

CONCLUSION

Associées à un concept scientifique déjà difficile à appréhender, les technologies de l'énergie posent des problèmes complexes. Leurs aspects sont multiples et contradictoires, même si on laisse de côté les questions économiques, sociales et politiques, de sorte qu'une *perspective globale* est indispensable à toute réflexion. Les énergies manifestent une grande diversité, tant par leur forme que par leur échelle d'intensité. Chacune d'elles présente des avantages et des inconvénients. La multiplicité des sources répond ainsi à une **multiplicité des besoins**, et il faut se défier de tout simplisme à ce sujet. Bannir le nucléaire conduirait inexorablement à émettre plus de CO₂ vers l'atmosphère. Bannir les carburants serait non moins impensable dans les prochaines décennies : bien que la France, dont 80% de la production électrique est d'origine nucléaire, 15% d'origine hydraulique, parvienne à se passer presque totalement des carburants pour ses centrales électriques, elle doit faire appel à eux (principalement au pétrole et au gaz) pour 60% de son approvisionnement **total** en énergie. Nos besoins énergétiques se répartissent en effet en 35% pour le chauffage, 30% pour l'industrie, 25% pour le transport et 10% pour les usages domestiques et tertiaires. Les énergies renouvelables, même si elles sont trop diluées pour remplacer celles qui sont couramment employées aujourd'hui, présentent des avantages qui justifient leur développement, mais à condition de les mettre en œuvre seulement pour des utilisations auxquelles elles sont adaptées. Enfin, certains besoins spécifiques peuvent appeler des solutions extrêmes : malgré le coût prohibitif de l'énergie qu'elles fournissent, piles et batteries sont irremplaçables pour montres et téléphones portables.

Prendre simultanément en compte les multiples questions liées à la production et à l'usage des différentes formes d'énergie et les contraintes qu'elles impliquent, impose de **peser le pour et le contre** de chaque hypothèse. Il importe en effet de prendre conscience des diverses conséquences de chaque décision concevable (y compris celle de ne rien faire !), de les comparer et de les hiérarchiser. Il est remarquable que le « principe de précaution », tel qu'il est énoncé dans la loi BARNIER sur l'environnement, comporte des réserves : « l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures **effectives** et **proportionnées**, visant à prévenir un risque de dommages **graves** et **irréversibles** à l'environnement à un coût **économiquement acceptable** ». Les adjectifs que nous avons soulignés supposent que l'on se soit livré à une évaluation comparative raisonnée des diverses mesures envisa-

geables. Sans ces réserves, souvent méconnues, le principe de précaution peut conduire à des décisions discutables ou même aberrantes. L'abandon par l'Allemagne de l'électronucléaire, qui la conduira inéluctablement soit à émettre plus de CO₂, soit à réduire massivement et autoritairement les consommations, est-il rationnel ? Des partisans du développement des énergies renouvelables eux-mêmes en arrivent à s'opposer à tel ou tel projet de barrage ou d'éoliennes en découvrant ses nuisances. Même une mesure d'économie d'énergie peut avoir des conséquences indirectes dommageables : en Hongrie, une campagne de calfeutrage systématique des fenêtres lors du premier choc pétrolier a permis de réaliser des économies sur le chauffage, mais a conduit à une accumulation, dans l'air des appartements, de radon émis par le béton des murs ; de ce fait, la population est soumise chaque hiver à une irradiation supérieure à l'effet des retombées de Tchernobyl. Il semble par ailleurs que le calfeutrage soit, avec l'élévation de la température des appartements, l'une des causes de l'augmentation de 50% en une trentaine d'années des cas d'asthme, observée dans les pays les plus riches.

Toute réflexion sur l'énergie, avec les indispensables comparaisons qu'elle suppose, devrait s'appuyer sur des données chiffrées, ou tout au moins sur des **ordres de grandeur**. Certains devraient particulièrement être gardés en mémoire, comme ceux qui concernent la plus ou moins grande concentration des énergies. On comprend également mieux les enjeux géopolitiques de l'énergie en sachant que la population mondiale est passée en 50 ans de 2,5 à 6 milliards, tandis que la production d'énergie était multipliée par 4, et que la puissance moyenne consommée est actuellement de 5 kW (ou 3,8 tep/an) pour un Européen, de 11 kW pour un Nord-Américain, de 1,2 kW pour un Chinois, de 0,7 kW pour un Indien et moins encore pour un Africain. Il faut savoir qu'il existe une forte corrélation entre les indicatifs sanitaires tels que la durée de vie et la consommation d'énergie, au moins jusqu'à 4 kW par tête. Ces chiffres montrent tout l'effort de développement à faire ; ils mettent aussi en évidence l'importance de la **maîtrise de l'énergie**, car la consommation énergétique, lorsqu'elle est forte, ne reflète pas seulement un niveau de vie mais aussi un niveau de gaspillage : dans l'ex-URSS, la consommation par tête a avoisiné celle des États-Unis.

