



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

ÉNERGIE 2007-2050 LES CHOIX ET LES PIÈGES



Bernard Tissot

Marie-Lise Chanin
Michel Combarous
Robert Guillaumont
Pierre Joliot

Guy Laval
Michel Pouchard
Ionel Solomon
Maurice Tubiana



Académie des sciences - DNBR

TOME X - 2007

EXTRAIT



L'Académie des sciences a adopté le 15 février 2005 un rapport global sur l'énergie et le 1^{er} mars 2005 une déclaration sur les problèmes de recherche qui s'y rattachent.

Depuis, nous disposons de nouvelles données et des conclusions du IPCC/GIEC sur le changement climatique et son ampleur prévisible. D'autre part, de nombreux scénarios énergétiques ont été présentés par des organismes nationaux ou internationaux.

Il nous a donc paru utile de faire la synthèse de ces nouveaux travaux et de mettre en évidence les avantages, les inconvénients et les contraintes introduits par les choix énergétiques des prochaines années.

ÉNERGIE 2007-2050 LES CHOIX ET LES PIÈGES

RÉSUMÉ

Le nouveau rapport du groupe d'experts internationaux IPCC/GIEC a été présenté à l'Académie des sciences début février 2007 à Paris. Ce document confirme la probabilité très élevée d'un changement climatique ainsi que le rôle majeur joué par les émissions de gaz à effet de serre (GES) au cours des 25-30 dernières années.

Quoi qu'on fasse pour limiter les émissions de GES, il est déjà trop tard pour prévenir les premières évolutions climatiques dont les manifestations ont déjà été observées et les développements sont attendus d'ici 2020. Les solutions ne peuvent être exclusivement d'ordre scientifique ou technologique. Il est indispensable qu'elles soient associées à une modification profonde de notre mode de vie, ce qui soulève de lourds problèmes économiques et sociaux.

Les combustibles fossiles - les hydrocarbures et le charbon - représentent toujours les 4/5^e de nos sources d'énergie. Il convient avant tout de garder à l'esprit le point majeur mis en évidence dans le précédent rapport de l'Académie des sciences : une erreur considérable, telle que 100 milliards de tonnes d'équivalent pétrole, sur l'évaluation des réserves en pétrole et en gaz ne ferait que décaler de dix ans, dans un sens ou dans l'autre, l'épuisement de ces réserves.

Seules les utilisations du charbon (électricité, chaleur, carburant de synthèse) et celles du nucléaire de fission tel qu'actuellement (électricité), peuvent satisfaire la demande globale en énergie au moins jusqu'à la fin du siècle. Les

réserves sont là. Elles pourraient éventuellement être étendues à plusieurs siècles pour le charbon ainsi que pour le nucléaire actuel (neutrons thermiques), si l'on récupère la matière fissile du combustible usé (uranium et plutonium). Au-delà, on pourrait atteindre plusieurs millénaires avec des réacteurs à neutrons rapides.

Toutefois, l'exigence d'un développement durable impose d'un côté la séparation et le stockage à long terme du gaz carbonique issu des combustibles fossiles, et de l'autre le règlement satisfaisant du problème des déchets nucléaires.

L'électricité est un vecteur d'énergie privilégié dans les pays industrialisés, au point que sa disposition est une condition nécessaire pour toutes les activités de la vie courante (eau potable, transports publics, communication, etc.), de l'industrie et du commerce. L'électricité prend rapidement une importance croissante dans les pays en transition. Les pays très industrialisés de l'OCDE, ainsi que les grands pays en transition, avec une population nombreuse, auront principalement le souci de produire de **l'électricité « concentrée »** pour alimenter les très grandes villes où se concentre la majeure partie des habitants et de l'industrie.

Or, le charbon apparaît à beaucoup d'industriels comme le relais naturel des produits pétroliers. Les États-Unis et certains pays de l'Union européenne, même s'ils prévoient également une croissance de l'énergie nucléaire, envisagent, pour les décennies proches, des centrales thermiques classiques produisant des GES : au charbon (le plus fort émetteur de CO₂ par kWh électrique produit) ou au gaz naturel,

dont les prix tendent à suivre celui du pétrole. Les pays en forte croissance qui disposent de larges réserves de charbon, comme la Chine et l'Inde, utilisent dès maintenant et massivement ce combustible, tant pour générer l'électricité que pour l'usage direct par l'industrie, même s'ils prévoient aussi la construction de plusieurs centrales nucléaires.

Cette orientation oublie l'exigence d'un développement durable : la combinaison capture/stockage à long terme du CO₂ est actuellement la seule voie qui permettrait un relais soutenable des produits pétroliers par le charbon. Ces procédés sont considérés par beaucoup comme acquis, au vu des expériences de taille limitée (1 et 2 millions de tonnes de CO₂ par an) menées en mer du Nord et au Canada sur l'injection de ce gaz dans des aquifères profonds ou dans de vieux gisements pétroliers. En fait, on mesure mal la somme des difficultés qui doivent être contournées. Pour apporter une contribution significative, à l'échéance 2050, il faudrait en capturer 10 à 20 milliards de tonnes chaque année, et les stocker pour plusieurs siècles. Il est bien difficile de transposer un procédé industriel directement à une échelle 10 000 à 20 000 fois plus grande.

Les principales sources d'électricité ne produisant pas de GES sont l'hydroélectricité, si on dispose encore de sites appropriés, et les centrales nucléaires.

Les deux **énergies renouvelables** souvent citées (solaire et surtout éolienne) sont également présentées comme des sources envisageables pour répondre à une demande concentrée et constamment croissante d'électricité, sans

générer de CO₂. Certains pays, qui ont décidé de fermer leurs centrales nucléaires, veulent les remplacer par des éoliennes. Le problème principal de ces énergies renouvelables est leur caractère intermittent qui appelle un stockage de l'énergie, particulièrement de l'énergie électrique ; cette limitation s'exprime par un *average capacity factor* de 20 % au lieu de 80 à 90 % (gaz, nucléaire). Pour 1 000 MW installés, la quantité d'énergie produite en un an est de 8 000 MWh dans le cas du nucléaire et de 2 000 MWh dans l'autre cas. Il ne faut pas que l'enthousiasme pour ces formes d'énergies renouvelables masque la réalité : elles ne seront que des énergies d'appoint.

La **géothermie** est souvent assimilée aux énergies renouvelables et mérite d'être encouragée dans toutes les régions favorables, liées à des zones de tectonique active, en particulier pour la génération d'électricité.

Le **stockage de l'énergie**, et plus particulièrement de l'électricité, constitue un facteur essentiel pour valoriser ces formes d'énergie. En l'absence de cette possibilité, les énergies intermittentes obligent à entretenir une capacité de réserve, reposant sur des centrales au gaz, et se déclenchant à la demande, ce qui accroît les investissements et les émissions de GES.

La solution, souvent mentionnée, de choisir l'hydrogène comme nouveau vecteur d'énergie **stockable** et **propre** est une solution qui semble plus lointaine, de même que son utilisation pour les transports. En revanche, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau ne produit pas de CO₂, pourvu que l'électricité soit d'origine nucléaire ou renouvelable. Mais ceci

ne serait pas usuel avant le milieu du siècle, vu le délai nécessaire pour développer ces réacteurs et les usines de production de l'hydrogène. Au bilan énergétique global, on risque des pertes à la fois dans le procédé de production de l'hydrogène et dans son utilisation.

La ressource principale pour assurer un développement soutenable reste **l'option nucléaire**. Quels que soient les choix opérés précédemment par les gouvernements ou les citoyens de divers pays dans une situation climatique alors mal évaluée, c'est maintenant une nécessité impérieuse de construire des centrales de génération III, particulièrement sûres, comme l'ont décidé la Finlande, la France et probablement la Chine. Les recherches internationales du programme « Génération IV », visent à accroître les ressources en matière fissile dans quelques décennies et à assurer de l'énergie pour plusieurs millénaires. Les moyens très importants engagés sur la fusion pourraient déboucher dans la seconde moitié du siècle.

Un éventuel échec du développement nucléaire, par idéologie ou faute d'acceptation sociale, nous précipiterait à terme (raréfaction du pétrole et du gaz) dans l'usage quasi exclusif du charbon dans des centrales thermiques, avec pour conséquence un fort accroissement du changement climatique.

L'accroissement de **l'efficacité énergétique**, aux divers stades de la conversion de l'énergie et de l'utilisation finale, est la voie qui, dans tous les domaines, offre les meilleures perspectives pour assurer un équilibre durable. Cet accroissement est cependant plus lié à des problèmes sociologiques (style de vie, longévité

des habitations) ou économiques (prix excessif des matériels à faible consommation) qu'à des problèmes scientifiques ou techniques.

C'est dans les **transports** terrestres que les économies seront les plus difficiles. Ce domaine est déjà le plus fort émetteur annuel de CO₂ au niveau mondial et consomme actuellement environ 50 % des produits pétroliers dans les pays en développement, et près de 70 % dans les pays industrialisés. Il présente la plus forte croissance annuelle. La solution la plus efficace à long terme, notamment dans les agglomérations de plusieurs millions d'habitants, est le transport électrique en site propre (train, métro, tramway ou combinaison de ces divers modes). Sur les longues distances, le trajet Paris-Marseille génère pour un passager 5 kg de CO₂ en TGV, 20 fois plus en avion et 30 à 50 fois plus en voiture. Le mode de transport par rail est privilégié au Japon.

Le fret routier s'est largement développé, notamment en Europe, réduisant la part des transports ferroviaires et de la voie d'eau. L'élargissement de l'Union européenne a renforcé cette tendance. Ce mode de transport est gros consommateur d'énergie, et le captage du CO₂ n'est pas possible. Le seul choix reste entre l'émission toujours croissante de GES et le transfert modal : les charges lourdes (matériaux de construction, véhicules neufs, conteneurs et équipements divers) seront transportables par des voies ferrées électrifiées, puis livrées au client par route sur quelques dizaines de kilomètres. La Suisse a ainsi trouvé un équilibre qui lui permet d'économiser sur l'entretien coûteux d'un réseau routier de montagne.

À diverses reprises, on a préconisé les carburants liquides qui pourraient être préparés à partir du charbon, sans éliminer pour autant les émissions de GES, et seraient compétitifs à partir d'un prix du pétrole évalué successivement à 30, puis 40 \$/bl, etc., alors que ce prix n'est pas redescendu à ces valeurs depuis deux ans et est resté le plus fréquemment supérieur à 60 \$/bl. De plus, les émissions de CO₂ sont réparties entre l'usine de fabrication et le véhicule utilisateur, mais ne diminuent pas pour autant. Les systèmes énergétiques reposant sur l'hydrogène et les piles à combustibles, dont on parle beaucoup, apparaîtront peut-être à titre expérimental vers 2020-2030, mais n'occuperont encore qu'une place mineure au milieu du siècle.

Dans le domaine **résidentiel et tertiaire**, le chauffage solaire de l'eau sanitaire dans des panneaux posés sur des toitures ou des façades est déjà largement appliqué dans certains pays européens ou méditerranéens. Les pompes à chaleur permettent de réduire les dépenses de chauffage. Cependant les uns et les autres rencontrent en France des difficultés sociologiques.

La **biomasse** intervient ordinairement dans le bilan énergétique par son utilisation traditionnelle comme **combustible de chauffe**. Il s'agit certainement là de l'utilisation la plus directe et les pays industrialisés pourraient reconsidérer cet usage. Dans les grandes villes, des réseaux de chauffage urbain en permettraient l'utilisation.

L'usage des **biocarburants** issus de cultures dédiées peut faciliter une période de transition. Néanmoins, la totalité des terres arables du monde ne suffirait pas en 2030 à faire rouler

le parc de véhicules. Il existe, à terme, un risque certain de compétition entre la production de carburants pour les véhicules et celle de nourriture pour 9 milliards d'habitants au milieu du siècle. Une autre forme de compétition s'installerait entre l'usage de l'eau (qui n'est pas inépuisable) pour les cultures alimentaires et son usage pour celles visant la production de biocarburants.

De plus, il serait très important de disposer, dans chaque cas, de données précises et fiables sur l'énergie fossile consommée dans l'ensemble du cycle de vie du produit, pour faire un bilan énergétique « du sol à la roue ». Le bilan énergétique est nettement positif au Brésil, où l'on peut produire, à partir de la canne à sucre, jusqu'à 8 litres d'éthanol par fermentation pour un litre de produits pétroliers consommé.

En revanche, l'utilisation de l'ensemble de la biomasse ligno-cellulosique, comme des futaies à courte rotation, pourrait privilégier des terres peu favorables à la production alimentaire. Cette voie plus complexe permettrait à long terme de produire par gazéification le mélange CO+H₂, puis, par une synthèse chimique de type Fischer-Tropsch, des carburants de haute qualité, en particulier pour les moteurs diesel.

Il faut cependant réaliser que l'ajout au carburant habituel d'une quantité mineure de biocarburant relève d'une adaptation, voire d'une auto-adaptation des moteurs, ce qui s'applique aussi bien au parc ancien. L'ajout d'une quantité majeure de biocarburant (notamment 85 % d'éthanol) est une réelle diversification du véhicule mis sur le marché, avec des moteurs adaptés.

Gardons toujours à l'esprit que **le plus grand apport de la biomasse dans la lutte contre le changement climatique existe et nous le détruisons : il s'agit de la forêt primaire** qui joue un rôle capital dans les échanges de CO₂ entre l'atmosphère, la végétation et les sols.

* *

En l'absence de mesures reconnues par tous les principaux pays consommateurs d'énergie, la situation sera gravement compromise bien avant le milieu du siècle. Même si l'on arrive à ramener, en 2050, les émissions de GES à leur niveau actuel, le poids des premières décennies du siècle subsistera. En effet, la durée de vie du CO₂ dans l'atmosphère est d'ordre séculaire : les concentrations atmosphériques seront en 2050 bien plus élevées qu'à l'époque actuelle et les températures et les désordres climatiques aussi.

Il est urgent de développer un **effort de recherche scientifique et technique** très ambitieux pour pallier tous les manques évoqués dans le texte, tant sur le climat qu'on ne connaît pas suffisamment pour les besoins prévisionnels, que sur les technologies de l'énergie.

Science et technologie sont indispensables, mais l'**économie** et la **sociologie** devraient, elles aussi, être l'objet d'une recherche nouvelle, face à un bouleversement majeur de nos modes de vie.

