

ACADÉMIE des SCIENCES

RECOMMANDATIONS

PERSPECTIVES ÉNERGÉTIQUES

Recommandations adoptées le 1^{er} mars 2005

Groupe de travail

Membres : Michel Combarrous
Robert Guillaumont
Pierre Joliot
Guy Laval
Michel Pouchard
Ionel Solomon
Bernard Tissot

Président : Bernard Tissot
Secrétaire : Robert Guillaumont

L'humanité doit faire face à deux problèmes majeurs pour ce siècle : l'épuisement progressif des combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon) qui fournissent actuellement plus de 80% des énergies primaires commercialisées dans le monde et le changement climatique lié aux émissions de gaz à effet de serre (25 Gt de CO₂ par an issues des seuls combustibles fossiles). L'évolution du climat est la menace la plus grave pour notre civilisation ; elle appelle une prise de conscience planétaire. Le protocole de Kyoto est un premier pas, mais il est très insuffisant. La dérive séculaire du climat affecte tous les pays, riches et pauvres. Nul pays ou continent ne pourra se sauver seul. Ce sont probablement les bouleversements climatiques violents et inacceptables pour la population (sécheresse, canicule, tempêtes ou cyclones fréquents) qui seront l'amorce d'actions d'ampleur de la part des pays industrialisés, même si ceux-ci supportent mieux les épisodes climatiques brutaux que les pays pauvres.

La demande en combustibles fossiles et d'une façon générale en énergie ira globalement en augmentant. La Chine et l'Inde consommeront en 2020 autant que l'Amérique du Nord et l'Europe aujourd'hui. A cet horizon, dans un scénario de liberté totale, la consommation mondiale sera de 50% plus élevée qu'aujourd'hui. La population mondiale, de plus de 6 milliards actuellement, serait au milieu du siècle de 8 à 10 milliards et la demande mondiale d'énergie en 2050 aux environs de 20 Gtep/an, soit le double de la situation actuelle. La demande électrique pourrait augmenter plus rapidement et atteindre trois fois la valeur présente.

Le pétrole et le gaz représentent 60% de l'énergie primaire consommée dans le monde. A ce rythme, les réserves prouvées actuelles seront épuisées au milieu du siècle et les ressources ultimes, que des apports nouveaux de la science et de la technique permettront de mobiliser, seront épuisées avant la fin du siècle. Or, le pétrole est très difficile à remplacer dans ses principales applications, particulièrement dans les transports. Dans ce domaine, une transition vers une autre source d'énergie ne pourra se faire que progressivement et sur plusieurs décennies, vers le milieu du siècle.

Le charbon constitue la principale ressource en énergie fossile. La Chine et l'Inde, en forte croissance économique, l'exploitent largement. Sa disponibilité et son coût modéré en feraient un relais naturel des hydrocarbures. Mais les problèmes d'environnement sont lourds. Ramené à un contenu énergétique identique, le charbon libère deux fois plus de CO₂ que le gaz naturel. La capture et le stockage du CO₂ sont des conditions nécessaires pour permettre son utilisation intensive, mais leurs faisabilités sont loin d'être établies.

Seules, les énergies renouvelables, l'énergie solaire et ses dérivées—éolienne, hydraulique, biomasse—, la géothermie et le nucléaire ne produisent pas de gaz à effet de serre et permettraient à l'humanité d'échapper au destin qu'elle se forge. Mais nous sommes incapables de remplacer, à court terme, pétrole, gaz et charbon.

Il faut donc tirer parti de toutes les formes d'énergie, et nous ne pourrons nous passer d'aucune d'entre elles dans les prochaines décennies, pourvu que ce soit dans le respect de l'environnement, c'est à dire en minimisant les contraintes qu'elles imposent en termes de nuisance et de déchets.

Nous devons en conséquence mener une politique courageuse et volontariste, et déployer à temps un intense effort de recherche, dans tous les domaines de production, de conversion et d'utilisation de l'énergie, pour ne pas nous retrouver dès 2020 devant une situation devenue ingérable, en particulier avec des émissions de CO₂ accrues de 50%.

Il convient d'abord d'insister sur l'importance de poursuivre et d'intensifier les recherches relatives au climat. Quels que soient les choix qui seront retenus, elles sont une nécessité.

Dans le domaine propre de l'énergie, plusieurs problèmes majeurs ne semblent pas recevoir l'effort de recherche qu'ils méritent :

1. La capture et le stockage pérenne (séquestration) du gaz carbonique sont un sujet prioritaire : lui seul permettrait de poursuivre l'utilisation du pétrole, du gaz et du charbon en limitant la dégradation du climat, tout en assurant une transition acceptable par les usagers. Les discours sur ce thème sont innombrables, mais le contenu et la portée des recherches menées jusqu'ici sont encore peu convaincants. La possibilité de stockages souterrains ou sous-marins d'une taille capable de recevoir chaque année de 30 à 70 Gt supplémentaires de CO₂, pour des siècles ou millénaires, est loin d'être établie tant du point de vue scientifique et technique qu'économique. De plus, il faut être conscient qu'il s'agit, pour l'homme, d'intervenir dans le cycle du carbone, ce qui pose des problèmes scientifiques complexes.

2. Dans le domaine des transports, la capture du CO₂ produit par les carburants à bord des véhicules n'est pas envisageable. Or, le parc mondial de véhicules routiers pourrait doubler au cours des 30 ou 40 prochaines années. De plus, l'épuisement des réserves de pétrole interviendra au cours du siècle. On est donc amené à faire des économies d'énergie (transport collectif, transport fluvial, ferro-routage) et à préparer le relais des carburants liquides actuels par des fluides ne produisant pas de CO₂. Il s'agit là d'un des points durs de la recherche. Le meilleur candidat paraît être l'hydrogène, mais les conditions les plus favorables pour sa production et son usage à moyen terme sont loin de faire l'unanimité.

3. Plus de la moitié de la population de la Terre vit déjà dans des agglomérations urbaines. La fourniture d'électricité à près de 400 mégapoles de plus d'un million d'habitants, dont déjà une vingtaine de plus de 10 millions d'habitants, paraît hors de portée des sources d'énergie renouvelables, souvent *diffuses* à la réserve des très grands barrages, pour lesquels les sites disponibles deviennent rares. Il reste alors deux possibilités seulement d'énergie *concentrée* : les centrales nucléaires (avec une réponse au problème des déchets) et, pour quelques décennies, les centrales thermiques utilisant les combustibles fossiles, mais avec la capture et le stockage du CO₂, ce qui est loin d'être acquis.

4. L'énergie nucléaire paraît être la solution la plus robuste pour fournir de l'électricité *concentrée* aux grandes villes, sans accroître les désordres climatiques. Elle doit donc être un objectif majeur des recherches énergétiques. La poursuite de l'effort entrepris devra permettre de donner un exutoire ultime aux déchets nucléaires. Les réacteurs de fission actuels seront perfectionnés dans le sens d'une sûreté accrue. La recherche sur les réacteurs du futur devra prendre en compte l'incinération de leurs propres déchets et le rôle futur de l'hydrogène dans notre civilisation. On cherchera aussi à valoriser la majeure partie de l'uranium (uranium 238) grâce à de nouveaux réacteurs à neutrons rapides, ce qui portera les réserves de combustible à l'échelle des millénaires.

5. La recherche sur la fusion nucléaire (ITER) devra faire l'objet d'un effort vigoureux, afin de valider ses avantages supposés en matière de sûreté, d'impact environnemental et de prolifération. Mais vouloir évaluer dès maintenant la contribution de la fusion à la solution du problème énergétique mondial relève de la spéculation.

6. Le stockage de l'hydrogène en grandes quantités doit être étudié notamment en situation géologique (cavité, aquifère). La faisabilité, du point de vue technique ou économique, de stocker l'hydrogène sur une base saisonnière, comme on le fait pour le gaz naturel, doit être comparée à celle de stocker le CO₂ indéfiniment, en créant de nouveaux stockages chaque année.

7. Les éoliennes actuelles sont capables de produire des puissances de plusieurs MW. L'acceptabilité de leur implantation n'est pas toujours acquise. Cette objection s'applique moins pour des sites en haute mer, mais le coût augmente alors

considérablement. Leur principal problème concerne les périodes d'indisponibilité, qui nécessitent de disposer d'une capacité de production en réserve par une centrale thermique (avec tous les problèmes de captation de CO₂ ou de déchets de celle-ci). Cette production pourrait être un complément intéressant jusqu'à 10 ou 15% de la fourniture d'électricité. Au-delà, elle pose le problème du stockage saisonnier de l'énergie.

8. Parmi les biomasses envisagées, l'utilisation des ressources forestières pourrait recevoir un plus grand développement, sans entrer en compétition avec les cultures vivrières. Des recherches complémentaires seraient souhaitables pour étudier la préparation de gaz de synthèse à partir de la biomasse ligno-cellulosique, permettant ensuite la synthèse sélective de carburants. La production de biocarburants à partir de cultures dédiées est par nature limitée, car elle occupe préférentiellement des terres arables et nécessite un apport d'énergie substantiel pour l'exploitation et la fabrication du carburant, notamment en cas d'une culture intensive. Une analyse comparative devrait être menée avec d'autres types d'allocation des sols : alimentation humaine, peuplements forestiers, etc., incluant un bilan de la consommation d'énergie pour la culture, comparée à l'énergie produite. Dans cette voie il faudrait chercher à valoriser le plus possible le carbone des plantes.

9. Dans les zones rurales et isolées des pays en développement, une quantité – même faible – d'électricité photovoltaïque permettrait de satisfaire les besoins de première nécessité, tels que : éclairage, pompage d'eau potable, stockage des vaccins, alimentation de petites antennes médicales, rupture de l'isolement des populations (enseignement). Des avancées sur les matériaux permettraient d'abaisser le coût des capteurs solaires. Ce problème concerne près de 2 milliards d'habitants qui ne sont pas reliés à un réseau électrique (et ne le seront peut-être jamais). Il relève autant du devoir humanitaire et de l'éthique que de la science et de la technique.

10. Le stockage temporaire de l'électricité serait une véritable percée. En effet, les énergies nucléaire, éolienne ou solaire – qui ne produisent pas de CO₂ – ne se prêtent guère au stockage d'énergie en grandes quantités. Les dispositifs indirects de stockage massif par voie hydraulique (barrages utilisés en sens inverse) sont vite saturés. On est actuellement très limité par les batteries, malgré les progrès réalisés. Le stockage de l'électricité permettrait de donner un plus grand développement aux énergies intermittentes, éolienne ou photovoltaïque. D'une façon générale le stockage de l'énergie, quelle qu'en soit la forme (électricité, hydrogène, chaleur) aura un rôle central à jouer pour remplacer celui joué implicitement jusqu'ici par le stockage du pétrole ou du gaz. Bien que peu évoqué dans les priorités, il s'agit là d'un problème de grande importance dont la solution est loin d'être évidente.

En France et en Europe, la vision politique de production d'énergie n'est pas encore prise en charge à sa réelle valeur, malgré une certaine conscience de la gravité des phénomènes au sein de la population. Diviser par deux en 2050 la consommation française de combustibles fossiles serait déjà très difficile, à moins d'un rapide et profond changement de nos choix de consommation d'énergie (en particulier dans les transports) et d'un effort de recherche considérable. La diviser par quatre paraît irréaliste, puisque la France, à la différence des autres pays, a déjà enregistré le bénéfice du passage de l'électricité produite à partir des combustibles fossiles vers l'électricité nucléaire qui n'émet pas de CO₂.

Une évolution énergétique majeure, en Europe comme dans le monde, est inévitable au cours du siècle. Pour qu'elle ne soit pas brutale et douloureuse, un processus de recherche fondamentale et de développement technologique doit être amorcé dès maintenant, dans tous les domaines de production, de stockage et de l'usage de l'énergie, moyennant un important effort supporté par de grands programmes de recherche.

PERSPECTIVES ENERGETIQUES

Rapport d'étape
du Groupe de travail « ÉNERGIE »
de l'Académie des sciences

18 janvier 2005

Groupe de travail :

Membres : Michel Combarous
Robert Guillaumont
Pierre Joliot
Guy Laval
Michel Pouchard
Ionel Solomon
Bernard Tissot

Président : Bernard Tissot

Secrétaire : Robert Guillaumont

1. INTRODUCTION

Les deux principales contraintes physiques, difficiles à éviter, qui conditionneront l'utilisation de différentes sources d'énergie au cours du siècle sont (i) le caractère fini et non-renouvelable des ressources en énergie primaire les plus communes utilisées pour produire les formes d'énergie que nous consommons et (ii) le changement climatique. La prise en compte de ce dernier s'imposera à tous lorsque les catastrophes « naturelles » qui en résultent dépasseront ce que l'humanité est capable de supporter, tant par leurs conséquences humaines et sociales que par le coût des pertes économiques subies.

L'épuisement progressif des combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon) résulte du caractère limité des réserves et de la consommation sans cesse croissante qu'en font les hommes. Même la consommation de charbon, dont la part décroît un peu en valeur relative, n'a jamais été aussi élevée en valeur absolue. Les conséquences de la raréfaction des principales sources actuelles d'énergie primaire se feront inévitablement sentir dans le domaine des prix, ainsi que par un risque de pénurie et par une moindre sécurité des approvisionnements. Il n'est pas exclu que ces trois éléments engendrent en outre des problèmes politiques entre les nations.

Le changement climatique déjà amorcé est particulièrement lié aux émissions de gaz à effet de serre (GES). Les études menées par un groupe international d'experts (GIEC/IPCC) laissent peu de doute sur la nature du phénomène. Les événements déjà enregistrés font craindre que l'ampleur des changements soit dans la fourchette haute des prévisions. L'application du protocole de Kyoto, souvent évoqué, ne suffirait pas à y remédier.

On a pu se demander laquelle des deux contraintes suivantes deviendrait la première insupportable pour l'humanité : envolée des prix liée à la raréfaction du pétrole ou du gaz ou atteintes à l'agriculture, à la santé et au mode de vie liées au changement climatique. L'expérience des crises pétrolières de 1973-74 et 1979-80 d'une part, finalement supportées malgré une hausse considérable des prix, et des catastrophes naturelles des cinq dernières années d'autre part, laisse penser que c'est l'évolution climatique qui sera le facteur décisif. Mais il est plus difficile de prévoir quand ces catastrophes seront ressenties comme inacceptables.

