant cette technologie.

Technologies d'utilisation moins polluante des énergies fossiles

Potentiel

De tous les combustibles fossiles, le charbon est celui dont les ressources de base sont de loin les plus importantes et qui affiche le rapport réserves/

consommation le plus élevé. Il constitue un élément clé de la sécurité énergétique mondiale, car il est abondant, largement réparti sur la planète et relativement peu onéreux. En outre, ses prix sont stables et il est facile à obtenir sur un marché international bien établi et concurrentiel.

D'un autre côté, l'importance du pétrole demeure particulièrement grande pour les pays développés – notamment dans les transports – et sa demande continue de progresser. La consommation de gaz naturel est également à la hausse, car il s'agit d'un combustible pratique et économique qui présente des caractéristiques perçues comme des avantages écologiques comparatifs.

Priorités

Concernant le charbon, le pétrole et le gaz, les objectifs technologiques prioritaires sont les suivants :

1. améliorer le rendement de conversion, l'acceptabilité environnementale et la viabilité économique de l'utilisation de charbon en tant que source d'énergie compétitive;
2. diversifier les usages non polluants du charbon en s'efforçant de préserver une certaine flexibilité et de s'adapter à l'évolution à long terme des besoins en énergie;
3. faciliter l'accès aux réserves de pétrole et de gaz naturel économiquement exploitables;
4. diminuer les risques et les effets sur l'environnement de la production d'hydrocarbures.

Perspectives

On trouve aujourd'hui sur le marché, ou à un stade de démonstration avancé, des technologies nouvelles ou améliorées de lutte contre les émissions de polluants classiques et contre leur effets.

Cependant, la majorité des technologies permettant de concilier les aspects énergétiques et environnementaux de l'utilisation du charbon tout en préservant sa compétitivité économique sont des technologies de prochaine génération et font actuellement l'objet de travaux activement menés de R-D, de démonstration ou d'essai.

On n'a cessé de mettre en avant la protection de l'environnement comme une composante à part entière du développement technologique, afin d'améliorer l'approvisionnement international en pétrole et en gaz naturel.

Retombées

Des progrès considérables sont possibles dans les domaines des aides publiques directes et de la coopération pouvoirs publics-industrie visant à limiter les incertitudes concernant les caractéristiques de rendement, à réduire les coûts ainsi qu'à améliorer l'exploitation à l'échelle industrielle et les perspectives des technologies d'utilisation propre du charbon et des systèmes de production d'électricité à partir de charbon qui sont éprouvés et de prochaine génération. Ce type de collaboration pourrait minimiser les risques des premiers projets à grande échelle et garantir que les options à plus long terme, dont les combustibles de synthèse, bénéficient d'efforts de R-D suffisants. Il conviendrait par ailleurs que les pouvoirs publics facilitent en temps opportun des arrangements institutionnels permettant à l'industrie de développer et mettre en application des technologies adaptées. Enfin, les initiatives en faveur de la coopération internationale et des retombées technologiques mondiales constituent une autre mission fondamentale qui incombe aux pouvoirs publics.

Étant donné la relative maturité du secteur du pétrole et du gaz naturel, l'action des pouvoirs publics en faveur du progrès devrait principalement viser à favoriser les occasions de percées technologiques à haut risque mais dont l'impact serait considérable, à renforcer la sécurité et la protection de l'environnement, à garantir le maintien de moyens scientifiques et techniques suffisants et à adopter des réglementations et des politiques fondées sur le jeu du marché qui accroissent l'investissement et encouragent l'industrie à prendre des risques pour répondre aux besoins du marché.

Technologies novatrices de traitement du CO₂

Potentiel

Outre le développement de technologies permettant d'atténuer les émissions de gaz à effet de serre par l'amélioration de l'efficacité énergétique et la substitution entre énergies, les percées technologiques en matière de piégeage, d'élimination et de recyclage du CO₂ devraient largement contribuer à la réalisation de l'objectif du programme New Earth 21.

Priorités

En ce qui concerne les technologies novatrices de traitement du CO₂, les objectifs prioritaires sont les suivants :

1. les technologies de piégeage du CO₂, par exemple par fixation chimique ou biologique;

2. les technologies d'élimination du CO₂, par injection du CO₂ piégé dans des gisements de pétrole et de gaz naturel et dans des aquifères, ou par stockage dans les océans;
3. les technologies de recyclage du CO₂ piégé par transformation en méthanol de synthèse.

Perspectives

La majeure partie des activités de R-D sur ces technologies novatrices n'étaient pas encore entreprises avant les années 90 et se trouvent donc toujours dans les phases initiales de la R-D et de la démonstration. Bien que certaines incertitudes subsistent, elles devraient commencer à trouver des applications pratiques entre 2020 et le milieu du XXI^e siècle.

Retombées

Les activités de R-D sur les technologies novatrices de traitement du CO₂, étant donné les investissements publics massifs à long terme qu'elle réclament, leur nature interdisciplinaire et leurs retombées mondiales potentiellement immenses, nécessitent une coopération internationale et des initiatives gouvernementales soutenues et cohérentes. Ces initiatives doivent se concentrer sur la création d'un mécanisme efficace pour stimuler les percées technologiques porteuses d'innovation et leurs retombées internationales.

Technologie de la fusion nucléaire

Potentiel

Du fait des nombreux avantages potentiels attachés à cette ressource inépuisable, la fusion nucléaire est un élément important dans la stratégie énergétique à long terme pour réaliser l'objectif du programme New Earth 21.

Au cours du XXI^e siècle, l'application de technologies pratiques de production d'énergie par fusion pourrait accroître la sécurité énergétique mondiale, offrir une solution de rechange écologiquement acceptable aux combustibles fossiles et conforter la croissance économique en assurant la fiabilité de la fourniture d'électricité.

Priorités

En matière de fusion nucléaire, les objectifs technologiques prioritaires sont les suivants :

1. fournir des efforts continus pour démontrer la faisabilité technique de la production d'électricité à partir de la fusion nucléaire;

2. évaluer les incidences potentielles de ce mode de production d'électricité sur l'offre d'énergie future.

Perspectives

La technologie de la fusion nucléaire en est encore au stade du développement. Celui-ci progresse à un rythme qui est tributaire de la construction et de l'exploitation d'une série de dispositifs successifs destinés à démontrer la faisabilité des champs magnétiques intenses et des plasmas à très haute densité. Ces opérations devraient déboucher sur un réacteur expérimental à grande échelle, puis sur une centrale de démonstration pilote.

S'il n'est guère probable que la fusion nucléaire devienne une source d'énergie largement disponible avant une cinquantaine d'années, elle pourrait néanmoins constituer la solution ultime pour la production d'électricité au cours de la deuxième moitié du *xxi*^e siècle.

Retombées

Étant donné les investissements massifs à long terme qu'elle suppose et les immenses retombées mondiales qu'elle peut générer, la R-D sur la fusion nucléaire exige un soutien public adapté et soutenu et doit faire l'objet d'une coopération internationale.

3. Dimensions essentielles des stratégies de technologie de l'énergie pour le *xxi*^e siècle

L'examen qui précède des technologies énergétiques futures laisse à penser que, avec des efforts cohérents et des initiatives publiques raisonnablement soutenues, les principales catégories de technologies – notamment celles de l'utilisation finale, des énergies renouvelables, de la fission nucléaire et de l'utilisation moins polluante de combustibles fossiles – sont véritablement riches de promesses et offrent un potentiel suffisant de compatibilité commerciale. La réalisation de l'objectif de New Earth 21 par la concrétisation de ces perspectives dépend, dans une large mesure, de dimensions systémiques plutôt que des différents aspects techniques. Entre autres impératifs, il est essentiel de pouvoir s'appuyer sur un mécanisme efficace pour stimuler les grandes percées technologiques et leurs retombées internationales. En l'occurrence, la réussite de cette initiative exige la création en temps opportun : *i*) d'un cercle vertueux entre les environnements sociaux, économiques et naturels de la technologie dans un contexte mondial; et *ii*) d'un système destiné à maximiser le potentiel particulier des différents pays ou régions par des retombées technologiques mondiales.

Un autre facteur indispensable est la complémentarité. Les options systémiques permettant de surmonter les contraintes énergétiques et écologiques tout en assurant la poursuite d'un développement durable peuvent être vues comme l'interaction dynamique des 3 E : économie, énergie, environnement. Si on suppose que ces 3 E peuvent être représentés par la production (Y), la consommation d'énergie (E) et les émissions de CO₂ (C), cette dynamique peut se traduire par l'équation simple présentée à la fin de la figure 1.

Par conséquent, la solution systémique adaptée à la proposition ci-dessus consiste à combiner au mieux les trois options possibles : amélioration de l'efficacité énergétique, substitution entre énergies et piégeage du CO₂. Le programme New Earth 21 explore les options systémiques à long terme pour le siècle prochain en mettant en évidence les technologies énergétiques/environnementales correspondant aux choix susmentionnés. A titre d'exemple, les grands choix pour les cinquante prochaines années peuvent être «l'amélioration de l'efficacité énergétique à l'échelle mondiale» (option amélioration de l'efficacité énergétique), «la multiplication des sources d'énergie non polluantes» (option substitution entre énergies), et «le développement de technologies novatrices respectueuses de l'environnement» (option piégeage du CO₂).

Le tableau 2 compare succinctement cette interaction systémique dynamique sur les dix années qui ont suivi le deuxième choc pétrolier (1979-1988) au Japon, aux États-Unis, en Europe occidentale, dans l'ex-URSS et en Europe centrale et orientale, ainsi que dans les pays en voie de développement (PVD). Il en ressort que le Japon a enregistré la plus forte croissance économique, avec un PIB en hausse de 3.97 pour cent par an en moyenne. Cette croissance a été rendue possible par l'amélioration de 3.44 pour cent de l'efficacité énergétique et par la progression de 0.59 pour cent du taux de substitution interénergétique, auxquelles il

Tableau 2. **Comparaison des trajectoires de développement dans les grands pays et régions du monde (1979-1988)**

Rythme d'évolution moyen en pour cent par an

	Production ^{a)} ($\Delta Y/Y$)	Efficacité énergétique ($\Delta(E/Y)/(E/Y)$)	Substitution de combustibles ($\Delta(C/E)/(C/E)$)	Émissions de CO ₂ ($\Delta C/C$)
Japon	3.97	-3.44	-0.59	-0.06
États-Unis	2.78	-2.62	-0.11	0.05
Europe occidentale	2.01	-1.78	-1.33	-1.10
Ex-URSS/PECO	1.72	0.45	-0.83	1.34
PVD	3.53	0.85	-0.16	4.22

a) La production est exprimée par le PIB.

