

L'énergie et l'environnement: la transition

Le problème n'est pas tant celui des ressources énergétiques que celui des résidus de leur exploitation

par W. Häfele

Le débat actuel sur l'avenir de la production énergétique est essentiellement dominé par le sectarisme et les contradictions. Les conflits d'opinions, les défis, les affirmations sans réplique, nous ne les évoquerons ici que brièvement. Fondamentalement, cet état de choses est le reflet de la nature complexe des systèmes énergétiques et de leurs multiples interactions et résulte aussi du fait que certains aspects particuliers du problème sont mis en vedette par certains observateurs, tandis que d'autres aspects, qui méritent tout autant de retenir l'attention, sont passés sous silence. D'un côté comme de l'autre, il faut chercher à comprendre les rapports qui existent entre les différents éléments du problème. Cela est tout particulièrement vrai en ce qui concerne la politique énergétique.

Arguments et opinions

Il est très instructif de comparer les positions et les discussions caractéristiques de la controverse actuelle autour de la question de l'énergie. Par exemple, certains préconisent d'utiliser davantage le charbon, ce qui est logique pour les pays qui disposent de gisements exploitables à bon compte. Les Etats-Unis, l'Union soviétique et la Chine en possèdent de très importants. L'Union soviétique, en particulier, est en train d'installer en Sibérie, dans le secteur de Kansk-Achinsk de la région de Krasnoyarsk, une gigantesque houillère sur un gisement représentant en énergie l'équivalent des réserves de pétrole du golfe Persique, dont la production actuelle atteint 40 millions de tonnes par an; il est prévu de la porter à 1 milliard (10^9) de tonnes. Un projet de cette envergure a naturellement des répercussions sur l'infrastructure associée, impliquant notamment la construction de grandes agglomérations urbaines. Le potentiel charbonnier de la Chine est du même ordre. L'appel au charbon se fait entendre aussi en République fédérale d'Allemagne mais là, comme dans d'autres pays industriels, les conditions ne lui sont pas toutes favorables.

Par ailleurs, toute option charbon soulève le problème de l'anhydride carbonique dont la surabondance dans l'atmosphère terrestre est due à la combustion du charbon. La réalité de ce problème est le fondement de l'argumentation des partisans d'un abandon du charbon.

D'autres demandent, de leur côté, que l'on renonce immédiatement à l'énergie nucléaire. Ils jugent, semble-t-il, que l'énergie nucléaire ne joue pas encore un rôle économiquement important, sans indiquer toutefois par quoi on devrait la remplacer. L'argument contraire fait valoir que, dès aujourd'hui, l'énergie nucléaire compte pour beaucoup dans la production d'électricité et qu'il n'existe pas d'énergie de remplacement à court terme.

On entend aussi affirmer catégoriquement que l'énergie nucléaire n'est qu'une solution transitoire. On peut alors se demander quel en est l'aboutissement. Pour répondre à cet argument, rappelons qu'il n'y a en fait que trois sources inépuisables d'énergie sans émission de carbone. Ce sont l'énergie nucléaire à base de réacteurs surgénérateurs, l'énergie solaire à grande échelle et l'énergie nucléaire de fusion. Telles sont les principales options de toute stratégie à long terme. Pour le moment, la seule réalité technique est celle du réacteur surgénérateur. Il est en effet impossible, au stade actuel de la recherche, de savoir si et quand l'énergie solaire et la fusion pourront effectivement devenir une source substantielle et rentable d'énergie.

Un quatrième groupe, qui fait figure d'extrémiste, prétend que les économies d'énergie sont la seule solution de tous les problèmes et que le complément nécessaire ne doit venir que des sources dites de remplacement, c'est-à-dire l'exploitation locale de l'énergie solaire et le recours aux sources renouvelables offertes par la nature, tels le vent, l'eau et la biomasse. Les partisans de cette formule préconisent en outre la décentralisation des sources d'énergie. Il est vrai que la conservation des ressources est un principe qui a toujours fait loi en économie et demeure le principal souci de toute technologie de l'énergie. Au mieux, on peut s'attendre qu'elle facilite la solution des problèmes d'énergie, mais elle n'est pas le remède idéal. Il est rationnel en effet de ne pas trop attendre des sources d'énergie renouvelables car, dans la pratique, leur contribution est relativement modeste, à l'exception de l'énergie solaire, qui peut être largement exploitée dans les zones arides.

Le professeur Häfele est directeur du Kernforschungsanlage (KFA) de Juliers, en République fédérale d'Allemagne. Le présent article est repris, avec sa permission, de l'exposé qu'il a présenté le 14 septembre 1988 à la conférence de Dortmund sur les centrales électriques. Le texte intégral, en allemand, a paru dans VGB Kraftwerkstechnik, Mitteilungen der VGB Technische Vereinigung der Grosskraftwerkbetreiber E.V., 1968, fascicule 11/88, pages 1089 à 1097.