L'énergie totale consommée dans le monde en 2002 est environ 10 milliards de tonnes d'équivalent pétrole (10 Gtep). Sur cette quantité, les combustibles utilisés hors circuits commerciaux représentent peut-être 10% (bois, déchets ménagers et animaux, biogaz utilisés à l'échelle du village). Les énergies d'origine hydraulique et nucléaire contribuent pour 9%. Les émissions annuelles de gaz carbonique (GES le plus abondant et de durée de vie séculaire dans l'atmosphère) liées à la combustion des combustibles fossiles approchent de 25 milliards de tonnes (25 Gt). Ces valeurs ne comprennent évidemment pas les émissions liées à la déforestation.

De nombreux rapports et études touchant aux domaines de l'énergie ont été déjà présentés par d'éminents spécialistes. L'accent y est souvent mis sur les aspects économiques, technologiques ou sociétaux. Des prévisions de consommation à l'échelle du siècle sont parfois présentées. On peut douter de leur réalisme. De plus, l'aspect scientifique qui sous-tend les possibilités réelles des scénarios évoqués est souvent laissé dans l'ombre.

Les pays en forte croissance et très peuplés, comme la Chine et l'Inde, deviendront très vite des acteurs majeurs. On estime que ces deux pays consommeront en 2020 autant qu'actuellement l'Union Européenne et l'Amérique du Nord réunies. L'avenir des pays plus pauvres est difficile à cerner. Les considérations d'éthique nous font une obligation de ne rien entreprendre qui puisse empêcher ou freiner leur développement, et un devoir moral d'y contribuer.

Ce rapport examine les perspectives offertes par les différentes sources d'énergie et les questions scientifiques qui se posent à leur sujet, voire les verrous à éliminer avant que l'on puisse raisonnablement compter sur l'exploitation des diverses ressources, dans le respect de notre environnement.

La part de chaque énergie à une époque donnée dépendra de la possibilité de tirer le meilleur profit des sources déjà largement exploitées, pour limiter leur épuisement et les émissions de GES, de la possibilité de mettre réellement en œuvre les autres sources à un niveau pouvant assurer les relèves nécessaires et de l'ampleur des économies d'énergie dans les divers domaines d'utilisation. Quels que soient les scénarios pessimistes ou optimistes à propos des besoins et de la manière de les satisfaire, l'Académie doit se poser la question de savoir si la Science sera prête à temps.

2. LES ENJEUX ET LES ÉCHEANCES

2.1. Démographie, développement et demande énergétique

La demande mondiale d'énergie dépendra d'abord du nombre d'habitants de la Terre et du niveau de développement atteint dans les diverses régions au cours du siècle qui commence. Ce sont là des domaines qui relèvent, pour l'essentiel, des sciences humaines. Nous pouvons cependant, sur la base des observations déjà faites, avancer des prévisions à moyen terme sur le rôle de ce facteur.

L'élément, connu et important, lorsqu'on souhaite faire des projections, au moins à court, voire moyen terme correspond à l'observation suivante : depuis trente ans, c'est à dire le début des années 1970, la consommation d'énergie moyenne annuelle, ramenée à chacun des habitants de notre planète, est pratiquement constante. Pour l'ensemble des vecteurs énergétiques que sont les combustibles fossiles, l'hydraulique, le nucléaire, le bois énergie et les autres sources, en particulier renouvelables, cette consommation s'établit à 1,6 tep/an/hab, sans variation significative d'une année sur l'autre.

Cette observation, qui peut surprendre, est due à la conjonction de deux effets contraires : les pays gros consommateurs ne réduisent pas significativement les consommations individuelles, les moins développés consomment plus d'énergie, mais le poids relatif, en terme de population, des « nantis » diminue. Les ampleurs relatives de ces deux effets sont telles qu'apparaît, dans la période concernée, un effet de compensation.

Ce résultat constitue en lui-même le fond d'une méthode robuste de prédiction des évolutions des consommations d'énergie, à court ou moyen

terme (14 ou 15 Gtep à l'horizon 2020, par exemple). L'évolution de la population mondiale devient alors, comme dans de nombreux problèmes d'écologie générale, l'élément clé de premières approximations. Actuellement la population mondiale croît chaque jour de plus de 200 000 habitants (bilan des naissances et des décès).

Ces chiffres donnent alors toute la mesure des efforts à accomplir. Pour maintenir ce niveau moyen de consommation, chaque jour devrait être implanté, de par le monde, un ensemble d'éléments représentant une puissance supérieure à 400 MW et capable de fonctionner à plein temps.

Cette observation appelle bien sûr d'autres interrogations. Le « décollage » de grands pays comme la Chine n'aura-t-il pas des incidences encore plus fortes qui conduiront les indicateurs globaux à ne pas garder la stabilité observée ? Cette stabilité n'est-elle pas la mesure du côté « dramatique » des besoins énergétiques ?

A plus long terme, de près de 6,5 milliards actuellement, nous serions au milieu du siècle entre 8 et 10 milliards. Si l'on suppose que la consommation moyenne s'est accrue de 1,6 à 2 tep/an/hab en 50 ans, la consommation mondiale serait en 2050 aux environs de 20 Gtep/an, soit le double de la situation actuelle. La demande électrique pourrait augmenter plus rapidement et atteindre trois fois la valeur actuelle.

2.2 Les horizons temporels du problème énergétique

Les ressources en énergies conventionnelles comprennent avant tout les combustibles fossiles – pétrole, gaz et charbon, voire l'uranium – dont les ressources ultimes peuvent être évaluées, pourvu qu'on y intègre les ressources qui font appel à des procédés d'exploitation non-classiques, comme les sables bitumineux ou les gisements pétroliers en mer très profonde. Il est donc possible d'en calculer la diminution progressive, dans des scénarios économiques divers. On peut également recenser les possibilités offertes par la géothermie, mais le problème est plus complexe pour les énergies solaire, hydraulique et éolienne, qui empruntent leur énergie à celle reçue actuellement du soleil et sont affectées dans leur répartition par le changement climatique.

Le changement climatique est maintenant considéré comme un fait établi par la plupart des scientifiques du domaine des Sciences de l'Univers. Les modèles prévoient que l'élévation de température sera lente (1 ou 2°C supplémentaires en 2050, 2 à 5°C en 2100) et celle du niveau de la mer encore plus lente, mais elle durera très longtemps. En fait, les modèles travaillent sur des moyennes, et les événements déterminants, de nature à modifier les comportements humains, seront les changements abrupts (tempêtes et cyclones, canicule, sécheresse prolongée, inondations). Ceux-là sont au contraire difficiles à prévoir : on est sûr que ces événements seront plus fréquents et plus violents, mais on ne sait pas les situer dans le temps, à l'échelle de la décennie. On peut penser que ces événements deviendront insupportables pour l'homme avant – voire bien avant – l'épuisement des combustibles fossiles.

D'autres contraintes sur l'utilisation des sources d'énergie primaires sont introduites par la science et la technique. Les filières susceptibles d'être utilisées en 2020 se limitent à celles dont la faisabilité technique est déjà prouvée, même si le passage à l'échelle industrielle nécessite encore des travaux complémentaires. La plupart des nouveaux procédés de conversion du gaz ou surtout du charbon en énergie électrique ou en carburant, avec des rendements accrus, appartiennent encore pour quelques années à cette catégorie. Il en est de même pour l'exploitation des sables bitumineux à moyenne ou grande profondeur. On peut situer vers le milieu du siècle la réalisation industrielle de procédés dont la faisabilité scientifique est acquise, mais dont la faisabilité technique ne l'est pas encore : capture et stockage du gaz carbonique émis par les centrales thermiques, réacteurs nucléaires de fission dits de «*génération 4*». Enfin, l'incertitude est grande sur la date où la fusion nucléaire pourrait faire l'objet d'un prototype industriel, mais on peut espérer disposer d'une réponse vers le milieu du siècle.

Les informations fournies par la science et la technique permettent de distinguer plusieurs périodes au cours du siècle qui commence, selon le taux de consommation des réserves énergétiques non-renouvelables, l'accroissement de la contrainte climatique et les degrés de liberté dont nous pourrions disposer pour choisir nos sources d'énergie primaire. Sur ces bases, on peut considérer trois périodes successives :

- 2005-2020 pour laquelle la démographie est très prévisible ; les procédés d'exploitation ou de conversion d'énergie qui seront utilisés à l'échelle industrielle en 2020 sont tous déjà connus, sinon développés. La demande globale d'énergie à cette date (14 ou 15 Gtep) prévue par les scénarios d'économie libérale (*business as usual*) amènerait dès 2020 une augmentation de 50% des émissions de carbone dans l'atmosphère, justifiant les perspectives les plus pessimistes pour notre avenir climatique. Mais c'est aussi le schéma le plus probable, en l'absence à ce jour d'un accord international pour lutter contre le changement climatique, et au vu des délais que suppose une mutation technologique dans les transports. Seul un large accord, comprenant les principaux pays consommateurs, permettrait de limiter cette demande de façon effective dans un avenir proche ; c'est dans ce sens que doivent œuvrer citoyens et pouvoirs publics de ces pays.
- 2020-2050 pendant laquelle on peut espérer qu'un accord international pour limiter les émissions de gaz à effet de serre sera observé, au moins par les pays les plus gros consommateurs. La demande globale d'énergie pourrait être en 2050 double de la consommation actuelle, soit 18 à 25 Gtep dont 10 à 12 Gtep pour les hydrocarbures. Elle sera cependant freinée par la nécessité de piéger et stocker une part importante du gaz carbonique issu des combustibles fossiles et par le rythme de développement de l'énergie solaire. Les études sur les réacteurs nucléaires définis dans le programme *Génération 4* donneront probablement lieu à une ou plusieurs unités de démonstration vers 2035-2050. On saura alors si ces réacteurs pourront produire de grandes quantités d'hydrogène, et si un débouché des recherches est en vue pour la fusion nucléaire.

- 2050-2100 pendant laquelle la demande en combustibles fossiles sera freinée non seulement par la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi par l'approche de l'épuisement du pétrole et du gaz naturel. La consommation d'énergie annuelle pourrait cependant atteindre ou dépasser le triple de la consommation présente, soit 30 Gtep. Des transferts importants de la demande des transports vers l'électricité ou l'hydrogène sont possibles à cette échelle de temps. Les changements climatiques peuvent amener une demande énergétique accrue pour le conditionnement d'air en été et le dessalement de l'eau de mer : la demande globale d'électricité deviendrait alors très lourde. L'apparition de nouveaux réacteurs nucléaires et la maîtrise du coût de l'énergie solaire pourraient fournir une réponse.

On peut admettre que la science apportera peu d'éléments nouveaux qui puissent recevoir une application industrielle assez tôt pour avoir un impact significatif sur la période 2005-2020. Les actions prioritaires pendant cette période sont d'une part un mouvement en faveur d'un accord international pour économiser l'énergie et limiter les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, et d'autre part la recherche scientifique et technique pour préparer l'avenir.

Nous nous placerons donc dans la double perspective 2020-2050 et 2050-2100, en donnant à ces limites la signification ci-dessus en matière d'énergie et de lutte contre le changement climatique. L'étude examinera les avancées possibles de la science propres à générer de nouveaux modes de production, transformation, stockage ou consommation d'énergie. On s'efforcera de comparer le calendrier possible de leur émergence avec l'évolution prévisionnelle de la demande.

On sait cependant que l'humanité est capable de progrès très rapides lorsqu'une volonté politique puissante s'appuie sur une prise de conscience profonde. La fission nucléaire a été découverte en 1938, la première bombe atomique a explosé en 1945. Le premier homme a été dans l'espace en 1961 ; un autre homme a marché sur la Lune en 1969. Nous pouvons craindre que seul un caractère dramatique et économiquement insupportable des futures catastrophes climatiques puisse amener une prise de conscience rapide, comparable à celle de la guerre – ouverte ou froide.

3. LES HYDROCARBURES : PÉTROLE ET GAZ NATUREL

La civilisation actuelle peut-être considérée comme liée aux combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon) qui représentent 80% de nos sources primaires d'énergie, et près de 90% des énergies primaires commercialisées. Bien plus, on peut parler actuellement d'une « civilisation des hydrocarbures », puisque ceux-ci ont remplacé le charbon dans beaucoup de ses utilisations, depuis la Seconde Guerre mondiale, même si la consommation annuelle de ce dernier est toujours croissante. Les hydrocarbures (pétrole et gaz naturel) représentent à eux seuls près de 60% de l'énergie primaire commercialisée. De plus, ils sont considérés

actuellement par les économistes de l'industrie comme une énergie de bouclage, c'est-à-dire disponible autant que de besoin pour équilibrer la demande sans cesse croissante d'énergie.

Cette situation se traduit par une dépendance très forte de notre mode de vie et de notre économie par rapport au pétrole et au gaz. Ce lien peut s'expliquer par plusieurs qualités de flexibilité propres aux hydrocarbures et particulièrement au pétrole. Il remplace aisément les autres énergies primaires pour répondre aux conditions locales d'utilisation : production d'électricité, chauffage, cuisine, etc. Il est, par contre, difficile de remplacer les produits pétroliers dans les transports et la pétrochimie. La facilité d'emploi du pétrole et du gaz est très grande puisque ce sont des fluides, assez légers, moins polluants et moins générateurs de CO₂ que le charbon (le rapport atomique H/C est de 2 à 4 pour les hydrocarbures contre 0,2 à 1 pour les charbons et lignites). La mise en service et l'arrêt des installations (génération d'électricité) sont rapides. Enfin le marché est vaste et très actif, la distribution est aisée, même dans les pays dépourvus d'infrastructure (acheminement par citerne ou baril des produits pétroliers). La tendance actuelle se traduit dans les scénarios dits de «laisser-faire» par un accroissement de 50% de la demande annuelle d'hydrocarbures (de 5,7 à 8,5 Gtep), d'ici 2020.