Sources : Y. Ogawa, à partir des statistiques de l'AIE : Statistiques de l'énergie des pays de l'OCDE, Bilans énergétiques des pays de l'OCDE et Statistiques et bilans énergétiques des pays non membres de l'OCDE, 1992.

faut ajouter la baisse de 0.06 pour cent des émissions de CO₂. (On peut considérer que l'amélioration des deux premiers indicateurs a contribué à celle du troisième.) Dans les PVD, la croissance annuelle moyenne du PIB a été presque aussi forte qu'au Japon (3.53 pour cent). Au cours de la période considérée, la substitution entre énergies, en progression de 0.16 pour cent par an en moyenne, a eu un effet positif. En revanche, l'efficacité énergétique a reculé de 0.85 pour cent, ce qui a entraîné une hausse de 4.22 pour cent des émissions de CO₂. Les États-Unis ont atteint un taux de croissance annuel moyen du PIB de 2.78 pour cent, notamment grâce à une amélioration de 2.62 pour cent de l'efficacité énergétique et à une progression de 0.11 pour cent de la substitution entre énergies. Pour leur part, les émissions de CO₂ ont augmenté de 0.05 pour cent. En Europe occidentale, la croissance du PIB s'est établie à 2.01 pour cent, tandis que l'efficacité énergétique s'améliorait de 1.78 pour cent, que la substitution interénergétique progressait de 1.33 pour cent et que les émissions de CO₂ diminuaient de 1.10 pour cent. Enfin, dans les pays de l'ex-URSS et les PECO, la croissance annuelle moyenne du PIB a été de 1.72 pour cent. L'efficacité énergétique a baissé de 0.45 pour cent, la substitution entre énergies a progressé de 0.83 pour cent et les émissions de CO₂ ont augmenté de 1.34 pour cent.

Les avantages et inconvénients relatifs de l'amélioration de l'efficacité énergétique et de la substitution interénergétique dépendent généralement des réalités économiques, industrielles, géographiques, sociales et culturelles de chaque pays ou région. Au Japon, qui possède une économie importatrice d'énergie, axée sur la technologie et les échanges, c'est l'industrie qui a impulsé une amélioration notable de l'efficacité énergétique dans le cadre de la stratégie de survie qu'elle a adoptée pour alléger le fardeau des coûts de l'énergie. En revanche, étant donné les contraintes géologiques et la dépendance à l'égard du charbon pour remplacer le pétrole, les possibilités de substitution de combustibles y étaient limitées. Ce n'était pas le cas en Europe occidentale, où les pays pouvaient tirer parti, de par leur situation géographique, de ressources aisément accessibles en gaz naturel et en biocombustibles – et où les efforts déployés par l'industrie en vue d'améliorer l'efficacité énergétique n'ont pas été aussi vigoureux.

Cette observation laisse à penser que, si on pouvait transférer l'expérience et les compétences des pays/régions possédant des avantages économiques, géographiques et/ou sociaux comparatifs vers ceux qui sont comparativement désavantagés à cet égard, il en résulterait une amélioration spectaculaire de l'état des 3 E dans les pays/régions bénéficiaires et, partant, au niveau de la planète tout entière.

4. Démonstration empirique de la réussite des options systémiques

Afin de relier les dimensions clés des stratégies de technologie de l'énergie pour le XXI^e siècle, exposées dans la section précédente, et les stratégies d'options

systémiques, essentielles à la réalisation de l'objectif du programme New Earth 21, la réussite des options systémiques au Japon a été mise en évidence de façon empirique. L'attention a notamment porté sur les domaines suivants : *i)* amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie manufacturière; *ii)* création d'un cercle vertueux entre R-D, démonstration, diffusion et application dans la mise en valeur de l'énergie photovoltaïque; et *iii)* retombées intersectorielles de la haute technologie, essentielles à une amélioration spectaculaire de l'efficacité énergétique dans les secteurs tributaires de l'énergie.

Mécanisme systémique pour l'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie manufacturière

Malgré la fragilité de sa structure énergétique, le Japon a réussi à surmonter deux crises énergétiques dans les années 70, et su maintenir une croissance économique qui s'est traduite par une amélioration spectaculaire de sa technologie industrielle – ce qui a créé un cercle vertueux. Le succès de ces efforts peut s'expliquer parce que l'on a trouvé des solutions particulièrement adaptées aux choix technologiques possibles, fondées sur des options systémiques, en remplaçant l'énergie par la technologie. La politique du ministère du Commerce extérieur et de l'Industrie du Japon (MITI) a atteint son but en stimulant la vitalité de l'industrie, qui était indispensable pour que cette substitution se concrétise. Néanmoins, après le relâchement des contraintes énergétiques, suivi de la formation de ce que l'on a appelé la « bulle économique » et de son éclatement, les moyens d'action du MITI dans ce domaine se sont affaiblis, ce qui a fait craindre un effondrement du cercle vertueux entre technologie et développement économique.

Options systémiques

Comme le montre la comparaison présentée dans la figure 1, si le Japon a réussi au cours des années 70 et 80 à surmonter les contraintes énergétiques et écologiques tout en maintenant une croissance durable, c'est avant tout grâce aux efforts acharnés de l'industrie pour améliorer l'efficacité énergétique. Malgré de nombreux handicaps, l'économie japonaise a pu assurer un développement durable en se concentrant sur l'amélioration de la productivité de ressources relativement peu abondantes : le capital jusqu'aux années 50, puis la main-d'œuvre et les contraintes de capacité liées à l'environnement, et enfin l'énergie après le premier choc pétrolier de 1973. Le développement de l'industrie manufacturière s'est révélé le véritable moteur de cette évolution. De plus, le développement technologique a joué un rôle déterminant dans la progression rapide des niveaux de productivité en parvenant à se substituer à la ressource limitée qu'est l'énergie.

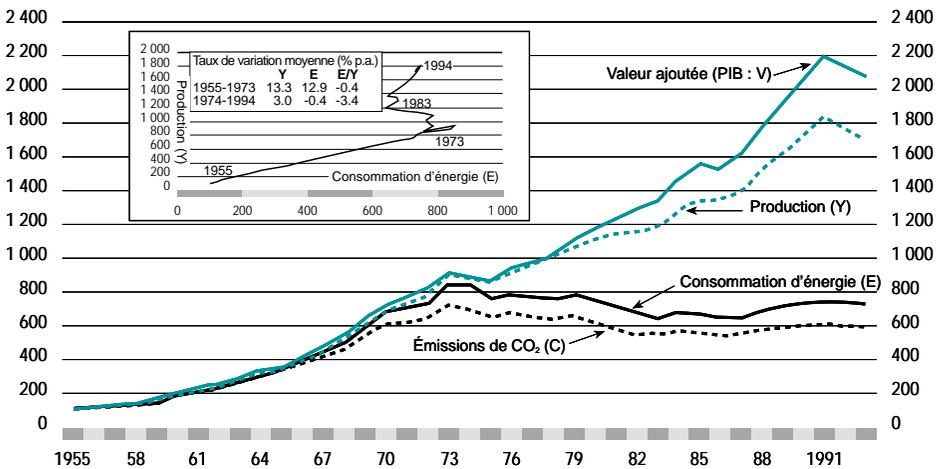
Entre 1955 et 1973, période qui a précédé la première crise énergétique, l'industrie manufacturière japonaise affichait une croissance de 13.3 pour cent par

an, largement soutenue par une offre d'énergie stable et bon marché. Au cours de cette période, le taux de dépendance vis-à-vis de l'énergie augmentait en moyenne de 12.9 pour cent par an, tandis que le rythme d'évolution de l'efficacité énergétique n'était que de -0.4 pour cent par an. En revanche, entre 1974 et 1994, l'industrie manufacturière japonaise est parvenue à une amélioration remarquable de l'efficacité énergétique de 3.4 pour cent par an. C'est notamment ce qui lui a permis d'accroître sa production de 3.0 pour cent par an en moyenne (contre une croissance de 4.1 pour cent du PIB) tout en allégeant le plus possible sa dépendance à l'égard de l'énergie, pour la ramener à -0.4 pour cent, comme le montre la figure 2. On y constate que, malgré les incidences négatives des crises énergétiques, l'industrie a réussi à se développer de façon soutenue et à augmenter sa production tout en limitant au minimum sa consommation d'énergie et ses émissions de CO₂.

Le graphique 1 (voir l'annexe) analyse les facteurs qui ont contribué à l'évolution des émissions de CO₂ dans l'industrie manufacturière entre 1970 et 1994. Elle montre que, entre 1974 et 1994, les émissions moyennes de CO₂ ont reculé de 0.71 pour cent, tandis que la progression annuelle moyenne de la production divisée par la valeur ajoutée se maintenait à un niveau raisonnable de 4.06 pour cent. Il

Figure 2. Évolution de la production, de la consommation d'énergie et des rejets de CO₂ de l'industrie manufacturière japonaise (1955-94)

Indice : 1955 = 0.1



ressort par ailleurs du graphique 1 que 71 pour cent de cette réduction des émissions de CO₂ peuvent être attribués aux efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique, tandis que 22 pour cent sont le fait de l'évolution de la structure industrielle. En revanche, la substitution entre énergies n'a contribué à cette baisse qu'à hauteur de 4 pour cent. Ces chiffres sont en phase avec l'analyse déjà présentée, et confirment que si le Japon est parvenu à un développement durable respectueux de l'environnement après la première crise énergétique, il le doit dans une large mesure aux efforts entrepris pour réduire sa dépendance vis-à-vis de l'énergie.

Si on examine l'évolution des rejets de CO₂ et les facteurs qui y contribuent à des périodes différentes, on constate que les émissions de CO₂ ont considérablement baissé après 1973, au moment où les efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique se sont intensifiés. Cette tendance découle dans une large mesure du remplacement de l'énergie par la technologie (technologies d'économies d'énergie) et le capital (équipements d'économies d'énergie). En revanche, la contribution de la substitution interénergétique (qui est aussi le résultat de remplacements similaires mettant en jeu des dépenses en capital et des technologies de rechange au pétrole) a été nettement moins importante, car la dépendance vis-à-vis du charbon, substitut prometteur du pétrole, s'est accrue.

Si on observe attentivement ces tendances, on remarque que les émissions de CO₂ ont augmenté après 1983 (année qui marque le début de la baisse des prix mondiaux du pétrole) en raison de la plus forte dépendance vis-à-vis du charbon et du relâchement des efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique. A partir de 1987 (début de la « bulle économique » japonaise), ces efforts ont encore sensiblement diminué, ce qui a entraîné une hausse des émissions de CO₂. Ensuite, à partir de 1991, les rejets de CO₂ ont à nouveau baissé, mais uniquement en raison de la chute du PIB induite par l'éclatement de la « bulle économique » – les efforts d'amélioration de l'efficacité énergétique ont continué à faiblir, d'où une inflexion de tendance vers un mode de fonctionnement à forte intensité énergétique.