Les principales contraintes que nous rencontrerons pour satisfaire aux besoins énergétiques croissants de l'humanité sont celles des ressources, des nuisances et de la distance entre ressources et utilisation, donc de la nécessité de transporter et de stocker l'énergie.

RESSOURCES

Afin d'apprécier les problèmes de réserves énergétiques et de nuisances, il importe de noter qu'actuellement, à l'échelle mondiale, l'énergie (hors aliments) provient du pétrole pour 35%, du charbon pour 22%, du gaz pour 21%, du bois de chauffage pour 10%, du nucléaire pour 6%, de l'hydraulique pour 6%, le reste étant négligeable.

Les énergies **renouvelables** proviennent pour la plupart, directement ou non, du rayonnement solaire : énergies **solaire, hydraulique, éolienne, biomasse** (aliments d'une part, combustibles comme le bois, les déchets végétaux ou l'alcool d'autre part). Malgré leur pérennité, ces énergies sont très diluées ; la puissance maximale qu'elles sont susceptibles de fournir ne peut suffire à subvenir qu'à une partie de nos besoins. Certes la Terre reçoit du Soleil un flux de $1,4 \text{ kW/m}^2$ de surface apparente, ce qui représente en une heure l'énergie que les hommes consomment en un an. Compte tenu de la sphéricité de la Terre, de la durée des nuits, de la réflexion et de l'absorption par l'atmosphère, la puissance moyenne qui atteint le sol, 160 W/m^2 , est plus faible mais reste importante. Malheureusement, les rendements des divers processus de capture de l'énergie solaire sont faibles.

Ainsi, l'**assimilation chlorophyllienne** n'exploite qu'une faible part du flux lumineux : les cultures sucrières, les plus productives en énergie biochimique, fournissent seulement en moyenne annuelle l'équivalent de $0,6 \text{ W/m}^2$. Ceci limite les perspectives de la biomasse. Elle est produite actuellement presque uniquement pour notre alimentation. Or un homme consomme en moyenne pour se nourrir 2700 kcal/jour , c'est-à-dire 130 W , chiffre faible devant sa consommation de 2 kW en énergies conventionnelles (moyenne mondiale pour l'électricité et les carburants). Un développement significatif des biocarburants occuperait donc une part importante des terres cultivables, de sorte que malgré leur intérêt les combustibles végétaux ne pourront jouer qu'un rôle limité.

Le rendement des **piles photovoltaïques** industrielles atteint 15% et il faudrait 200 m^2 de panneaux par Européen pour assurer en moyenne ses besoins en énergie ; leur fabrication repose pour l'instant sur une technologie dispendieuse. De plus, le solaire, aussi bien d'ailleurs que l'éolien, si l'on veut les utiliser plus que comme des sources d'appoint pour la production d'électricité, doivent être combinés à un **stockage** d'énergie, problème non résolu. Dans nos pays, c'est dans le domaine du chauffage domestique que l'énergie solaire semble dans l'immédiat le mieux utilisable, grâce à des capteurs sur les toits produisant de l'eau chaude. Au contraire, dans des régions dépourvues de réseau électrique, les dispositifs photovoltaïques associés à des batteries sont peut-être, malgré leur coût, le choix le meilleur pour donner accès à un minimum de confort électrique à des milliards d'humains qui en sont dépourvus. Quant à l'énergie **hydraulique**, celle qui parmi les énergies renouvelables occupe (après l'énergie solaire directe) le moins de surface sur Terre pour une puissance donnée, elle ne peut plus se développer que dans certains pays où il subsiste encore des sites adéquats pour l'installation de barrages, et ce au prix de bouleversements écologiques et humains qui peuvent être considérables. Dans les pays développés, l'équipement hydroélectrique approche de la saturation ; en France, il fournit environ 15% de notre consommation électrique.

La **géothermie** occupe une place particulière parmi les énergies renouvelables, car elle est issue non du Soleil mais de l'intérieur de la Terre, dont la température reste élevée en raison de sa radioactivité. Elle aussi ne peut fournir qu'une puissance limi-

tée car elle est en général diluée, son flux étant de 1 W/m^2 . De plus, il existe une grande variété de gisements dont l'exploitation pose des problèmes spécifiques ; certains sont épuisables..