Pour être en mesure de faire face à des événements imprévisibles, et être capables de réagir vite, il importe avant tout de considérer que, dans cette perspective difficile, les valeurs

sociales sont plus importantes que les valeurs économiques. Les conséquences dramatiques pour les personnes âgées de la canicule de 2003 en France, la longue attente des secours et des mesures d'aide après le cyclone Katrina, et la crise sociologique qui l'a accompagné, illustrent ce problème. On peut aussi craindre d'importants déplacements de populations : la submersion des zones les plus basses du Bangladesh poserait un problème majeur d'accueil de plusieurs millions de réfugiés. L'installation et le soutien d'immenses camps de personnes déplacées à l'intérieur d'un pays déjà pauvre seraient un problème d'une difficulté extrême pour la collectivité internationale. Les modèles destinés à évaluer les conséquences de l'évolution climatique et les moyens d'adaptation ne prennent pas en compte les « effets non marchands » (santé humaine, environnement, personnes déplacées). Un **partage équitable des rôles entre nations et générations** sera une tâche difficile.

Les **investissements** des 20 prochaines années auront une influence déterminante sur la situation de la planète au milieu du siècle et même bien au-delà. La capture et le stockage du CO₂ coûteront cher et demanderont des réponses à de nombreux problèmes techniques qui ne seront pas tous prévus. Si les États laissent construire de grandes centrales thermiques au charbon, sans capture et stockage des émissions, et capables de fonctionner pendant 40 ou 60 ans, notre avenir est irrémédiablement compromis. S'il est difficile d'empêcher la construction de telles installations, il est encore bien plus difficile de les fermer prématurément. Il est également important de se prémunir contre la « délocalisation » du CO₂, c'est-à-dire le trans-

fert des installations vers un pays voisin moins soucieux des contraintes d'environnement, pour importer ensuite de l'énergie électrique, ou encore importer de pays lointains des produits industriels à fort contenu énergétique.

Le rôle des **droits d'émission** (ETS, *emission trading scheme*) est encore ambigu et la cote est assez confuse. De plus, le prix du carbone émis n'est pas pris en compte dans les décisions d'investissement.

Dans l'état actuel des connaissances, toutes les sources d'énergie seront mises à contribution. Cependant, un ordre de priorité et des conditions nécessaires à leur mise en œuvre devront être observés :

En nucléaire	<i>Gestion des déchets nucléaires</i>
Charbon	<i>Séparation et gestion à long terme du CO₂</i>
Hydraulique, Géothermie	<i>Les sites se font rares et sont souvent éloignés de la demande la plus forte</i>
Biomasse	<i>Ne pas entrer en compétition avec la production de nourriture pour 9 milliards d'habitants au milieu du siècle</i>
Autres énergies	<i>Majoritairement intermittentes (éoliennes, photovoltaïque), donc limitées à une fraction du parc (15 à 20 % ?). Le stockage de l'énergie changerait la donne</i>

Nous ne sauverons notre mode de vie et nos moyens d'existence ni avec l'ignorance, ni avec l'idéologie, ni avec des déclarations ou des incantations. L'idéologie ne saurait prévaloir sur la science, la technique et l'économie. Tout retard sera coûteux et désastreux, et l'inaction qui se cache derrière la formule *business as usual* serait une **politique inacceptable**.

1. ÉPUISEMENT DES RESSOURCES FOSSILES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le principal élément nouveau concerne **l'évolution climatique**. Le nouveau rapport du groupe d'experts internationaux sur le climat IPCC/GIEC a été présenté à l'Académie des sciences début février 2007 à Paris (Groupe 1 : Les bases scientifiques du changement climatique). Ce document confirme la probabilité très élevée d'un changement climatique ainsi que le rôle majeur joué par les émissions de gaz à effet de serre (GES) issus de l'usage des combustibles fossiles, particulièrement au cours des 30 dernières années. Dans le domaine des **ressources énergétiques** et de leur épuisement, plusieurs documents émanant d'instances nationales ou internationales renforcent les positions prises dans notre rapport précédent (*Perspectives énergétiques*, Académie des sciences, Paris 2005).

*
* *

Dans le domaine du **changement climatique**, notre groupe observe que la poursuite de la forte montée des températures moyennes mondiales incite à une réflexion de fond. On peut se demander si le facteur prédominant avant et après 1975 (date approximative) est bien le même. Les facteurs indépendants de l'homme sont toujours présents et sont évidemment les seuls à expliquer les observations effectuées sur les glaciations et déglaciations du Quaternaire : paramètres orbitaux décrits par Milankovitch et intégrés dans les modélisations menées par A. Berger à Louvain, fluctuations de

l'activité solaire, effet de serre « naturel » et, à plus court terme, activité volcanique et aérosols associés. Mais la liste n'est pas nécessairement close. La question simple est : ces facteurs peuvent-ils – à eux seuls – rendre compte de l'essentiel des variations observées jusqu'en 1975 ?

Après 1975, le phénomène observé est un changement climatique abrupt. Il concerne non seulement la température, mais encore la fréquence et la violence fortement accrues d'événements dont certains étaient jusqu'ici rares : canicules, sécheresses ou inondations dans des pays jusqu'ici tempérés, tempêtes, cyclones, ainsi que la diminution considérable des glaciers de montagne, de la banquise et du volume de glace des calottes glaciaires. Seul l'effet de serre additionnel dû aux activités humaines permet de rendre compte de ces phénomènes : les autres facteurs subsistent, bien sûr, mais celui-ci devient prédominant.

Les modèles climatiques sont ajustés (paramétrisation de leur physique) en cherchant à simuler au mieux un état moyen de la planète à l'échelle des décennies. Les essais de simulation de l'évolution du climat sur les 30 dernières années sont des expériences dans lesquelles les modèles sont forcés par des phénomènes complémentaires (CO₂ croissant, poussières anthropiques et volcaniques, activité solaire variable, etc.). On voit mal, notamment, comment réaliser sur 30 ans l'ajustement d'un modèle fiable, permettant des prévisions à l'échelle du siècle.

On peut aussi se poser la question de la capacité des modèles à simuler un changement climatique abrupt, en raison notamment de leur capacité limitée à prendre en compte les trans-

ferts radiatifs et à simuler correctement la couverture nuageuse dans un climat différent de l'actuel, et plus généralement le cycle de l'eau. Les rétroactions (effets non linéaires, paramètres non pris en compte) constituent un domaine où la prévision est difficile. Que les sceptiques ne se rassurent pas en pensant que le changement climatique est un mythe : aucun modèle ne simule, pour les décennies à venir, une absence de réponse à l'accroissement du CO₂ atmosphérique, avec – même pour les plus optimistes – un réchauffement et une perturbation du cycle hydrologique qui vont bien au-delà de l'évolution actuelle.

Sans vouloir se substituer aux nombreux climatologues, dont c'est le rôle de faire progresser ces questions, les responsables de l'énergie doivent s'unir pour témoigner de l'urgence de soutenir ces recherches.

*
* *

Les nouveaux rapports publiés en 2006, concernant les ressources énergétiques en **pétrole** et en **gaz**, renforcent l'idée de l'épuisement de ces combustibles fossiles au cours du siècle. La consommation annuelle mondiale d'énergie, actuellement de 10 milliards de tonnes d'équivalent pétrole (10 Gtep) passera à 15 Gtep en 2030 et 22 Gtep en 2050, dans l'hypothèse du laisser faire (*business as usual*, *BAU*) si aucun accord international contraignant n'est intervenu auparavant pour limiter la consommation de combustibles fossiles et des émissions de CO₂ qui en résultent.

Il convient cependant de garder à l'esprit le point majeur mis en évidence dans le précédent rapport de l'Académie : une erreur considérable, telle que 100 milliards de tonnes, sur l'évaluation des réserves en pétrole et en gaz, ne ferait que décaler de dix ans ou moins, dans un sens ou dans l'autre, l'épuisement de ces réserves. Ce point se trouve confirmé par les évaluations de consommation d'hydrocarbures dans les années 2030 ou 2050 faites tant par le Département de l'énergie des États-Unis que par l'Agence internationale de l'énergie. Ainsi, la fin de ces réserves de combustibles au cours du siècle est inéluctable.

2. PRÉVISIONS ET SCÉNARIOS DES ORGANISMES NATIONAUX ET INTERNATIONAUX

Deux types de rapports préparés par des organismes nationaux ou internationaux permettent d'évoquer l'avenir énergétique du XXI^e siècle. D'une part, des *prévisions* supposent que l'on peut estimer raisonnablement le comportement des principaux acteurs : pays producteurs, pays consommateurs, industriels et consommateurs individuels. Le document récent du Département de l'énergie (DOE) des États-Unis est de ce premier type. D'autre part, des *scénarios* correspondant à diverses positions possibles de ces mêmes acteurs tentent de calculer les conséquences de ces comportements. On peut, en particulier, tester diverses politiques possibles sur une même période : le document récent de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) est de ce second type. Dans le domaine pétrolier, certaines compagnies, comme Shell, utilisent couramment cette approche comme une aide à la décision.

Le rapport global du DOE des États-Unis est paru en juin 2006 (Energy Information Administration. *International Energy Outlook 2006, IEO 2006*). Il affiche clairement que la consommation mondiale d'énergie augmentera d'environ 70 % entre l'époque actuelle et 2030 ; une extrapolation¹ limitée montre qu'elle serait probablement doublée dès 2040, dans cette perspective. À cet horizon, le seul domaine des transports serait alors responsable de la moitié de l'accroissement de la demande de produits pétroliers. Avec la hausse des prix du pétrole et du gaz, le charbon pourrait augmenter sa part, tant en valeur absolue qu'en pourcentage, pour le chauffage et la production d'électricité. Plus tard, la raréfaction des ressources pétrolières viendrait renforcer cette tendance.

Selon cette même source, la consommation d'électricité ferait plus que doubler d'ici 2030, avec une croissance forte (près de 4 % par an) dans les pays hors OCDE. Le charbon, le gaz naturel et les sources renouvelables augmenteraient leur part dans la génération d'électricité. La capacité électronucléaire augmenterait dans la plupart des régions du monde, y compris en Amérique du nord, mais diminuerait, selon ce document, dans les pays de l'OCDE en Europe, encore que cette dernière supposition soit discutable si on en juge par quelques prises de position récentes sur l'avenir énergétique.

Dans le domaine des transports, les États-Unis, actuellement le plus gros consommateur du monde, verraient leurs besoins augmenter de près de 50 % d'ici 2030 (la consommation

moyenne des véhicules, qui est de 27,5 miles/gallon dans ce pays, ne diminuerait pas). En Europe, par contre, la demande n'augmenterait pas. En Chine, la demande serait presque multipliée par trois en 2030 et en Inde par deux. L'usage de carburants de substitution resterait modeste jusqu'à 2030, sauf dans quelques régions particulières (Brésil).

*
* *

Un grand poids est accordé dans le document du DOE aux évolutions du PIB (et par suite du niveau de vie), considéré comme un des facteurs principaux de la demande énergétique, et donc un argument pour « justifier » une consommation élevée. Ce point particulier est discuté au chapitre 12.

De son côté, la démographie, souvent mise en cause dans l'accroissement de la demande, devrait y jouer un rôle modéré à court et moyen terme. En effet, l'accroissement de la population mondiale, passant de 6 à 9 milliards d'habitants, concernera essentiellement des régions hors OCDE, dans des pays qui ne sont pas tenus par les accords de Kyoto mais ont un niveau actuel de consommation annuelle par habitant extrêmement bas. Cet accroissement pourrait alors contribuer assez faiblement aux émissions de GES (gaz à effet de serre), dans un premier temps.

Dans un chapitre séparé, ce rapport envisage les émissions de CO₂. Il prévoit, ce qui pourrait être assez réaliste pour les décennies proches, que les émissions des pays n'ayant pas

¹ Le document IEO 2006 ne présente de projection que jusqu'en 2030. L'extension à 2040 résulte d'une extrapolation pour atteindre le seuil mondial d'émissions de 50 Gt de CO₂.

ratifié les accords de Kyoto (États-Unis, Australie, Chine, Brésil et tous les pays en développement) suivront une évolution de type *business as usual*, y compris un usage accru du charbon, et que les pays ayant ratifié ces accords respecteront leurs engagements jusqu'à leur terme en 2012, voire poursuivront une politique de type Kyoto.

Les valeurs globales ainsi obtenues, dans le rapport du DOE pour les émissions de CO₂, sont alors très proches de celle du rapport présenté à l'Académie des sciences en février 2005. Le niveau mondial d'émission de CO₂ serait de 40 Gt en 2030 et atteindrait 50 Gt dès 2040². Le poids relatif des pays du protocole de Kyoto sur les émissions mondiales diminuera rapidement pour deux raisons : (i) les pays où l'on attend la plus forte croissance de la demande (Chine, Inde, Brésil) ne participent pas à cet accord ; (ii) ces pays, de même que les États-Unis (premier consommateur actuel d'énergie), disposent de réserves importantes de charbon et ne manqueront pas d'y faire appel.

Dans le scénario *business as usual*, les émissions des pays hors OCDE, sans y inclure les pays de l'ex-Union Soviétique, passeraient de 5 à 22 Gt de CO₂ en 2030. Au contraire, les émissions des pays du protocole de Kyoto atteindraient seulement 5,9 Gt/an de CO₂ en 2010, soit une économie d'émissions de 0,4 Gt, représentant moins de 1,5 % des émissions annuelles mondiales. En 2030, ces mêmes pays émettraient 6,5 Gt de CO₂, soit une économie de 0,7 Gt. Si ces hypothèses sont fondées (et même si la valeur véritable des émissions économisées

était double ou moitié), on voit combien ces efforts – pourtant lourds à réaliser – seraient modestes au niveau mondial si un large accord, réunissant les principaux pays consommateurs (en tonnage brut) ne pouvait pas être réalisé rapidement. On ne doit pas s'en étonner puisque la majeure partie de l'accroissement de la demande d'énergie entre 2007 et 2050 viendra des pays en forte croissance, comme la Chine ou l'Inde.

*
* *

De son côté, l'Agence internationale de l'énergie (IEA/AIE) des pays de l'OCDE a publié en juin 2006 une étude approfondie sur les scénarios et stratégies pour 2050, en appui du plan d'action attendu des pays du G8 : *Energy Technology Perspectives 2006*, AIE, juin 2006. Ce document important distingue un scénario de référence (de type *business as usual*) et de nombreux scénarios correspondant à la mise en œuvre de diverses mesures pour freiner l'épuisement des ressources et/ou le changement climatique. On peut ainsi prendre conscience des conséquences, parfois non souhaitées, de certains choix.