Contribution des options technologiques

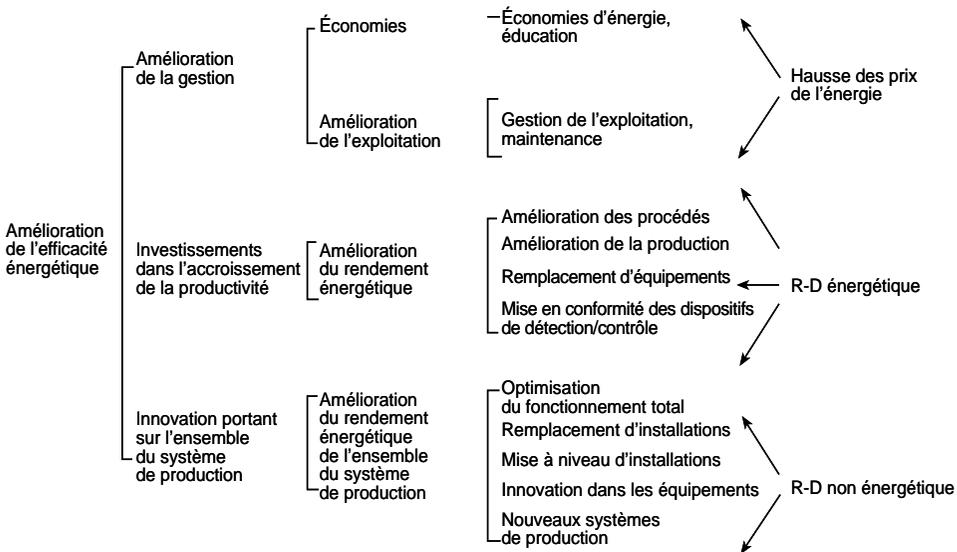
Si le Japon est parvenu à un développement durable respectueux de l'environnement après la première crise énergétique de 1973, il le doit en grande partie à ses efforts de réduction de sa dépendance énergétique. Ceux-ci ont pris la forme de gains d'efficacité énergétique, surtout à l'initiative du secteur industriel dans un premier temps, dans le but de contrecarrer les effets de la forte hausse des prix de l'énergie consécutive aux deux chocs pétroliers. Tout d'abord, on s'est concentré sur l'amélioration de la gestion par la sensibilisation aux économies d'énergie, la gestion de l'exploitation et des efforts d'entretien.

Dès qu'il est apparu clairement que ces efforts avaient porté tous leurs fruits, on a procédé à des investissements pour augmenter la productivité, qui ont donné lieu à l'acquisition, l'installation, l'équipement ou le remplacement d'installations perfectionnées et de systèmes de détection et de contrôle pour accroître le rendement des flux complexes d'énergie, de matières et de produits semi-finis. Lorsque les prix de l'énergie ont à nouveau flambé après la seconde crise énergétique de 1979, ces efforts avaient aussi produit tous les effets escomptés, et l'industrie s'est alors orientée vers la phase suivante : l'innovation dans l'ensemble des systèmes de production (figure 3).

Ces deux dernières phases ont été rendues possibles en grande partie par l'innovation technologique dans les domaines des dispositifs d'économies d'énergie, des procédés de production, des systèmes de détection et de contrôle et des nouveaux systèmes de production. C'était là la stratégie de survie du Japon au sein d'un environnement économique soumis à des contraintes : remplacer un facteur de production soumis à des contraintes (l'énergie) par un autre exempt de toute contrainte (la technologie).

L'évolution de l'efficacité énergétique est le fruit d'une interaction dynamique entre les premiers infléchissements de la dépendance à l'égard de l'énergie et les

Figure 3. Mesures en faveur de l'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie



Source : Auteur.

changements correspondants au niveau de la production pour que celle-ci soit fondée sur des formes d'énergie présentant une sécurité satisfaisante. En règle générale, la technologie a une incidence considérable sur l'évolution de la situation énergétique et de la production. Par conséquent, elle joue un rôle en faveur de l'efficacité énergétique en ce qu'elle maximise la production tout en réduisant le plus possible la consommation d'énergie. En l'occurrence, on peut distinguer deux catégories : les technologies énergétiques et les technologies non énergétiques. Alors que les technologies non énergétiques ont essentiellement pour but de maximiser la production, les technologies énergétiques sont ciblées sur les économies d'énergie et l'approvisionnement, et leur finalité est, avant tout, de réduire la dépendance énergétique (principalement vis-à-vis du pétrole).

Il y a une interaction importante entre les technologies non énergétiques et le capital pour augmenter la production – il s'agit d'une relation complémentaire. Toutefois, en augmentant le capital pour accroître la production, on aboutit inévitablement à une hausse de la consommation d'énergie. En revanche, la synergie des technologies énergétiques avec le capital donne lieu, pour une bonne part, à des gains d'efficacité énergétique (il s'agit là encore d'une relation complémentaire); ainsi, ces technologies concourent dans une large mesure à la diminution de la dépendance énergétique (remplacement de l'énergie par le capital). Certes, ces technologies ont aussi un effet stimulant sur la production, mais il est relativement faible.

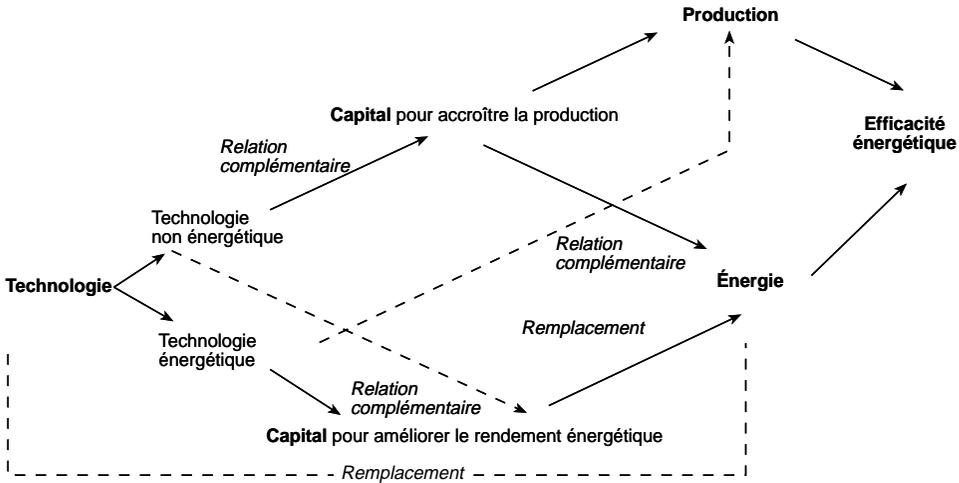
On peut considérer que la technologie contribue à l'amélioration de l'efficacité énergétique par une interaction dynamique qui se produit surtout entre les facteurs que nous venons d'évoquer : les technologies non énergétiques avec le capital pour accroître la production; les technologies énergétiques avec le capital pour améliorer l'efficacité énergétique; l'énergie; et la production (figure 4).

Afin d'analyser quantitativement l'interaction dynamique concernant l'option technologique et sa contribution à l'amélioration de l'efficacité énergétique, l'auteur a mesuré les valeurs correspondant aux technologies énergétiques (TE) et aux technologies non énergétiques (TnE) en calculant le stock de connaissances technologiques de la R-D énergétique et de la R-D non énergétique, compte tenu d'un rythme d'obsolescence dynamique de la technologie et du délai entre R-D et commercialisation.

Le résultat, présenté au graphique 2 (voir l'annexe), appelle plusieurs observations :

1. A partir du début des années 70, la priorité est passée de la R-D non énergétique à la R-D énergétique dans l'industrie manufacturière japonaise. Cette tendance traduit l'impact économique des crises énergétiques de 1973 et 1979; les dépenses de R-D énergétique ont alors connu une progression rapide, notamment entre 1974 et 1982. En revanche, en 1983, lors-

Figure 4. Concept de base de l'option technologique pour la croissance durable en présence de contraintes énergétiques



Source : Auteur.

que les cours mondiaux du pétrole ont commencé à baisser, ces dépenses ont fortement chuté.

2. Parallèlement à cette tendance, mais avec un certain retard, le stock de connaissances technologiques de la R-D énergétique s'est considérablement accru entre 1974 et 1982, puis entre 1983 et 1986, avant de connaître un déclin spectaculaire à partir de 1987.
3. Cet accroissement sur une courte période (1974-1986) a provoqué un vive accélération du rythme d'obsolescence de la technologie (qui est passé de 15.4 pour cent en 1974 à 21.2 pour cent en 1987), d'où un raccourcissement notable du délai entre R-D et commercialisation, qui est passé de 3.4 ans en 1974 à 1.4 an en 1987.

Sur la base des conclusions que permet de tirer le graphique 2, au cours de la période 1974-1994, on peut résumer comme suit les caractéristiques de la R-D énergétique dans l'industrie et du stock de connaissances technologiques de la R-D énergétique qu'elle a produit :

1. existence de facteurs intersectoriels d'ordre plus général, communs à tous les secteurs autres que la R-D non énergétique;

2. sensibilité au financement public de la R-D;
3. forte incitation aux investissements visant à améliorer l'efficacité énergétique;
4. contribution notable à l'amélioration de l'efficacité énergétique;
5. évolution dynamique étroitement liée aux tendances des prix de l'énergie.

Ces caractéristiques donnent à penser que la contribution de la technologie à l'amélioration de l'efficacité énergétique dans l'industrie manufacturière peut être analysée en se fondant sur le stock cumulé de connaissances technologiques de la R-D énergétique.

Les résultats de cette analyse sont présentés dans le graphique 3 (voir l'annexe). Il en ressort que l'amélioration de 3.4 pour cent par an en moyenne de l'efficacité énergétique, obtenue par l'industrie manufacturière entre 1974 et 1994, peut être attribuée comme suit : 55.4 pour cent aux technologies énergétiques (stock de connaissances technologiques de la R-D énergétique), 24.9 pour cent aux technologies non énergétiques, 8.0 pour cent à d'autres efforts entrepris en réponse à la forte hausse des prix de l'énergie et 11.7 pour cent à des améliorations autonomes non technologiques de l'efficacité énergétique.

Ces analyses corroborent l'hypothèse déjà évoquée, selon laquelle le Japon, confronté aux effets négatifs des crises énergétiques et dans le cadre de sa stratégie de survie, n'a ménagé aucun effort pour substituer un facteur de production exempt de contraintes (ou illimité), à savoir la technologie, à un facteur de production soumis à des contraintes (ou limité), à savoir l'énergie. Elles aboutissent aussi à une mise en garde : bien qu'elle ait surmonté avec succès les contraintes énergétiques et écologiques au cours des années 60, des années 70 et de la première moitié des années 80, l'économie japonaise risque à nouveau de subir ce type de contraintes, après la chute des cours mondiaux du pétrole, puis la formation et l'éclatement de la « bulle économique ».