Les autres énergies, **fossiles**, reposent sur l'exploitation de minéraux formés durant l'histoire de la Terre et n'existant qu'en quantités limitées. Au rythme de consommation actuel, les réserves mondiales reconnues ne peuvent couvrir qu'un **demi-siècle** pour le **pétrole**, un **siècle** pour le **gaz** ou pour l'**uranium**, **quelques siècles** pour le **charbon**. On peut certes espérer que des technologies futures permettront d'exploiter pour les carburants des gisements déjà connus mais actuellement inutilisables car le pétrole y est trop dilué pour qu'on puisse l'extraire de la roche-réservoir. Mais, outre la hausse des coûts de production, ne serait-il pas plus judicieux de réserver le pétrole aux usages, actuels ou futurs, de la pétrochimie pour laquelle il est irremplaçable, plutôt que de le brûler ? En n'utilisant que des technologies actuellement maîtrisées, la seule solution pour assurer une disponibilité suffisante d'hydrocarbures fossiles aux générations futures paraît être la construction de centrales nucléaires **surgénératrices**, grâce auxquelles l'énergie électrique extraite de l'uranium serait multipliée par 100 et celle, bien plus importante, extraite du thorium deviendrait accessible. Ceci permettrait de couvrir la consommation **annuelle** d'électricité mondiale à l'aide seulement du **dix millième** des réserves d'uranium (beaucoup moins si l'on tient compte des réserves d'uranium contenues dans les océans). Un jour peut-être, la fusion fournira-t-elle une source d'énergie calorifique et électrique inépuisable grâce au deutérium contenu dans l'eau de mer. On peut aussi espérer que l'on parviendra à couvrir au moins une partie des besoins en chaleur et en électricité à l'aide du solaire. Mais le problème reste entier pour le transport automobile, où il faudra trouver rapidement de nouvelles technologies n'ayant pas recours aux carburants fossiles, telles que l'emploi d'hydrogène produit à partir du nucléaire ou, à long terme, d'énergies renouvelables.

NUISANCES

Toutes les formes d'énergie engendrent des nuisances. La plus préoccupante d'entre elles est l'augmentation de l'**effet de serre** en raison de l'émission de CO_2 provoquée par la combustion de gaz, de pétrole ou de charbon. Par kilowattheure fourni, le gaz dégage 49 g de CO_2 , le pétrole 71 g et le charbon 86 g. De ce fait, la teneur de l'atmosphère en CO_2 , qui oscillait jusqu'à il y a deux siècles entre 180 ppmv (parties par million en volume) lors des périodes glaciaires et 280 ppmv, a augmenté de plus en plus rapidement depuis le début de l'ère industrielle, jusqu'à la valeur actuelle de 365 ppmv. Ce chiffre est supérieur de 30% aux maxima atteints depuis 420 000 ans, période pour laquelle on a pu faire des mesures sur les carottes glaciaires de l'Antarctique. Quelle que soit la politique énergétique mondiale, un doublement du CO_2 atmosphérique au cours du XXI^e siècle paraît difficilement évitable.

Le problème est d'autant plus complexe que quatre causes humaines d'importance comparable concourent à l'augmentation de l'effet de serre : le chauffage, les transports, la production industrielle, la production alimentaire. Cette augmentation de l'effet de serre est probablement responsable, au moins en partie, des changements climatiques observés au cours du dernier siècle : en moyenne mondiale, la température s'est élevée de près d'un degré (dont la moitié attribuée aux émissions de gaz à effet de serre), le niveau des mers de 10 cm. L'emploi du nucléaire ou de l'hydraulique pour la production d'électricité réduit cette nuisance : les Etats-Unis ou le Canada émettent environ 20 tonnes de CO₂ par tête et par an, l'Europe en moyenne 8 tonnes, la France ou la Suède moins de 6 tonnes ; ce chiffre reste relativement élevé dans ces deux pays, bien qu'ils n'utilisent pratiquement pas de centrales thermiques, car le chauffage et les transports nécessitent un recours au pétrole, au gaz ou au charbon. D'ailleurs, à l'échelle mondiale, les carburants représentent 80% de l'énergie totale utilisée. Même si l'électronucléaire se répand dans le monde, il faudra, pour réduire les émissions de CO₂, généraliser le chauffage solaire et la récupération de chaleur des centrales, diminuer la part du pétrole dans les transports et parvenir à mettre au point de nouvelles technologies (perfectionnement du photovoltaïque, hydrogène pour les véhicules ?). Il convient de noter à ce propos que l'hydrogène, souvent présenté comme une panacée, n'est pas une source primaire d'énergie mais seulement un moyen de stockage ; il n'existe à l'état naturel qu'en combinaison et on ne peut l'extraire sans production de CO₂ qu'en faisant appel à une énergie électronucléaire ou renouvelable.