À la différence du document américain, le document de l'AIE pose d'entrée l'idée que la tendance actuelle de la demande et du mode de consommation de l'énergie **n'est pas soutenable**. Dans le scénario de base, l'épuisement des ressources en pétrole et gaz est pris en compte. Les émissions mondiales de gaz carbonique dans l'atmosphère seraient **multipliées par 2 à 2,5 en 2050** par rapport aux valeurs actuelles

² Cf. note 1

(ce qui est compatible avec le rapport du DOE américain), et provoqueraient une **dérive climatique insupportable**. L'accroissement de la température moyenne pourrait se trouver en 2100 dans la fourchette haute des prévisions du rapport IPCC 2001 (+5 à +6°C). Les principaux domaines responsables de cette évolution catastrophique seraient les transports et la production d'électricité dans des centrales classiques à charbon, en forte croissance.

Plusieurs scénarios appelés *Accelerated Technology Scenarios* (ACT) se proposent de montrer comment on pourrait, après être passés par une phase de rejets accrus, revenir au niveau actuel d'émissions. Ceci ne signifie nullement un retour à la *concentration* actuelle dans l'atmosphère, compte tenu de la longue durée de vie du CO₂ dans ce milieu, et ne ramènera pas du tout les problèmes climatiques à leur niveau actuel. De toute manière, la concentration augmentera à l'horizon du demi-siècle.

La demande d'électricité est considérée comme celle qui augmentera le plus fortement, entre 2 et 2,5 % par an, même si près de 2 milliards d'habitants n'ont pas d'accès à un réseau électrique et ne l'auront peut-être pas au milieu du siècle. Le recours massif au charbon pour les centrales thermiques pourrait alors multiplier par 3 les émissions de CO₂ dues à ce combustible.

Plusieurs scénarios sont présentés, dans lesquels l'effort principal est mis, selon les cas, sur les économies d'énergie, la capture et le stockage du CO₂, la filière nucléaire, ou la biomasse, ainsi qu'un scénario « technologique plus » qui tente de réaliser un optimum par com-

binaison de toutes ces filières, mais demeure quelque peu utopique. On voit ainsi que les difficultés rencontrées ne relèvent pas seulement de la science et de la technologie mais aussi de problèmes financiers et sociologiques.

La nature et l'ampleur des problèmes qui y sont discutés sont globalement en accord avec le rapport adopté par notre Académie en février 2005. Les données numériques associées à ces scénarios représentent une source considérable d'information et nous nous référerons à ce rapport pour évaluer les diverses voies de recherche permettant d'accéder aux mesures les plus efficaces.

*
* *

Le rapport demandé à Sir Nicholas Stern par le Gouvernement britannique vise à évaluer le coût économique du changement climatique, selon les diverses lignes de conduite que l'on peut envisager. Il s'appuie sur les nombreux modèles physiques de changement climatique construits, soit dans le cadre du groupe IPCC, soit indépendamment. Il évalue ensuite les conséquences économiques de l'évolution climatique, selon les scénarios retenus. Le rapport montre que l'attitude la plus coûteuse, tant en nuisances et désastres qu'en coût économique, est celle de l'inaction (*business as usual, BAU*). Ce comportement amènerait, chaque année au milieu du siècle, une perte moyenne de 5 % du PIB mondial. Nous pourrions, au contraire, en consacrant annuellement et dès maintenant 1 % de ce PIB à des actions précoces, stabiliser la situation vers le milieu du siècle.

Devant la perspective de désastres que ce rapport considère comme comparables aux plus grandes perturbations historiques (guerres mondiales, grande dépression des années 1930), une action précoce et volontariste est considérée comme la seule voie pour stabiliser vers le milieu du siècle les concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans notre atmosphère. Le niveau actuel est d'environ 380 ppmv (cm^3/m^3) pour le CO_2 et de 430 ppmv d'équivalent CO_2 , si on ajoute les autres GES. Dans ces conditions, prévoir de limiter les concentrations totales vers 450 ppmv au milieu du siècle est irréaliste, et nous pouvons tenter de stabiliser la situation vers 550 ppmv en 2050, ce qui est déjà une tâche difficile.

Certains pays prennent déjà des mesures : Union européenne, Japon, Chine, Californie, par exemple. Mais nous ne pourrions pas nous passer d'un large accord international comportant une conviction commune pour réduire les émissions, une coopération technologique pour capter et stocker les émissions carbonées et développer les énergies qui n'en produisent pas, un arrêt de la déforestation, et une aide aux pays les plus pauvres.

Ce rapport s'élève contre les subventions aux diverses formes d'énergie, qu'il évalue à 250 milliards de dollars chaque année, et qui ont pour effet de masquer le signal dû aux prix. Il considère l'état actuel comme l'échec le plus grand du marché, de tous les temps. Le rapport Stern paraît cependant très optimiste quant aux conséquences des mesures envisagées sur l'économie et le niveau de vie. Il considère qu'elles n'introduiront pas de limite à la croissance des pays, riches ou pauvres, que les pays de

l'OCDE pourront conserver leur mode de vie, et les autres poursuivre leur développement, que nous sommes en mesure de séparer croissance et émissions carbonées, et que la lutte contre le changement climatique contribuera à créer des potentialités commerciales importantes. On peut partager ou non cet optimisme.

3. QUELLES SONT LES ORIENTATIONS DE RECHERCHES PRIORITAIRES ?

Nous n'évoquons pas ici le respect ou non-respect d'accords internationaux de type Kyoto.

Les recherches sur l'évolution du climat doivent évidemment être poursuivies, afin d'accroître la compréhension des phénomènes impliqués, en particulier les transferts radiatifs et le rôle des nuages, de faire ainsi progresser les modèles et leur validation, la qualité des prévisions, et de transposer ces dernières à l'échelle régionale dès que les moyens informatiques le permettront. Ce domaine de recherche reçoit un nouvel éclairage par la présentation début février 2007 du rapport IPCC/GIEC 2007.

Les recherches sont également une évidente obligation dans le domaine de l'énergie, dont le futur est obstrué à la fois par l'épuisement des ressources et par la menace du changement climatique. Nous aurons certainement besoin de toutes les sources d'énergie, mais des priorités de recherche s'imposent en faveur des sources et des convertisseurs d'énergie capables de réaliser un équilibre durable entre une demande toujours croissante et la volonté d'é-

conomiser l'énergie et de ne pas accroître le changement climatique. Les perspectives de recherche dégagées dans le rapport 2005 de notre Académie, associées aux divers scénarios considérés par l'AIE, permettent de discerner les orientations à privilégier parce qu'elles apportent un gain énergétique ou climatique important. À l'inverse, on peut identifier les facteurs les plus pénalisants, si on ne parvient pas à les corriger ou les améliorer dans les décennies proches.

Depuis le milieu de la décennie 1970, les émissions annuelles de gaz à effet de serre (GES) ont augmenté de 50 %, et un peu plus pour le seul CO₂ des combustibles fossiles. Ce dernier atteint maintenant presque 30 Gt. Les autres GES importants sont issus de l'agriculture (méthane et oxydes d'azote) et de la déforestation (CO₂). À défaut d'économies, les émissions annuelles de CO₂ auront doublé au milieu du siècle (50 à 60 Gt) compte tenu, en premier lieu, de la forte demande en électricité, qui serait satisfaite pour la plus grande part au moyen de centrales thermiques traditionnelles au charbon. Les transports de personnes et de fret par des véhicules consommant des produits pétroliers seront, en l'absence de mesures contraignantes, la seconde cause majeure de cet accroissement. De son côté, la déforestation devrait être limitée, pour maintenir le prélèvement de CO₂ par les végétaux et les sols, en particulier dans les grandes forêts tropicales. Les autres GES (méthane, oxydes d'azote et composés fluorés) pourraient demeurer globalement plus stables.

Un scénario moyen qui parviendrait, au prix de durs efforts, à limiter les émissions

mondiales de CO₂ vers 550 ppmv au milieu du siècle (c'est-à-dire environ 650 ppmv éq.CO₂ pour l'ensemble des GES) maintiendrait pendant la seconde partie du siècle une température moyenne supérieure d'environ 2 à 3 °C aux valeurs présentes. Il s'agit là d'une limite déjà élevée, qui ne resterait supportable que si elle ne donne pas lieu à des rétroactions entraînant des changements abrupts, encore imprévisibles. Il est donc urgent de faire porter l'effort sur ces émissions.

Le progrès qui, dans tous les domaines, offre les meilleures perspectives pour assurer un équilibre durable, réside dans l'accroissement de **l'efficacité énergétique**. En d'autres termes, réaliser des économies énergétiques à toutes les étapes de conversion et d'utilisation de l'énergie est une priorité, qui doit être soutenue par une volonté active. Leur succès relève avant tout de l'acceptation sociale, combinée avec des facteurs incitatifs comme les prix et les taxes. L'AIE relève, à l'échelle internationale, une récente baisse des efforts dans ce sens. Elle estime pourtant le niveau global d'économies d'énergie réalisables d'ici 2050 à entre 15 et 35 % de la consommation mondiale d'énergie actuelle, si l'on y porte un effort soutenu. Une réserve sur ces valeurs cibles résulte cependant du poids des pays en fort développement, dont le comportement ne nous est pas connu et, en ce sens, les prévisions sont précaires.

Le succès de cet objectif conditionne donc largement celui de la lutte contre le changement climatique. Les modes de fourniture d'énergie, produits pétroliers, électricité, etc., même s'ils sont perfectionnés pour un rendement optimal dans les raffineries ou les centrales, ne pourront

porter leur plein effet que si le consommateur, industrie ou personne physique, assure un usage optimal de cette énergie.

Au-delà de ce qui peut être réalisé par des économies, une stratégie de recherche scientifique et technique doit être mise en œuvre. Elle devra prendre en compte l'évolution probable des choix énergétiques faits dans les pays les plus gros consommateurs. Dans cette perspective, **l'électricité** est un vecteur d'énergie privilégié dans les pays industrialisés et prend une importance croissante dans les pays en transition. Les principales sources d'électricité ne produisant pas de GES sont l'hydroélectricité, les centrales nucléaires et les éoliennes, si on arrive à surmonter les difficultés liées au caractère intermittent de ces dernières. Deux autres ressources sont souvent citées : des centrales thermiques au charbon (et au lignite qui en est proche) ou au gaz naturel ; ces autres sources produisent des GES. Le lien important qui s'est établi entre les prix du pétrole et du gaz naturel a diminué l'intérêt porté à ce dernier, sauf là où la proximité géographique ou des aspects géopolitiques lui donnent l'avantage.

Les pays très industrialisés de l'OCDE auront principalement le souci de produire de **l'électricité « concentrée »** pour alimenter les très grandes villes où se concentre la majeure partie de la population. Plusieurs pays se tournent dès maintenant vers un parc composite de centrales nucléaires, de centrales thermiques et d'énergies renouvelables – en particulier éoliennes et hydraulique – lorsqu'il reste des sites possibles. Les parts respectives de ces diverses filières varieront beaucoup selon l'expérience acquise antérieurement – en particulier dans le

nucléaire –, les choix des industriels, l'acceptation sociale et les conditions régionales. De leur côté, les pays en forte croissance qui disposent de réserves de charbon, comme la Chine et l'Inde, vont recourir massivement à ce combustible, même s'ils prévoient également une forte croissance de l'énergie nucléaire.

Les centrales thermiques utiliseront le plus souvent le charbon, ce dernier actuellement moins coûteux que les produits pétroliers. En effet, à mesure de l'épuisement des réserves pétrolières et gazières, le charbon apparaît à beaucoup d'industriels comme le relais naturel des produits pétroliers. La combinaison **capture/stockage du CO₂** est actuellement la seule voie qui permettrait un relais soutenable des produits pétroliers par le charbon. Les autres options nous orientent en priorité vers deux autres domaines de recherche : les **futurs réacteurs nucléaires** du programme international *Generation IV* et le sort des déchets, le **stockage de l'électricité** pour une meilleure utilisation des générateurs intermittents, en particulier éoliens ou solaires.

Le domaine des **centrales de production** d'électricité ou de chaleur est certainement celui où la séparation et le stockage des GES paraît réalisable, même si des travaux considérables de recherche et développement sont encore nécessaires. De son côté, le secteur résidentiel et tertiaire est certainement très demandeur d'énergie (il est en France le premier secteur de consommation finale énergétique), mais assez décentralisé. Il se prête peu à la capture des GES sur le site d'utilisation et à leur stockage, si ce n'est par utilisation d'un réseau énergétique (électricité ou chaleur) qui reporte en

amont les émissions de GES et leur traitement. On est alors ramené au problème précédent.

Le domaine des **transports** (il est en France le second secteur de consommation finale énergétique) est celui où la capture et le stockage des GES sont les plus difficiles, sauf à envisager une mutation vers des convertisseurs d'énergie utilisant l'hydrogène (moteurs ou piles à combustible) ou un changement modal des habitudes de transport, vers les voies d'eau ou les chemins de fer électrifiés.

Enfin, le domaine des **matériaux** mérite un effort considérable qui bénéficiera à toutes les orientations majeures de recherche qui s'imposent, depuis les réacteurs nucléaires à haute température jusqu'au stockage et à la distribution de l'hydrogène.

Les chapitres suivants (4 à 11) passent en revue ces divers objectifs et particulièrement la recherche scientifique et technologique nécessaire, les chances de succès et leur impact sur le problème global. Mais il faut être conscient de l'importance et de l'ampleur des problèmes sociologiques (économies d'énergie et nucléaire) et économiques (énergies renouvelables et capture/stockage du CO₂), qui s'ajoutent aux problèmes relevant de la science et de la technique ; les problèmes sociologiques et économiques seront évoqués au chapitre 12.

4. L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LE DOMAINE DU CHAUFFAGE

Le secteur « résidentiel et tertiaire », qui est actuellement le moins avancé dans le domaine de l'efficacité énergétique, représente selon les pays entre 30 % et 50 % de la demande énergétique totale. Dans les pays industrialisés, le secteur résidentiel et tertiaire représente actuellement 60 % de la consommation d'électricité. La croissance annuelle dans ce domaine est très forte, entre 2 et 2,5 % par an, pouvant même atteindre 5 % (France 1970-2004). L'efficacité énergétique, qui dans cet usage repose sur les économies d'énergie, est une priorité. Les solutions reposent en général sur des technologies déjà prouvées ou en développement : en particulier, celles qui seront utilisées d'ici 2020 sont pour la plupart déjà disponibles.