Le rôle des pouvoirs publics

L'investissement dans la R-D présente généralement diverses caractéristiques, dont l'incertitude, un risque très important, des coûts élevés et un temps de retour long. En ce qui concerne la R-D énergétique, il faut y ajouter un forte proportion de financement public, un lien étroit avec la sécurité nationale et une sensibilité à des facteurs peu prévisibles comme les cours mondiaux du pétrole. Aussi, pour stimuler un investissement vigoureux de l'industrie dans la R-D énergétique, qui est essentiel pour accroître en temps utile le stock de connaissances technologiques, une implication forte des pouvoirs publics dans une optique à long terme est nécessaire. Cela est particulièrement vrai au Japon, où la structure énergétique est extrêmement fragile comparée à celles des autres pays industrialisés.

Le MITI, qui est chargé de la politique en matière d'énergie et de technologie industrielle, a pris un ensemble très étudié de mesures visant à créer les incitations voulues. Ses objectifs sont les suivants :

1. encourager une large participation de tous les secteurs de l'industrie aux projets du programme national de R-D, dont les projets Sunshine (technologies relatives aux énergies nouvelles) et Moonlight (technologies des économies d'énergie), en stimulant le caractère concurrentiel de l'industrie;
2. favoriser les retombées technologiques transsectorielles et l'effet d'entraînement entre technologies;
3. stimuler une activité de R-D industrielle vigoureuse dans le domaine de l'énergie, qui aurait pour effet de :
4. accroître le stock de connaissances technologiques de la R-D énergétique dans l'industrie, ce qui induirait encore plus les retombées évoquées au point (2). Ce faisant, le MITI pourrait :
5. jouer un rôle de catalyseur pour le remplacement de l'énergie par la technologie dans l'industrie.

Les efforts du MITI pour parvenir à ce remplacement ont manifestement donné un nouvel élan à la R-D énergétique dans l'industrie, en favorisant la stimulation entre technologies et ses retombées transsectorielles. Grâce à ces efforts conjugués, le Japon a réussi à faire évoluer son système énergétique dans les années 70 et 80.

Que dire, alors, des craintes qui se manifestent actuellement eu égard aux contraintes énergétiques et écologiques? Dans l'analyse présentée au graphique 3, ces craintes sont mises sur le compte de la stagnation des technologies énergétiques (stock de connaissances technologiques de la R-D énergétique), elle-même imputable au fléchissement des dépenses de R-D énergétique de l'industrie. Afin d'identifier les origines de cet immobilisme, l'auteur a analysé les facteurs qui ont déterminé les dépenses de R-D énergétique de l'industrie manufacturière japonaise au cours de la période 1974-1994. Le graphique 4 (voir l'annexe) fait ressortir que les principales causes d'inertie sont, depuis 1983, la réduction des crédits alloués par le MITI à la R-D énergétique et la baisse des dépenses totales de R-D de l'industrie, ainsi que le délai entre la R-D énergétique et la commercialisation.

Le budget de R-D énergétique du MITI a subi l'influence de l'enveloppe globale consacrée par le ministère à la R-D, de certaines tendances des prix de l'énergie (la baisse des cours mondiaux du pétrole) et des contraintes qui ont pesé sur les finances publiques après les crises énergétiques en raison du ralentissement de la croissance économique.

Ultérieurement, après l'éclatement de la « bulle économique », l'industrie japonaise a connu un tassement structurel des activités de R-D qui a réduit la contribution de la technologie à la croissance économique. Ensuite, la croissance économique étant plus lente, l'incitation à l'investissement dans la R-D s'est amoindrie. Ces tendances ont créé un cercle vicieux entre technologie et développement économique, qui risque de déstabiliser le cercle vertueux qui s'était établi entre eux.

Il se dégage clairement des données des signaux d'alerte quant à la stagnation persistante du stock de connaissances technologiques de la R-D énergétique de l'industrie manufacturière. Le mécanisme japonais de remplacement de l'énergie par la technologie pourrait s'en trouver sérieusement ébranlé. Le MITI doit prendre des mesures préventives et efficaces pour relancer les initiatives de substitution. En outre, étant donné les facteurs contrastés en jeu, le MITI devrait élaborer une stratégie reposant sur l'intégration des programmes de R-D – concernant les technologies dans les domaines des énergies nouvelles, des économies d'énergie et de l'environnement mondial – de façon à atténuer les préoccupations au sujet de la durabilité. Les contraintes énergétiques et écologiques peuvent être surmontées simultanément.

Pour y parvenir, le MITI a décidé en avril 1993 de lancer le programme New Sunshine (R-D en matière de technologies énergétiques et environnementales), qui intègre le projet Sunshine, le projet Moonlight et le programme technologique pour l'environnement mondial. On s'attend à ce que le programme New Sunshine contribue grandement à la réalisation de l'objectif du programme New Earth 21.

Création d'un cercle vertueux entre R-D, démonstration, diffusion et application concernant l'énergie photovoltaïque

Impulsion donnée par les pouvoirs publics

Le graphique 5 (voir l'annexe) présente l'évolution des dépenses de R-D énergétique du MITI et de l'industrie manufacturière japonaise entre 1955 et 1994. Il résume également une analyse consacrée à l'effet de stimulation produit par la R-D énergétique conduite sous l'égide du MITI (économies d'énergie, énergie solaire, charbon, pétrole et gaz, nucléaire et électricité) sur des activités de R-D analogues dans l'industrie manufacturière japonaise. Le graphique montre que cet effet a été considérable, compte tenu d'un décalage d'un à deux ans. Les corrélations apparaissent distinctement pour la R-D énergétique induite par la technologie dans les domaines des économies d'énergie, des énergies renouvelables et du charbon, sous l'effet des projets Moonlight et Sunshine; elles sont un peu moins évidentes pour la R-D sur la mise au point de technologies visant la diversification énergé-

tique (pétrole et gaz, énergie nucléaire et électricité). Cette analyse semble corroborer les hypothèses formulées plus haut.

Dynamisme industriel du cercle vertueux entre R-D, croissance du marché et baisse des prix

En dépit des efforts considérables consacrés à l'exploitation à grande échelle des énergies renouvelables, le Japon n'a pas acquis d'avantage comparatif dans ce domaine en raison des contraintes inhérentes à ces ressources naturelles. La production d'électricité photovoltaïque constitue une exception à cet égard.

La photovoltaïque est considérée comme une énergie renouvelable sans contraintes d'implantation qui, à la faveur d'une percée technologique, peut permettre au Japon de surmonter ses handicaps géographiques. Son application pratique est prévue à brève échéance : elle contribuera à une augmentation notable, dans le monde, de l'utilisation d'énergie « propre ». Lancé en 1974, le projet Sunshine (consacré à la R-D sur les énergies nouvelles) visait à mettre en valeur des formes d'énergie non polluantes sous l'effet d'entraînement de la technologie. Toutefois, c'était l'énergie solaire thermique et non la photovoltaïque qui constituait au départ la priorité de la R-D. En 1980, à partir des progrès réalisés dans les domaines des semi-conducteurs et des photopiles au silicium amorphe, le MITI a décidé de concentrer la R-D menée dans le cadre du projet Sunshine sur la photovoltaïque. Le ministère s'est doté d'une direction spécifique chargée de la mise en œuvre et de la gestion du projet, la NEDO (organisation pour le développement de la technologie industrielle et des énergies nouvelles), qui a pris une initiative forte en faveur de la R-D dans ce domaine. La figure 5 illustre l'évolution du budget, ainsi que les dépenses de R-D correspondantes de l'industrie suscitées par ce projet.

Ces efforts ont enrichi de façon spectaculaire le stock de connaissances technologiques de la R-D sur la photovoltaïque et abouti, parallèlement, à une augmentation de la production de piles solaires assortie d'une baisse des coûts de production (figure 6).

En 1974, année de lancement du projet Sunshine, le coût de production des piles solaires était de 20 000 yen/W. Il est ensuite passé à 5 000 yen/W en 1980, 2 000 yen/W en 1983, 1 200 yen/W en 1985, 650 yen/W en 1990 et enfin 600 yen/W en 1994 (prix courants). On a expliqué cette baisse constante par l'accroissement du stock de connaissances technologiques et par l'augmentation de la production de piles solaires qui s'en est suivie. L'influence du projet Sunshine est analysée au graphique 6 (voir l'annexe).

Encouragé par ces progrès, et par les perspectives qu'offrait la photovoltaïque en tant qu'énergie « propre » dont l'élément moteur est la technologie, le MITI a décidé d'accorder la priorité à la création d'un cercle vertueux de développement de la photovoltaïque dans le cadre du programme New Sunshine; la R-D dans ce

Figure 5. Évolution des dépenses de R-D en matière d'électricité photovoltaïque au Japon (1974-94)
En centaines de millions de yen aux prix courants

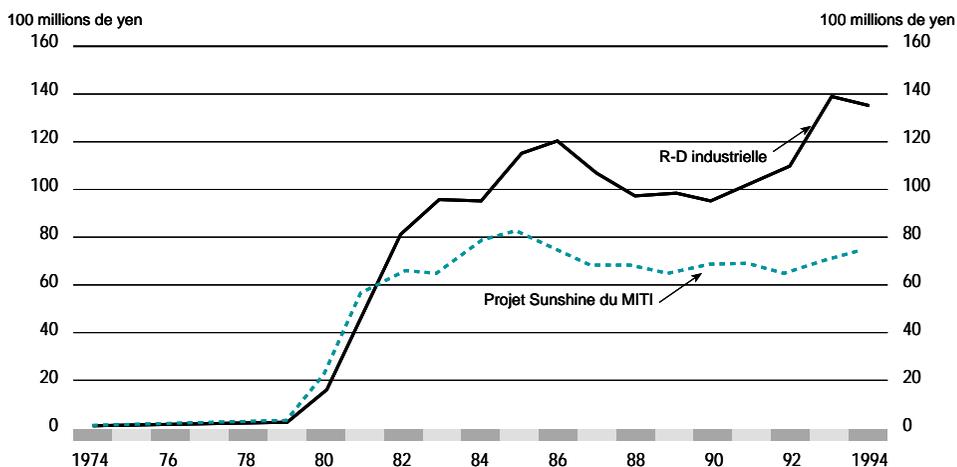
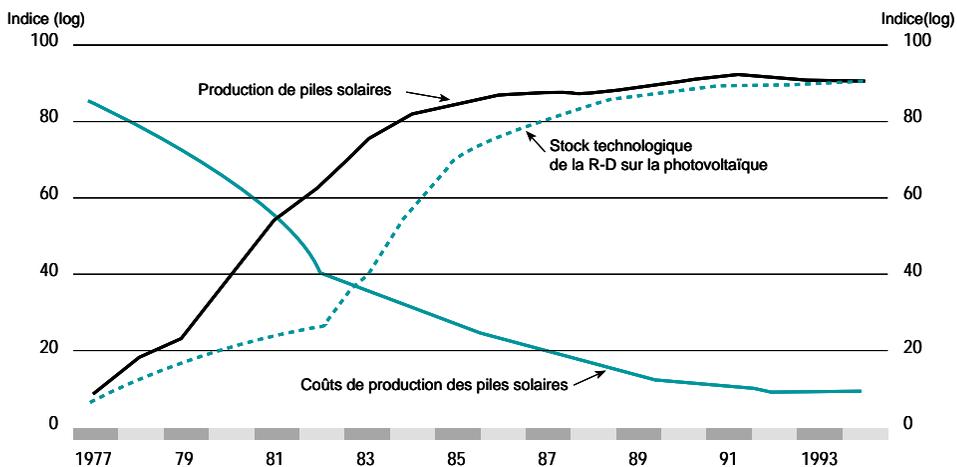


Figure 6. Tendances de développement de l'électricité photovoltaïque au Japon (1976-94)
Indice



domaine a été accélérée à partir de 1993, et des incitations plus puissantes en faveur de l'application pratique des systèmes photovoltaïques ont été offertes.