Pour répondre à cette demande, les facteurs qui contrôlent la disponibilité du pétrole et du gaz naturel sont de nature diverse. Les ressources sont liées à la géographie et à la géologie : les 2/3 du pétrole sont au Moyen Orient ; 80% du gaz est en Sibérie, dans les républiques d'Asie centrale et au Moyen Orient. Leur découverte, leur évaluation et leur production font appel à la science et à la technique. L'accès à ces ressources et son prix relèvent de la géopolitique et de l'économie. Enfin, l'impact sur l'environnement, et particulièrement sur le changement climatique fait intervenir la science, la technique et la politique internationale.

Les apports de la science et de la technique ne changent pas les ressources ultimes, mais permettront d'en faire une évaluation plus précise, grâce aux connaissances acquises en géochimie sur la genèse du pétrole et à la modélisation des bassins sédimentaires incluant la formation des gisements d'hydrocarbures. Ces mêmes disciplines, associées à la géophysique, ont déjà réduit le risque de l'exploration en faisant passer le taux de découverte de 1 forage sur 10 en 1970 à 1 sur 4 en 2000, voire 1 sur 3 dans certaines parties du monde. Les progrès de la mécanique des fluides en milieu poreux, et ceux de la physico-chimie des interfaces ont déjà accru le taux de récupération du contenu d'un gisement en exploitation de 25% à 35%, et l'objectif de récupérer 50% semble possible. Enfin, le développement des connaissances sur les constituants lourds du pétrole et les progrès techniques dans les traitements thermiques des huiles lourdes et bitumes permettront d'accéder à une part plus importante des vastes gisements de ce type qu'on ne peut le faire actuellement.

En tenant compte de ces espoirs plausibles, on peut donner une évaluation des ressources ultimes de pétrole et de gaz naturel susceptibles d'être exploitées. Pour le pétrole, les réserves déjà prouvées (160 Gt) peuvent être accrues par de nouvelles découvertes, en particulier en mer profonde : dans le golfe du Mexique, on produit déjà sous 2300 m d'eau et on explore sous 3050 m. Les réserves peuvent aussi être accrues par une amélioration du taux de récupération des gisements. On peut espérer environ 100 Gt de chacune de ces deux sources. Enfin, la quantité exploitable des sables bitumineux (Canada, Venezuela) pourrait être de

l'ordre de 80 Gt, même si cette valeur devra être révisée en fonction de l'évolution des technologies. Au total, c'est entre 400 et 450 Gt que l'on peut espérer.

Pour le gaz, dont la prospection systématique a débuté plus tardivement, on pense qu'il est possible d'en découvrir autant qu'on en a déjà trouvé (150 Gtep), ce qui situerait les ressources ultimes à 300 Gtep. Par contre, il n'y a guère d'espoir d'améliorer le taux de récupération qui est déjà très élevé, comparé à celui du pétrole. Enfin, les hydrates de gaz observés dans les sédiments des fonds marins et dans les régions de permafrost ne constituent pas actuellement une ressource exploitable, aussi longtemps que nous ne connaissons pas mieux leur mode de gisement et leur extension. et que les techniques d'exploitation appropriées ne seront pas mises au point.

Sur ces bases, et en considérant les prévisions de consommation généralement évoquées dans une hypothèse de libre choix des gouvernements et des industriels, les réserves prouvées de pétrole seraient épuisées avant 2050 et celles de gaz naturel vers 2050. Si l'on prend en compte globalement les ressources ultimes d'hydrocarbures, celles-ci seraient épuisées avant la fin du siècle.

Ces évaluations des ressources ultimes en pétrole et en gaz naturel peuvent paraître imprécises. Il faut cependant être conscient du fait que la consommation annuelle de pétrole plus gaz serait d'environ 10 Gtep dès 2030 (pour une demande totale d'énergie primaire de 16 Gtep), dans l'hypothèse évoquée du « laisser-faire ». Dans ces conditions, une forte erreur d'évaluation des ressources ultimes, portant sur 100 Gtep, avancerait ou reculerait seulement d'environ 10 ans le terme ultime de ces ressources.

Les prévisions de consommation d'énergie primaire mentionnées ici sont évidemment incompatibles, dans le long terme, avec les ressources disponibles. Une demande totale d'énergie de 18 à 25 Gtep en 2050 et peut-être 30 Gtep en 2100 paraît difficile à satisfaire avec nos sources usuelles, à moins d'un recours démesuré au charbon qui engendrerait des problèmes complexes et abrégerait la durée de cette ressource. On peut cependant remarquer que ces hypothèses prennent déjà en compte une meilleure répartition de la demande entre les diverses sources d'énergie primaire et une utilisation plus économe. Il faut être conscient qu'un modeste taux de croissance annuel de 2% de la demande énergétique multiplierait la consommation actuelle de 10 Gtep par $(1,02)^{100} = 7,3$ soit 70 Gtep en fin de siècle. De son côté la population humaine atteindra entre 9 et 12 milliards d'habitants dans la seconde moitié du siècle, et entraînera un accroissement supplémentaire de 5 à 10 Gtep, si l'on reprend la valeur modeste de 1,6 tep/hab/an.

De plus, l'émission de 50 à 75 Gt/an de gaz carbonique dans l'atmosphère en 2050, et de plus de 100 Gt/an en 2100 amènerait la concentration de CO₂ dans l'atmosphère à 500 cm³/m³ (ou encore partie par million en volume) en 2050, et 700 à 1000 cm³/m³ en 2100, ce qui ne manquerait pas de déclencher de graves catastrophes climatiques.

Ces commentaires montrent combien le problème est profond et difficile à maîtriser. Il faudra – et le plus tôt sera le plus sage – transférer une partie de la demande vers d'autres sources primaires (la première idée est d'utiliser plus de charbon dont les réserves sont plus importantes, mais les émissions de CO₂

seraient encore plus élevées si on le substitue au gaz), diminuer les consommations par les utilisateurs finaux, et résoudre des problèmes spécifiques très difficiles (remplacer les hydrocarbures pour fournir des carburants aux transports ; remplacer le gaz et le charbon pour fournir de l'électricité aux mégapoles). Un large champ de recherche s'ouvre ici pour la science et la technique ; l'élimination de verrous comme la capture et la séquestration du CO₂ ou le stockage de l'électricité serait une percée significative pour la substitution des hydrocarbures.

4. LE CHARBON

Le charbon, à l'origine du développement industriel du siècle qui vient de s'écouler, constitue encore en 2002 une part importante 23,5%, soit 2,4 Gtep, de la consommation énergétique annuelle mondiale (10 Gtep/an). Cette contribution correspond à une production annuelle d'environ 4,5 Gt de charbon et lignites (ou charbons bruns).

Depuis 1970, la production mondiale de charbon est en croissance régulière (+1,6%/an) ; celle-ci devrait logiquement se poursuivre à ce rythme jusqu'en 2020 au moins, pour atteindre plus de 6 Gt (c'est-à-dire 3 Gtep environ). Cette croissance modérée est plus faible que celle des deux autres énergies fossiles, le pétrole et le gaz naturel. La contribution du charbon à l'ensemble des énergies primaires est donc légèrement décroissante. Cette évolution prévue de la filière charbon n'est cependant pas mondialement homogène : deux pays, la Chine et l'Inde, en raison d'une croissance exceptionnelle, contribuent, pour l'essentiel à l'accroissement mondial.

Les utilisations du charbon sont de trois types bien différents, les usages thermiques locaux, les grandes industries consommatrices de matières réductrices ou de chaleur comme la métallurgie et les cimenteries, et la production d'électricité : 60% environ de la production de charbon est destinée aux centrales électriques. Ce pourcentage pourrait augmenter d'ici 2020, puisque la consommation électrique annuelle, actuellement d'environ 16000 TWh_e devrait doubler en vingt ans.

Le charbon constitue la principale ressource en énergie fossile. Cette ressource - qui ne tient pas compte de l'exploitabilité des gisements (d'un point de vue technique ou économique) - est évaluée à environ 3500 Gtep et est relativement bien répartie à la surface du globe, à l'exception peut-être de l'Amérique latine. On préfère généralement parler de réserves prouvées et récupérables. Selon le World Energy Council (1999), elles seraient proches de 500 Gtep - dont environ 100 Gtep de charbon bruns et lignites. Au rythme actuel de la consommation mondiale, les réserves dépasseraient ainsi deux siècles.

Ainsi le charbon apparaît comme un recours énergétique possible pour l'époque où les productions pétrolières puis gazières commenceront à décroître. Mais cette orientation ne prend pas en compte les émissions de gaz à effet de serre, sauf si le problème du destin du CO₂ est résolu d'ici là.

Malgré sa disponibilité et son coût relativement bas (sensiblement 40 \$/t), la quote-part du charbon dans les sources primaires d'énergie pourrait subir

encore, au cours des deux prochaines décennies, un certain tassement, en raison du fait qu'il est une source importante de pollution :

- Tout d'abord, la production de CO_2 – résultat final de toute combustion de dérivé carboné – est maximale dans le cas du charbon : 1 t de charbon libère 3,7 t de CO_2 alors qu'une tonne de méthane n'en libère que 2,75. Ramené à des contenus énergétiques identiques, le méthane libère deux fois moins de CO_2 .
- Les nombreuses impuretés que contient le charbon (soufre, halogènes, métaux lourds), dont la combustion produit des oxydes, sont en partie responsables des pluies acides observées dans les années 70. Elles ont conduit à l'acidification des sols, et à l'émission de cendres volantes toxiques.
- enfin, des substances toxiques sont dégagées, suivant les conditions de fonctionnement des brûleurs, comme les oxydes d'azote NO_x (température de combustion trop élevée), les hydrocarbures imbrûlés (aromatiques polycycliques) ou plus généralement des composés organiques volatils.

Dans ce contexte, on conçoit que la réglementation environnementale influence défavorablement le développement de la filière charbon, dans son état actuel. Le Protocole de Kyoto impose aux pays signataires des réductions de 5 à 8% des émissions des gaz à effet de serre (GES) et la définition pour chaque Etat de « plafonds nationaux d'émissions ». L'application de ces règles aux émissions globales de GES – y compris les transports, difficilement contrôlables – renforce les contraintes appliquées aux productions centralisées de CO_2 .

Pour fixer les idées, la consommation annuelle de 4,5 Gt de charbon et lignite produit dans l'atmosphère 16,5 Gt de CO_2 , c'est-à-dire environ 10 Gm^3 de CO_2 solide (carboglace) soit un cube de 2,2 km de côté. Ce cube aurait 22 km de côté pour du CO_2 gazeux à la pression atmosphérique ...

On voit donc toute l'importance d'augmenter les rendements des centrales thermiques au charbon - on libère moins de CO_2 par kWh_e produit -, mais aussi d'envisager sa capture et son stockage, que l'on ne sait encore réaliser qu'à petite échelle. Le stockage profond en aquifère salin, en gisement pétrolier épuisé, et surtout en océan pose en outre le problème de son acceptabilité environnementale. La convention de Londres de 1992 a d'ailleurs exclu le déversement de tout déchet industriel dans l'océan.

Des travaux de recherche sont donc nécessaires pour faire du charbon une filière propre. D'ores et déjà, des solutions ont été trouvées pour les pollutions acides de type SO_x , NO_x , soit par la modification des brûleurs (dits à bas NO_x), la recherche de températures de combustion modérées, ou l'injection de calcaire dans le foyer, soit par le traitement des fumées (TF).

Par ailleurs, l'amélioration en cours des centrales thermiques concerne essentiellement :

- les brûleurs, grâce à l'utilisation de charbon pulvérisé (CP), et l'adoption de lits fluidisés circulants (LFC), technique que l'on tente actuellement de transposer sous haute pression,
- le remplacement de l'air par de l'oxygène pur (oxycombustion), parfois dilué dans le CO_2 ou par des particules d'oxydes non stoechiométriques jouant le rôle de transporteur d'oxygène entre deux lits fluidisés. Ces technologies sont bien adaptées à une capture plus aisée du CO_2 , non dilué dans l'azote de l'air,

- la chaudière, enfin, dont les paramètres de fonctionnement franchissent le domaine critique de l'eau (374°C, 217 bars), ce qui permet, en état super critique, de gagner de 5 à 10 points de rendement thermodynamique : 50% pourraient être atteints avec des températures de fonctionnement de l'ordre de 700°C. Il est clair que les problèmes de tenue des matériaux et d'ingénierie sont au cœur de ces projets.

Enfin, la technologie IGCC (Integrated Gazeification in Combined Cycles) de gazéification du charbon en gaz de synthèse (CO et H₂ essentiellement), brûlé dans une turbine à gaz à cycle combiné, est particulièrement prometteuse, mais complexe. Elle est performante sur le plan environnemental car elle facilite la capture du CO₂ et elle permet la « trigénération » chaleur, électricité et hydrogène. Elle fait l'objet de beaucoup de travaux de R et D notamment aux Etats-Unis, en Chine et en Europe. Quelques centrales prototypes de ce type sont actuellement en test. Il faut être conscient qu'il s'agit là d'usines de pointe utilisant une technologie avancée. Toutefois, le coût de cette technologie est, pour l'instant, rédhitoire et son développement encore immature.

Pour l'oxycombustion, il convient de diminuer les coûts de production de l'oxygène pur obtenu soit par distillation, soit par séparation membranaire (matériaux de type électrolyte solide ou conducteurs mixtes).

En conclusion, l'avenir du charbon « électrique » devra passer par des efforts scientifiques et techniques de grande ampleur, notamment sur la capture et le stockage du CO₂ produit. Son développement n'apparaît pas devoir suivre une trajectoire linéaire dans le temps, ni homogène dans tous les pays (stagnation momentanée aux Etats-Unis et en Europe, croissance nette en Chine).

Au-delà d'une période intermédiaire (2020-2050), si l'on n'assiste pas à un renouveau sensible du nucléaire et à un développement suffisant des énergies renouvelables, un démarrage massif du charbon semble très probable car il serait alors le seul à permettre un bouclage énergétique difficile à réaliser autrement.

Ce redémarrage dépendra aussi beaucoup de la valorisation chimique du charbon et du CO₂ produit :

- carburants de synthèse nécessaires notamment aux transports, mais sans contrôle du CO₂ émis, ou filière hydrogène permettant un contrôle et une capture du CO₂ à la source,
- utilisation massive du CO₂ produit, pour de nouvelles industries de synthèse chimique, en CO₂ supercritique, et pour le traitement des déchets,
- à très long terme, valorisation du CO₂ dans des réactions photochimiques, de type photosynthèse.