La nocivité des émissions liées à la combustion, pour l'industrie ou pour les transports, de gaz, de pétrole et, surtout, de charbon ne se limite pas à l'accroissement de la concentration des gaz à effet de serre. **Oxydes d'azote** et de **soufre, poussières** sont, directement ou indirectement, responsables de nombreuses affections respiratoires et cardio-vasculaires à l'origine de plusieurs centaines de milliers de décès prématurés annuels dans le monde. Il est certes possible de limiter efficacement ces rejets à la source à condition d'y mettre le prix ; c'est ainsi que la qualité de l'air des grandes métropoles est d'autant meilleure qu'elles sont situées dans des pays riches. Contrairement à un préjugé répandu, la pollution moyenne à Paris n'a cessé de diminuer depuis 50 ans malgré la circulation croissante. Les pics de pollution causent encore cependant plus de 10 000 décès prématurés chaque année à Paris et la recherche d'énergies propres reste indispensable.

Parmi les nuisances des industries de l'énergie, les **accidents** provoquent à juste titre l'émotion du public. Beaucoup d'entre eux seraient cependant évitables. Tchernobyl est le résultat d'une incurie notoire, de même que la plupart des déversements de pétrole dans la mer. La mortalité des mineurs de charbon est plus de 1000 fois plus faible en Australie qu'en Chine. Le retentissement médiatique d'un accident est souvent sans mesure avec sa gravité : une catastrophe dans une mine de charbon en Asie ou en Europe de l'Est ayant causé de nombreuses pertes humaines peut passer inaperçue, alors que Three Mile Island, qui n'a causé par irradiation aucune victime, est dans toutes les mémoires.

Le problème de la radioactivité des **déchets nucléaires** est source de préoccupation générale. Le danger est évident, mais doit être relativisé par diverses comparaisons, d'abord avec celui du CO₂, puis avec celui des déchets radioactifs d'origine médicale, beaucoup moins délimité et moins bien contrôlé, avec celui des déchets chimiques, enfin et surtout avec la radioactivité naturelle. Faut-il s'inquiéter d'informations alarmistes faisant état d'une activité du sol de quelques dizaines de milliers de becquerels au m², induite par des retombées de Tchernobyl, lorsqu'on sait qu'un corps humain émet en permanence 8000 Bq ? Ces peurs sont entretenues par une surestimation des effets sur nos cellules des faibles doses de rayonnement. Les réglementations et les croyances communes sont basées sur une extrapolation linéaire de ces effets à partir des valeurs observées pour de fortes doses. En réalité, des études de biologie et d'épidémiologie (confirmant l'idée selon laquelle la radioactivité naturelle n'a pas entravé le développement de la vie) ont montré que les effets des faibles doses, s'ils existent, sont très inférieurs aux estimations courantes. Ici encore, la physique doit aider à la réflexion : la très longue durée de certains déchets préoccupe le public, alors qu'elle implique une très faible activité. Un traitement rationnel des déchets suppose leur tri et une recherche de solutions différentes selon le temps de vie (stockage ou transmutation). Les progrès de la physique nucléaire, si les recherches nécessaires sont poursuivies, pourraient aboutir à une solution du problème, d'autant plus que le volume total à traiter est faible. Les surgénérateurs pourraient en particulier aider à se débarrasser du plutonium. Des recherches sont aussi en cours pour mettre au point de nouveaux types de réacteurs, qui ne seraient pas susceptibles de s'emballer et qui produiraient peu de déchets actifs.

Les **déchets chimiques**, dangereux comme le plomb issu de la fabrication des accumulateurs ou les métaux lourds contenu dans les piles, présentent des risques différents. Ils ne disparaissent pas avec le temps comme les produits hautement radioactifs. Ils sont beaucoup moins aisément détectables que des corps même très faiblement radioactifs, et passent plus facilement inaperçus.

La **pollution thermique**, issue de la dégradation de l'énergie, est globalement négligeable pour l'ensemble de la Terre. Elle peut localement conduire à une nuisance, associée par exemple à l'échauffement d'une rivière.

Les énergies renouvelables ne sont pas exemptes de nuisances. Les **barrages**, qu'ils soient grands ou petits, perturbent l'environnement, parfois de façon catastrophique. C'est l'une des raisons pour lesquelles l'usine **marémotrice** de la Rance n'a pas eu de successeur. Les **éoliennes** occupent à puissance donnée beaucoup d'espace ; elles nécessitent chacune un socle de béton de 270 tonnes ; malgré les progrès, elles restent bruyantes et sont souvent critiquées, comme les pylônes électriques, pour la place qu'elles occupent dans le paysage ou dans la mer. Les panneaux solaires, noirs eux-mêmes, peuvent choquer le sens esthétique. La **géothermie** se heurte à divers problèmes tels que la corrosion. Quant à la **biomasse**, sa production industrielle suppose l'emploi de quantités importantes d'engrais,

ainsi que l'irrigation, au risque de pénurie d'eau et de pollution. Elle nécessite un contrôle strict des techniques d'utilisation pour limiter les émissions polluantes et une gestion assurant que les plantations compensent les consommations.