Si l'on veut faire des énergies renouvelables une option d'avenir pour la substitution interénergétique afin de favoriser un développement écologiquement durable, il paraît capital d'élaborer une politique cohérente pour libérer le dynamisme des cercles vertueux mettant en jeu la croissance du marché et la baisse de prix des technologies correspondantes.

Retombées intersectorielles de haute technologie favorisant l'amélioration de l'efficacité énergétique

Le tableau 3 recense 115 entreprises qui participaient aux projets Sunshine et Moonlight en 1992. Il en ressort qu'un nombre important d'entreprises intersectorielles de pointe (la moitié des 40 premières entreprises en matière de R-D) ont pris part à de nombreux projets, d'où des retombées et des transferts technologiques entre les projets et entre les entreprises.

Le tableau 4 met en évidence un exemple précis où des demandes de brevets ont découlé des projets de R-D sur les piles à combustible menés dans le cadre du projet Moonlight. Il est intéressant de noter que plus de 60 pour cent des demandes émanaient de l'industrie des machines et non des secteurs dépendant de l'énergie comme ceux de l'électricité, du gaz de ville, du pétrole ou des produits chimiques, ce qui démontre que les industries de pointe produisent des retombées technologiques dynamiques en direction des secteurs gros consommateurs d'énergie.

Au sein de l'industrie manufacturière japonaise, ce sont principalement les secteurs tributaires de l'énergie tels que la sidérurgie et la chimie qui ont commencé à réaliser des gains d'efficacité énergétique remarquables. Ces grands secteurs représentent près de 60 pour cent de la consommation d'énergie de l'industrie manufacturière, comme le montre le graphique 7 (voir l'annexe). Néanmoins, contrairement aux attentes, leurs dépenses de R-D énergétique se sont révélées plutôt limitées – entre 4 et 11 pour cent du total pour la sidérurgie et entre 3 et 6 pour cent pour l'industrie chimique.

Dans les secteurs de haute technologie, où les efforts de R-D énergétique ont été extrêmement importants, il s'est produit une évolution contraire. Par exemple, la part des dépenses dans l'industrie des machines électriques s'est située entre 29 et 35 pour cent et, dans celle des matériels de transport, entre 27 et 40 pour cent. Dans le même temps, la part de la consommation d'énergie dans ces secteurs ne représentait pas plus de 2.5 à 4 pour cent.

Cette observation laisse à penser que le stock de connaissances technologiques de la R-D énergétique accumulé dans ces deux secteurs a eu des retombées

Tableau 3. **Entreprises participant aux projets Sunshine et Moonlight en 1992**

Le Projet Sunshine (61)

Chimie (15)	24 Asahi Chemical Industry Co., 29 Mitsubishi Kasei Co., Mitsui Toatsu Chemicals Inc., Kaneka Co., Daito Hoxan Inc., Japan Catalytic Chemicals, Nippon Steel Chemical Co., Idemitsu Oil Co., Tonen Co., Nippon Oil Co., Nippon Kyoseki Oil Co., Oil Resources Development, Sumitomo Coal Mining Co., Mitsui Coal Liquefaction
Céramique (4)	33 Asahi Glass Co., Kyocera Co., NGK Spark Plug Co., Shinagawa Refractories Co.
Sidérurgie (7)	Nippon Steel Co., 33 Sumitomo Metal Industries Ltd., 26 Kobe Steel Ltd., NKK Co., 28 Kawasaki Steel Co., Japan Steel Works Ltd., Japan Metal & Chemicals Co.
Produits et métaux non ferreux (5)	Sumitomo Electric Industries, Ltd., Sumitomo Metal Mining Co., Hitachi Cable Ltd., Mitsui Mining & Smelting Co., Osaka Titanium Co.
Machines (20)	3 Hitachi Ltd., 6 Toshiba Co., 35 Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., 12 Mitsubishi Industries Ltd., 10 Mitsubishi Electric Co., 38 Fuji Electric Co., 32 Oki Electric Industry Co., 15 Sharp Co., 17 Sanyo Electric Co., Ebara Co., Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., 2 Matsushita Electric Industry Co., Yuasa Battery Co., Japan Storage Battery Co., Matsushita Battery Co., 1 Tokyo Motor Co., 8 Nissan Motor Co.
Entreprises publiques d'électricité (4)	EPDC, Tohoku Electric Power Co., Okinawa Electric Power Co., Tokyo Gas Co.
Construction (6)	JGC Co., TEC Electrics Co., Chiyoda Co., Kandenko Co., Ohte Development Co., Geothermal Technology Development

Le Projet Moonlight (54)

Chimie (3)	24 Asahi Chemical Industry Co., 29 Mitsubishi Kasei Co., Ube Industries Ltd.
Céramique (4)	33 Asahi Glass Co., Kyocera Co., NGK Spark Plug Co., NGK Insulators Ltd.
Sidérurgie (3)	33 Sumitomo Metal Industries Ltd., 26 Kobe Steel Ltd., NKK Co.
Produits et métaux non ferreux(5)	Sumitomo Metal Industries Ltd., Hitachi Cable Ltd., Fujikura Ltd., Showa Electric Wire & Cable Co., Furukawa Electric Co.
Machines (23)	3 Hitachi Ltd., 6 Toshiba Co., 35 Ishikawajima-Harima Heavy Industries Co., 12 Mitsubishi Industries Ltd., Kawasaki Heavy Industries Ltd., 10 Mitsubishi Electric Co., Fuji Electric Co., 17 Sanyo Electric Co., Ebara Co., Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Kubota Co., Yokogawa Electric Co., Murata MFG. Co., Maekawa Manufacturing, Aishin Seki Co., Daikin Industries Ltd., Sumitomo Precision Products Co., Hitachi Zosen Co., Niigata Engineering Co., Yammer Diesel, Yuasa Battery Co., Japan Storage Battery Co., Matsushita Battery Co.
Entreprises publiques d'électricité(11)	Hokkaido Electric Power Co., Tohoku Electric Power Co., 19 Tokyo Electric Power Co., Chubu Electric Power Co., Hokuriku Electric Power Co., Kansai Electric Power Co., Chugoku Electric Power Co., Shikoku Electric Power Co., Kyusyu Electric Power Co., EPDC, Osaka Gas Co.
Construction (5)	JGC Co., TEC Electrics Co., Chiyoda Co., Shimizu Co., Obayashi Co.

Notes : Le chiffre qui précède le nom indique le rang occupé par l'entreprise, parmi les 40 premières, dans le classement selon les dépenses de R-D effectués en 1992 (19 entreprises sur 40 ont participé).
Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre d'entreprises participantes dans chaque secteur.

Tableau 4. Nombre de demandes de brevets issues du projet Moonlight – Exemple de la R-D sur les piles à combustible (janvier 1991-août 1994)

Secteur	PCOS ^a	PCEP ^b
Chimie et céramique	78 (10.9 %)	5 (3.5 %)
Machines	436 (60.9 %)	98 (69.0 %)
Énergie (électricité, gaz de ville, pétrole)	132 (18.4 %)	5 (3.5 %)
État	21 (2.9 %)	3 (2.1 %)
Participants étrangers	41 (5.7 %)	3 (2.1 %)
Autres	8 (1.1 %)	28 (19.7 %)
Total	716 ^c (100 %)	142 (100 %)

a) PCOS : pile à combustible à oxyde solide.

b) PCEP : pile à combustible à électrolyte polymérique.

c) Englobe 21 modèles d'utilités.

Source : Trends in Patent Applications (Office des brevets, 1995).

sur la sidérurgie et l'industrie chimique, grâce à des interactions au niveau du personnel, des biens d'équipement et des intrants intermédiaires. Ces retombées technologiques transsectorielles ont joué un rôle déterminant dans les importantes améliorations de l'efficacité énergétique observées dans l'industrie manufacturière japonaise. En outre, les projets lancés par le MITI dans le cadre des programmes nationaux de R-D, dont les projets Sunshine et Moonlight, ont porté leurs fruits en stimulant ces retombées.

A en juger par la réussite des retombées technologiques intersectorielles que l'on vient d'évoquer, il conviendrait de redoubler d'efforts dans ce sens à l'échelle planétaire.

5. Options systémiques des technologies énergétiques des cinquante prochaines années – répercussions

On peut résumer comme suit les enseignements clés de cette analyse du point de vue de la définition des options systémiques les mieux adaptées aux technologies énergétiques futures et de la réalisation de l'objectif de New Earth 21.

Les dimensions systémiques sont cruciales pour que les technologies énergétiques atteignent l'objectif du programme New Earth 21.

Pour atteindre l'objectif de New Earth 21 en s'assurant que les perspectives techniques des technologies énergétiques seront favorables, il faut plutôt faire fond sur les dimensions systémiques que sur les dimensions techniques. Entre autres conditions essentielles, cela exige un mécanisme qui favorise efficacement les innovations technologiques et leurs retombées à l'échelle mondiale.

L'examen des technologies énergétiques futures montre que la technologie est indissociablement liée aux domaines social, économique, culturel, institutionnel et géopolitique. A l'image d'un système biologique, elle émerge des interactions entre ces différentes strates, et elle naît, se développe et parvient à maturité à l'intérieur d'un cercle vertueux. De même, elle marque le pas, décline et devient obsolète lorsque le cercle vertueux s'interrompt.

Une complémentarité mondiale est indispensable pour atteindre l'objectif du programme New Earth 21.

Les options systémiques, qui doivent permettre de surmonter les contraintes énergétiques et écologiques tout en assurant la poursuite d'un développement durable, mettent à profit l'interaction dynamique des 3 E : économie, énergie, environnement. L'essentiel est de trouver la meilleure combinaison des trois options possibles : amélioration de l'efficacité énergétique, substitution interénergétique et piégeage du CO₂.