Des travaux très fondamentaux doivent être envisagés dans ces différents domaines.

Cependant ce redémarrage sera largement conditionné par :

- pour le seul charbon, les progrès substantiels de la technologie des centrales (LFC, IGCC), mais surtout la maîtrise à grande échelle de la capture et du stockage du CO₂ à des coûts acceptables et dans des conditions de sécurité socialement acceptées,

- comme pour l'ensemble des énergies fossiles, la réglementation découlant d'applications strictes des accords internationaux pour limiter le changement climatique (Kyoto ou autre) et la prise en compte des prix d'émission de la tonne de CO₂, ainsi que l'évolution des prix du pétrole et du gaz concurrentiels.

L'Europe, bien qu'elle ne dispose pas de réserves de charbon comparables à celles des Etats-Unis et de la Chine doit cependant participer, dès à présent, à cet effort de R et D. Cela est nécessaire pour assurer sa sécurité énergétique à long terme et lui permettre une compétitivité commerciale en équipements lourds.

5. L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE DE FISSION

L'énergie nucléaire de fission fournit 16,6 % de l'électricité à la planète (2660 TWh sur une production totale de 16000 TWh en 2002) avec une répartition très inégale entre 31 pays, allant de quelques pourcent à 77 % dans le cas de la France (63 GWe installés fournissant 437 TWh/an en 2002). Pour une quinzaine de pays la contribution nationale est de plus de 30 %. L'énergie nucléaire contribue cependant de façon plus modeste à l'énergie primaire totale consommée annuellement dans le monde, environ 680 Mtep sur 10 Gtep, soit 6,8 %, puisqu'elle ne débouche actuellement que sur une production d'électricité.

Ce n'est pas une énergie souple car les réacteurs d'une puissance du GWe doivent être associés à un réseau de distribution électrique conséquent, capable d'absorber une puissance quasi constante. Elle nécessite des investissements importants avec un long retour sur investissement. Elle produit du plutonium et des déchets dont les gestions à plus ou moins long terme posent de réels problèmes scientifiques, techniques et de société. Elle est considérée par certains comme une énergie à risque élevé bien que la sûreté dans le nucléaire soit très bien encadrée tant au niveau national qu'international. En revanche l'exploitation de cette énergie ne produit pas de CO₂, elle conduit actuellement à un coût total du kWh très faible, elle repose sur une technologie éprouvée qui peut évoluer vers une meilleure utilisation de la matière fissile, laquelle est encore importante, et elle est peu soumise à la géopolitique, du moins en ce qui concerne l'approvisionnement.

Plus de 85 % des 440 réacteurs nucléaires mondiaux sont des réacteurs à neutrons thermiques modérés et refroidis à l'eau et utilisant comme combustible neuf de l'uranium enrichi en U235 jusqu'à 5% (combustible dit UOX). Très peu d'entre eux, 35 pour l'instant, utilisent du combustible neuf contenant aussi du plutonium civil comme matière fissile (combustible dit MOX). Celui-ci est extrait des combustibles usés initialement à base d'uranium enrichi. Ainsi l'uranium naturel reste-t-il la principale source primaire de toute matière fissile. Pour produire de l'ordre de 2500 TWh/an à l'échelle mondiale, correspondant à 350 GWe installés (environ 6 fois la production du parc français), il faut actuellement environ 50 000 tonnes d'uranium naturel (0,05Mt) dont la teneur en uranium 235 est de 0,73%. Les réserves mondiales au prix actuel de l'uranium sont estimées à 2,3 Mt. Elles sont principalement en Australie, au Kazakhstan, au Canada et Afrique du Sud. A un prix double on les estime à 4 Mt. On voit qu'on peut raisonnablement entretenir un parc de cette capacité et du type actuel pendant 80 ans. De plus, 99% de l'uranium (U238) n'est actuellement pas valorisé et constitue

une ressource potentielle considérable pour l'avenir – plusieurs millénaires – si l'on se tourne vers les réacteurs à neutrons rapides.

Aujourd'hui 32 réacteurs sont en construction, surtout en Asie, à des stades plus ou moins avancés. Ils sont de type comparable aux réacteurs actuellement en service dans le reste du monde. Une augmentation, une relance ou le maintien de la pérennité du nucléaire demandent de bien examiner la question de l'approvisionnement en matière fissile, même si dans les années qui viennent on tirera un meilleur parti de cette dernière (augmentation du taux de combustion des combustibles, disponibilité accrue des réacteurs, utilisation accrue du MOX jusqu'à un doublement pour les pays qui retraitent leur combustible). Toutefois ces évolutions n'iront pas sans poser de nouveaux problèmes de gestion à court et moyen terme des combustibles usés avec l'apparition d'isotopes d'actinides, générateurs de chaleur et de neutrons.

C'est pourquoi le développement du nucléaire de fission doit être repensé dans le sens d'une meilleure utilisation de la matière fissile qu'aujourd'hui et d'une réduction, à la fois des quantités de combustibles usés et des quantités de radionucléides à vie longue qu'ils contiennent. L'idée que le nucléaire doit avoir d'autres applications que la production d'électricité est également sous jacente aux réflexions sur l'utilisation massive de l'hydrogène comme vecteur d'énergie. La mise en place de nouveaux réacteurs répondant à ces impératifs est une affaire de plusieurs décennies. Plusieurs projets de réacteurs du futur ont été récemment proposés pour aller dans ce sens.

Pour simplifier la nomenclature, on convient de désigner sous les appellations « génération 2 » les réacteurs actuels, « génération 3 » des réacteurs qui capitalisent l'expérience des réacteurs actuels et en accroissent la sécurité, et « génération 4 » de nouveaux concepts de réacteurs qui pourraient être en service vers le milieu du siècle.

La période jusqu'en 2020 restera donc probablement ce qu'elle est pour la production d'électricité nucléaire et la gestion des combustibles usés et des déchets. Pour renouveler ou accroître les parcs nationaux, des réacteurs dits de génération 3, dont les dessins sont prêts, seront construits. Ces réacteurs pourraient consommer plus de plutonium sous forme de MOX que ceux d'aujourd'hui. Un exemple est le réacteur EPR développé en Europe par Framatome-Siemens et choisi récemment par la Finlande, puis par la France. Il y a des concurrents (USA, Japon, Canada, Russie). Deux réacteurs mis récemment en service au Japon sont quasiment de type génération 3. En revanche d'ici 2020 il faudra mener des recherches pour préparer les prototypes des réacteurs de génération 4. Les plus optimistes évoquent 2035 pour les premiers réacteurs industriels de ce type.

En effet, les réacteurs de la génération 4 restent à concevoir car pour l'instant il s'agit de simples concepts. Six concepts ont été retenus par les 10 pays ou organismes internationaux qui constituent le "*Generation IV International Forum*" (GIF) et qui ont manifesté un soutien pour participer à un développement (Brésil, Argentine, Canada, France, Japon, Corée, Afrique du Sud, Royaume-Uni, USA, Euratom). Parmi ces réacteurs, ceux qui seront à neutrons rapides pourront consommer par fission tous les actinides. En effet avec eux tous les isotopes de l'uranium naturel et ceux du plutonium deviennent fissiles ce qui multiplie par plus de cent la matière fissile disponible. Les réserves énergétiques deviennent alors bien supérieures à celles offertes par le charbon. Cela ouvre aussi des

horizons pour diminuer la nocivité des déchets nucléaires par transmutation des actinides. A cet égard ces réacteurs pourraient être en concurrence avec des réacteurs sous critiques pilotés par accélérateurs. Au-delà, ou en parallèle, le thorium utilisé comme combustible dans des réacteurs à sels fondus pourrait aussi augmenter considérablement une pérennité du nucléaire par production d'uranium 233. Tous les réacteurs de génération 4 ont en commun d'avoir une température de cœur élevée, supérieure à 600 °C et pouvant aller jusqu'à 1000 °C, pour viser des rendements thermodynamiques ambitieux et des applications autre que l'électricité nucléaire. Cela est une caractéristique nouvelle. Les cycles du combustible associés aux réacteurs de génération 4 devront être des cycles fermés. En effet il faudra obligatoirement retraiter les nouveaux combustibles usés pour en extraire les actinides et d'autres produits de fission afin de les recycler jusqu'à disparition. Ceux qui sont déjà étudiés en France par le CEA (et en Europe dans le cadre de Euratom) sont des réacteurs à très haute température refroidis à l'hélium, d'abord à neutrons thermiques (puis à neutrons rapides dans un second temps).

Au milieu du siècle pourraient coexister en France des réacteurs de génération 3 et 4 dans une proportion dépendant de la vie des réacteurs actuels qui sera certainement de 40 ans ou plus. Par ailleurs un réacteur tel que EPR est construit pour 60 ans, lui conférant une vie double de celle prévue à l'origine pour les réacteurs des années 1980.

Certains pays souhaitent sortir du nucléaire aux alentours de 2020-2025 (Suède, Allemagne, Belgique). D'autres laissent l'option nucléaire ouverte ou affirment la poursuivre. Certains pays retraitent leurs combustibles usés, d'autres les considèrent *de facto* comme des déchets. Au total 30 % des 250 000 tonnes de combustibles usés ont été retraitées, réduisant ainsi de façon importante le volume des déchets de haute activité. Certains pays ont des réacteurs particuliers. Mais tous connaissent le problème de la gestion des déchets nucléaires. Devant une situation aussi contrastée la recherche et le développement ont un rôle important à jouer.

Les déchets de faible ou moyenne activité à vie courte peuvent faire l'objet d'un stockage en surface, sous surveillance : des radioéléments comme ^{137}Cs ou ^{90}Sr voient leur radioactivité divisée par 1000 en 300 ans. Les éléments de haute activité (certains produits de fission) ou ceux à vie longue (actinides) nécessiteraient une surveillance beaucoup plus longue. La plupart des pays envisagent pour eux une période d'entreposage en surface sous surveillance (de plusieurs décennies), suivie d'un stockage, réversible ou non, en situation géologique profonde. Des travaux de recherche considérables sont en cours dans les principaux pays concernés.

L'arrêt programmé du nucléaire ne pourrait se faire, si l'on en décidait ainsi, qu'au moment où d'autres énergies (énergies renouvelables) seraient prêtes pour la relève. Il n'y a pas de problème scientifique à résoudre pour démanteler les réacteurs : c'est une question d'ingénierie résolue. Toutefois le démantèlement ne peut se faire, pour des raisons de technologie et de sûreté, que sur une longue durée, plusieurs décennies. Reste la gestion des déchets de démantèlement (entreposage et stockage) qui pose les problèmes scientifiques déjà identifiés.

A l'inverse, la mise en route des réacteurs de génération 3 ne pose pas non plus de problèmes scientifiques mais comporte de nombreuses améliorations technologiques. Les recherches d'accompagnement pourraient porter sur le

combustible pour accroître la consommation de plutonium. Si un multi recyclage du plutonium était envisagé (comme cela est quelquefois évoqué, mais reste peu probable avec les réacteurs à neutrons thermiques), il faudrait accélérer les recherches sur le retraitement de combustibles MOX, contenant alors de plus en plus d'actinides et notamment du curium. De toute façon de telles recherches seraient nécessaires pour l'avenir avec la venue des réacteurs de génération 4.

Pour concrétiser les vues du GIF à propos des réacteurs de génération 4 beaucoup de recherches pluridisciplinaires sont nécessaires. Trois points clés sont à étudier simultanément pour aller vers leur déploiement : sélectionner les matériaux pour les composants des réacteurs, mettre au point les nouveaux assemblages de combustibles et assurer le traitement des combustibles usés ou irradiés pour diminuer, au total, la production de radionucléides à vie longue. Ces trois points sont indissociables. Ils ne peuvent plus être traités successivement comme ce fut le cas pour les réacteurs de la génération actuelle.

Les matériaux devront résister pendant longtemps à la combinaison d'une haute température, à des déplacements atomiques importants et à la corrosion.

Les combustibles déjà envisagés, devant accepter de haut taux de combustion, de hautes températures et de fortes densités de dissipation de puissance, sont des oxydes, des nitrures, des carbures à l'état de céramique et des alliages métalliques mixtes d'uranium et de plutonium (voire contenant d'autres actinides). Il convient de les mettre au point et en forme. Le gainage de ces matériaux est prévu en céramique ou en nuances d'acier, qu'il faut également étudier. Ils devront être compatibles avec le combustible. Le cas du combustible à sels fondus est à part. Il n'est pas bien connu et reste à étudier quasi complètement.

Pour ce qui concerne le retraitement il faut s'attendre à traiter une grande variété de combustibles nucléaires solides à plus de 5% en matière fissile sous diverses formes (pastille, particules) et des sels fondus. Deux voies sont possibles l'hydrochimie avancée et la pyrochimie, la seconde ne bénéficiant que d'un faible retour d'expérience. D'importants problèmes de séparation chimique portant sur la matière hautement radioactive comme le curium devront être traités.

Il est entendu aujourd'hui que les recherches doivent être conduites en collaboration à l'échelle internationale. Il est clair que l'expertise pluridisciplinaire du nucléaire ne doit pas être perdue, ce qui rendrait difficile le recours à cette ressource énergétique dans le futur, mais au contraire renforcée dans les années qui viennent.

En effet, dans l'état actuel des sciences et des techniques, l'énergie nucléaire de fission paraît être la solution la plus robuste pour répondre, en large quantité, à la demande *concentrée* d'électricité indispensable aux grandes villes et aux zones à haute densité de population, sans accroître pour autant les désordres climatiques.

6. L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE DE FUSION

La Conférence de Genève sur les Utilisations Pacifiques de l'Énergie Atomique, en 1958, a véritablement marqué le début des recherches sur la fusion nucléaire contrôlée avec comme objectif la production d'énergie à des fins civiles. Après une suite de tâtonnements, de déceptions et de succès, l'avenir de cette

source d'énergie apparaît plus clairement aujourd'hui. Les résultats acquis montrent qu'il est possible de construire des dispositifs produisant de l'énergie à partir de la fusion nucléaire et de dater approximativement les futures étapes qui devraient conduire à son exploitation industrielle. Il faut cependant se garder d'une trop grande assurance. Les expériences actuelles, comme celles du proche avenir, appartiennent encore au domaine de la recherche, même si elles sont franchement orientées vers la réalisation d'un réacteur industriel. Vouloir évaluer la contribution de la fusion à la solution du problème énergétique mondial relève de la spéculation. Cette incertitude ne remet pas en cause la nécessité d'un effort vigoureux pour la faire progresser, car ses avantages en matière de ressources, de sûreté, de déchets et d'absence de production de gaz à effet de serre seraient réels, en cas de succès.