Le chauffage seul (chauffage des locaux et eau chaude sanitaire) absorbe plus de la moitié de ces consommations, offrant ainsi une cible privilégiée aux économies d'énergie. Les équipements électroménagers ou de communication sont maintenant vendus dans l'Union européenne avec une indication d'efficacité énergétique, dont les prix risquent parfois de neutraliser l'avantage énergétique, comme dans le cas des lampes à faible consommation.

Dans les **bâtiments** (secteurs résidentiel et tertiaire) le chauffage est le premier poste de la consommation d'énergie. Les procédés d'isolation, doubles fenêtres et doubles cloisons, qui permettraient jusqu'à 50 % d'économie de chauffage, n'apparaissent guère dans les loge-

ments que dans les constructions nouvelles (en France depuis 1980). De plus, la durée de vie des maisons et le taux de rotation des logements sont très inégaux selon les régions du monde, ce qui rend plus difficile l'isolation thermique des habitations dans certaines parties du monde, notamment en Europe. Même dans ce cadre plus restreint, on observe des écarts importants d'énergie consommée entre des pays voisins, comme la France (200 kWh/m²/an³) et l'Allemagne (100).

Le choix d'une source d'énergie domestique joue un rôle important et les campagnes publicitaires ne donnent pas que de bons conseils. En France, par exemple, une campagne incitant au choix de l'électricité pour le chauffage a été suivie d'une rumeur le décrivant comme trop coûteux et d'une autre campagne offrant des prêts « à taux zéro » pour choisir une autre source d'énergie. Finalement, les experts considèrent que l'électricité, en raison de sa souplesse, est probablement la plus appropriée pour optimiser la consommation d'énergie et la dépense dans les années qui viennent.

Concernant la substitution possible par des sources d'énergie renouvelables, c'est évidemment la combustion du bois qui vient en tête. Son utilisation pour le chauffage individuel dans un environnement urbain ou suburbain est difficile, mais le développement de réseaux de chaleur le permettrait. Ces derniers ne sont guère dans nos usages : l'ensemble des réseaux de chaleur de la France n'égale pas celui de la seule ville de Saint-Petersbourg.

De son côté, l'utilisation conjointe de l'énergie solaire (eau chaude sanitaire et contribution au chauffage des locaux) offre des perspectives notables et permet une économie d'énergie appréciable, même sous nos climats. L'utilisation de panneaux solaires pour le chauffage d'eau sanitaire ou de pompes à chaleur rencontre en France une certaine indifférence, parfois une hostilité sur la base de leur coût d'installation ou de nuisances esthétiques ou acoustiques. Souvent le recours aux énergies renouvelables (chauffage collectif au bois, solaire thermique) et à la géothermie (qui leur est souvent assimilée) reste plus modeste en France que dans les pays voisins. Cette situation vient renforcer l'écart d'énergie consommée signalé plus haut. Dans ce sens, on peut aussi regretter une récente baisse des efforts en faveur des économies d'énergie, relevée par l'AIE dans divers pays.

Plus généralement, le problème des économies d'énergie dans le secteur « résidentiel et tertiaire » se heurte à des problèmes sociologiques d'habitudes acquises et de coutumes. C'est ainsi que les énergies renouvelables sont mises à profit dans des pays méditerranéens ensoleillés (Espagne, Israël, Italie), mais aussi en Allemagne et dans les Pays du nord, dont le climat n'est pas meilleur que celui de la France (Glasgow, par exemple). Il est donc important d'**enseigner** les connaissances de base nécessaires dans le domaine de l'énergie dès le collège et le lycée.

Dans l'**industrie**, qui ne représente plus que 40 % de la demande électrique, la métallur-

³ Un bâtiment neuf satisfaisant la norme RT2005 affiche des besoins de 90 à 140 kWh/m²/an.

gie, les cimenteries, les usines produisant du verre et des céramiques sont souvent de gros consommateurs. Des progrès importants ont été faits en métallurgie et dans l'industrie du ciment, d'autres peuvent encore être réalisés en modifiant des procédés génériques, comme la formulation des ciments, ou en tirant partie de particularités locales (installation d'usines d'aluminium – fortes consommatrices d'énergie – en Islande, alimentées par de l'électricité issue de l'énergie géothermique qui y est abondante).

L'**agriculture** est moins avancée dans le domaine des économies d'énergie que l'industrie. Mais l'émission de gaz à effet de serre dans ce domaine d'activité concerne plutôt les rizières, l'élevage et les engrais (méthane, oxydes d'azote) ; ces émissions spécifiques ne sont pas traitées dans ce rapport.

5. L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE DANS LES TRANSPORTS

C'est dans les **transports** terrestres que les économies seront les plus difficiles : la croissance du parc mondial de véhicules, actuellement de 750 millions, sera rapide et très forte, avec un doublement à 1,5 milliard dès 2030. De plus, le captage du CO₂ émis par les véhicules est impossible. Ce domaine est déjà maintenant le plus fort émetteur annuel de CO₂ au niveau mondial (plus de 5 Gt, soit 21 %), en dehors des centrales électriques brûlant des combustibles fossiles (10 Gt, soit 41 %) ; il présente la plus forte croissance annuelle. Il est très probable que le transport sera devenu le premier émetteur de GES au milieu du siècle, faute d'un captage des émissions.

De plus, ce secteur consomme actuellement environ 50 % des produits pétroliers dans les pays en développement, et près de 70 % dans les pays industrialisés, selon les pays. Il présente la plus forte croissance annuelle : il subira de plein fouet la raréfaction du pétrole et la dérive des prix vers la hausse, qui l'accompagne.

C'est peut-être le domaine où il sera le plus difficile de modérer les consommations. Seul un changement radical de carburant ou de mode de transport pourrait interrompre à terme cette évolution actuellement inéluctable. Ce domaine offre cependant des perspectives d'économies d'émissions, si on le veut réellement.

Les tendances observées, après le second choc pétrolier, vers une réduction de la taille des voitures et de la cylindrée de leur moteur, notamment aux États-Unis, ne se sont pas maintenues et les moteurs puissants et gourmands sont de retour. En Europe occidentale, la mode des « 4x4 » s'est répandue dans plusieurs pays. Les carburants seront encore très majoritairement issus du pétrole ou du gaz naturel pendant la première moitié du siècle ; plusieurs étapes de réduction des consommations ont déjà été franchies (EURO 4) et on attend encore une ultime optimisation des moteurs actuels (essence et diesel) dont le concept initial date des dernières années du XIX^e siècle. Les technologies concernant la réduction de taille des moteurs à essence et de nouveaux modes de combustion visent à améliorer le rendement et réduire la consommation. Une évolution mondiale vers le moteur diesel, comparable à celle observée en Europe, pourrait également diminuer les consommations. Enfin, le remplacement progressif des véhicules anciens par ceux répon-

dant aux nouvelles normes permettra à la fois une diminution de la consommation et des polluants. Mais la durée moyenne de vie des véhicules varie de 15 à 25 ans selon les régions du monde : cet aspect est bien visible si l'on compare les voitures en circulation à Paris et dans un département rural, ou encore sur les deux rives de la Méditerranée, dans l'Union européenne et dans d'autres pays.

La solution la plus efficace à long terme, notamment dans les agglomérations de plusieurs centaines de milliers d'habitants, est le transport électrique en site propre (train, métro, tramway ou combinaison de ces divers modes). Il semble que, pour le transport des personnes, des mesures palliatives comme le « covoiturage », rendu attractif par des files prioritaires ou des dispenses de péage, pourraient apporter une amélioration temporaire.

Sur les longues distances, le train utilisant l'électricité d'origine nucléaire ou renouvelable l'emporte largement sur les autres modes de transport des personnes. À titre d'exemple, le trajet Paris-Marseille génère pour un passager 5 kg de CO₂ en TGV électrique, 90 kg en avion et 150 kg en voiture. Le mode de transport par rail est privilégié au Japon.

Le fret routier s'est largement développé, notamment en Europe, réduisant la part des transports ferroviaires et de la voie d'eau. L'Union européenne et son élargissement ont renforcé cette tendance. Ce mode de transport est gros consommateur d'énergie, sous sa forme la plus difficile à combattre, puisque le captage du CO₂ n'est pas possible. Ceci ne laisse le choix qu'entre l'émission toujours croissante de

gaz à effet de serre et le transfert modal. En dehors des produits alimentaires frais, qui resteront liés aux transports routiers, les charges lourdes (matériaux de construction, véhicules neufs, conteneurs et équipements divers) sont largement transportables par des voies ferrées électrifiées, si l'électricité provient d'énergie nucléaire ou renouvelable, puis livrables au client par route sur quelques dizaines de kilomètres. La Suisse a ainsi trouvé dans le ferroutage un équilibre qui lui permet d'économiser sur l'entretien coûteux d'un réseau routier de montagne. Aux États-Unis, le transport par rail représente 40 % du fret, même si la traction n'est pas électrique. Ces exemples laissent penser que le système est viable. On met parfois en avant la gestion des stocks « à flux tendu » qui amène à privilégier le transport par camion ; faut-il, pour la commodité de quelques-uns, aggraver une évolution climatique déjà fort inquiétante ?

L'Europe du Nord-Ouest a maintenu en service un important réseau de canaux, au gabarit actuel ; la remise aux normes de quelques canaux anciens actuellement réservés au tourisme, notamment en France, permettrait un transfert de certains frets vers les voies d'eau. La voie maritime mérite également d'être privilégiée, puisque l'Europe et notamment la France possèdent une grande longueur de côtes. Le transport par mer représente déjà 40 % du fret en Europe et au Japon.

On voit que si la recherche de l'efficacité énergétique dans le domaine de l'habitat nécessite d'informer et de convaincre la population, ce même objectif dans le domaine des transports passe par la conviction des pouvoirs

publics et la mise en place d'une politique nouvelle, lourde de conséquences économiques et sociales. Pourquoi, par exemple, imposer une taxe par essieu, payable par les seuls transporteurs nationaux, au lieu d'une vignette de circulation, comme c'est le cas en Suisse, payable annuellement par tout camion lourd circulant sur le territoire ?

6. L'ÉLIMINATION DU GAZ CARBONIQUE : UNE CONDITION NÉCESSAIRE AU RELAIS DU PÉTROLE PAR LE CHARBON

Le gaz carbonique émis par les activités humaines contribue à l'effet de serre additionnel pour environ 55 %. L'objectif visant la combinaison capture/stockage du CO₂ est actuellement la seule voie qui permettrait un relais soutenable des produits pétroliers par le charbon. Or, il apparaît que les pays en forte croissance qui disposent de charbon, comme la Chine et l'Inde, vont y recourir massivement (au milieu du siècle, les trois quarts de la capacité électrique hors OCDE dériveraient du charbon), même si ces pays prévoient également une forte croissance de l'électricité nucléaire. Dans certaines régions des États-Unis et même de l'Union européenne, on se propose d'ouvrir de nouvelles exploitations de charbon ou de lignite pour alimenter des centrales électriques. Nous devons donc faire face à une situation où ces substances seront utilisées consciemment et inévitablement. C'est dire l'importance qui s'attache à cet objectif de recherche. De son succès dépendent pour une large part les taux d'émission de gaz à effet de serre (GES), si aucun accord global n'est trouvé.

Charbon et lignite sont proposés dans beaucoup de pays qui en exploitent comme un élément important de leur politique énergétique, en base, complément ou substitut de l'énergie nucléaire. L'hypothèse *business as usual* débouche naturellement sur un triplement de la consommation de charbon en 2050. Dans tous les scénarios proposés par l'AIE/IEA, même le plus favorable au rôle de la technologie, les consommations d'énergie primaire des centrales électriques et des centrales de chaleur augmentent considérablement. Les rendements espérés, en particulier en réalisant une filière de type IGCC (*Integrated Gasification Combined-cycle*), paraissent trop optimistes pour être atteints dès les prochaines décennies. En revanche, le problème de séparation du CO₂ est bien réel ; son stockage pérenne risque d'exiger un considérable effort de recherche et de poser un grave problème environnemental.

Le domaine qui risque le plus de souffrir d'une mauvaise efficacité énergétique est celui de la production de carburants de synthèse à partir de charbon ou de gaz naturel (*coal to liquid, gas to liquid*). En effet, les rendements attendus sont de 50 ou 60 %, alors que les raffineries produisant les carburants classiques à partir du pétrole ont un rendement de 85 à 95 %. L'aspect économique, de son côté, est loin d'être clair. On nous a successivement expliqué que les carburants liquides qui pourraient être préparés à partir du charbon seraient compétitifs à partir d'un prix du pétrole de 30, puis 40 \$/bl, puis... alors que ce prix n'est pas redescendu à ces valeurs depuis deux ans et est resté le plus fréquemment supérieur à 60 \$/bl.

La capture et le stockage du gaz carbonique sont une nécessité, dans tous les secteurs où l'on pourra le faire, pour permettre le relais du pétrole et du gaz par le charbon. Ces procédés sont considérés par beaucoup comme acquis, au vu des expériences de taille limitée menées en mer du Nord et au Canada sur l'injection de ce gaz dans des aquifères profonds ou dans des gisements pétroliers pour tenter d'en accroître la récupération. En fait, on mesure mal la somme des difficultés qui doivent être contournées, ainsi que les ordres de grandeur respectifs de ces essais et des quantités de gaz carbonique à stocker chaque année. Les émissions mondiales de CO₂ dues aux combustibles fossiles dépassent déjà 25 Gt et se situeront en 2050 au-delà de 50 milliards de tonnes par an. Pour apporter une contribution significative, à cette échéance, il faudrait en capturer 10 à 20 milliards de tonnes chaque année et les stocker pour plusieurs siècles. Les essais d'injection menés à Sleipner (mer du Nord, Norvège) portent sur 1 Mt par an et ceux menés à Weyburn (Canada) sur 2 Mt par an. Il est bien difficile de faire passer un procédé industriel directement à une échelle 10 000 à 20 000 fois plus grande.

De plus, divers aspects de ce genre d'opération restent encore mal connus. La **séparation (ou capture)** du CO₂ repose sur des méthodes utilisées pour le traitement du gaz naturel à la production, ou dans des procédés industriels. Dans ces deux cas, il s'agit de traiter des gaz de composition bien connue et constante. Si l'on doit traiter les émissions d'une centrale thermique, le problème devient beaucoup plus complexe, selon qu'elle est alimentée au gaz, et surtout au charbon ou au lignite, compte tenu de leur composition (notamment charbon sans sou-

fre, charbon avec des teneurs en soufre très variées ; lignite avec contenus en matière organique et en matière minérale très divers), et du procédé utilisé dans chaque centrale future (combustion à l'air ou à l'oxygène). Ainsi, on peut être amené à séparer le CO₂ à partir de gaz contenant ou non une majorité d'azote, des composés soufrés hautement corrosifs ou toxiques, de la vapeur d'eau, etc. Il est donc probable qu'il faudra mettre au point des procédures de capture, y compris des technologies membranaires, ou des variantes adaptées à chaque cas.