Les avantages et inconvénients relatifs de ces options dépendent généralement des réalités économiques, industrielles, géographiques, sociales et culturelles de chaque pays ou région. Une complémentarité mondiale des compétences et expériences des pays et régions possédant des avantages économiques, géographiques ou sociaux comparatifs pourrait induire une amélioration mondiale des 3 E.

La création et l'entretien d'un cercle vertueux sont essentiels.

Compte tenu de la nature métabolique de la technologie, il est essentiel de construire et d'entretenir un cercle vertueux pour le développement technologique dans ses environnements social, économique et naturel.

Depuis 40 ans, malgré de nombreux handicaps, le Japon a su mettre en œuvre un développement durable en concentrant ses efforts sur une amélioration de la productivité des ressources relativement peu abondantes. Cela s'est vérifié à chaque époque, y compris dans les années 70 et 80, lorsque s'exerçaient des contraintes énergétiques et écologiques. La technologie a joué un rôle majeur à cet égard. En outre, le développement soutenu a stimulé d'autres avancées technologiques. Ainsi, à l'image d'un écosystème, le Japon a créé un cercle vertueux complexe entre technologie et développement économique.

Cependant, depuis l'atténuation des contraintes énergétiques, la forte réévaluation du yen, la « bulle économique » qui s'en est suivi et son éclatement, l'industrie japonaise doit faire face à une stagnation structurelle des activités de R-D qui risque d'entraîner l'effondrement de ce cercle vertueux. Or, comme le montre bien

l'exemple des écosystèmes, quand un cycle s'interrompt, la remise en état du système devient beaucoup plus difficile.

Une dynamique importante qui régit ce système tient à ce que le cercle vertueux, pour être efficace, doit être fondé sur des interactions positives avec des systèmes appartenant à différentes strates. Ces interactions dépendent inévitablement d'un cycle complexe inscrit dans un échancier spécifique.

Le respect de certaines conditions prépare la voie pour la sécurité énergétique des cinquante prochaines années :

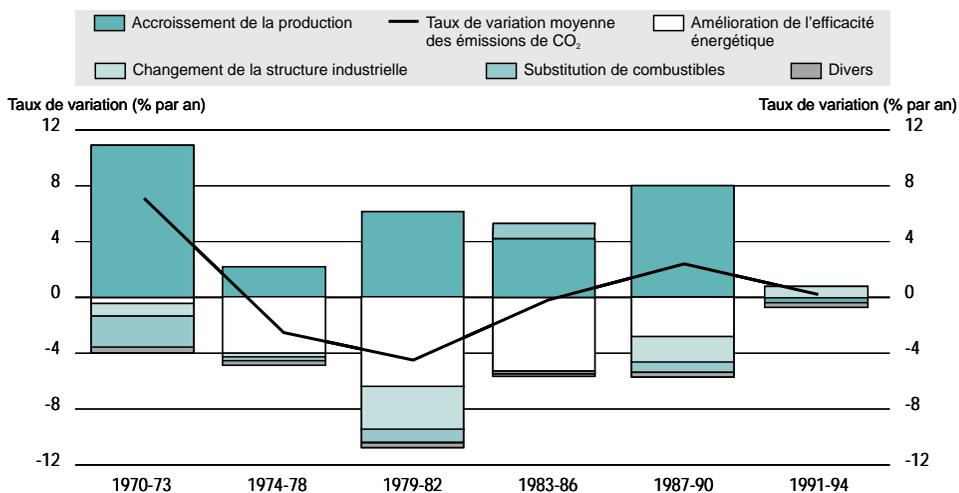
1. une démarche opportune, ordonnée et systématique, pour la création et l'entretien d'un cercle vertueux;
2. une complémentarité suffisante, pour générer des retombées technologiques mondiales;
3. une large implication des acteurs, pour intégrer leur vitalité et pour définir le partage des responsabilités.

Notes

1. L'auteur remercie pour leur aide MM. Kenneth Friedman et Clas-Otto Wene, de l'AIE.
2. M. Watanabe est également Conseiller principal auprès du Directeur chargé de la technologie au sein de l'Institut international pour l'analyse des systèmes appliqués (IIASA), et président du Groupe de travail sur les technologies pour l'utilisation finale de l'énergie du CRTE de l'AIE.

Annexe

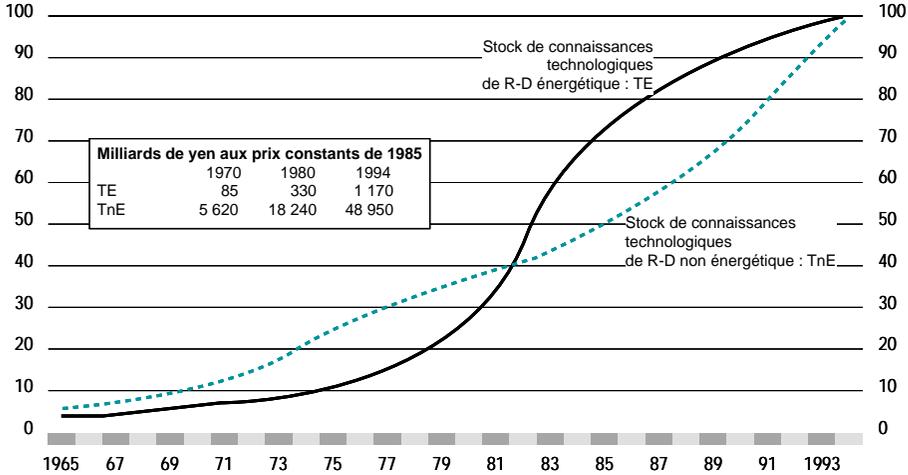
Graphique 1. Tendances et importances des facteurs contribuant à l'évolution des émissions de CO₂ dans l'industrie manufacturière japonaise (1970-94)



Source : Auteur.

Période	Émissions de CO ₂	Substitution de combustibles	Efficacité énergétique	Changement de structure industrielle	Croissance du PIB	Divers
	ΔCO_2 CO ₂	$\frac{\Delta C/E}{C/E}$	$\frac{\Delta E/Y}{E/Y}$	$-\frac{\Delta V/Y}{V/Y}$	$\frac{\Delta V}{V}$	ϵ
1970-73	7.12	-2.19	-0.20	-1.10	11.00	-0.39
1974-78	-2.29	-0.24	-3.98	-0.32	2.31	-0.06
1979-82	-4.11	-1.09	-6.31	-2.93	6.34	-0.12
1983-86	0.11	1.28	-5.00	-0.13	4.27	-0.31
1987-90	2.60	-0.72	-2.66	-1.83	8.04	-0.23
1991-94	0.52	-0.15	1.10	-0.13	-0.24	-0.06
1974-94	-0.71	-0.19 (4.0 %)	-3.40 (71.3 %)	-1.03 (21.6 %)	4.06	-0.15 (3.1 %)

Graphique 2. Évolution du stock de connaissances technologiques de la R-D énergétique et de la R-D non énergétique dans l'industrie manufacturière japonaise (1965-94)



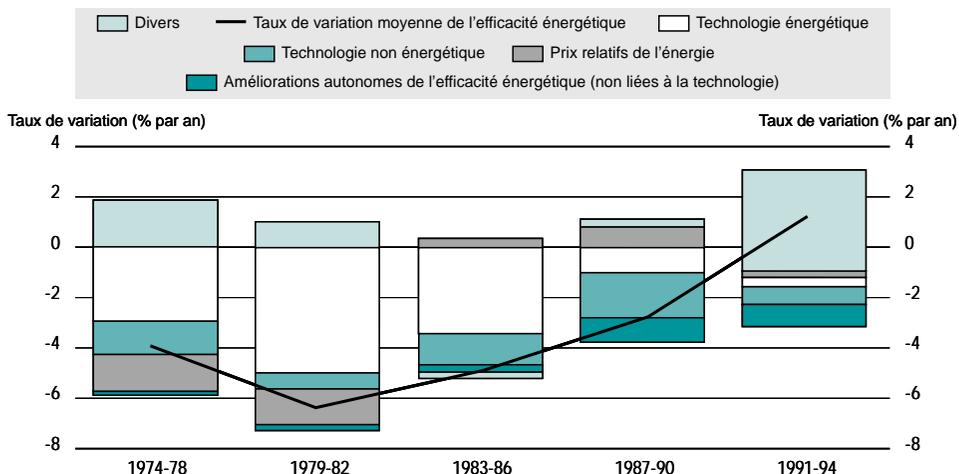
Source : Auteur.

Note : Le stock de connaissances technologiques est mesuré par les équations suivantes :

$$T_t = R_{t-m_t} + (1 - \rho_t)T_{t-1}, \quad \rho_t = \rho(T_t), \quad m_t = m(\rho_t)$$

où T_t est le stock de connaissances technologiques de la R-D énergétique au cours de la période t , R_t est la dépense de R-D au cours de la période t , m_t est le délai entre R-D et commercialisation au cours de la période t , et ρ_t est un rythme d'obsolescence de la technologie au cours de la période t .

Graphique 3. Facteurs ayant contribué à l'évolution de l'efficacité énergétique dans l'industrie manufacturière japonaise (1974-94)



Source : Auteur.

Note: L'ampleur de la contribution est mesurée par les équations suivantes :

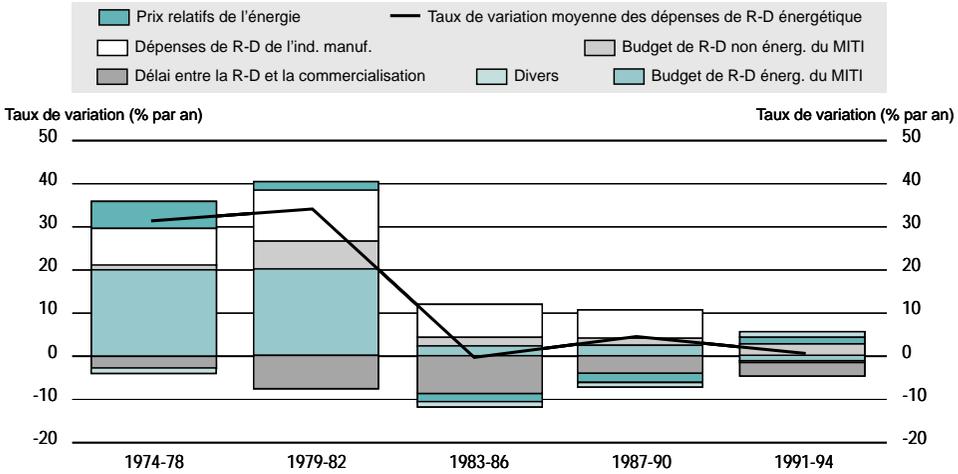
$$\frac{\Delta(E/Y)}{(E/Y)} = \sum \frac{\partial Y}{\partial X} * \frac{X}{Y} * \frac{\Delta(E/X)}{E/X} \quad (X = L, K, M)$$

$\ln E/X = a + b_1 \ln (P_x/P_e) + b_{21} \ln TE + b_{22} \ln TnE + b_3 \lambda t$

où P_x , P_e sont les prix de X et de l'énergie, TE et TnE sont les stocks de connaissances technologiques de la R-D énergétique et de la R-D non énergétique, λ' représente les améliorations autonomes (non technologiques) de l'efficacité énergétique et t est la tendance temporelle.