TRANSPORT DE L'ÉNERGIE

Jusqu'à la révolution industrielle, seuls le transport du bois de chauffage et celui des aliments permettaient d'utiliser de l'énergie ailleurs que sur le lieu de production. Nous disposons aujourd'hui de deux moyens commodes de transport d'énergie (à côté des canalisations d'eau chaude).

Le premier moyen est l'emploi de **lignes électriques**. L'importance considérable de l'énergie électrique, ses multiples possibilités d'utilisation, résident précisément dans le fait que c'est la seule forme d'énergie susceptible d'être transformée en n'importe quelle autre et d'être transportée au loin en grande quantité, à un coût énergétique relativement faible. En effet, grâce aux transformateurs qui permettent en courant alternatif d'utiliser des lignes à **haute tension**, les pertes par effet JOULE peuvent être réduites. Elles sont en France de 8%.

Le second moyen est le **transport des carburants**, par bateau ou par rail pour le charbon, par oléoduc ou navire pétrolier pour le pétrole, par gazoduc ou méthanier pour le gaz, par camion-citerne pour l'essence. Notons cependant que ce transport peut être dispendieux en énergie : le transport de charbon en Chine depuis le lieu de production jusqu'à Pékin peut consommer la moitié du chargement des trains ; une importante proportion de gaz se perd en Sibérie en raison des fuites dans les gazoducs. Le transport de l'uranium pose moins de problèmes de pertes puisqu'on n'a besoin d'en véhiculer que de faibles volumes. L'essor du train à vapeur au XIX^e siècle, celui de la **voiture** et de l'**avion** au XX^e siècle, ont reposé sur la possibilité d'emporter **avec soi**, sous forme de carburant, l'énergie nécessaire pour parcourir des distances de plus en plus longues. Auparavant, il fallait sur mer nourrir des rameurs ou attendre le vent, sur terre multiplier les relais de poste, source de foin transformé en énergie hippomobile.

L'énergie peut aussi être transportée à distance par un rayonnement : c'est sous cette forme que nous parvient l'énergie solaire. Cependant, on ne sait transférer ainsi (sauf dans la science-fiction) que de faibles puissances, de sorte que l'emploi du rayonnement se limite à l'envoi par **voie hertzienne** de signaux de télécommunications (télévision, téléphonie, satellites...).

STOCKAGE

De même que le transport, le stockage entraîne des pertes d'énergie sous forme de chaleur, car il nécessite souvent un changement de forme d'énergie.

Les **carburants** offrent non seulement une commodité de transport mais aussi de stockage. Malheureusement, seul leur emploi pour le chauffage domestique ou industriel permet d'utiliser toute leur énergie chimique ; leur emploi dans les centrales électriques ou les véhicules fait perdre en chaleur 60% de cette énergie.

Les **barrages** hydroélectriques constituent le seul moyen (indirect) de stocker de grandes quantités d'électricité. Ils sont de plus en plus souvent équipés de manière à fonctionner presque **réversiblement**, soit en faisant chuter l'eau pour produire de l'électricité, soit en pompant l'eau d'aval en amont. Dans les deux cas, la dégradation en chaleur est relativement faible. Ceci permet de stocker une énergie électrique produite en heures creuses par des centrales nucléaires (qu'il est préférable de faire fonctionner sans variation excessive de puissance), afin de la restituer au réseau en heures de pointe. La Suisse revend de la sorte à l'Italie de l'énergie électrique achetée auparavant en heures creuses à la France. Les barrages sont donc utilisables non seulement comme sources d'énergie hydroélectrique grâce à la pluie, mais aussi comme réservoirs d'énergie électrique.

Les **accumulateurs** constituent un autre moyen commode de stocker une énergie. Cependant, ici, les pertes sous forme de chaleur sont plus importantes. Surtout, les accumulateurs ont par unité de masse une **capacité limitée**, par exemple 35 Wh/kg pour ceux au plomb. Cette faible capacité constitue la principale entrave au développement des voitures électriques (la puissance d'une voiturette est de l'ordre de 10 kW).