Les recherches sur **l'injection dans les couches géologiques profondes** (500 m ou plus) devront évidemment s'appuyer sur les études de réservoir menées par les pétroliers et le stockage de gaz naturel, tout en étant conscient des différences de nature du fluide injecté, des interactions entre la roche et le fluide, de la nécessité de confinement du CO₂ pendant une longue période de stockage et de surveillance, etc.

La recherche pose des problèmes de reconnaissance des terrains pour s'assurer que les caractéristiques de ces roches sont satisfaisantes (**réservoir** à porosité suffisante, **couverture** imperméable), pour envisager le problème des **fuites** possibles vers des aquifères moins profonds et éventuellement vers des nappes d'eau douce exploitées dès maintenant ou à moyen terme.

De plus, l'eau chargée de gaz carbonique dissout le calcaire, on le sait depuis longtemps et les formes karstiques, notamment les dolines en surface et les cavités souterraines en profondeur, sont connues de longue date. Or, de nom-

breuses roches autres que les calcaires proprement dits contiennent du carbonate de calcium comme constituant important ou ciment de la roche. Quel sera le comportement de ces terrains en présence d'eau naturellement présente et de gaz carbonique injecté ? Il s'agit là d'un problème de géochimie minérale bien peu documenté et dont les conclusions sont particulièrement importantes pour des stockages pluriséculaires. De son côté, le changement du pH dû au CO₂ dissous pourrait affecter certains silicates. Enfin, une attention particulière devra être portée au problème d'étanchéité des couvertures, pour empêcher totalement tout retour vers des aquifères exploités ou susceptibles de l'être, ou vers la surface. Il ne faut pas oublier que, à partir d'une concentration dans l'air de 5 à 6 %, les effets sur la santé humaine peuvent être très graves. Il faut aussi être conscient que même une faible concentration de CO₂ gazeux dans l'eau serait de nature à susciter l'inquiétude des populations et à entraîner un rejet sociétal.

Le comportement du stockage dans le long terme, les scénarios de fuite devront être modélisés, en s'inspirant de ce qui a été fait pour les stockages artificiels réalisés pour le gaz naturel, mais avec une échelle de temps différente et un problème d'interaction roche/fluide plus complexe. Les modèles de transfert de fluides et de comportement de la roche réservoir développés pour la mise en production des gisements de pétrole et de gaz naturel apporteront également des éléments. Ces modèles devront inclure la thermodynamique, la thermo-chimie, la pétrophysique (porosité, perméabilité et leur altération liée au CO₂), les écoulements réactifs, la géomécanique. L'étude des roches assurant le scellement étanche du stockage mettra à profit

l'expérience acquise sur les couvertures des gisements de gaz qui ont maintenu l'étanchéité durant des périodes très longues.

La question de l'**ordre de grandeur** des ouvrages à réaliser prend ici toute son importance. Comme on l'a dit, le stockage intégral du CO₂ produit annuellement au milieu du siècle concernerait plus de 50 Gt, celui d'une quantité significative serait de 20 Gt. À titre d'exemple, ce dernier objectif exigerait l'étude et la validation, chaque année et au niveau mondial, d'un ensemble de réservoirs aquifères équivalant à deux fois la capacité de stockage développée par Gaz de France en 40 ans. Un tel programme poserait d'importants problèmes de financement : le stockage commercial de gaz naturel vise à étaler la forte demande saisonnière et suit sensiblement un cycle annuel à l'issue duquel il est revendu et le réservoir peut être utilisé de nouveau, alors que le stockage de CO₂ vise à écarter celui-ci pour plusieurs siècles.

Quant à l'injection de CO₂ **en mer profonde**, il faut bien voir qu'on aborde là un domaine très problématique qui touche à la fois la capacité de l'océan à tolérer une très forte concentration locale en gaz carbonique, qui ne manquera pas de faire, à terme, retour vers la surface et l'atmosphère. Il risque alors de perturber considérablement l'écosystème marin, voire de le détruire, et d'affecter ainsi les ressources de la pêche, déjà perturbées par la pêche intensive et le réchauffement des eaux de surface. De plus, de tels déversements dans la mer pourraient rencontrer des obstacles juridiques dans le cadre de certains traités régionaux ou internationaux, même si le traité du NE Atlantique ne l'interdit pas explicitement.

On voit clairement que, vu le nombre d'incertitudes qu'il faudra maîtriser, les valeurs numériques qui circulent sur les volumes offerts au stockage géologique du gaz carbonique n'ont guère de fondement dans l'état actuel des connaissances. De toute manière, le stockage du CO₂ ne peut être raisonnablement envisagé qu'à l'échéance de 2030 et la division par 4 des émissions de CO₂ à l'horizon 2050 paraît très incertaine. En particulier, cet espoir ne doit pas être utilisé comme un alibi permettant de relancer dès maintenant la construction de nouvelles centrales thermiques de type ancien, en remettant à plus tard le difficile problème de l'élimination du CO₂.

7. LE STOCKAGE DE L'ÉLECTRICITÉ : UNE OUVERTURE MAJEURE POUR LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

L'énergie nucléaire et les énergies renouvelables sont des sources permettant de produire de l'électricité sans émission de gaz carbonique ; elles présentent à ce titre un gros avantage sur les combustibles fossiles, charbon et lignite en particulier. Elles permettent de s'affranchir des procédés complexes évoqués plus haut ; elles éliminent aussi le risque, qu'il ne faut pas négliger, de voir repousser ou abandonner un jour le projet de séparer et stocker le CO₂, au motif du coût de l'opération, ou de l'attente de résultats complémentaires sur le stockage de ce gaz. Ces sources apportent ainsi une garantie non négligeable.

L'énergie nucléaire et deux énergies renouvelables (solaire et éolienne) sont présen-

tées comme des sources également possibles pour répondre à une demande constamment croissante d'électricité, sans générer de CO₂. En fait, la situation de ces trois énergies est bien différente. L'énergie nucléaire alimente *en base* depuis plusieurs décennies les réseaux de plusieurs grands pays en Amérique, Asie et Europe. L'énergie éolienne a fait un retour important depuis 15 ans ; l'énergie solaire photovoltaïque est encore à l'état ponctuel ou expérimental pour la production électrique. La situation pourrait s'améliorer avec des photopiles moins chères, des matériaux moins sophistiqués, eu égard à un potentiel théorique par unité de surface supérieur à celui des éoliennes. L'une et l'autre (éolienne, photovoltaïque) fournissent une énergie intermittente (vent trop faible ou trop fort pour l'une ; nuit et nuages pour l'autre). Comme ces fluctuations ne correspondent généralement pas à celles de la demande, le stockage de l'électricité serait particulièrement utile pour une meilleure efficacité de ces sources renouvelables.

Le **stockage de l'énergie**, et plus particulièrement de l'électricité, constitue un facteur essentiel pour valoriser l'énergie produite lorsque le réseau est peu sollicité et la restituer quand la demande augmente. En l'absence de cette possibilité, les énergies intermittentes obligent à entretenir une capacité de réserve, reposant sur des centrales au gaz, et se déclenchant à la demande. Il faut bien voir que le pétrole et le gaz, aisément stockables dans les raffineries, sur le site des centrales thermiques, ou même dans le réservoir d'un véhicule, permettaient jusqu'ici de répondre aux besoins d'entreposage temporaire, sans que l'attention de tous soit attirée par cette commodité considérable.

Les recherches sur le stockage de l'**électricité** permettent actuellement de stocker de *petites quantités* d'énergie (piles, batteries d'accumulateurs). L'usage des piles ou de batteries rechargeables dans les outils informatiques et ceux de la communication apporte un avantage inestimable en sorte que leur coût importe peu : ce n'est pas la quantité d'électricité que nous payons, mais seulement son usage dans des situations bien spécifiques. Des techniques efficaces de stockage existent aussi pour de *grandes quantités* d'énergie, notamment celle produite de nuit par les centrales nucléaires. On peut alors utiliser les barrages hydroélectriques pour pomper l'eau depuis un bassin aval vers le réservoir amont (STEP), et produire ensuite de l'électricité à la demande qui est alors comptée comme une production hydraulique.

En revanche, le **stockage de quantités moyennes d'électricité**, notamment celle produite par un parc d'éoliennes (ou de capteurs photovoltaïques), ne semble pas résolu actuellement de manière efficace. Le stockage de l'électricité produite par les éoliennes permettrait à ces générateurs, qui sont de toute manière intermittents, de mieux s'adapter à la demande du réseau et de s'affranchir des contraintes météorologiques (vent trop faible ou trop violent). Pour ces situations, qui sont par nature fixes, on s'oriente vers la compression d'un fluide dans des cavernes souterraines ou dans des réservoirs construits. Un essai intéressant est actuellement mené en Allemagne. On peut simplement comprimer de l'air, mais on peut aussi penser au gaz naturel qu'il faut de toute façon comprimer pour l'injecter dans un réservoir souterrain. Ce domaine avait fait l'objet de recherches actives, il y a trente ans, mais il est loin de recevoir toute

l'attention qui serait justifiée par son intérêt dans la gestion des productions d'électricité.

Le problème est plus complexe pour la **propulsion électrique (donc propre) d'une voiture** avec une autonomie raisonnable : un compromis doit être trouvé entre l'énergie électrique stockée, le temps de charge, le poids et le volume des batteries. Les accumulateurs au plomb ont certes fait leurs preuves et seraient utilisables pour des véhicules de services administratifs ou de prestations après-vente. Mais l'autonomie du véhicule reste limitée (une centaine de kilomètres) et les longs trajets extra-urbains demanderaient alors plusieurs journées pour assurer chaque nuit la recharge. Il semble en effet difficile d'attendre des usagers qu'ils utilisent deux voitures, l'une pour les trajets urbains, l'autre pour les longues distances.

En ce sens, les véhicules hybrides (propulsion électrique et fourniture d'électricité par un moteur thermique embarqué fonctionnant dans les conditions optimales, indépendamment des conditions du trafic) pourraient offrir une réponse dans les décennies qui viennent. Le stockage principal est alors celui d'un carburant classique, tandis que le stockage d'électricité se limite à celui d'un intermédiaire jouant le rôle de tampon. Deux modèles hybrides sont déjà commercialisés par des constructeurs japonais, d'autres sont annoncés par différents constructeurs.

8. VERS UNE ÉCONOMIE DE L'HYDROGÈNE ?

La solution, souvent mentionnée, consistant à choisir, pour les transports, l'hydrogène

comme nouveau vecteur d'énergie **stockable** et **propre** est une solution qui semble plus lointaine : on pourrait alors l'utiliser soit dans un moteur thermique, soit dans une pile à combustible. Actuellement, l'hydrogène est couramment produit – et consommé – dans les raffineries de pétrole : il provient par réaction chimique d'une fraction pétrolière proche de l'essence. L'émission de CO₂ est alors délocalisée et plus facile à recueillir en usine qu'à bord d'un véhicule, mais le bilan global du CO₂ émis n'est modifié que si ce gaz est stocké (chapitre 6).

Par contre, la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau ne produit pas de CO₂, pourvu que l'électricité soit d'origine nucléaire ou renouvelable. À long terme, on pense que des réacteurs nucléaires à haute température pourraient également produire de l'hydrogène pour les transports, en passant (électrolyse à haute température) ou sans passer (cycles thermochimiques) par l'intermédiaire de l'électricité. Mais ceci ne serait pas usuel avant le milieu du siècle, vu le délai nécessaire pour développer ces réacteurs et les usines de production de l'hydrogène.

Dans les deux cas envisagés ci-dessus, il sera nécessaire d'établir un bilan énergétique global. On risque de perdre de l'énergie à la fois dans le procédé de production de l'hydrogène et dans son utilisation. Le coût énergétique de l'hydrogène peut poser des problèmes, même en utilisant de l'électricité nucléaire pour la production de ce nouveau vecteur d'énergie.

Les diverses étapes de transport et d'utilisation de l'hydrogène posent des problèmes difficiles. En particulier, sa distribution à des

millions d'utilisateurs et son stockage à bord des véhicules recèlent des difficultés considérables auxquelles il sera ardu de donner des réponses. Il restera à adapter les convertisseurs appropriés (moteurs ou pile à combustible) ainsi que les véhicules à ce type de carburant. À titre expérimental, trois autobus à hydrogène fonctionnent à Reykjavik, capitale de l'Islande ; ils nécessitent trois remplissages de carburant par jour. Le constructeur de voitures allemand BMW a présenté une voiture comportant un moteur à combustion interne à bicarburant, essence et hydrogène ; l'autonomie est de 200 km avec l'hydrogène plus 500 km avec l'essence. BMW a choisi de stocker l'hydrogène à l'état liquide (très basse température, -250°C, volume modéré). D'autres constructeurs préfèrent le stocker à l'état gazeux, sous haute pression. Certains privilégient l'usage de l'hydrogène dans une pile à combustible.

La difficulté maximale est attendue dans les transports aériens, où le risque spécifique de formation de particules à très basse température n'a pas, jusqu'ici, reçu de réponse.

Les systèmes énergétiques reposant sur l'hydrogène et les piles à combustibles, dont on parle beaucoup, apparaîtront peut-être à titre expérimental vers 2020-2030, mais n'occuperont encore qu'une place mineure au milieu du siècle. Les véhicules hybrides mentionnés au paragraphe précédent pourraient offrir une transition plus adaptée dans les décennies qui viennent : le stockage principal est celui d'un carburant classique. D'une façon générale, on considère que les innovations – chères, comme les piles à combustibles – et les investissements très élevés nécessaires pour créer un réseau de distribution d'hydrogène ne permettront le dévelop-

pement d'une éventuelle « économie de l'hydrogène » que dans la seconde moitié du siècle.

9. L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

Outre ces deux domaines – capture/stockage du CO₂ et stockage de l'électricité – les objectifs principaux de la recherche devraient être le recours au nucléaire pour produire l'électricité, chaque fois que c'est possible, et la filière bois pour générer de la chaleur ou de l'électricité. L'échec de l'un ou de l'autre serait fortement pénalisant. Un éventuel échec du développement nucléaire, par idéologie ou faute d'acceptation sociale, nous précipiterait à terme (raréfaction du pétrole et du gaz) dans l'usage quasi exclusif du charbon dans des centrales thermiques, avec un fort accroissement du changement climatique.