Period	$\frac{\Delta E/Y}{E/Y}$	Contribution factors				
		P_x/P_e	TE	TnE	λ	ϵ
1974-78	-3.98	-1.53	-2.90	-1.34	-0.17	1.96
1979-82	-6.31	-1.39	-4.96	-0.74	-0.25	1.03
1983-86	-5.00	0.33	-3.46	-1.23	-0.36	-0.28
1987-90	-2.66	0.85	-0.99	-1.69	-1.10	0.27
1991-94	1.10	0.20	-0.38	-0.71	-0.94	2.93
1974-94	-3.40	-0.37 (8.0%)	-2.56 (55.4%)	-1.15 (24.9%)	-0.54 (11.7%)	1.22

Graphique 4. Facteurs contribuant à l'évolution des dépenses de R-D énergétique dans l'industrie manufacturière japonaise (1974-94)



Source : Auteur.

Note : L'ampleur de la contribution est mesurée par l'équation suivante :

$$\ln \text{ERD} = -6.57 + 0.65 \ln \text{MERD} + 0.27 \ln (\text{MnERD}) + 0.74 \ln \text{RD} + 0.64 \ln \text{Me} + 0.25 \text{Pet}$$

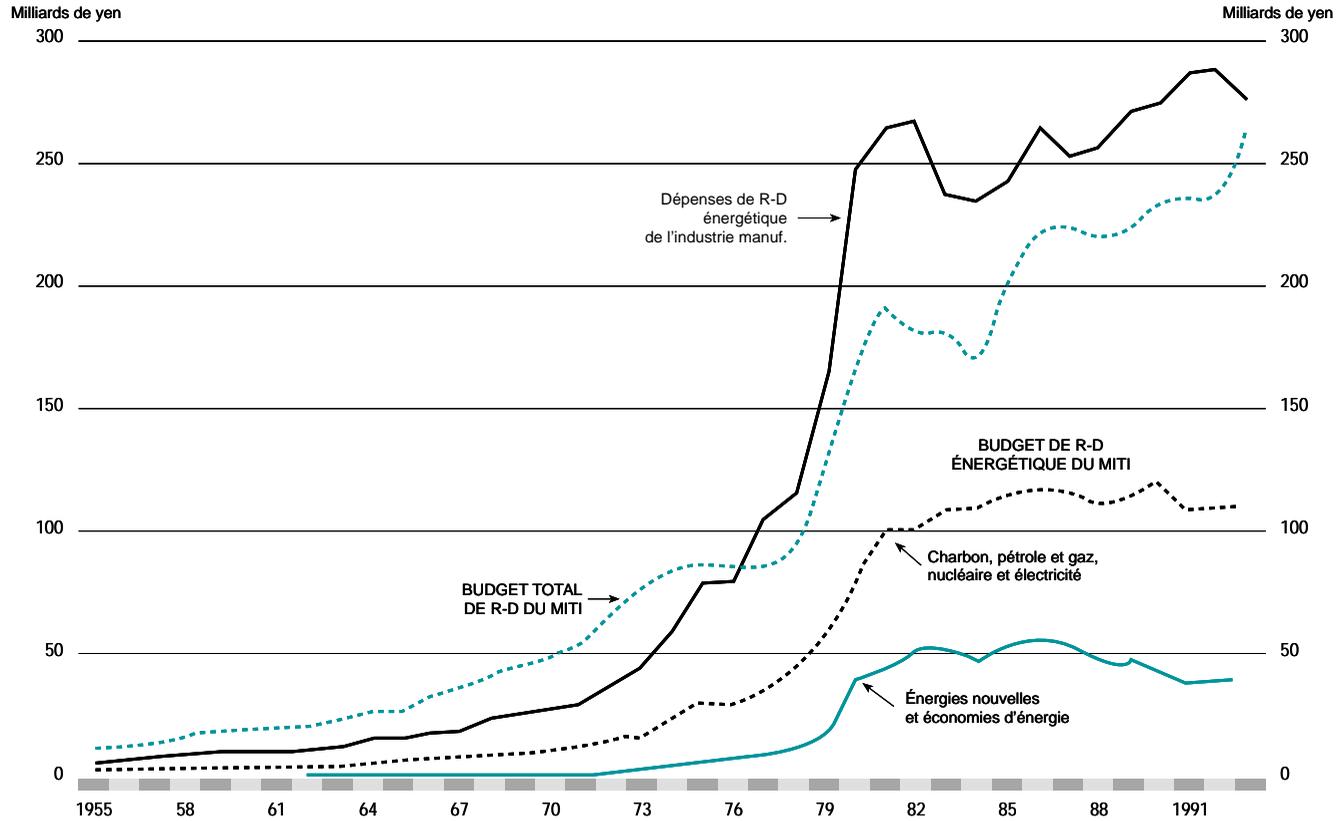
(6.81) (3.54) (3.32) (4.10) (2.26)

adj. R2 0.993 DW 2.07

où ERD et RD sont la dépense de R-D énergétique et la dépense totale de R-D de l'industrie manufacturière, MERD et MnERD sont le budget de R-D énergétique et le budget de R-D non énergétique du MITI, Me est le délai entre R-D énergétique et commercialisation, et Pet représente les prix relatifs de l'énergie par rapport aux coûts d'investissement de la technologie.

Période	R-D énergétique industrielle	R-D énergétique du MITI	R-D non énergétique du MITI	Total de la R-D industrielle	Délai entre la R-D et la commercialisation	Prix relatifs de l'énergie	Divers
	$\frac{\Delta \text{ERD}}{\text{ERD}}$	$\frac{\Delta \text{MERD}}{\text{MERD}}$	$\frac{\Delta \text{MnERD}}{\text{MnERD}}$	$\frac{\Delta \text{RD}}{\text{RD}}$	$\frac{\Delta \text{Me}}{\text{Me}}$	$\frac{\Delta \text{Pet}}{\text{Pet}}$	ϵ
1974-78	31.77	20.33	1.08	8.19	-3.01	6.44	-1.26
1979-82	32.99	20.64	6.22	11.36	-7.34	2.25	-0.14
1983-86	-0.09	2.37	2.15	7.73	-8.70	-2.29	-1.35
1987-90	3.46	1.78	1.03	7.88	-4.25	-2.04	-0.94
1991-94	0.35	-1.08	2.32	-0.50	-3.39	1.33	1.67
1974-94	14.56	9.36	2.49	6.99	-5.23	1.39	-0.44

Graphique 5. Évolution des dépenses de R-D du MITI et de l'industrie manufacturière japonaise (1955-94)
Aux prix constants de 1985 (en milliards de yen)

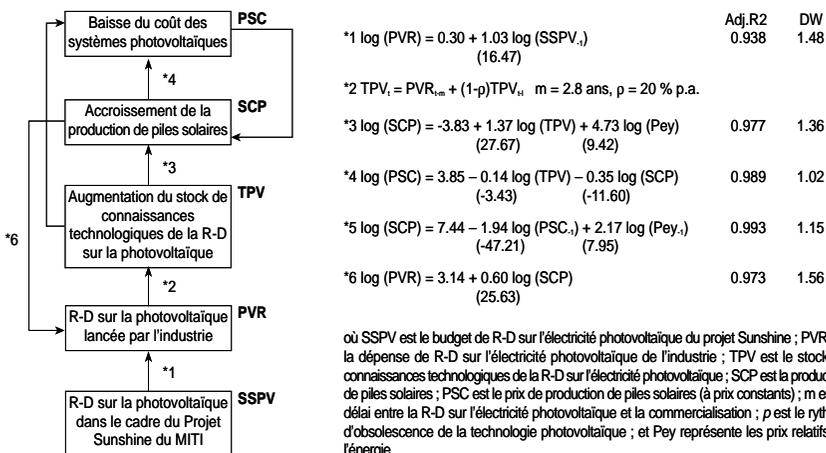


Source : Auteur.

**Effet d'entraînement de la R-D énergétique du MITI sur les activités de R-D énergétique
de l'industrie manufacturière japonaise (1977-94)**

	Prix relatifs de l'énergie	adj. R2	DW
1. R-D sur les économies d'énergie (CONSV) par rapport au Projet Moonlight (ML) et à la R-D non énergétique du MITI (MITInERD) $\ln(\text{CONSV}) = 3.149 + 0.437 \ln(\text{LAG2}(\text{ML})) + 0.285 \ln(\text{LAG1}(\text{MITInERD})) + 0.003 \ln(\text{Pey}) + 0.411\text{D}$ (6.41) (2.09) (0.02) (4.58)	1979-81 = 1	0.950	1.57
2. R-D sur l'énergie solaire (SOLAR) par rapport à la R-D sur l'énergie solaire du MITI (SS) $\ln(\text{SOLAR}) = 0.981 + 0.871 \ln(\text{LAG1}(\text{SS})) + 0.011 \ln(\text{Pey}) + 0.285\text{D}$ (13.62) (0.05) (2.48)	1979, 80 = 1	0.936	1.17
3. R-D sur le charbon (COAL) par rapport aux activités du MITI sur la transformation du charbon (SC) et la combustion du charbon (MC) $\ln(\text{COAL}) = -0.584 + 0.289 \ln(\text{LAG2}(\text{SC})) + 0.845 \ln(\text{LAG1}(\text{MC})) + 0.509 \ln(\text{Pey}) + 1.630\text{D}$ (6.91) (3.12) (1.10) (5.60)	1980 = 1	0.947	2.39
4. R-D sur le pétrole et le gaz (OILGAS) par rapport à la R-D sur le pétrole et le gaz du MITI(MOG) $\ln(\text{OILGAS}) = 0.998 + 0.858 \ln(\text{LAG1}(\text{MOG})) + 1.362 \ln(\text{Pey}) + 0.721\text{D}$ (11.11) (6.31) (5.36)	1979, 80 = 1	0.898	1.92
5. R-D sur l'énergie nucléaire (NUCLEAR) par rapport à la R-D sur l'énergie nucléaire du MITI (MN) $\ln(\text{NUCLEAR}) = 3.990 + 0.425 \ln(\text{LAG2}(\text{MN})) + 0.022 \ln(\text{Pey}) - 0.192\text{D}$ (8.98) (0.17) (-2.38)	1979, 80 = 1	0.896	1.93
6. R-D sur l'énergie électrique (ELECTRIC) par rapport à la R-D sur l'énergie électrique du MITI (MEP) $\ln(\text{ELECTRIC}) = -1.882 + 1.413 \ln(\text{LAG1}(\text{MEP})) + 0.865 \ln(\text{Pey}) + 1.431\text{D}$ (10.49) (1.55) (3.95)	1979, 80 = 1	0.868	2.05