C'est pourquoi l'emploi de l'**hydrogène**, qui serait produit par électrolyse de l'eau et utilisé pour produire un courant électrique dans une pile à combustible, paraît une voie prometteuse, quoique futuriste, de stockage de l'énergie pour des voitures électriques. En effet, cette technique est associée à une énergie chimique de 32 kWh par kg d'hydrogène, considérablement plus grande que celle des batteries et nécessitant moins de matériaux inactifs. Cette énergie par unité de masse est également supérieure à celle des carburants usuels, par exemple 12 kWh par kg de pétrole, et présente l'avantage potentiel de pouvoir être convertie en énergie électrique directement utilisable dans un moteur à fort rendement, souple et silencieux. Il reste à diminuer les coûts de production, améliorer les rendements et trouver des techniques de stockage sûres, efficaces et, cependant, légères.

Il faut enfin noter que l'énergie **solaire**, foncièrement intermittente, nécessite un stockage. Celui-ci est facilement réalisé par production d'eau chaude si cette énergie est captée pour le chauffage domestique, mais une pile photovoltaïque nécessite un couplage avec un accumulateur. Il en est de même pour l'énergie **éolienne**, sauf lorsqu'elle est utilisée pour pomper de l'eau comme dans les polders. Le développement de ces deux formes d'énergie pour la production d'électricité est donc conditionné par les progrès de l'électrochimie.

POURQUOI ON NE PEUT CONTINUER « COMME ÇA »

Nous l'avons vu, notre exploitation des énergies fossiles est intensive. Elle ne pourra durer longtemps à ce rythme. D'une part, les réserves ne sont pas inépuisables ; d'autre part et, sans doute, plus gravement, les émissions de gaz à effet de serre associées à la combustion des combustibles fossiles posent le problème du dérèglement climatique. Si les scientifiques répugnent à affirmer que tel ou tel incident climatique récent – tempête, inondation, sécheresse, canicule... – est dû de manière certaine à l'augmentation observée du taux de gaz carbonique dans l'atmosphère, ils s'accordent à constater que la température moyenne du globe augmente, que la banquise fond, que le niveau de la mer s'élève à cause de la dilatation de l'eau, que les dix dernières années du xx^e siècle ont été les plus chaudes. En même temps, ils considèrent que la fréquence des événements extrêmes devrait augmenter. Certes, le secteur de l'énergie n'est pas le seul responsable des émissions de gaz à effet de serre (la source principale de méthane, par exemple, est l'agriculture, en particulier l'élevage des bovins et la culture du riz). Mais le secteur énergétique, le chauffage et les transports sont les principaux émetteurs de gaz carbonique, qui contribue à lui seul à plus de 65% de l'augmentation de l'effet de serre.

La demande énergétique va croître, du fait de l'augmentation attendue du nombre des hommes sur la Terre, du fait du développement rapide de pays très peuplés comme la Chine et l'Inde, l'Indonésie, le Brésil. Même si l'on constate que plus un pays est développé, meilleure est son efficacité énergétique, on observe que la consommation d'énergie par habitant continue à croître en même temps que le PIB par tête.

DES ÉCONOMIES D'ÉNERGIE, JUSQU'OU ?

L'habitat est un secteur où d'importantes économies d'énergie pourraient être faites, sans compromettre le confort ni augmenter considérablement les coûts de construction. Diminuer les besoins de climatisation en saison chaude, les besoins de chauffage en saison froide, en jouant sur l'isolation, l'orientation de la construction, la distribution des ouvertures, les matériaux, tout cela est possible. Mais l'effet sur la consommation est forcément lent ; dans un pays comme la France, l'habitat ne se renouvelle qu'à l'échelle du siècle, et encore. Des logements datant de 100 à 200 ans et n'ayant pas subi de modification notable de leur gros œuvre sont toujours en usage.

Un développement de l'emploi du solaire thermique pour assurer, ou tout au moins contribuer au chauffage des pièces ou à la production d'eau chaude sanitaire, l'utilisation de pompes à chaleur, pourraient conduire rapidement à des économies appréciables : ces installations peuvent être incorporées à des bâtiments existants.

L'amélioration du rendement énergétique des appareils est une autre source d'économies d'énergie. En Europe, les appareils destinés au grand public (électroménager, téléviseurs...) se sont vu imposer un étiquetage qui permet d'apprécier leur consommation d'énergie, dans l'espoir que les acheteurs choisiront les plus économes.

Dans l'industrie, de gros efforts ont déjà été faits ; ils se poursuivent, d'une part dans un souci de diminuer les coûts de revient, d'autre part en anticipation de législations contraignantes, en particulier en Europe et aux États-Unis.

Ces économies, qui concernent essentiellement les pays développés où, il est vrai, la consommation par habitant est la plus forte, sont conditionnées par une forte volonté politique et collective – peu de gens réduiront spontanément leur consommation individuelle, convaincus que cela ne changerait pas grand-chose. On connaît l'anecdote du curé qui, ayant demandé à chacun de ses paroissiens de verser dans un tonneau, placé à l'entrée de l'église, un pichet de vin destiné aux messes, le trouva plein, mais d'eau pure... Ce n'est qu'au moyen d'une forte incitation (voire une coercition ?), en particulier par une augmentation du prix de l'énergie, que les consommateurs consentiront d'abord à éviter les gaspillages, puis à prendre en compte les économies d'énergie dans leur comportement quotidien.