L'énergie nucléaire est celle qui peut délivrer de l'énergie électrique en quantité considérable, en particulier aux mégalopoles, de manière permanente. La génération actuelle de réacteurs à neutrons thermiques fonctionne avec régularité et sûreté ; leur durée de vie, de trente ans à la construction, est maintenant portée dans de nombreux pays à quarante ans et pourrait atteindre soixante avec la génération qui est prête à démarrer (Finlande, France). Les réserves d'uranium naturel (contenant 0,7 % d'uranium 235) sont, pour les réacteurs de filières à neutrons thermiques, de l'ordre du siècle pour le parc actuel et donc comparables à celles de pétrole et de gaz.

Une nouvelle génération de réacteurs, à neutrons rapides (surgénérateurs), est attendue

au cours du demi-siècle qui commence. Elle pourra consommer l'uranium 238 qui est le principal isotope dans l'uranium naturel et multiplier ainsi les réserves, en théorie par 140 (= 1/0,07), en réalité par un facteur de l'ordre de 50 à 100. On voit que si une telle filière était développée, nous disposerions de cinq à dix millénaires de réserves. C'est l'objet des recherches du programme international « Génération IV ».

Les problèmes posés pour l'acceptation de cette source d'énergie sont de quatre natures :

- l'investissement très important qui doit être réalisé, par rapport aux centrales thermiques « conventionnelles » (c'est-à-dire au charbon ou au gaz, mais sans captage et stockage du CO₂ ; si au contraire on inclut ces exigences, toutes les filières thermiques deviennent très coûteuses) ;
- le syndrome de l'accident de Tchernobyl (très faible risque mais conséquences énormes) ;
- le sort des déchets ;
- le risque de prolifération des armes nucléaires.

Les déchets issus des réacteurs actuels sont, pour une large part, gérés en utilisant des filières de transformation conduisant au stockage de colis adaptés. Il s'agit de ceux dits « à vie courte ». En revanche, les déchets nucléaires à vie longue qui renferment des radionucléides pouvant présenter des nuisances (radiotoxicité) sur des millénaires sont pour l'instant entreposés en attente d'une solution. Plusieurs voies sont explorées pour en réduire la radiotoxicité : soit détruire les radionucléides porteurs de la radiotoxicité, soit placer des colis de déchets dans un stockage construit dans une couche géologique profonde, assurant qu'un retour

éventuel à la biosphère n'aurait pas plus de conséquences que la radioactivité naturelle. Un effort considérable de recherche reste à mener à terme pour lancer des systèmes nucléaires (réacteurs à neutrons rapides et installations associées) visant le premier objectif. L'atteinte du second objectif nécessite encore des recherches mais le principal obstacle est ici de nature sociologique. Tous les pays nucléaires sont confrontés à la gestion des déchets nucléaires à vie longue. À ce jour, aucun pays n'a réalisé de stockage effectif des déchets en situation géologique, même si plusieurs pays sont très avancés dans leurs recherches et disposent de laboratoires souterrains.

Il faut cependant préciser que les nouveaux réacteurs du programme « Génération IV » ont pour objectif principal la fourniture d'électricité. On peut aussi en attendre qu'ils éliminent ou minimisent les résidus issus de leur propre fonctionnement, voire des déchets antérieurs. Nous devons également être conscients du fait que les réacteurs dits « surgénérateurs » qui ont fonctionné l'ont fait à partir de combustible « frais », enrichi en uranium 235, ou en utilisant du plutonium « de première génération ». Aucun n'a consommé les transuraniens qui se trouvent dans le combustible utilisé des centrales actuelles.

L'énergie nucléaire représente dans le monde moins de 7 % de l'énergie totale consommée, mais 16 % de l'électricité ; ceci est principalement dû au fait qu'elle ne débouche pas actuellement sur les autres demandes énergétiques. À moyen terme, elle pourrait cependant satisfaire les besoins de chaleur des grandes agglomérations dans le domaine résidentiel

et tertiaire, grâce au développement de réseaux de chaleur : cette dernière est aujourd'hui perdue, à la réserve de quelques usages locaux (culture de primeurs, de fleurs, etc.). On peut penser qu'il faudrait des réacteurs dédiés avec des fluides chauds, l'eau de refroidissement actuelle ne peut être transportée très loin.

Une préoccupation de nature très différente est l'opposition rencontrée dans certains pays face à l'énergie nucléaire, au nom de la défense de l'environnement. En Europe, notamment, l'Allemagne et les pays scandinaves ont prévu un calendrier de fermeture définitive des réacteurs nucléaires existants sur des périodes de 30 ans. Cependant, la demande sans cesse grandissante d'électricité, le coût croissant du kWh tiré vers le haut par les énergies renouvelables, le taux de disponibilité limité des éoliennes et le menace environnementale introduite par la construction de nouvelles centrales au lignite et au charbon amènent ces pays à reconsidérer leur position, même si leur souci écologique demeure. La Finlande a décidé d'accroître son potentiel nucléaire d'une unité nouvelle de type EPR ; la France a pris la même décision. L'Allemagne pourrait réviser en 2007 son plan énergétique.

Enfin, un souci constant de non-prolifération, centré sur les déchets et le plutonium issu des séparations de combustible nucléaire utilisé, voire sur d'autres éléments produits dans les réacteurs, est exprimé par certains pays. Cette préoccupation est reliée à l'utilisation dans les décennies précédentes, par les premiers pays détenteurs de l'arme nucléaire, du plutonium présent dans les combustibles irradiés pour préparer ces armes. Néanmoins les pays qui se sont dotés récemment de cette arme, ou qui tentent

de le faire, ont privilégié l'uranium 235 obtenu par enrichissement de l'uranium naturel, au moyen de l'ultracentrifugation. Le plutonium apparaît plutôt maintenant comme un combustible privilégié pour démarrer les futurs réacteurs à neutrons rapides.

10. LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

L'énergie hydraulique est, de loin, la plus attrayante pour produire de l'électricité. On considère généralement qu'un tiers des sites possibles sont actuellement équipés de barrages et de centrales électriques. Cependant, les deux tiers des sites restant à équiper sont situés majoritairement en Amérique du Sud ou en Afrique Centrale, le plus souvent loin de la demande majeure. En Asie, il reste également des possibilités, souvent dans des régions très peuplées.

*
* *

Le problème principal de plusieurs des énergies renouvelables - éolienne, solaire - est leur caractère intermittent qui appelle un stockage de l'énergie, particulièrement de l'énergie électrique, ce qu'on ne sait faire de façon efficace que pour de grandes quantités d'énergie (« barrages fonctionnant à l'envers ») ou de petites quantités (piles et batteries) comme on l'a dit plus haut. Le caractère intermittent rend aussi plus difficile la comparaison du bilan et des coûts de l'énergie produite : avec des éoliennes et un *average capacity factor* de 20 % au lieu de 80 à 90 % (gaz, nucléaire), on produit 4 à 5 fois moins d'électricité pour une même

puissance nominale installée. En d'autres termes, pour 1000 MW installés, la quantité d'énergie produite en un an est de 8 000 MWh dans le cas du nucléaire et de 2 000 MWh dans l'autre cas. Aussi longtemps que le problème du stockage de l'électricité ainsi produite n'aura pas été résolu de manière simple et efficace, on ne peut pas envisager de remplacer des centrales thermiques ou nucléaires par des énergies renouvelables pour assurer la production électrique de base.

L'énergie solaire est la source de diverses formes d'énergie renouvelables, y compris celle du vent. Elle est aussi, *via* la photosynthèse, à l'origine de celle de la biomasse. Deux modes d'utilisation directe de l'irradiation solaire – thermique et photovoltaïque – pourraient recevoir une large utilisation, selon la situation régionale.

Le *chauffage* direct de l'eau sanitaire dans des panneaux posés sur des toitures ou des façades est déjà largement appliqué dans des pays méditerranéens (Israël, Espagne, etc.). Il pourrait constituer un appoint notable, même à des latitudes plus hautes.

L'électricité photovoltaïque est surtout utilisée, dans les pays industrialisés, pour de faibles consommations d'électricité sans connexion avec un réseau : parcmètres, affichage sur les autoroutes, calculettes. Dans les pays en voie de développement, les coûts d'installation et l'obligation d'entretien (nettoyage) en restreignent beaucoup l'utilisation. Elle permettrait cependant de fournir les petites quantités d'électricité nécessaires pour une antenne médicale et la conservation des vaccins, et pour rom-

pre l'isolement des populations. L'électricité photovoltaïque est un peu moins dépendante du stockage de l'électricité que celle produite par les éoliennes, car elle coïncide mieux avec la demande des logements et des bureaux (horaires de jour et surtout saison : été et climatisation). Elle reste néanmoins plus coûteuse que toutes les autres sources d'énergie (cependant les valeurs avancées correspondent plus à des situations expérimentales qu'à une exploitation en routine). Les recherches visent principalement à améliorer les performances des capteurs, baisser le coût des matériaux et du kWh produit.

L'énergie éolienne est l'exemple type d'une énergie renouvelable intermittente. L'Allemagne a déjà installé des unités sur terre et en mer totalisant 18 000 MW. Cependant, le projet ultérieur de développement de l'énergie éolienne (environ 20 000 MW supplémentaires à installer, dont 15 000 en mer) pose diverses questions. En fait, on envisage, dans certains pays, de remplacer des centrales nucléaires, qui fonctionnent en base et qu'il est prévu de fermer, par des centrales classiques (charbon et lignite) et des énergies intermittentes (éoliennes), dont les jours et heures de fonctionnement effectif ne coïncident pas nécessairement avec la demande du réseau. Tant que le problème du stockage de l'électricité n'a pas reçu de solution simple et robuste, il s'agit là d'une difficulté importante. D'autre part, les réticences rencontrées dans la population de certaines régions pourraient prendre plus d'ampleur si l'on doublait ainsi les installations éoliennes existantes.

Un bon exemple d'utilisation efficace d'une énergie intermittente est fourni par l'Australie. L'élevage d'ovins et de bovins, pour

la laine et la viande, est l'un des plus importants du monde. Les troupeaux sont immenses et les fermes sont très distantes. Depuis plus d'un demi-siècle, toutes ces fermes sont équipées d'éoliennes. Le problème central est d'abreuver le bétail et l'eau pompée dans les puits est aisément stockable. Les batteries classiques d'accumulateurs suffisent pour rompre l'isolement des fermes (communication, enseignement, etc.).

La géothermie est souvent assimilée aux énergies renouvelables, même si certains procédés comme l'utilisation de nappes aquifères dans les couches sédimentaires ne répondent pas toujours à cette définition. Les sources d'énergie les plus abondantes se rencontrent dans des régions de tectonique intense : sur les marges actives des continents, comme en Californie ; dans les arcs insulaires, comme en Nouvelle Zélande, et dans des îles volcaniques, comme en Islande, aux Antilles ou à la Réunion.

On peut aussi rechercher des situations comparables à grande profondeur dans des roches ignées chaudes, en particulier dans des fossés tectoniques, comme le Fossé Rhéan. Dans ce cas, les travaux de recherche comprennent non seulement une exploration géologique, mais encore une étude mécanique et hydrologique des roches profondes sèches et très chaudes. On peut alors, si nécessaire, les fracturer et y injecter de l'eau qui s'échauffe par circulation dans la roche et remonte vers la surface. Dans le cas où une fracturation artificielle est nécessaire, il faudra développer des recherches, y compris des modèles, pour prévoir les éventuelles conséquences de cette opération sur les aquifères sus-jacents, voire sur les terrains superficiels et les implantations humaines.

11. QUELS USAGES DE LA BIOMASSE ?

La biomasse intervient ordinairement dans le bilan énergétique par son utilisation traditionnelle comme **combustible de chauffe** ; elle représente ainsi environ 10 % de la demande énergétique mondiale, le plus souvent hors des circuits commerciaux traditionnels. Il s'agit certainement là de l'utilisation la plus directe et les pays industrialisés pourraient reconsidérer cet usage qui tend à se perdre chez eux (à l'exception des gens les plus pauvres) ou bien se limite à un rôle festif. Dans les grandes villes, des réseaux de chauffage urbain en permettraient l'utilisation.

L'usage des biocarburants issus de cultures oléagineuses avec collecte de la graine (colza, tournesol) restera limité. On recueille l'huile, utilisable directement dans les tracteurs agricoles ou de chantier, et dans les véhicules diesel en général, après estérification. On voit bien que si l'on compare la source d'énergie ainsi récupérée - l'huile issue par pressage de la graine - avec l'énergie solaire reçue, capable de générer sur la même surface des plantes entières et des arbres, l'efficacité est modeste. D'autres espèces végétales, spécialement favorables avec un climat adapté, comme la canne à sucre au Brésil, offrent des possibilités importantes de production d'éthanol par fermentation.

S'agissant des biocarburants, il serait très important de disposer de données sur l'énergie fossile consommée dans l'ensemble du cycle de vie du produit, notamment sur les carburants issus de la biomasse cultivée : travail des machines agricoles, fabrication et mise en

œuvre d'engrais ou pesticides, collecte, broyage, fermentation, séparation, conversion chimique (par exemple estérification), pour faire un bilan énergétique « du sol à la roue ». En d'autres termes, si l'on sacrifie un litre de produits pétroliers pour cet ensemble de travaux, combien produit-on de carburant de substitution (en tenant compte des pouvoirs calorifiques des uns et des autres) ? Des déclarations récentes ont mis en cause la validité de certains bilans présentés pour les esters destinés au diesel (colza, tournesol) ; d'autres celle de l'éthanol obtenu par fermentation à partir de céréales (blé, maïs).

Le bilan énergétique est nettement positif au Brésil, où l'on peut produire jusqu'à 8 litres d'éthanol pour un litre de produits pétroliers consommé. Il faut bien sûr tenir compte des pouvoirs calorifiques respectifs de l'éthanol et de l'essence (2 litres d'éthanol correspondent environ à 1 litre d'essence), ce qui laisse une marge énergétique appréciable.