La fusion se produit lorsque la collision de deux noyaux d'atomes légers est suivie d'une réaction nucléaire avec formation d'un noyau plus lourd et diminution de la masse totale du système. La masse perdue se retrouve dans l'énergie cinétique des produits de la réaction, comme le prédit la relativité. La réaction la plus facile à réaliser est la fusion des noyaux de deutérium (D) et de tritium (T), deux isotopes de l'hydrogène. Le deutérium contient deux nucléons, le tritium trois. Quatre de ces nucléons s'associent pour donner un noyau d'hélium 4 emportant une énergie cinétique de 3,5 MeV et le nucléon restant est un neutron libre de 14 MeV qui contient donc 80% de l'énergie libérée par la réaction.

Cette réaction très exothermique présente l'intérêt supplémentaire de n'impliquer que des produits abondants et bon marché. En effet, le deutérium existe dans l'eau de mer à une concentration de 33 mg par litre. Le tritium se fabrique à partir du lithium, élément bon marché et présent en grande quantité dans l'écorce terrestre. Ce métal alcalin, additionné d'un multiplicateur de neutrons, génère l'isotope de l'hydrogène lorsqu'il est irradié à l'aide des neutrons produits par la réaction de fusion elle-même. La fusion complète d'un gramme de mélange DT équimoléculaire libère 340 GJ, soit environ 94000 kWh (la fission d'un gramme de matière fissile libère 80 GJ). Cette consommation extrêmement faible en combustible conduit à estimer que la domestication de la fusion libérerait l'humanité de tout risque de pénurie énergétique. C'est le lithium qui viendrait d'abord à manquer. On peut espérer que les progrès de la science et de la technique permettraient alors de n'utiliser que le deutérium comme combustible, ce qui est possible mais plus difficile.

Un autre intérêt de la fusion du DT réside dans le fait que cette réaction nucléaire ne génère aucun élément radioactif à vie longue. Les combustibles de base, lithium et deutérium, ne sont pas radioactifs. Le tritium, élément radioactif avec un temps de vie de 12 ans, serait fabriqué sur place au fur et à mesure des besoins sans en amasser des stocks importants. Seuls des éléments du réacteur deviendront radioactifs par exposition aux neutrons de 14 MeV, mais la radioactivité induite aura disparu en quelques centaines d'années. La quantité de ces déchets peut être réduite en choisissant des matériaux dont l'activation reste faible. Enfin, la production d'énergie ne s'accompagne d'aucune émission de gaz à effet de serre, point commun avec une centrale nucléaire classique, basée sur la fission des noyaux lourds.

Enfin, s'il reste indispensable de se prémunir contre les éventuels incidents, en particulier ceux concernant la gestion du tritium, la sûreté nucléaire d'une telle installation est facile à assurer. Aucune catastrophe majeure n'est à redouter, car

un accident par emballement des réactions n'est pas possible. En effet, à chaque instant, le cœur du réacteur ne contient qu'une faible quantité de combustible et l'interruption de l'alimentation en mélange DT entraîne l'arrêt immédiat de la combustion, comme dans une chaudière à gaz. De plus, tout dérèglement ou détérioration aurait le même effet, tant est difficile le maintien des conditions physiques permettant aux réactions de se produire.

Cette difficulté, qui pour la sécurité est un avantage, est un inconvénient pour la faisabilité et retarde la mise en œuvre de cette technologie si prometteuse. Il est admis, aujourd'hui, que la physique des phénomènes est suffisamment connue pour mettre en chantier la construction d'une expérience où les conditions seront proches de celles d'un réacteur : puissance produite très supérieure à la puissance fournie pour faire fonctionner l'installation, fonctionnement sur des échelles de temps de plusieurs dizaines de minutes, alimentation en continu et évacuation de l'hélium. C'est l'objectif de l'expérience ITER. Selon les prévisions, ITER devrait entrer en fonctionnement avant 2015 et être exploité jusqu'au début des années 2030. Les années 2020 devraient voir la construction d'une machine appelée DEMO, dans laquelle seront étudiées et mises au point les procédures de l'exploitation industrielle en fonctionnement continu à haute puissance avec régénération du tritium. Cette phase pourrait conduire à la conception d'une première usine de production vers 2035 et à sa construction au début des années 2050. La seconde moitié du siècle pourrait donc voir le déploiement de la fusion comme partenaire des autres options dans le bouquet énergétique.

Ce calendrier n'est qu'indicatif. Comme il a été rappelé plus haut, les années qui viennent peuvent encore réserver des surprises dans la bonne ou la mauvaise direction, qu'elles viennent de la maîtrise scientifique, de la technologie ou du financement. Elles ne devraient pas mettre en cause la validité de la fusion comme source d'énergie utile, mais elles peuvent modifier la durée des différentes phases. Ce calendrier suppose que, parallèlement à la construction et à l'exploitation des machines, se déroule un programme de recherche intensif sur la tenue des matériaux dans les conditions extrêmes qui seront celles du réacteur ; en effet, la recherche sur de tels matériaux nécessite encore de gros efforts et est loin d'être résolue. Les résultats de ces recherches conditionneront la viabilité d'une exploitation industrielle de la fusion

La fusion ne contribuera vraisemblablement pas à la solution du problème énergétique avant 2050, bien que certains pensent pouvoir gagner une dizaine d'années en lui accordant les moyens d'un programme prioritaire. Dans la seconde moitié du siècle, ses capacités seront connues sur les plans techniques, économiques et environnementaux. Son déploiement dépendra de paramètres économiques liés aux coûts d'investissements, de production et de démantèlement ainsi que des performances des autres sources d'énergie. La fusion jouera cependant un rôle clé dans la stratégie mondiale, bien avant qu'elle soit commercialisable. En effet, dès que ses possibilités réelles se préciseront, peut être vers 2030, la fusion pourrait apparaître comme un recours en réserve pour prendre le relais d'autres modes de production dont le temps de vie est limité soit par épuisement des réserves, soit par incompatibilité avec le développement durable.

7. L'ÉNERGIE SOLAIRE

L'énergie solaire est une énergie réellement inépuisable et abondante. En moins d'un an, l'énergie solaire arrivant sur terre est supérieure au total des

énergies fossiles connues : 62000 Gtep, sont absorbés chaque année par l'air, les océans et les continents. Il serait vraiment dommage de ne pas utiliser une telle ressource. Deux voies sont possibles : la conversion directe de la lumière solaire en électricité par les dispositifs photovoltaïques et l'exploitation thermique de l'énergie solaire.

7.1 Utilisation de l'énergie solaire pour la production d'électricité: le photovoltaïque

Le principal obstacle à l'utilisation à court terme des dispositifs photovoltaïques n'est pas, à proprement parler, de nature technique ou scientifique, mais d'origine économique. La haute technicité de ces dispositifs conduit à un prix de revient élevé, résultant pour le moment en un prix du kWh de 5 à 10 fois plus élevé que celui produit par les sources d'énergie conventionnelles.

Il faut toutefois distinguer deux types d'utilisation de nature et d'horizons temporels très différents.

I – Zones rurales et isolées : *les pays en développement* (PED).

Parmi les problèmes auxquels doivent faire face les zones isolées, non reliées à un réseau électrique, en particulier dans les PED, celui de l'énergie et de la production locale d'électricité pour satisfaire les besoins élémentaires des populations, est certainement un des plus importants. Une quantité, même très faible, d'électricité (quelques dizaines de watts pendant quelques heures par jour) est nécessaire pour atteindre un minimum de confort ou de sécurité médicale. Pour ces régions, le photovoltaïque est de loin la solution générale la mieux adaptée. En l'absence de connexion à un réseau électrique, la question du prix du kWh ne se pose pas, toutes les autres sources étant plus chères. Pour l'éclairage, par exemple, même la lampe à pétrole revient plus cher, sur le long terme, qu'un "kit" photovoltaïque. La production individuelle, ou par mini centrale à l'échelle d'un village, permet:

- de satisfaire les besoins de première nécessité (éclairage, pompage d'eau potable);
- de briser l'isolement des populations rurales (télévision, enseignement);
- la petite irrigation des cultures;
- de satisfaire certains problèmes de santé, comme le stockage au froid des vaccins ou l'alimentation de petites antennes médicales.

Bien sûr, l'alimentation en électricité des PED ne représente pas, même à l'échelle de la planète, une quantité d'énergie considérable, encore que l'on estime entre 1,6 et 2 milliards le nombre d'habitants qui ne sont pas (et ne seront peut-être jamais) reliés à un réseau de distribution électrique. Mais, le bénéfice humanitaire et politique est tellement conséquent, que ce devrait être l'intérêt bien compris des pays industrialisés de participer, par leur capitaux mais aussi par leur potentiel de recherche, à ces opérations. Ce point, bien qu'un peu excentré, ne peut être complètement absent d'une réflexion sur l'énergie. Il relève autant de la morale et de l'éthique que de la science et de la technique.

II - Production centralisée d'électricité: *les centrales solaires*

La production d'énergie solaire au niveau des mégawatts (MW) est d'une toute autre nature. Il convient d'abord de faire quelques remarques de mise au

point pour corriger des opinions erronées qui apparaissent parfois dans les discussions sur l'énergie solaire.

a) Surface au sol. L'idée, que l'on trouve parfois publiée dans des revues de vulgarisation, selon laquelle la surface occupée par des centrales solaires couvrirait une partie très importante du territoire national mérite une analyse réaliste plus quantitative. L'énergie lumineuse reçue en plein soleil est proche de 1kW/m^2 . En diminuant cette quantité d'un facteur entre 5 et 10 pour le rendement des capteurs photovoltaïques, et d'un autre facteur de 4 à 10 pour la nuit et le climat, on arrive à une puissance moyenne sur l'année de 10 à 50 W/m^2 . Pour une centrale de 1000 MW, cela représente une surface, dans le pire des cas, de $10\text{km} \times 10\text{km}$, et dans des conditions plus favorables de $4\text{km} \times 5\text{km}$, ce qui est une taille concevable pour un grand site industriel.

Il est difficile pour le moment de prévoir le rejet ou l'acceptabilité des populations pour ce type d'occupation des sols. On ignore également l'éventuel impact de la modification du bilan énergétique naturel du sol sur le climat local. On peut remarquer, sur ces sujets, que si le type de stockage discuté ci-dessous (paragraphe b) est réalisé, on peut imaginer d'implanter des centrales photovoltaïques dans des régions désertiques (en général très ensoleillées), l'énergie produite étant convertie sous forme d'hydrogène et transportée par des gazoducs ou des navires transporteurs du type des méthaniers actuels.

b) Stockage inter-saisonnier. Le stockage de l'énergie à long terme n'est pas un problème spécifique du photovoltaïque. Il est vrai que l'énergie solaire nous arrive d'une manière intermittente et qu'un stockage inter-saisonnier est nécessaire pour parler de moyenne annuelle. Mais s'il était réalisé, il permettrait de corriger dès maintenant la différence de rythme entre la production (continue) et l'utilisation (en pointes) de l'électricité. L'économie réalisée par ce stockage est estimée à 13% de la production française, soit beaucoup plus que la production photovoltaïque avant de nombreuses années. Le stockage des énergies intermittentes est un problème que l'on ne sait pas résoudre aujourd'hui et sur lequel il serait urgent d'entamer une nouvelle recherche scientifique.

Quand peut-on espérer une pénétration non négligeable (par exemple 25%) du photovoltaïque dans la production française d'électricité ? Les avis divergent fortement, sans que personne de responsable n'avance de date antérieure à 2020-2030. La condition nécessaire pour une telle pénétration est que le kWh photovoltaïque descende au dessous du prix des autres sources d'énergie. Le problème est difficile et les prédictions aléatoires. Les paramètres techniques et scientifiques ne sont pas seuls en cause, encore que des grands progrès, ou même une percée, dans la physique des matériaux photovoltaïques pourraient changer la donne : il faut poursuivre et sans doute augmenter l'effort de recherche dans ce domaine.

Mais la réponse dépend fortement des conditions économiques et politiques. Les plus optimistes pensent que, à condition qu'un effort et qu'une volonté politique suffisants soient déployés, l'électricité solaire pourrait aboutir avant 2050. D'autres sont très sceptiques sur cette prédiction et pensent que l'électricité photovoltaïque ne pourra déboucher que lorsque les autres sources d'énergie auront disparu ou seront devenues très chères, soit pas avant la fin du siècle.

7.2 Utilisation thermique de l'énergie solaire

Pour l'utilisation non photovoltaïque de l'énergie solaire, essentiellement le thermique, les progrès à espérer concernent beaucoup plus la technique et l'ingénierie que la physique de base.

Le captage pour produire des températures élevées (1000° ou plus) nécessite la concentration par des grands miroirs orientables. Ceci nécessite un ciel clair, ce qui limite fortement le nombre de sites acceptables, du moins en Europe. La lumière diffusée par les nuages ou le brouillard, qui dans nos régions est en moyenne une part importante de l'énergie reçue, est perdue dans cette technologie, ce qui la rend peu attractive.

La production d'eau chaude (50 à 100°) par capteurs plans est d'une technicité beaucoup plus simple. Elle est déjà bien employée dans certains pays pour le chauffage des habitations, et surtout pour la production d'eau chaude domestique ou le chauffage des piscines. Les surfaces installées sont de l'ordre de 700.000 m² en France et 13.000.000 m² en Europe. Ce type d'exploitation de l'énergie solaire, soutenue par les pouvoirs publics, peut être très rentable (amortissement de l'investissement en 3 à 10 ans) et pourrait être augmentée d'un bon facteur 10 dans notre pays, si l'aspect esthétique était plus largement admis.