Cependant, il ne faudrait pas que les économies d'énergie conduisent à une baisse du niveau de vie, du confort, de la santé, de la qualité de l'alimentation, de la qualité des produits de consommation. C'est l'énergie bon marché qui a permis le développement des sociétés industrielles et les progrès qui y sont associés, en particulier l'allongement considérable de la durée de vie et l'amélioration de la santé. Il ne peut être question de mettre en cause ces acquis, il s'agit d'un choix de civilisation sur lequel on ne peut revenir radicalement sans produire des catastrophes. Il y a trop d'hommes sur la Terre pour que les sociétés puissent retrouver les modes de vie d'autrefois – à supposer que ceux-ci soient désirables. L'Histoire, avec la révolution industrielle, a conduit à une situation irréversible.

Il s'agit donc de maintenir la qualité de vie dans les pays développés, d'améliorer les conditions de vie dans les pays en voie de développement, tout en ayant le souci d'économiser l'énergie. Tous les scénarios de prévision conduisent à une augmentation de la demande, plus ou moins grande selon le degré de frugalité consenti. Selon le scénario le plus restrictif, qui suppose une croissance nettement ralentie des PIB moyens, la demande mondiale d'énergie primaire serait, en 2050, de 40% plus élevée qu'en 2000.

Aussi paraît-il impossible de tabler sur une diminution de la consommation mondiale d'énergie à l'horizon 2050, même si chacun devenait vertueux : il y a sur Terre trop d'êtres humains qui n'ont pu accéder aux bénéfices de l'énergie ; a-t-on le droit de les en empêcher ? Alors, que faire ?

POURQUOI EN PARLER MAINTENANT ?

L'inertie des systèmes de transformation de l'énergie est grande. On n'installe pas à grande échelle une nouvelle source d'énergie primaire rapidement. En revanche, les pénuries se font sentir instantanément et leur capacité de nuisance est immense. Une crise de l'approvisionnement énergétique pourrait avoir des conséquences dramatiques, allant d'une dégradation profonde de la situation des pays les plus pauvres à des conflits armés que les pays puissants n'hésiteraient pas à conduire pour s'assurer un approvisionnement vital pour eux.

Nous avons tenté, dans ce livre, d'expliquer le fonctionnement des sources d'énergie primaire et de donner des indications sur leur potentiel de production et sur les coûts associés, dans l'état actuel de la technologie. C'est avec ces énergies-là qu'il va falloir assurer la satisfaction de la demande de demain ; il ne faut pas s'attendre à ce que des physiciens découvrent, subitement, une nouvelle source d'énergie, facile à mettre en œuvre, comme un magicien sort un lapin de son chapeau.

Il est donc urgent de faire les choix qui permettront de diminuer radicalement la contribution des combustibles fossiles au bouquet énergétique – en particulier aux transports –, tout en garantissant une production suffisante et durable. Il s'agit de choix sociaux et économiques, donc de choix politiques, et ils concernent l'ensemble de la planète – il ne suffit pas d'être vertueux ou intelligent dans un seul pays, voire un continent ; il faut l'être mondialement. Ces choix doivent tenir compte des réalités incontournables que sont les capacités de production et les ressources. C'est l'un des objectifs de ce livre que de montrer quelles sont ces réalités incontournables. Le seul moyen de réduire aussi vite et autant que possible la part des énergies fossiles est de recourir aux énergies dites renouvelables et au nucléaire. Parmi les énergies renouvelables, il y a lieu de distinguer celles qui sont intermittentes, comme l'éolien ou le solaire, de celles qui sont disponibles à tout moment, comme l'hydraulique et la biomasse. Pour les premières, la nécessité et la difficulté de disposer d'un moyen de stockage de l'énergie à un coût raisonnable sont des facteurs qui en limiteront encore longtemps l'extension, en particulier pour la production d'électricité. L'hydraulique, sous la forme des barrages hydroélectriques, est particulièrement compétitive mais réclame des investissements lourds. Elle est la forme de production électrique qui présente le plus de souplesse et est particulièrement bien adaptée à la gestion des demandes de pointe. Elle a contre elle de conduire à des bouleversements écologiques et sociologiques qui peuvent être considérables, même à l'échelle régionale. De plus, dans bien des pays, comme le nôtre, il ne reste plus guère de sites encore susceptibles d'être équipés. La biomasse, sous forme de biogaz, de biocarburants ou de combustibles solides, représente sans doute le plus important gisement d'énergie renouvelable dans les prochaines décennies. Elle présente de sérieux risques de pollutions atmosphériques et ne peut être considérée comme neutre sur le plan des rejets de gaz à effet de

serre qu'au prix d'une gestion rigoureuse de la ressource et d'une lutte déterminée contre le déboisement, lutte dont les conditions de succès sont loin d'être assurées dans la grande majorité des pays en voie de développement. Elle peut aussi poser de sérieux problèmes d'allocations des sols et des ressources en eau.