Néanmoins, la totalité des terres arables du monde ne suffirait pas en 2030 à faire rouler le parc de véhicules ; c'est dès aujourd'hui le cas au niveau de la France. Il existe, à terme, un risque certain de compétition entre la production de carburants pour les véhicules et celle de nourriture pour 9 milliards d'habitants au milieu du siècle. Le doublement en un mois du prix des tortillas au Mexique début 2007 est directement lié à des achats massifs de maïs par les États-Unis pour produire du bioéthanol dans des conditions profitables. Une autre forme de compétition s'installerait entre l'usage de l'eau (qui n'est pas inépuisable) pour les cultures alimentaires et pour la production de biocarburants.

En revanche, l'utilisation de l'ensemble de la biomasse lignocellulosique, comme des futaies à courte rotation, pourrait privilégier des terres peu favorables à la production alimentaire. L'utilisation de déchets agricoles ou sylvicoles (paille broyée, sciure de bois) irait dans le même sens. Cette voie est plus complexe puisqu'elle comporte un prétraitement suivi d'une hydrolyse enzymatique pour produire des sucres simples (glucose), puis de l'éthanol par fermentation avec des souches de levure. Une autre possibilité à long terme permettrait de produire par gazéification le mélange CO+H₂, puis par une synthèse chimique de type Fischer-Tropsch, des carburants de haute qualité, en particulier pour les moteurs diesel. De leur côté, les futurs systèmes énergétiques pourraient utiliser l'hydrogène, après séparation, dans des piles à combustibles. Ces dernières apparaîtront peut-être à titre expérimental dans les transports vers 2020-2030, mais n'occuperont encore qu'une place mineure au milieu du siècle.

Il faut cependant réaliser que l'ajout au carburant habituel d'une quantité mineure de biocarburant relève d'une adaptation, voire d'une auto-adaptation des moteurs, ce qui s'applique aussi bien au parc ancien. L'ajout d'une quantité majeure de biocarburant (notamment 85 % d'éthanol) est une réelle diversification du véhicule mis sur le marché, avec des moteurs adaptés, voire auto-adaptables (*flexfuel* de 20 à 80 % au Brésil).

Dans les pays européens, le bilan économique de ces diverses filières est encore difficile à prévoir et demandera une période suffisante de production « en régime » pour disposer de bases claires. En particulier, la prise en compte

des sous-produits, qui peuvent présenter un intérêt accessoire, devra être très prudente, lorsqu'il s'agit de matières courantes déjà présentes en abondance sur le marché. Il est plus important d'améliorer le bilan énergétique global de chaque filière, et en particulier de la synthèse Fischer-Tropsch dont les produits sont bien adaptés au parc européen de véhicules.

L'ensemble des orientations envisageables demande une recherche assidue sur les voies de transformation, comme la gazéification de la biomasse lignocellulosique, et sur les bilans énergétique et économique. Cette filière paraît être, à long terme, la voie qui permettrait de valoriser la majeure partie de la biomasse et produire ainsi des biocarburants, sans entrer directement en compétition avec les cultures alimentaires : en cas d'échec nous serions limités à une utilisation très partielle des végétaux dans ce but, hors plantes sucrières.

Fondamentalement, il faut toujours garder à l'esprit que **le plus grand apport de la biomasse dans la lutte contre le changement climatique existe et nous le détruisons : il s'agit de la forêt primaire** qui joue un rôle capital dans les échanges de CO₂ entre l'atmosphère, la végétation et les sols. Que la déforestation ait lieu en Amérique du Sud, en Asie du Sud-Est ou en Afrique centrale, qu'elle ait pour objet la commercialisation de bois précieux ou l'ouverture de nouvelles terres à l'agriculture (pour combien d'années ?) c'est notre capital que nous anéantissons. Juguler la déforestation est donc une priorité ; il faut cependant réaliser que ce problème se pose pour 70 % dans 8 pays, pour la plupart en voie de développement.

12. LA PLANÈTE SERA AU MILIEU DU SIÈCLE CE QUE NOUS LA FERONS

En l'absence de mesures reconnues par tous les principaux pays consommateurs d'énergie, la situation sera gravement compromise bien avant le milieu du siècle. Les émissions mondiales annuelles de CO₂ auront doublé avant 2050, par rapport à la situation actuelle. À lui seul, l'accroissement (x 3) de la consommation du charbon pour produire de l'électricité pèsera d'un grand poids dans un tel scénario. Il est très difficile d'évaluer le coût pour l'humanité de la non-décision, mais l'ordre de grandeur avancé par le rapport confié à Sir Nicholas Stern par le gouvernement britannique est plausible. Le coût d'une action positive efficace pour réduire dès maintenant les émissions de GES serait chaque année environ 1 % du PIB mondial. Si, au contraire, on ne fait rien, nous serons rapidement face à une perte de 5 % du PIB mondial annuel et il faudrait en plus réparer les dommages créés par notre inconscience collective et l'illusion de pouvoir dominer la nature.

L'idée, répandue par certains, que les pays les plus développés souffriront moins et que la technologie leur permettra alors de résoudre tous les problèmes, ne paraît pas solidement fondée. Nous n'avons qu'une seule atmosphère et la technologie ne peut pas tout. La canicule de 2003 a causé 15 000 morts en France ; l'ouragan Katrina a fait des dégâts humains, matériels et même sociétaux dans le pays le plus riche et développé du monde ; l'agriculture australienne souffre gravement de cinq années consécutives de sécheresse. Enfin, les partisans

de la thèse « la technologie permet tout » ne semblent pas conscients que si l'on arrive à ramener, au milieu du siècle, les émissions de GES à leur niveau actuel, le poids des décennies 2000-2050 subsistera. En effet, la durée de vie du CO₂ dans l'atmosphère est de l'ordre du siècle : les concentrations atmosphériques seront, en 2050, bien plus élevées qu'à l'époque actuelle : les températures et les désordres climatiques aussi.

Une erreur comparable est propagée par un usage abusif, et peut-être orienté, de publications relatives aux pays en développement africains ou sud-américains et dont les conclusions sont généralisées au monde entier : le niveau de développement d'un pays et la qualité de vie de sa population sont supposés « corrélés avec la consommation d'énergie ». À partir de ce postulat, on montre que les citoyens américains et canadiens ont le meilleur niveau de vie et le plus haut degré de développement du monde, ce qui justifierait une consommation d'énergie par habitant très élevée. Toujours dans ce mode de raisonnement, les seuls qui s'approchent de ce niveau de vie élevé (et de ce niveau de consommation) sont, dans ce classement, les Russes, les Saoudiens et les Australiens ; puis vient le niveau de vie et de développement de l'Europe, de l'Asie centrale (ex-URSS), du Japon, et enfin les autres... Il conviendrait de dire avec prudence : « jusqu'à atteindre un certain niveau moyen de consommation énergétique, on observe, dans les pays en développement, une corrélation entre niveau de vie et consommation d'énergie ». Bien plus, ce classement contestable devrait être comparé avec celui du véritable niveau de vie, basé sur la longévité, la santé et l'alimentation, ce qui modifierait profondément cette doctrine.

La demande en électricité est une vulnérabilité importante de notre système énergétique. La sécurité de la prestation est déjà incertaine dans certaines mégalo-poles comportant jusqu'à plus de 30 millions d'habitants et situées dans des pays en développement. Elle est également menacée lors de catastrophes climatiques, même dans les pays très avancés : tempête de décembre 1999 en France, cyclone Katrina en 2005 aux États-Unis. Dans d'autres circonstances, des effondrements massifs du réseau électrique ont frappé des régions parmi les plus actives des États-Unis (Nord-Est et Californie) et de l'Europe (Italie). Ils ne sont pas dus à des événements climatiques, mais ils ont illustré à quel point le mode de vie des pays les plus développés est devenu dépendant de l'électricité. Ce type de défaillance, s'il devait se prolonger au-delà de quelques heures, est susceptible d'en entraîner d'autres telles que la distribution de l'eau, l'accessibilité des immeubles élevés, les réseaux informatiques des entreprises, les communications par Internet, le fonctionnement des appareils à commande électronique (des chaudières individuelles jusqu'au téléphone), etc.

Le problème des communications mérite une mention spéciale. En cas de catastrophe, la rupture des liaisons directes avec les régions touchées rend beaucoup plus difficile la connaissance des dégâts humains et matériels ainsi que la mise en œuvre des plans d'intervention et l'acheminement des secours. La brève défaillance du réseau Internet en Asie du Sud-Est en décembre 2006 et celle des communications à la Nouvelle-Orléans après le passage du cyclone en 2005 sont peut-être un avertissement pour l'avenir proche. Même si le pre-

mier exemple n'est pas lié au changement climatique, ces événements montrent ce que serait l'ampleur d'un désastre privant les populations des pays développés d'accès à l'électricité et aux communications.

Une autre conséquence importante du changement climatique concerne la disposition d'eau douce. La régularité du cycle de l'eau sera sans doute profondément affectée et la disponibilité de l'eau douce sera un problème majeur à grande échelle, diminuant déjà dans certaines régions du monde les rendements agricoles. Certaines situations conflictuelles, comme entre la Turquie et l'Irak, ou même entre Israéliens et Palestiniens, intègrent la compétition pour l'eau douce. Il est vrai, par contre, que les pays riches du Moyen-Orient pourront produire de l'eau douce pour l'alimentation humaine, par dessalement de l'eau de mer, aussi longtemps que le marché du pétrole sera prospère, avec des coûts généralement inférieurs à un euro/m³, alors que leurs voisins ne le pourront pas tous, surtout si leur population est nombreuse.

On considère approximativement qu'une élévation de la température moyenne de 1 °C déplace les zones climatiques de 200 km en direction des pôles, et 2 °C de 400 km. En Australie on enregistre la cinquième année de grande sécheresse dans le bassin de la rivière Murray, ce qui réduit la production agricole à seulement 20 % de son niveau antérieur. La disposition d'eau douce pour l'agriculture, si elle persiste à faire défaut dans certaines régions du Pakistan et dans les républiques d'Asie centrale, est de nature à diminuer considérablement le PIB agricole de ces régions et ne pourrait pas être réglée par une simple gestion de l'eau.

Agriculteurs et éleveurs du Sahel voient périliciter leur récolte et mourir leur bétail, avec une conséquence directe : la malnutrition s'installe avec tous ses risques pour la croissance des enfants, la famine suit. En Inde, c'est la « révolution verte » qui a permis de nourrir le fort accroissement de population. Qu'en sera-t-il si une perturbation climatique majeure rend ces pratiques moins efficaces ? La production de nourriture pour 3 milliards d'habitants supplémentaires (6,2 milliards maintenant, 9 milliards en 2050) ne permet pas de « perdre » des quantités importantes de nourriture, alors qu'il faudrait massivement « augmenter » cette production d'ici 2050.

D'autres risques pour la santé des populations viennent d'une expansion géographique de certaines maladies, en particulier les maladies à vecteurs. Ce problème n'est pas traité dans le présent document.

La fréquence globale des catastrophes « naturelles » brutales (inondations, tempêtes, cyclones) sera certainement accrue. Les compagnies d'assurance et de réassurance ressentent déjà le problème au point de parler de ne plus assurer ces risques, même si le coût total pour cette profession est largement minoré parce qu'une fraction notable des victimes n'est pas assurée, comme à la Nouvelle-Orléans. Quant à la prévision à long terme de ces catastrophes, les modèles nous aident peu à les prévoir ou à les localiser : les modèles sont destinés à représenter des valeurs moyennes (réchauffement, montée de la mer), et non des événements singuliers et abrupts. Même en reprenant toutes les mesures collectées pendant le premier semestre 2003 il n'est pas possible de « prévoir » la cani-

cule qui a frappé la France en août de cette même année. Seuls, les modèles météorologiques à l'échelle de quelques jours permettent de lancer un avis d'alarme, mais il est trop tard pour bâtir ou surélever une digue.

L'étude de l'AIE montre que des mesures sévères et largement respectées permettraient – si l'on arrive à les appliquer – de freiner l'augmentation, en apparence inéluctable, des émissions de gaz à effet de serre dans les années qui viennent et peut-être de ramener le niveau des **émissions** de CO₂ au niveau actuel vers le milieu du siècle. Mais, nous l'avons dit plus haut, les **concentrations** de ce gaz dans l'atmosphère ne reviendront pas au niveau actuel, compte tenu de la durée de vie séculaire du CO₂ dans l'atmosphère, et continueront donc à augmenter. Il en sera de même pour les températures et les phénomènes abrupts.

13. LA SCIENCE ET LA TECHNIQUE NE SONT PAS SEULES CONCERNÉES

Trois ressorts majeurs de notre avenir devront faire l'objet d'une investigation approfondie, scientifique et technique, sociologique et financière. La première investigation a fait l'objet des chapitres 3 à 11. L'ambition affichée des programmes est grande, mais les travaux effectivement menés dans le domaine de l'énergie pour réduire les émissions de GES restent modestes en face de la gravité de la situation et de l'ampleur des problèmes. Depuis notre précédent rapport, la situation n'avait pas évolué beaucoup dans le domaine de la recherche en fin d'année 2006, autant que l'on peut en juger.

Chaque atterroissement, chaque lenteur ne fera qu'aggraver et alourdir la nécessité et le poids de l'effort à fournir.

Il importe en premier lieu de ne pas laisser échapper l'occasion, encore à notre portée, de stabiliser la concentration des GES à environ 550 ppmv éq. Si, au contraire, notre action au cours des 15 ou 20 prochaines années est faible ou nulle (*business as usual*) cette occasion ne se représentera plus.

Il est urgent de développer un **effort de recherche scientifique et technique** très ambitieux pour pallier tous les manques évoqués dans le texte, tant sur le climat qu'on ne connaît pas suffisamment pour les besoins prévisionnels, que sur les technologies de l'énergie (chapitres 3 à 11). Le déficit de recherche dans ces derniers domaines est tragique et reflète bien l'absence d'une prise de conscience effective par les décideurs politiques.

On est alors amené à placer au premier plan l'importance du **système éducatif**, les budgets dévolus à l'éducation et à la **recherche**, la formation de spécialistes dans toutes les branches de l'énergie et de **doctorants** capables de travailler efficacement à faire progresser ces thèmes, scientifiques et techniques, ainsi que les problèmes sociologiques ci-dessous.

*
* *

L'évolution de la situation pourrait faire apparaître des problèmes **socio-économiques et politiques** importants que nous avons encore beaucoup de mal à appréhender. À un niveau

plus modeste, mais essentiel, c'est aussi dans ce domaine que réside la principale clef des économies d'énergie, qui dépendent moins de nouvelles avancées scientifiques ou techniques que d'une information sincère, qui emporte la conviction de la population des pays développés, où ce problème est prioritaire.