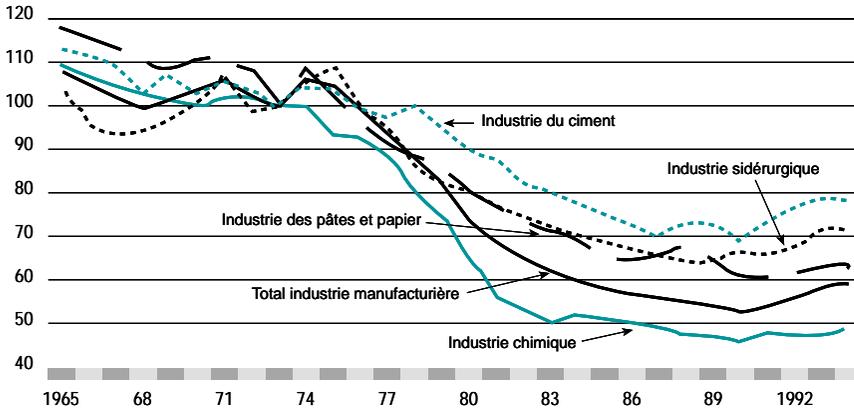
Graphique 6. Initiative du MITI en faveur de la création d'un cercle vertueux pour le développement de l'électricité photovoltaïque au Japon (1976-94)



Source : Auteur.

Graphique 7. Retombées technologiques des secteurs des machines électriques et du matériel de transport en direction de la sidérurgie et de l'industrie chimique au Japon

Évolution de la consommation unitaire d'énergie dans l'industrie manufacturière japonaise (1965-94) – Indice : 1973 = 100



Source : Auteur.

		1980	1985	1990	1994
Consommation d'énergie	Sidérurgie	33.7	31.5	29.5	27.4
	Chimie	24.5	25.9	27.4	30.3
	Machines électriques	}	2.5	3.5	4.0
	Matériels de transport				
	Autres	39.3	39.1	39.1	38.3
Total	100	100	100	100	
Dépenses de R-D énergétique	Sidérurgie	10.6	11.1	6.4	4.4
	Chimie	4.4	5.7	2.5	2.5
	Machines électriques	29.0	30.2	30.9	34.6
	Matériels de transport	26.6	34.4	39.4	34.2
	Autres	29.4	18.6	20.8	24.3
Total	100	100	100	100	

Bibliographie

- AIE (1994),
Energy and Environmental Technologies to Respond to Global Climate Change Concerns, OCDE/AIE, Paris.
- AIE (1996),
Comparing Energy Technologies, OCDE/AIE, Paris.
- AIE (1997),
Energy Technologies for the 21st Century, OCDE/AIE, Paris.
- INDUSTRIAL TECHNOLOGY COUNCIL OF MITI (1992),
A Comprehensive Approach to the New Sunshine Program, Tokyo.
- MacDONALD, G. (1998),
«Climate and Catastrophic Weather Events», présentation à la Engineering Academy of Japan, Tokyo.
- MITI,
Annual Report on MITI's Policy, Tokyo, éditions annuelles, 1970-1994.
- MITI (1993),
Review of MITI's Policy, Tokyo, vol. 14, pp. 276-307.
- OGAWA, Y. (1991),
«An Analysis on Factors Affecting Energy Consumption and CO₂ Emissions and Their Regional and Sectoral Differences», rapport présenté à l'atelier du Energy and Industry Subgroup, Groupe de travail 3 du GIEC, Séoul.
- WATANABE, C. (1992),
«Trends in the Substitution of Production Factors to Technology : Empirical Analysis of the Inducing Impact of the Energy Crisis on Japanese Industrial Technology», *Research Policy* 21, n° 6, pp. 481-505.
- WATANABE, C. (1995a),
«Identification of the Role of Renewable Energy – A View from Japan's Challenge», *Renewable Energy* 6, n° 3, pp. 237-274.
- WATANABE, C. (1995b),
«Mitigating Global Warming by Substituting Technology for Energy : MITI's Efforts and New Approach», *Energy Policy* 23, n° 4/5, pp. 447-461.
- WATANABE, C. (1997),
«Systems Options for the Rational Use of Energy for Global Sustainability», Actes du Séminaire : APEC Energy and Technology Transfer and Renewable Energy Resource Assessment Seminar, Santiago.

Annexe

Liste des participants

PRÉSIDENT

Donald JOHNSTON
Secrétaire général
de l'OCDE

PARTICIPANTS

Fernando ALVAREZ
Chief Economist
CEMEX
Mexique

Garegin S. ASLANIAN
Executive Vice President
Centre for Energy Policy
Fédération de Russie

Adolf BIRKHOFER
Professor for Reactor Dynamics and Safety
Technical University of Munich
Allemagne

Jean-Marie BOURDAIRE
Directeur
Bureau de la coopération à long terme
et analyse des politiques
Agence Internationale de l'Énergie (AIE)

Ron A. BRENNEMAN
General Manager
Corporate Planning Department
Exxon Corp.
États-Unis

Fernando CLAVIJO
Analítica Consultores Economica
former Chief Economic Advisor
to the President
Mexique

Johannes EBNER
Vice President, Infrastructure
and Communications
Fuel Cell Project
Daimler Benz AG
Allemagne

Luis ECHAVARRI
Directeur général
Agence de l'OCDE pour l'Énergie Nucléaire
(AEN)

David FITZSIMMONS
Director of Planning
The British Petroleum Company (BP)
Royaume-Uni

Sergio GARRIBBA
Commissioner
Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas
Italie

Emilio GERELLI
Dipartimento di Economia Publica
Università degli Studi
Italie

Patricia GODLEY
Assistant Secretary for Fossil Fuel Energy
US Department of Energy
États-Unis

Pierre GOLDSCHMIDT
Directeur Général
Synatom S.A.
Belgique

Leopoldo GOMEZ
Under-Secretary for Energy Operations
Ministry of Energy
Mexique

Arnulf GRÜBLER
International Institute for Applied Systems
Analysis (IIASA)
Autriche

Øystein HÅLAND
Senior Market Analyst
Statoil
Norvège

William HARE
Climate Policy Director
Greenpeace International
Pays-Bas

Bernhard HEITZER
Deputy Director General
Energy and Environment
Federal Ministry of Economics
Allemagne

Jaakko IHAMUOTILA
Chairman of the Board
Neste Company
Finlande

Carlo JAEGER
Professor
Institut fédéral pour l'aménagement,
l'épuration et la protection des eaux
Suisse

Brice LALONDE
Génération Écologie
Ancien Ministre de l'Environnement
France

Suk-Young LEE
Director General
Bureau of Energy Management
Ministry of Commerce, Industry
and Energy
République de Corée

Tim MACKEY
Executive Director, Resources and Energy
Group
Department of Primary Industries
and Energy
Chair, APEC Energy Working Group
Australie

Claude MANDIL
Directeur Général de l'Énergie
et des Matières premières
Ministère de l'Économie, des Finances
et de l'Industrie
Président du Conseil de Direction de l'AIE
France

Wolfgang MICHALSKI
Directeur
Unité consultative auprès
du Secrétaire général
OCDE

Thorvald MOE
Secrétaire général adjoint
OCDE

Dominique MOÏSI
Directeur adjoint
Institut Français pour les Relations
Internationales (IFRI)
France

William A. NITZE
Assistant Administrator for International
Activities
Environmental Protection Agency
États-Unis

M. Peter NYGÅRDS
President
SKB, Swedish Nuclear Fuel and Waste
Management Co.
Suède

Jean-Paul PONCELET
Vice-Premier ministre et ministre
de la Défense nationale et de l'Énergie
Belgique

Robert PRIDDLE
Directeur exécutif
Agence Internationale de l'Énergie (AIE)

Horst ROTH
Director, Corporate Energy Resources
Alcan Aluminium Limited
Canada

Robert W. SLATER
Sous-ministre adjoint principal
Environnement Canada
Canada

Christian STOFFAES
Directeur à la Présidence
et à la Direction générale
EDF
France

Tomihiko TANIGUCHI
Professor for Socio-technics of Nuclear
Energy
University of Tokyo
Former Deputy Director-General
Ministry for International Trade
and Industry (MITI)
Japon

Eduard W. THALMANN
Président
Alusuisse-Lonza Energy AG
Suisse

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

Joke WALLER-HUNTER
Directeur
Direction de l'Environnement
OCDE

WANG Naixin
Deputy Director-General
Ministry of Coal Industry
République Populaire de Chine

Chihiro WATANABE
Professor, Dept. of Industrial
Engineering & Management
Tokyo Institute of Technology
Japon

Kees ZOETEMAN
Deputy Director-General for Environment
Ministry of Housing,
Spatial Planning and the Environment
Pays-Bas

SECRETARIAT DE L'OCDE

Barrie STEVENS
Adjoint au Directeur
Unité consultative auprès
du Secrétaire général

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

Reza LAHIDJI
Administrateur
Unité consultative auprès
du Secrétaire général

Également disponibles

Études prospectives

- Les technologies du ^{xx}e siècle : promesses et périls d'un futur dynamique*
(3 98 03 2P), 92-64-26052-8 140 FF
- La Chine au ^{xx}e siècle : implications globales à long terme*
(03 96 05 2P), ISBN 92-64-24924-9 120 FF

Énergie

- Données sur l'énergie nucléaire 1999*
(66 99 08 3P), ISBN 92-64-05856-7 120 FF
- World Energy Outlook 1998*
(61 98 22 1P), ISBN 92-64-16185-6 (disponible uniquement en anglais) 700 FF
- Changement climatique : pour une mobilisation mondiale*
(97 97 21 2P), ISBN 92-64-25675-X 195 FF

Pour une liste complète des publications OCDE, consultez :
www.oecd.org/bookshop.

Où nous contacter :

Centre OCDE de Paris
2, rue André-Pascal – 75775 Paris Cedex 16 – France
Tél. : (33.1) 45.24.81.67 (demandes de renseignements)
Fax : (33.1) 45.24.19.50 (demandes de renseignements)
E-mail : sales@oecd.org

Commandes en ligne : www.oecd.org/bookshop
(paiement sécurisé par carte de crédit)

Commandes par fax : (33.1) 49.10.42.76

LES ÉDITIONS DE L'OCDE, 2, rue André-Pascal, 75775 PARIS CEDEX 16
IMPRIMÉ EN FRANCE
(03 1999 01 2 P) ISBN 92-64-27016-7 – n° 50570 1999