En définitive, on ne voit pas comment on pourrait à la fois faire face à la demande d'énergie et limiter les émissions de gaz à effet de serre à un niveau acceptable, sans faire appel de façon beaucoup plus massive qu'à présent à l'énergie nucléaire. Non seulement elle permettrait au niveau mondial de se passer presque totalement des carburants pour la production d'électricité, comme actuellement en France, mais elle pourrait aussi dans un avenir pas très lointain être stockée sous forme d'hydrogène susceptible d'alimenter les véhicules. Il semble impossible que la fusion nucléaire puisse donner lieu à un déploiement industriel avant 2050. Reste donc l'énergie de fission. Pour ce faire, il faudra la rendre socialement plus acceptable qu'elle ne l'est actuellement. Des réponses satisfaisantes qui ne relèvent pas toutes de la technique, loin de là, devront être apportées aux préoccupations des populations, qu'il s'agisse de la sûreté des installations, de la gestion des déchets ou de la prolifération des armements nucléaires. En ce qui concerne les deux premières questions, la situation est dès à présent sous contrôle car on ne voit pas se profiler à l'horizon d'obstacles techniques insurmontables pour leur trouver des réponses durables et sûres. La question de la prolifération relève, elle, de mesures politiques plus que techniques. Certes, en recourant aux réacteurs actuels, un important déploiement de l'énergie nucléaire risque de se heurter à une raréfaction des ressources d'uranium. Il est donc important et urgent de développer une ou des filières surgénératrices permettant une gestion optimale des ressources, une diminution spectaculaire des besoins d'extraction minière et une diminution tout aussi spectaculaire de la production de déchets ; les bases scientifiques sont bien établies et les recherches technologiques déjà amorcées, en coopération au niveau mondial, montrent que l'objectif pourrait être atteint à l'horizon 2050 si une volonté politique existe.

Comme on l'a vu à maintes reprises, les questions énergétiques sont, parmi les problèmes de société majeurs dont l'opinion se préoccupe à juste raison, celles qui nécessitent le plus de faire appel à la science, en particulier à la physique. Celle-ci a un double rôle à jouer. D'une part, même si elle ne peut suffire à résoudre les multiples problèmes qui se posent, elle seule est susceptible de suggérer des solutions technologiques. Ce livre a abordé des questions relatives aux rejets de CO₂, au stockage de l'énergie, au traitement des déchets nucléaires, à l'amélioration de l'emploi des énergies chimique ou solaire, aux progrès des réacteurs à fission, aux économies d'énergie, à une meilleure exploitation des gisements d'énergie fossile, aux espoirs en la fusion. Pour toutes ces questions, des **recherches** fondamentales et appliquées sont cruciales. Il importe en effet de faire face à un défi majeur, celui de satisfaire aux besoins des hommes en énergie à l'échelle mondiale, tout en préservant l'avenir de notre planète.

D'autre part, comme nous l'avons vu, une approche scientifique est non seulement utile, mais souvent indispensable pour embrasser les problèmes énergétiques. La science fournit des bases, souvent peu intuitives, nécessaires à toute prévision, à tout débat et à toute décision sur l'énergie. Peut-on ignorer les contraintes imposées par les lois naturelles, guide irremplaçable sans lequel on risque aussi bien de se livrer au pessimisme que de pêcher par excès d'optimisme ? Est-il raisonnable de préférer telle ou telle forme d'énergie pour tel ou tel usage, sans reconnaître l'importance et comprendre la signification des indispensables comparaisons chiffrées – ce qui suppose une connaissance minimale des grandeurs, phénomènes et unités physiques ? Peut-on sainement évaluer les risques de chaque forme d'énergie et les mettre en balance sans avoir assimilé les concepts de probabilité et d'espérance mathématique ? C'est donc un objectif primordial pour l'enseignement que de familiariser les élèves, avec une **culture scientifique** essentielle à leur **formation citoyenne**. Ils seront ainsi mieux armés pour jauger objectivement les propositions politiques ou économiques et participer aux décisions démocratiques, dans ce domaine de l'énergie où fleurissent trop facilement préjugés simplistes et mythes.

Roger BALIAN, Elisabeth HUFFER, Hervé NIFENECKER