7.3 Energie éolienne

L'énergie, produite par la force du vent (elle-même dérivée de l'énergie solaire) sur des pales d'hélices est utilisée depuis des siècles dans les moulins à vent. Les éoliennes modernes sont capables de produire, en pointe, des puissances de plusieurs MW. Divers pays d'Europe ont déjà des puissances installées non négligeables : plus de 600 MW_p [MW_{pointe}] avec 330 éoliennes. Des projets importants sont en cours de réalisation : Allemagne 12.000 MW_p, Grande Bretagne 7000 MW_p, Danemark: 5.000 MW_p). La France est plutôt en retrait: 200 MW_p, mais par suite d'une incontestable volonté politique et de l'existence d'un grand nombre de sites favorables, ce domaine se développe rapidement, avec une volonté affichée d'atteindre en 2010 un niveau comparable à nos voisins.

Dans les cas les plus favorables, le prix du kWh éolien se rapproche de celui des énergies conventionnelles. Toutefois, il semble que l'acceptabilité de l'implantation des éoliennes ne soit pas toujours acquise: pollution sonore (qui pourtant a fait de grands progrès depuis quelques années), pollution esthétique, occupation d'espaces privilégiés. Ces objections s'appliquent moins pour des sites situés en haute mer, mais le prix de revient augmente alors considérablement.

Il faut également rappeler que les périodes d'indisponibilité des éoliennes (absence de vent ou – par précaution – vent trop violent) peuvent recouvrir indifféremment des heures de faible ou forte consommation d'électricité, ce qui nécessite de disposer d'une capacité de production en réserve par centrale thermique classique pouvant être mise en service à tout moment. En Allemagne, qui a fait un effort important dans ce domaine, la production ne dépasse guère l'équivalent de 1300 heures à pleine puissance par an, soit 16 TWh. Cet aspect est assez contraignant.

En conclusion, il est généralement admis que la production éolienne d'électricité pourrait être un complément intéressant, jusqu'à 10 ou 15% de la

fourniture d'électricité, mais sans doute pas une forme principale d'utilisation de l'énergie solaire. Dans les zones à habitat dispersé, sans réseau de distribution, cette source d'énergie répond bien à la demande : c'est le cas depuis longtemps en Australie, dans les régions éloignées des côtes, où l'essentiel de la demande sert à pomper de l'eau, aisément stockable, pour abreuver le bétail.

7.4 Hydraulique

L'énergie hydraulique est, à ce jour, la seule énergie renouvelable qui joue un rôle significatif : près de 800 GWe installés dans le monde, fournissant en 2002 près de 2700 TWh, soit 16,2% de l'électricité. De plus elle constitue une source d'électricité *concentrée*, capable d'approvisionner les zones à forte densité de population. Par contre, cette source d'énergie peut, elle aussi, varier à l'échelle saisonnière ou annuelle, en cas de sécheresse importante.

Les possibilités de développement ultérieur existent, mais sont limitées par la localisation des sites favorables qui n'ont pas encore été équipés et qui sont souvent éloignés des grandes concentrations humaines. Un calcul global, basé sur la valeur des précipitations et la surface des bassins versants suggère un potentiel mondial proche de 3000 GWe. Dans les pays industrialisés, quelques régions ont encore des possibilités notables dans des régions de haute latitude (Canada, Scandinavie, Russie). Les autres possibilités se situent sur des grands fleuves d'Asie ou des fleuves tropicaux de l'Afrique ou de l'Amérique du sud. Si le changement climatique ne modifie pas ces évaluations, la production électrique pourrait être doublée ou triplée ce qui permettrait de maintenir, ou d'accroître un peu, la part de l'électricité d'origine hydraulique.

7.5 Géothermie

Nous rattacherons à ce chapitre l'énergie géothermique qui peut être souvent considérée comme renouvelable ; elle n'est pas dérivée de l'énergie solaire, mais de la chaleur dégagée par la croûte terrestre, grâce aux radioéléments naturels qu'elle contient, en filiation avec U238 et 235, Th232 et aussi du K40. Les meilleures perspectives paraissent offertes par les roches sèches et profondes à haute température (au-delà de 150°C) dans lesquelles on fait circuler de l'eau qui sert de caloporteur. On peut alors générer de l'électricité par une turbine. Cette géothermie haute énergie bénéficie du développement des recherches en modélisation des transferts de fluides, ainsi que du suivi géophysique et géochimique des opérations. Elle est aussi une des rares énergies renouvelables exploitable à plein temps.

La géothermie représente actuellement 0,3% de la production mondiale d'électricité, soit 8 GW installés. Les ressources possibles sont évaluées à 30 GW. Les sites favorables sont concentrés dans les régions d'activité tectonique et magmatique récente : rides médio-océaniques (Islande), fossés tectoniques (Fossé rhénan), zones de tectonique récente (Californie, Mexique) éventuellement accompagnée de volcanisme (Nouvelle Zélande, Italie, Antilles). Au contraire, dans les régions géologiques stables, les couches aquifères offrent de l'eau à température modeste, souvent corrosive. On peut donc attendre plus de nouveaux développements dans les régions à tectonique active, que d'une généralisation de la géothermie à des situations géologiques diverses.

8. LES BIOMASSES

L'ensemble des biomasses végétales terrestres constitue l'essentiel du décor naturel dans lequel nous vivons. Élément quasi-exclusif de notre alimentation (les animaux qui constituent notre nourriture sont majoritairement herbivores), les biomasses végétales terrestres jouent un rôle important sur trois registres : le stockage de carbone par échanges avec l'atmosphère, les matériaux issus de la biomasse et leurs usages variés, y compris alimentaire, et enfin les usages énergétiques.

Si historiquement le bois a été le premier combustible de l'humanité, cet usage du bois constitue encore une contribution significative au bilan énergétique mondial. Elle est estimée à plus de 350 Mtep/an, du même ordre de grandeur que celle de l'énergie nucléaire ou hydraulique.

Le recours aux biomasses végétales à des fins énergétiques n'est pas limité au seul bois. Les autres biomasses utilisées traditionnellement sous forme de combustibles – qu'il s'agisse du charbon de bois, de résidus de bois, de liqueur noire (un résidu des productions papetières) ou de bagasse – contribuent, pour chacune d'elles à environ 50 Mtep/an.

Si on considère enfin tous les déchets utilisés à des fins énergétiques, près de 500 Mtep/an, dont 150 Mtep/an pour les seuls déchets animaux (40 % en Inde), l'ensemble des produits de la biomasse végétale, de tous types, bois compris, correspond à un peu plus de 1 Gtep/an, soit 10% de l'énergie consommée dans le monde. Une partie importante de cette énergie renouvelable est consommée localement et échappe aux circuits commerciaux.

Dans les pays de l'Union européenne, la biomasse utilisée pour la combustion représentait en 2000 plus de 60% du total des énergies renouvelables consommées, la majeure partie étant issue du bois ou de ses déchets et des déchets solides municipaux.

En regard de cela, le poids des combustibles fluides issus de la biomasse est presque négligeable : à l'échelle mondiale, les combustibles gazeux de cette filière correspondaient, en 1999, à 4 Mtep/an environ, les combustibles liquides à 11 Mtep/an (alcool résultant de la fermentation de céréales, de canne à sucre ou de betteraves, esters d'huiles végétales dérivées du colza ou du tournesol). Le développement des carburants a souvent d'autres buts qu'énergétiques seuls (indépendance nationale, jachères et autres déprises agricoles en Europe de l'Ouest).

Les rendements modestes des étapes successives qui vont de l'énergie solaire au champ, au produit récolté, puis au carburant utilisable, demandent une analyse exhaustive tant du point de vue économique qu'énergétique (selon les principes de « l'analyse des cycles de vie », établissant un bilan énergétique rigoureux des étapes successives de culture, récolte et élaboration du carburant). Une fois ces rendements estimés ainsi que le coût hors taxes et subventions des carburants utilisables, une analyse comparative est à mener avec d'autres types d'allocation des sols : alimentation humaine, peuplements forestiers,....

Enfin, il convient de noter que le rôle du bois, ou de tous les autres produits lignocellulosiques, est en fait double. D'une part, les écosystèmes forestiers sont, a priori, les plus adaptés à la capture et au stockage du carbone diffus, soit dans les forêts sur pieds, soit dans les produits en bois (ou à base de bois) utilisés par l'homme. D'autre part, l'utilisation aussi étendue que possible du « bois combustible » contribue à stabiliser quelque peu le recours aux combustibles fossiles carbonés.

Le rôle potentiel des diverses biomasses dans l'avenir a fait l'objet de maintes réflexions. Le bilan énergétique complet de chaque filière est difficile à établir et les informations présentées ne sont pas toujours cohérentes. Il semble cependant que l'usage traditionnel du bois de chauffage soit le plus favorable de ce point de vue : la forêt, installée sur des sols pauvres, pourrait fournir environ 1 tep/ha/an, sans entrer en compétition avec les cultures alimentaires. Ce cas n'implique ni irrigation, ni engrais et la principale dépense énergétique se rapporte à la collecte. En France, 15 millions d'hectares de forêt exploités en bois de chauffage pourraient fournir chaque année environ 15 Mtep, soit 50% de plus qu'actuellement. Il s'agit là d'un apport significatif, mais hors de proportion avec celui nécessaire pour assurer la relève des combustibles fossiles. Dans tous les pays qui le peuvent, l'utilisation sur place de la biomasse (bois et résidus, déchets de l'élevage et de l'agriculture) dans les villages ruraux est probablement la voie la plus efficace pour transférer une part de la consommation énergétique locale vers les énergies renouvelables.

La production de biocarburants à partir de cultures dédiées occupe, au contraire, préférentiellement des terres arables et nécessite un apport d'énergie pour l'exploitation (machines, engrais, irrigation, collecte, procédé de fabrication du carburant, etc.). Les bilans énergétique et économique actuels sont difficiles à interpréter, compte tenu des interactions avec les problèmes de jachères, de subventions et de taxes, et de l'impact du prix des énergies fossiles. Du strict point de vue de l'énergie, les valeurs avancées vont de 0,7 à 2 tep/ha/an de carburant pour une dépense énergétique de 0,3 à 1 tep/ha/an. On conçoit que les marges de variation soient importantes, selon que la partie valorisable de la plante se limite aux huiles tirées des graines (tournesol, colza), comprenne des sous-produits de la culture (bagasse au Brésil, paille) ou intéresse la majeure partie de la plante (bois et ses déchets). Certaines régions, comme les grandes plaines de Pologne ou d'Ukraine, pourraient être favorables à ce type de cultures.

En France, la conversion des 9 Mha assurant la production de céréales alimentaires à la production de carburant fournirait 12 Mtep dont il faudrait déduire une autoconsommation estimée entre 3 et 6 Mtep. A l'échelle mondiale, la consommation de produits pétroliers par le secteur transport – essentiellement le transport routier – était en 2001 de 1700 Mtep, celle de gaz naturel 54 Mtep et celle de produits venant de la biomasse 8 Mtep, soit moins de 0,5% du total. On voit que le principal substitut du pétrole dans les transports est actuellement le gaz. La part des biocarburants peut cependant, dans les conditions spécifiques d'un pays (Brésil), être plus importante.

Dans le futur, si on souhaitait remplacer le pétrole dans le secteur des transports par des produits issus de la biomasse, il faudrait pouvoir y consacrer plus que la surface actuelle des terres arables dans le monde, estimée à 1,5 milliards d'hectares. On ouvrirait alors une compétition sévère entre nourriture et carburants, sans pour autant suffire aux besoins des transports. En outre,

l'irrigation serait probablement nécessaire dans certaines régions et poserait un problème d'usage de l'eau.

Une autre voie est proposée : celle de gazéification de la biomasse ligno-cellulosique, qui peut être produite sur les terres pauvres, et de la synthèse de carburant, par exemple de gazole, à partir du mélange CO + H₂ ainsi obtenu. Il s'agit là d'une voie qui peut être considérée, mais qui est actuellement bien peu documentée, à la réserve de l'étape finale de synthèse.

On voit que les écarts de données numériques sont larges, même du strict point de vue du bilan énergétique. Le retour d'expérience sur les biocarburants, par exemple, porte sur un petit nombre de cultures et de régions du monde. Les analyses de type « cycle de vie » seront un élément important. Les bilans économiques présentés sont encore plus complexes à interpréter, compte tenu des intérêts des collectivités concernées, à l'échelle nationale, et des prises de position de certains pays, à l'échelle internationale.

Dans l'état actuel des connaissances, la biomasse pourrait offrir un appoint significatif à la consommation mondiale d'énergie, mais ne paraît pas en mesure d'assurer la relève quantitative du pétrole, même limitée au seul domaine des transports. La compétition entre la production de biocarburants et celle de nourriture pourrait prendre un caractère dramatique dans des régions où la densité de population est très élevée comme le sud-est asiatique. Par contre, l'utilisation du bois pourrait recevoir un plus grand développement, tant pour le chauffage des bâtiments que pour la production d'électricité, sans entrer en compétition avec les cultures vivrières. Enfin, des recherches complémentaires seraient souhaitables pour étudier la préparation de gaz de synthèse à partir de la biomasse ligno-cellulosique, permettant ensuite la production de carburant.

9. QUE FAIRE DU CO₂ ?

L'examen critique des sources d'énergie pour le siècle qui commence montre que les solutions simples et pérennes sont rares. Les économies d'énergie sont nécessaires, mais par nature limitées ; l'énergie solaire est certainement notre recours le plus pérenne, mais elle ne sera pas en mesure d'assurer en temps utile le relais des combustibles fossiles, tant dans les transports que pour les besoins des mégapoles. L'énergie nucléaire répond à cette dernière exigence, mais ne pourra intervenir dans les transports que par le biais de l'hydrogène, ce qui nécessitera plusieurs décennies de développement technologique des réacteurs, de déploiement d'une infrastructure de distribution, et de mutation dans les véhicules.

Il faudra donc composer avec l'effet de serre, afin de pouvoir continuer à utiliser les combustibles fossiles dans certains domaines et assurer ainsi au cours du siècle les transitions nécessaires. Dans cette perspective, seul le stockage durable de tout ou partie des gaz à effet de serre paraît constituer une réponse. Cette solution est souvent évoquée, et pourrait être appliquée aux sources fixes (centrales thermiques, métallurgie, cimenteries). Mais elle posera de nombreux problèmes scientifiques et techniques : il faut être conscient qu'il s'agit, pour l'homme, d'intervenir dans le cycle du carbone.