Le rôle des gouvernements sera donc multiple :

- fournir une information claire et sincère emportant l'adhésion de la population ;
- initier la coopération internationale ;
- définir une politique à long terme, planifier des étapes ;
- assister les personnes les plus démunies.

Pour être en mesure de faire face à des événements imprévisibles, et être capables de réagir vite, il importe avant tout de considérer que, dans cette perspective difficile, les valeurs sociales sont plus importantes que les valeurs économiques. Ce sentiment existe bien dans les pays scandinaves, mais il n'est guère répandu dans les autres parties du monde. Un exemple encourageant nous vient des Pays-Bas : ce pays a choisi de renoncer à certains polders (et donc à une fraction de son PIB) pour rendre à la rivière son « bassin de crue » et éviter ainsi l'inondation des villes situées en amont. À la Nouvelle-Orléans, par contre, les projets de rehausser les digues n'avaient jamais été réalisés en 2005 (et ne le sont toujours pas). Quelle valeur économique peut-on attribuer aux 1 200 morts, à la longue attente des secours et des mesures d'aide après le cyclone Katrina, et à la crise sociétale qui l'a suivi ?

On peut aussi craindre d'importants déplacements de populations : les personnes évacuées de la Nouvelle-Orléans vers le Texas et d'autres États voisins ne reviendront pas toutes dans leur habitat antérieur. La submersion des zones les plus basses du Bangladesh poserait un problème majeur d'accueil de plusieurs millions de réfugiés. L'installation et le soutien d'immenses camps de personnes déplacées à l'intérieur d'un pays déjà pauvre seraient un problème d'une difficulté extrême pour la collectivité internationale. Les États insulaires des îles Maldives et de l'océan Pacifique ont certainement une population moins nombreuse, mais, pour certains d'entre eux, c'est la totalité de leur habitat qui serait affectée.

Il n'existe pas d'échelle permettant de comparer, d'une part les apports positifs d'une agriculture exportatrice en Amérique du Sud, au prix de la disparition de la forêt, ou les avantages du transport routier du fret en Europe, ou ceux de la surconsommation d'énergie aux États-Unis, et d'autre part la famine des éleveurs et agriculteurs en Afrique ruinés par la sécheresse ou la misère d'éventuels camps de réfugiés. Il en est de même pour un traitement équitable de la génération actuelle et des générations futures, ou encore la répartition des revenus dans une situation perturbée par les effets climatiques et par les mesures de défense contre ces effets. Les modèles destinés à évaluer les conséquences de l'évolution climatique et les moyens d'adaptation ne prennent pas en compte les « effets non marchands » (santé humaine, environnement, personnes déplacées). Les seuls mots qui viennent à l'esprit sont ceux de morale, d'éthique, un des domaines les plus sensibles de l'action humaine. Un **partage**

équitable des rôles entre nations et générations sera une tâche difficile. Mais la contribution de tous sera nécessaire et, encore une fois, nous n'avons qu'une seule atmosphère, que nous transmettrons aux générations à venir, puisque la durée de vie des GES émis par l'homme est au moins séculaire.

LES CHOIX ET LES PIÈGES

L'équilibre à long terme de l'offre et de la demande exige que les principaux pays – et/ou la communauté internationale prennent des décisions claires et les affichent dans le domaine global de l'énergie. En économie libérale, les prix jouent un rôle majeur pour équilibrer ces échanges, surtout si la ressource devient plus rare ou plus coûteuse à traiter pour limiter les émissions de GES. Or, dans plusieurs pays, on se hâte de masquer la hausse des produits pétroliers par des subventions, des détaxations ou autres facilités fiscales.

Les divers scénarios exposés aux instances internationales ou nationales présentent un biais systématique qui pèse sur les calculs et les scénarios présentés : l'évaluation du prix de l'énergie de référence, le baril d'équivalent pétrole (BOE), qui est souvent dans ces rapports de l'ordre de 40 \$ vers 2030 et 60 \$ en 2050, et quelquefois moins. Or, le prix actuel est déjà de l'ordre de 60 \$; il peut dépasser 70 \$ mais ne descend plus guère à 50 \$. De même, le prix de la tonne de CO₂ évitée n'est généralement pas pris en compte ; quand il l'est, c'est sur la base des ETS (voir ci-dessous) qui est actuellement dérisoire par rapport aux valeurs techniquement plausibles. On comprend aisément qu'opérer des choix sur ces bases entre diverses filières de R&D est peu éclairant.

Le problème des **investissements** à consentir, si l'on compte que les pays qui le pourront accepteront des sources d'énergie nouvelles ou mal ressenties jusqu'ici (centrale nucléaire, ferme éolienne), devient rapidement crucial. La capture et le stockage du CO₂, par exemple, coûteront cher et demanderont des réponses à de nombreux problèmes techniques qui ne sont pas tous prévus. De leur côté, les centrales nucléaires demandent des apports importants pendant la période de construction, même si le coût de production du kWh est ensuite le plus bas de tous. Comment les actionnaires accepteront-ils des investissements beaucoup plus élevés pour un réacteur nucléaire ou pour une centrale à charbon comprenant tout ce qui est nécessaire pour séparer le gaz carbonique et le stocker en situation géologique pérenne, alors qu'ils restent en droit de construire une centrale classique au charbon, sans s'embarasser des gaz à effet de serre ? Il convient néanmoins de garder à l'esprit que la maîtrise technique de ces procédés complexes donnera aux pays et aux industriels concernés une position dominante à l'échelle mondiale, hautement valorisable.

Toutes les entreprises ne seront pas sensibles à nos réflexions. Même si leur pays a pris des décisions courageuses, préconisant la construction de centrales nucléaires ou de centrales thermiques avec stockage du CO₂, la déréglementation garantit aux industriels, qui ne voudraient pas l'accepter, la possibilité d'installer leur site de production d'électricité dans un autre État européen que celui de leurs clients. Ils trouveront aisément un État voisin ou une province très attachée au charbon ou au lignite, qui leur assurera des droits d'émission pour toute la

durée de vie d'une centrale traditionnelle, sans s'embarasser du stockage de CO₂.

Les évaluations actuelles des besoins en électricité correspondent, dans les 25 ou 30 années à venir, à un effort d'installation d'environ 800 GW aux États-Unis, 800 GW en Chine et 600 GW en Europe (on évoque pour cette dernière 1 000 milliards d'euros), si l'on veut assurer l'équilibre à cet horizon. Diverses réflexions, où interviennent aussi bien des considérations financières que l'illusion de la surcapacité, laissent penser que ces investissements seront difficiles à réaliser dans le cadre d'un développement durable et que les producteurs choisiront des investissements moins coûteux, même au prix d'une aggravation des désordres climatiques. Il faut observer notamment que le prix du carbone émis **n'est pas pris en compte** dans les décisions d'investissement. Pour l'Allemagne seulement, les investissements envisagés représentent environ 110 milliards d'euros pour bâtir 48 GW de centrales thermiques, sans faire intervenir la capture/stockage du CO₂.

Un problème connexe est celui de « l'exportation » ou « délocalisation » hors d'Europe des émissions carbonées. À l'échelle mondiale, le transfert des fabrications concerne actuellement surtout les productions utilisant beaucoup de main d'œuvre. La délocalisation des industries très consommatrices d'énergie, comme la métallurgie, vers des pays en forte croissance, non encore engagés dans la lutte contre l'effet de serre, est une variante du même problème. Un tel choix semble ignorer que tous les hommes n'ont qu'une atmosphère, et que nul pays ne pourra se sauver seul.

Les investissements des 20 prochaines années gagneraient à être organisés à l'échelle européenne pour assurer notre compétitivité dans le respect de l'environnement. De plus, ils auront une influence déterminante sur la situation de la planète au milieu du siècle et même bien au-delà, si les États laissent construire de grandes centrales thermiques, sans aucun contrôle des émissions, capables de fonctionner pendant 40 ou 60 ans. **S'il est difficile d'empêcher la construction de telles installations, il est encore bien plus difficile de les fermer prématurément.**

Le surinvestissement dans des structures de grande longévité et fortement émettrices de CO₂ est l'un des plus graves dangers pour la planète. Il risque de verrouiller la situation pendant la période où certains pays s'en tiennent encore à la position *business as usual* (BAU) et nous amènerait avant le milieu du siècle dans la fourchette haute des prévisions pessimistes.

Le rôle des **droits d'émission** (ETS, *emission trading scheme*) est encore ambigu. L'industrie chimique, le transport aérien et le transport routier ne sont pas actuellement dans ce système de quotas et il est urgent de les inclure. Le prix de l'ETS, qui se situait vers 25-30 €/t de CO₂ lors de son introduction, puis 15 à 20 €/t début 2007 n'était plus que de 0,01 €/t de CO₂ fin février 2007. Un observateur a comparé la rapidité et l'ampleur de sa chute à celle des assignats sous la Révolution. Le prix de l'ETS est intégré dans les opérations courantes, mais il ne l'est pas encore dans les décisions d'investissement. De toute manière, s'il devait rester à un cours aussi dérisoire, cela signifierait que l'on peut continuer à construire des centrales ther-

miques conventionnelles à l'exclusion de tout captage du CO₂, sans aucunement tenir compte des accords ou des réglementations nationaux ou internationaux.

De plus, on ignore si les nouveaux pays entrés dans l'Union européenne recevront largement des ETS (abondance ou rareté de ces droits), ce qu'il en sera des vieilles installations déclassées, ainsi que ce que les ETS deviendront dans l'après-Kyoto (post-2012). Les industriels pourront-ils accumuler des droits achetés ou acquis et les « transférer » dans le temps ?

La comparaison du prix de l'ETS avec le coût que pourrait représenter la séparation et la capture du CO₂ en sortie d'une centrale thermique, ou d'une usine de métallurgie lourde, et son stockage en couches profondes d'aquifères salins et pour une longue durée, n'est pas aisée. Le cours actuel de l'ETS paraît dérisoire à côté de la complexité de ces procédés. Les spécialistes pensent que le coût technique de la tonne de CO₂ évitée serait plutôt de l'ordre de 100 à 200 €/t (le rapport Stern envisage 85 €/t de CO₂), ce qui changerait complètement les données du problème.

On peut aussi observer que le marché des ETS n'est pas une fin en soi. Le but est de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Au vu des résultats obtenus, il conviendrait de déterminer quel système est le plus efficace : taxe, réglementation ou marché de permis. Il est également important de se prémunir contre la « délocalisation » du CO₂, c'est-à-dire le transfert des installations vers un pays voisin moins soucieux des contraintes d'environnement, pour

importer ensuite de l'énergie électrique ou encore importer de pays lointains des produits industriels à fort contenu énergétique.

Le prix du kWh électrique est un élément tout aussi important que les investissements, tant pour les particuliers que pour la grande industrie. Il existe actuellement un écart considérable dans le coût technique du kWh, le plus faible étant celui du nucléaire (0,03 €) et le plus élevé, parmi les sources exploitées sur une grande échelle, le kWh éolien (0,06 à 0,09 € à terre et à 0,13 € en offshore). En Allemagne, par exemple, le remplacement des centrales nucléaires existantes par des centrales thermiques, au charbon et au lignite, se traduira inévitablement par une hausse des prix (0,04 € sans capture/stockage du CO₂). Si elles doivent être « propres », c'est-à-dire si l'opérateur de la nouvelle centrale est tenu de séparer et stocker le CO₂ (lignite et charbon sont les deux sources fossiles les plus émettrices de ce gaz pour 1 kWh produit), l'écart sera plus grand et pourrait atteindre 0,05 à 0,06 € par kWh. Le risque est alors de voir disparaître d'Europe la grande industrie avec un fort contenu énergétique, comme celle de l'aluminium. L'un des industriels de ce domaine a pensé s'installer en Islande, grâce à l'énergie géothermique qui y est disponible en abondance. D'autres pourraient délocaliser leurs usines vers des pays d'Asie moins impliqués dans la lutte contre le changement climatique.

14. CONCLUSIONS

Tous les peuples du monde sont également face à un défi commun qui risque de modi-

fier radicalement notre mode d'existence, notre niveau et nos conditions de vie, plus que tout autre événement, à la réserve d'une troisième guerre mondiale. Les réponses à cette mise en garde s'étalent depuis l'incrédulité et l'indifférence jusqu'au fanatisme écologique. Beaucoup préfèrent ne pas croire à ce qu'on sait, puisque nous n'avons pas de solution acceptée par tous.

Dans l'état actuel des connaissances, toutes les sources d'énergie seront mises à contribution. Cependant, un ordre de priorité et des conditions nécessaires à leur mise en œuvre devront être observés :

En Nucléaire	<i>Gestion des déchets nucléaires</i>
Charbon	<i>Séparation et gestion à long terme du CO₂</i>
Hydraulique Géothermie	<i>Les sites se font rares et sont souvent éloignés de la demande la plus forte</i>
Biomasse	<i>Ne pas entrer en compétition avec la production de nourriture pour 9 milliards d'habitants au milieu du siècle</i>
Autres énergies	<i>Majoritairement intermittentes (éoliennes, photovoltaïque), donc limitées à une fraction du parc (15 à 20 % ?). Le stockage de l'énergie changerait la donne</i>

Nous ne sauverons notre mode de vie et nos moyens d'existence ni avec l'ignorance, ni avec l'idéologie, ni avec des déclarations ou des

incantations. L'idéologie ne saurait prévaloir sur la science, la technique et l'économie. C'est dans ce sens que l'Europe doit prendre l'initiative d'une action internationale majeure, comprenant au moins les États-Unis, la Chine, l'Inde, le Japon, la Russie et l'Union européenne, et qui soit d'une ampleur bien plus grande que le protocole de Kyoto. En appui de ce dessein, il est grand temps de décider d'une stratégie ambitieuse de recherche scientifique, technique et socio-économique, notamment sur les points que nous avons examinés. Il importe de susciter l'engagement d'un effort concerté, à l'échelle des problèmes, pour la mettre en

œuvre : ces programmes doivent être menés en association européenne ou internationale. Nous sommes dans une voie énergétique à la fois précaire, puisque notre sécurité d'approvisionnement n'est pas assurée, ruineuse si les prix du pétrole et du gaz poursuivent leur ascension coutumière, et polluante de la façon la plus pernicieuse, puisque nul ne ressent directement quelques dizaines de ppm de gaz carbonique supplémentaires. Il est encore temps d'y porter remède. Tout retard sera coûteux et désastreux, et l'inaction qui se cache derrière la formule *business as usual* serait une **politique inacceptable**.