Le CO₂ n'est pas le seul gaz à effet de serre. Mais il est le principal acteur de ce phénomène – près des deux tiers –, compte tenu de sa teneur, de sa

faible réactivité et de sa longue durée de vie dans l'atmosphère. De plus, ceux qui viennent ensuite sont le méthane et les oxydes d'azote, responsables à eux deux de moins d'un tiers de l'effet. Ils sont principalement issus de l'élevage et de l'agriculture, et il sera d'autant plus difficile de réduire ces émissions que la Terre devra nourrir au milieu du siècle trois milliards d'habitants de plus.

Les cycles naturels du carbone mettent en jeu plusieurs compartiments qui échangent les uns avec les autres :

- l'atmosphère au sein de laquelle la concentration en CO_2 croît régulièrement, avec des baisses relatives, saisonnières, à chaque printemps boréal ; ce compartiment représente un stock d'environ 750 Gt de carbone (GtC), soit 2750 Gt de CO_2 .

- les mers et océans, qui en raison de leur masse constituent un stock beaucoup plus important de carbone que l'atmosphère ou les continents. Il s'y trouve sous diverses formes : CO_2 dissous, biomasse marine, matière organique dissoute ou en suspension, coquilles calcaires du plancton, etc., soit environ 40000 GtC.

- les continents : sols, détritiques organiques, biomasses végétales (et animales) constituent un compartiment stockant environ 2000 GtC. La biomasse la plus importante est constituée par les forêts, dont la surface couvre plus de 30% des terres émergées de la planète (contrairement aux idées reçues, cette surface est actuellement en croissance).

- le sous-sol enfin qui est le compartiment qui renferme, en situation géologique, la matière organique fossile (15 millions de GtC), et en particulier les combustibles fossiles. Sa contribution la plus significative est le rôle qu'il joue en tant que pourvoyeur des combustibles fossiles. Le sous-sol reçoit aussi les débris de carbonate issus des coquilles et des coraux qui, directement ou après recristallisation, constituent la majeure partie des sédiments calcaires ; une autre source de carbonate est l'altération des minéraux des roches par l'eau météorique chargée de CO_2 . Au total, environ 60 millions de GtC sont ainsi immobilisés à l'échelle des millions d'années : on peut alors parler de « séquestration ».

Les flux échangés entre océans et atmosphère (environ 90 GtC/an) sont du même ordre de grandeur que ceux échangés entre biomasse continentale – y compris le sol, siège d'une activité microbienne – et atmosphère (environ 60 GtC/an). Le flux anthropique net total est de plus faible ampleur (9 GtC/an) ; il est principalement dû à la combustion du charbon et des hydrocarbures fossiles, et à la déforestation. Il n'est plus directement compensé par un flux inverse, d'où il résulte l'accumulation de CO_2 dans l'atmosphère.

Les procédés qui sont proposés pour y remédier consistent à séparer le CO_2 des rejets anthropiques provenant des installations fixes qui brûlent des combustibles fossiles, en particulier les centrales thermiques, et à stocker ce gaz dans le sous-sol ou dans les profondeurs des océans (à condition que les traités internationaux le permettent). Des procédés physiques ou/et chimiques ont d'ores et déjà été mis au point pour séparer le CO_2 en sortie des installations de combustion, mais ils ne sont pas économiquement acceptables aujourd'hui et les recherches se poursuivent dans le monde entier. Les principaux problèmes résident dans les volumes démesurés à traiter, si la combustion est faite à l'air, la diminution du rendement énergétique et le surcoût de production. La combustion à

l'oxygène pur limiterait la taille des installations mais nécessiterait en amont une unité de production d'oxygène forte consommatrice d'énergie.

Certains parlent de « décarbonation » des combustibles fossiles « avant combustion ». On ne saurait éliminer le carbone du charbon ou du pétrole qu'en produisant de l'hydrogène. Cette voie se ramènerait donc à une pratique existante en raffinerie pour se procurer de l'hydrogène, nécessaire dans divers traitements de raffinage : par reformage d'hydrocarbures à la vapeur d'eau, on produit du gaz de synthèse $\text{CO} + \text{H}_2$. L'oxyde de carbone est à son tour converti en CO_2 et hydrogène. Le CO_2 serait capté. L'hydrogène serait brûlé dans une centrale thermique appropriée. L'ensemble est complexe et coûteux en investissement.

Dans les deux cas, il faut alors stocker de façon permanente le CO_2 . Le sous-sol est la première réponse proposée. L'utilisation comme agent de récupération améliorée dans les gisements de pétrole et l'injection en aquifère s'appuient sur une expérience effective au Texas et en Mer du Nord. Mais il s'agit de gaz pur et peu coûteux provenant de gisements naturels. De plus, les quantités injectées sont de l'ordre du millième (1,8 et 1 Mt/an) de la production anthropique annuelle (25 à 30 Gt/an en 2002 selon qu'on inclut ou non la déforestation). Les propositions pour stocker des volumes importants s'appuient sur l'expérience du stockage saisonnier de gaz naturel (méthane) dans des réservoirs artificiels constitués par des aquifères salins ou des cavités dans le sel. Les problèmes scientifiques sont nombreux et importants : connaissance et modélisation des interactions gaz/eau/roche (processus physiques et chimiques intervenant dans le réservoir), modélisation hydrodynamique couplée à la géochimie, étanchéité au gaz des couches géologiques et des installations. Les problèmes techniques et économiques à résoudre sont également importants puisque l'expérience acquise porte sur un stockage saisonnier intermittent et non un stockage permanent.

Une autre possibilité serait l'injection du CO_2 en profondeur dans les océans, mais outre le fait que cette possibilité est rejetée par la société mondiale (convention de Londres, 1992, sur l'interdiction des rejets de déchets industriels dans les océans), elle poserait des problèmes scientifiques considérables. L'injection dans les zones profondes de quantités massives de CO_2 liquide risquerait de perturber profondément les équilibres biologiques des eaux profondes et même de bouleverser la circulation océanique générale, dont les mouvements profonds sont un élément majeur. On ignore à peu près tout des conséquences possibles d'une telle opération.

Une autre proposition est de laisser le gaz carbonique se répandre dans l'atmosphère et de tenter d'augmenter les prélèvements naturels de ce gaz par la production accrue de biomasse, en mer ou sur les continents. Certains projets visent à augmenter la productivité ou l'extension des écosystèmes marins existants. Nos connaissances sont trop limitées pour prévoir si l'apport d'éléments nutritifs aurait bien l'effet recherché ou s'il ne favoriserait pas le développement d'organismes indésirables, ou l'eutrophisation de certains bassins.

Le stockage global de carbone dans la biomasse végétale des continents résulte de plusieurs contributions, concourantes ou opposées : (i) variations des surfaces boisées, positives (boisement, reboisement, expansion naturelle des forêts), ou négatives (déforestation, catastrophes naturelles), (ii) variation de leur densité moyenne (stock sur pied, sol) liée aux pratiques agricoles et sylvestres ou à des effets naturels. Certes, l'augmentation de la teneur

atmosphérique en CO₂ favorise la croissance de certaines espèces végétales, mais l'impact en est mal connu, compte tenu du rôle des autres facteurs limitants (eau, température, minéraux,...). La capacité de stockage offerte par les sols cultivés, les jachères et les prairies, naturelles ou artificielles, est également insuffisamment connue.

Il faut être conscient de la taille des problèmes abordés. La séparation et le stockage du CO₂ dans des conditions de sécurité démontrées constituent un projet important, mais complexe et qui demandera un volume de travail de recherche considérable. L'émission libre du CO₂ vers l'atmosphère et son immobilisation dans une biomasse marine ou terrestre est un problème dont nous sommes loin de maîtriser tous les éléments et qui comporte une prise de risque élevée. Plus généralement, cette voie pourrait fournir un stockage seulement temporaire, puisque le destin de toute matière organique est d'être finalement dégradée en eau et CO₂, à la réserve de la fraction infime qui constituera les futurs combustibles fossiles.

10. CONCLUSION

Il est urgent que les scientifiques de tous les pays émettent auprès de la population et des autorités un cri d'alarme mondial. Notre planète subit une agression qui, si on n'y porte pas remède à temps, pourrait affecter toutes les formes de vie à des degrés divers, et particulièrement le mode de vie des êtres humains. Cette agression est notre fait, et les causes sont liées à notre voracité pour l'énergie. Nous aurons brûlé en deux siècles la totalité du pétrole et du gaz naturel et, en un siècle ou deux de plus, la totalité du charbon, accumulés pendant un demi milliard d'années. L'effet de serre qui résulte de l'émission annuelle de 25 milliards de tonnes de CO₂ (probablement 50 à 75 milliards de tonnes en 2050) provoque un changement climatique majeur dont les premières manifestations apparaissent en de multiples circonstances. En outre la disparition, au cours du siècle, du pétrole et du gaz imposera, à elle seule, leur remplacement par d'autres sources d'énergie.

Entre les deux phénomènes qui sont liés – raréfaction et épuisement du pétrole et du gaz, et changement climatique – c'est certainement ce dernier qui constitue le danger le plus grave pour l'avenir de l'humanité et son mode de vie. Le temps de la décision, qui forcera à agir ceux qui s'y refusent, interviendra quand une large part de la population considérera que « le changement climatique est devenu insoutenable », à force de tempêtes, sécheresses, canicules ou inondations, et surtout à cause des pertes économiques et des répercussions humaines et sociales qui en résultent. Cette époque arrivera sans doute bien avant l'épuisement des combustibles fossiles, mais il sera alors peut-être trop tard. De plus, il doit être clair pour chacun que tous les habitants de la Terre partagent la même atmosphère et que nul pays ou continent ne pourra se sauver seul.

On peut considérer qu'une première époque critique où, si rien n'est fait pour y remédier, nous nous heurterons à un mur, se situera vers 2020. Le protocole de Kyoto n'est peut-être pas la meilleure réponse possible, mais il amorce un mouvement solidaire et mondial vers la réduction des émissions de CO₂. Néanmoins, si seul ce texte est appliqué, la dérive climatique se poursuivra sur un siècle pour la température et plusieurs siècles pour la montée des océans, en raison de la persistance séculaire du CO₂ dans l'atmosphère.

Il faut être conscient que, pour limiter la teneur résultante en CO₂ dans l'atmosphère à 550 cm³/m³ vers la fin du siècle (teneur bien plus élevée que les 370 cm³/m³ actuels, et source probable de dommages environnementaux et économiques déjà importants), il serait nécessaire de diviser par deux nos émissions dès 2050, compte tenu de la durée de vie séculaire du CO₂ dans l'atmosphère. Il faudrait donc également diviser par deux nos consommations d'énergie, si nous ne modifions pas profondément nos sources d'énergie primaires et leur mode d'utilisation. Revenir en fin de siècle à l'état de l'atmosphère tel qu'il était en 1980 exigerait une division par quatre que nul ne paraît prêt à accepter dans les pays développés. On peut noter qu'une répartition égale de l'énergie entre tous les hommes se traduirait par une exigence comparable.

Seules, les énergies renouvelables (énergie solaire et ses dérivées : éolienne, hydraulique, biomasse ; géothermie) et nucléaires (fission ou fusion) ne produisent pas de gaz à effet de serre et permettraient à l'humanité d'échapper au destin qu'elle se forge. Mais nous sommes incapables de remplacer, à court terme, pétrole, gaz et charbon qui représentent actuellement près de 90% de l'énergie primaire commercialisée dans le monde. Il faut donc tirer parti de toutes les formes d'énergie, et nous ne pourrions nous passer d'aucune d'entre elles dans les prochaines décennies, pourvu que ce soit dans le respect de l'environnement.

Il n'y a, dans les sources d'énergie, ni ange ni démon : elles seront ce que nous en ferons. On peut, par exemple, imaginer qu'au milieu du siècle l'usage des combustibles fossiles soit confiné à des parcs industriels d'où ne sortirait qu'électricité, hydrogène ou chaleur. De son côté, le CO₂ serait capté sur site et séquestré. Nous devons donc mener une politique courageuse et volontariste et déployer à temps un intense effort de recherche, dans tous les domaines de production et conversion d'énergie, pour ne pas nous retrouver dès 2020 devant une situation devenue ingérable, avec des émissions de CO₂ accrues de 50%.

A cette échéance, l'énergie nucléaire de fission est la seule solution robuste qui permette de faire face à un accroissement de 50% de la demande, en particulier dans les zones à forte concentration humaine, sans accroître les désordres climatiques. Certains considèrent le charbon comme le recours naturel, face à l'épuisement progressif des hydrocarbures. Cette position méconnaît le problème des gaz à effet de serre, pour lesquels le charbon est le plus fort émetteur, rapporté à l'énergie fournie. En particulier, la construction irréfléchie de centrales thermiques au charbon en grand nombre, dans les deux prochaines décennies, nous placerait en situation de faiblesse accrue lorsqu'il faudra prendre des décisions, face à l'ampleur des problèmes. On peut observer que, dans le contexte économique actuel, les investissements qui ne respectent pas l'environnement ou ne préparent pas le futur sont favorisés : centrales thermiques classiques sans piégeage du CO₂, soit au charbon brûlant un combustible peu coûteux, soit au gaz offrant un coût de construction modéré et un retour sur investissement rapide.

Avant d'examiner les recherches propres à l'énergie, il convient d'insister sur l'importance de poursuivre et d'intensifier les recherches relatives au climat. Le cycle du carbone, bien que probablement le plus étudié parmi les éléments, reste encore insuffisamment connu. Les modèles numériques sont le seul outil pour prévoir le comportement de la planète dans le futur. Ils doivent être alimentés par de nombreuses données apportées par l'expérience. Ils calculent des valeurs moyennes, mais non des valeurs extrêmes qui seront responsables des

changements brutaux, les plus néfastes pour l'homme. Les rétroactions, notamment celles liées au cycle de l'eau et au changement d'état ou d'usage des sols, ne sont pas intégrées à ce stade. Il importe également d'augmenter le maillage pour disposer de prévisions régionales et d'améliorer l'évaluation des paramètres aux interfaces, en particulier océan-atmosphère.

Plusieurs questions relatives à l'énergie, qui nous paraissent d'une grande importance, ne semblent pas recevoir actuellement l'effort de recherche – scientifique, technique, économique ou sociale – qu'elles mériteraient, même si les discours médiatiques les utilisent souvent :

- Le piégeage et le stockage pérenne du gaz carbonique sont un sujet prioritaire : lui seul permettrait de poursuivre l'utilisation du pétrole, du gaz et du charbon en limitant la dégradation du climat et en assurant ainsi une transition acceptable par les usagers. Les discours sur ce thème sont innombrables, mais le contenu et la portée des recherches menées jusqu'ici sont encore peu convaincants. La généralisation de stockages souterrains ou sous-marins d'une taille capable de recevoir chaque année de 30 à 70 Gt supplémentaires de CO₂, pour des siècles ou millénaires, est loin d'être établie tant du point de vue scientifique et technique qu'économique. Les processus physiques et chimiques affectant le réservoir souterrain et l'environnement d'un stockage sont mal connus, de même que les problèmes d'étanchéité au CO₂ des couches géologiques supposées favorables et des ouvrages du stockage. En mer profonde, les conséquences éventuelles sur les courants marins et la biologie marine sont inconnues. Quant à l'injection du gaz pour améliorer la récupération des gisements pétroliers, souvent citée, elle porte sur des quantités qui ne sont pas comparables aux besoins de stockage. Il importe donc qu'une recherche à la mesure de ces problèmes soit entreprise.
- Dans le domaine des transports, la capture du CO₂ produit par les carburants à bord des véhicules est difficilement envisageable. Or, le parc mondial de véhicules routiers pourrait doubler au cours des 30 ou 40 prochaines années. De plus, l'épuisement des réserves de pétrole interviendra au cours du siècle. Les véhicules hybrides – un modèle expérimental est déjà présent sur le marché – faciliteront la transition vers d'autres sources d'énergie, sans qu'on sache s'ils représenteront seulement une étape ou plus. Mais on est amené à préparer le relais des carburants liquides actuels par des fluides ne produisant pas de CO₂. Il s'agit là d'un des points durs de la recherche. Le meilleur candidat paraît être l'hydrogène, mais les conditions les plus favorables pour sa production et son usage à moyen terme sont loin de faire l'unanimité : dans un premier temps, production en raffinerie à partir de fractions pétrolières ou de gaz naturel, avec captation du CO₂ ; plus tard, électrolyse de l'eau usant de l'électricité de source nucléaire ou renouvelable ; des cycles thermochimiques sont également envisageables ; enfin, la décomposition catalytique de l'eau à des températures de l'ordre de 1000°C, pouvant être atteintes avec de futurs réacteurs nucléaires du programme « *Generation IV* » qui seraient disponibles au milieu du siècle. Il s'agit là de projets dont nous ne connaissons pas l'issue avant plusieurs décennies. Il faudrait en outre établir par la recherche si la pile à combustible est, dans cette perspective, le convertisseur le mieux adapté au transport, et sous quelle forme serait délivré l'hydrogène, comprimé, liquéfié ou absorbé.
- Plus de la moitié de la population de la Terre vit déjà dans des agglomérations urbaines. La fourniture d'électricité à près de 400

mégapoles de plus d'un million d'habitants, et plus encore à la vingtaine d'entre elles supérieures à 10 millions d'habitants, paraît hors de portée des sources d'énergie renouvelables, souvent *diffuses* à la réserve des très grands barrages, pour lesquels les sites disponibles deviennent rares. Il reste alors deux possibilités seulement d'énergie *concentrée* : les centrales nucléaires (avec une réponse au problème des déchets) et, pour quelques décennies, les centrales thermiques utilisant les combustibles fossiles, mais avec captation totale et stockage du CO₂, ce qui est loin d'être acquis. Des centrales à hydrogène poseraient le même problème si la source primaire est du charbon, du pétrole ou du gaz. L'utilisation de centrales nucléaires fonctionnant en permanence (plus de 8000 heures par an) permettrait la production d'hydrogène pendant les heures ou les périodes creuses, malgré le coût de l'électrolyse, assurant ainsi la complémentarité des deux demandes majeures d'énergie (transport et habitat), et donc la cohérence du système.

- L'énergie nucléaire paraît être la solution la plus robuste pour fournir de l'électricité *concentrée* aux grandes villes, sans accroître les désordres climatiques. Elle doit donc être un objectif majeur des recherches énergétiques. La poursuite de l'effort entrepris devrait, en premier lieu, permettre de donner un exutoire ultime aux déchets nucléaires. Les réacteurs actuels seront perfectionnés dans le sens d'une sûreté accrue. La recherche sur les réacteurs du futur devra prendre en compte l'incinération de leurs propres déchets et le rôle futur de l'hydrogène dans notre civilisation. On cherchera aussi à valoriser la majeure partie de l'uranium (²³⁸U), grâce à de nouveaux réacteurs à neutrons rapides, ce qui portera les réserves de combustible à l'échelle des millénaires. Dans une perspective à plus long terme, la recherche sur la fusion (ITER) devra faire l'objet d'un effort soutenu. De nombreux domaines scientifiques sont concernés par la fission et la fusion : sciences des matériaux, génie nucléaire, génie des procédés, thermique, etc.
- Le stockage temporaire de l'électricité serait une véritable percée. On est actuellement très limité par les batteries, malgré les progrès réalisés. Les procédés de stockage indirect par voie hydraulique (barrages utilisés en sens inverse) sont vite saturés. Toute suggestion réaliste serait la bienvenue. Certains industriels paraissent s'être penchés sur ces problèmes. L'utilisation de l'électricité issue des centrales peu flexibles (nucléaire) pour produire de l'hydrogène par électrolyse permettrait le stockage inter saisonnier de celui-ci, qui serait utilisé soit dans les transports, soit pour régénérer de l'électricité dans des turbines hydrogène/air, ou hydrogène/oxygène, ou encore dans des piles à combustible de haute température. Le rendement de ces dispositifs pourrait dépasser 50%. Cette voie pose des problèmes de sécurité, de matériaux, et de corrosion qu'il importe de maîtriser.
- Le stockage de l'hydrogène (et éventuellement celui de l'oxygène) en grandes quantités vaudrait d'être évalué. La possibilité de le faire en situation géologique (cavité, aquifère) mériterait d'être étudiée. La faisabilité, du point de vue technique ou économique, de stocker l'hydrogène sur une base saisonnière devrait être comparée à celle de stocker le gaz carbonique indéfiniment, en créant de nouveaux stockages chaque année. A une échelle plus modeste, on peut penser à améliorer ainsi l'efficacité moyenne dans le temps des énergies éolienne et photovoltaïque.

- Les réseaux et le stockage, journalier ou saisonnier, de la chaleur permettraient une meilleure utilisation de celle-ci, sous-produit de nombreux procédés industriels. Les besoins de chauffage et d'eau sanitaire des secteurs résidentiel et tertiaire (environ 50 Mtep annuelles en France) pourraient ainsi être partiellement satisfaits par les excédents de chaleur des centrales électriques, en particulier nucléaires, qui sont actuellement rejetés. Le stockage de chaleur aiderait également l'usage des énergies renouvelables intermittentes. Le développement de grands réseaux pourrait aussi faciliter l'usage de bois et de déchets dans cette perspective. Il existe déjà d'importants réseaux de chaleur (50 TWh/an à St Petersburg contre 24 TWh/an dans toute la France). Les contraintes qui vont régner sur les émissions de CO₂ permettront d'en étendre l'usage à des villes moyennes.

Ces projets font appel à de nombreux domaines scientifiques. L'un des plus sollicités est la science des matériaux, depuis la tenue en température et aux rayonnements dans les futurs réacteurs nucléaires jusqu'à la supraconductivité. Tous les domaines du génie des procédés (nucléaire, thermique, chimique, etc.) sont eux aussi impliqués.

D'autres recherches plus ponctuelles méritent un nouvel examen. Ainsi, l'utilisation thermique de l'énergie solaire pour les constructions nouvelles se heurte plus à des problèmes d'environnement qu'à des problèmes techniques. Les échangeurs thermiques de taille modeste sont un élément important pour l'avenir, par exemple des pompes à chaleur. Les piles à combustibles posent encore de nombreux problèmes. La distribution éventuelle de l'hydrogène aux transporteurs devrait assurer fiabilité et sécurité. L'énergie des vagues et des courants, la différence de température entre surface et profondeur des océans méritent une nouvelle évaluation. Les capteurs photovoltaïques spatiaux transférant l'énergie sur la planète sont actuellement une vue de l'esprit, mais leur faisabilité pourrait être étudiée.

Un effort particulier dans le domaine de l'éducation permettra d'informer les élèves et les étudiants sur les données du problème énergie-climat, et sur l'importance d'une large acceptation sociale, condition nécessaire pour le succès des économies d'énergie.

Les économies d'énergie sont une source supplémentaire d'énergie, et donc une nécessité première. Elles relèvent en général moins de la science que de la technique et du comportement des utilisateurs. L'ADEME et l'Académie des Technologies ont travaillé dans ce sens. Elles ont montré qu'il reste beaucoup à faire dans ce domaine, tout en gardant le « confort énergétique ». Les économies devront être jugées sur leur résultat, leur pérennité (dans certains pays, la diminution de consommation des moteurs a été annulée par le retour des grosses voitures) et l'évitement des nuisances secondaires (comme les conséquences sanitaires de l'isolation thermique des locaux). On peut espérer, par exemple, voir disparaître d'importantes pertes énergétiques : dans le chauffage des locaux (secteurs résidentiel et tertiaire), mais aussi dans les rejets thermiques des centrales nucléaires, qui pourraient être valorisés par des réseaux de chaleur dans les villes voisines et dans des serres. La mise en œuvre des économies dans le bâtiment est lente ; dans l'industrie elle est lourde. Il importe que de telles études soient menées avec le souci de disposer de réponses à une situation de crise (ce qui amènerait par exemple à considérer des distances plus importantes que maintenant

pour des réseaux de valorisation de la chaleur rejetée). Dans tous ces problèmes, les études sociologiques ont un poids important.

Certains problèmes sont tellement faussés ou occultés par des dispositions artificielles qu'il est devenu difficile d'en discerner le bilan énergétique ou même économique. Il en va ainsi de l'acheminement des marchandises non périssables par camion consommant des produits pétroliers en comparaison avec le train utilisant de l'électricité d'origine nucléaire ou renouvelable. Dans beaucoup de pays, l'accumulation de participations ou subventions de l'état, de facilités fiscales, de coûts supportés par d'autres que les usagers ont rendu le problème inintelligible (création d'un réseau d'autoroutes ou de voies ferrées, péages qui dépendent plus du poids des groupes de pression que de l'usure des chaussées). Les conditions privilégiées de création d'un parc d'éoliennes et l'obligation d'achat de l'électricité produite posent des problèmes comparables. Les aspects sociétaux occultent alors totalement ceux de nature scientifique, technique ou économique, et il faudra élucider les premiers avant de pouvoir évaluer les seconds.

Enfin, la disposition d'énergie est une condition nécessaire au développement des pays émergents. Le cas de pays vastes et très peuplés, comme la Chine et l'Inde, risque de bouleverser les équilibres énergétiques mondiaux, en particulier face aux problèmes climatiques. A titre d'exemple, ces deux pays pourraient consommer dans vingt ans autant d'énergie que l'Amérique du nord et l'Union européenne réunies en consomment actuellement. Notre propos n'est pas d'empêcher les pays de se développer. Mais nous devons être capables de mettre à leur disposition en temps utile des sources d'énergie dépourvues de gaz à effet de serre et des techniques peu exigeantes en énergie, à des coûts économiquement supportables par ces pays.

En France et en Europe, la vision politique de production d'énergie n'est pas encore prise en charge à sa réelle valeur, malgré une certaine conscience de la gravité des phénomènes au sein de la population. Dans certains autres pays, ce niveau de lucidité n'est pas encore atteint. Nous serons cependant tous confrontés aux problèmes cruciaux de l'énergie et du climat dans les prochaines décennies : c'est probablement là que résidera le plus grand combat du XXI^e siècle.

Diviser par deux en 2050 la consommation française de combustibles fossiles serait déjà très difficile, à moins d'un rapide et profond changement de nos choix de consommation d'énergie. La diviser par quatre paraît irréaliste, puisque la France, à la différence des autres pays, a déjà enregistré le bénéfice du passage de l'électricité produite à partir des combustibles fossiles vers l'électricité nucléaire qui n'émet pas de CO₂.

Une évolution énergétique majeure est inévitable au cours du siècle. Pour qu'elle ne soit pas brutale et douloureuse, un processus graduel doit être anticipé dès maintenant. Nous aurons certainement besoin, dans les décennies qui viennent, de toutes les sources d'énergie, pourvu qu'elles soient utilisées dans des conditions respectueuses de notre environnement. Certains pensent que la technologie permettra de surmonter toutes les difficultés. Encore faut-il que les savoirs et les procédés soient disponibles en temps utile, ce qui nécessite un effort de recherche et de développement audacieux et considérable. Le développement durable sur notre planète est à ce prix.

Annexe

Équivalence entre énergies

L'unité légale d'énergie (mécanique, thermique, lumineuse) est le joule et l'unité légale de puissance est le Watt. Mais on utilise souvent d'autres unités. Ainsi l'énergie électrique est comptée en kilowattheure électrique (kWhe) ou en ses multiples MWhe (1000 kWhe), GWhe (1000MWhe), TWhe (1000GWhe). Un kWhe est l'énergie délivrée par une source de courant électrique d'une puissance de 1000 watt fonctionnant pendant une heure. L'énergie consommée par un pays est généralement exprimée en tonne d'équivalent pétrole (tep). C'est de l'énergie thermique. On la comptabilise annuellement en tep/an. Pour transformer l'énergie thermique (tep) en énergie électrique (MWhe) on prend un rendement théorique de conversion de 33 %. Alors 1 MWhe vaut 0,26 tep Pour comptabiliser l'énergie hydraulique, éolienne ou photovoltaïque en énergie électrique on prend un rendement théorique de conversion de 100 %. Alors 1 MWhe se confond avec 1 MWh et vaut 0,086 tep. Ce sont les conventions de l'Agence Internationale de l'Énergie et nous l'avons suivie.