La consommation mondiale d'énergie

Au milieu de toutes ces contradictions, quels sont les points essentiels à retenir si l'on veut se placer dans une perspective convenable pour formuler les objectifs précis d'une stratégie ? Il suffit de se reporter aux chiffres de la production effective d'énergie et à son évolution pour prendre conscience de certaines limites pratiques. Dans ce contexte, il est commode de parler en térawatts-an (TWA), soit 10^9 kilowatts-an, un TWA étant l'équivalent de 1 milliard de tonnes de charbon; c'est à peu près la quantité d'énergie que les pays de l'OPEP ont vendue en 1987 sous forme de pétrole, ou que la mine de lignite à ciel ouvert de Hambach, près de Juliers, devrait produire au cours des 50 prochaines années.

En 1985, la consommation mondiale d'énergie primaire a atteint quelque 10 TWA, la part de la République fédérale d'Allemagne étant de 358 gigawatts-an (GWA). En fait, la consommation mondiale est légèrement supérieure si l'on tient compte de l'apport de l'énergie non industrielle, comme le bois et les déchets organiques utilisés comme combustibles dans les régions pauvres du monde. Selon la Commission de la conservation de la Conférence mondiale de l'énergie, cet apport est évalué à 1,1 TWA. Pour une population mondiale qui atteignait 5 milliards en 1985, la consommation annuelle moyenne par habitant représente un peu plus de 2 kilowatts-an (kWa), mais elle se répartit en fait de façon assez inégale dans l'ensemble du monde. En République fédérale d'Allemagne, elle est de 6 kWa. En Amérique du Nord, elle se situe aux alentours de 11 kWa, tandis que plus de 40 % de la population mondiale doit se contenter de 0,3 kWa d'énergie industrielle.

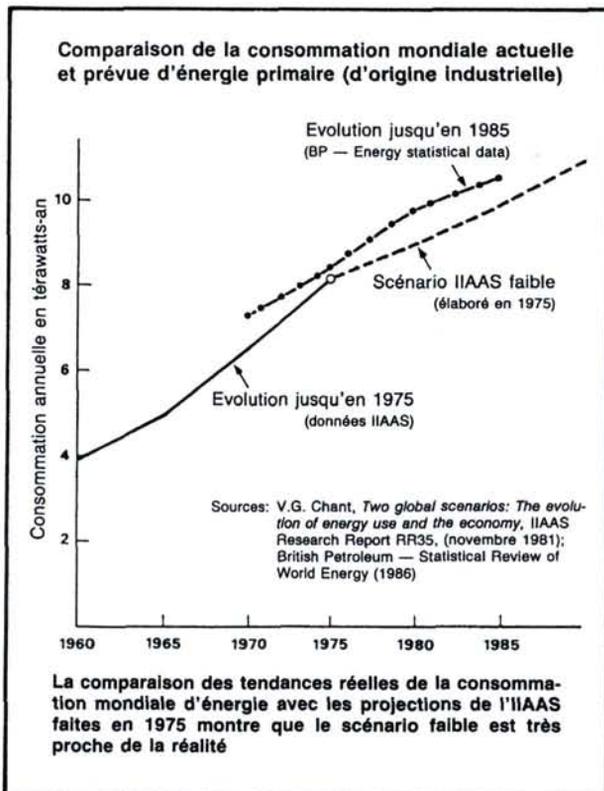
Le problème de l'énergie est aussi lié à la croissance démographique mondiale. Il est possible de calculer très précisément, pour un avenir prévisible, ce que deviendront la répartition par âge et les taux de natalité et de mortalité de la population actuelle. En 2030, la population mondiale sera d'environ 8 milliards d'habitants. A raison de 2 kWa par habitant, on arrive à une consommation mondiale annuelle de 16 TWA, chiffre qu'il faut considérer comme un minimum. Dans l'hypothèse où les pays en développement consommeraient suffisamment d'énergie pour que leurs niveaux de vie soient comparables à ceux d'Europe occidentale, les estimations varieraient entre 1,5 et quatre fois le chiffre actuel, selon la consommation par habitant considérée.

Plusieurs scénarios possibles

On peut affiner ces projections en faisant intervenir d'autres variables, tels les nombreux facteurs d'ordre technique, économique et social. Des hypothèses complémentaires doivent être introduites, non pas au hasard, mais de façon à obtenir un tableau cohérent des divers scénarios socio-techniques postulés. Techniquement parlant, il s'agit de «construire» un scénario. Un scénario n'est pas une prédiction, mais la représentation d'un avenir, d'une orientation et d'une perspective possibles, considérée d'un point de vue contemporain largement ouvert et fondée sur les meilleures sources du savoir et de la connaissance. Elaborer un scénario de l'énergie légèrement optimiste est une tâche extrêmement ardue, car les interactions des systèmes énergétiques au niveau de la configuration économique des divers secteurs influencent aussi en profondeur les caractéristiques particulières de la société et des modes de vie. Dans le cadre d'une étude générale des problèmes de l'énergie faite à l'Institut international pour l'analyse appliquée des systèmes (IIAAS) installé à Laxenburg, près de Vienne, deux scénarios mondiaux de l'énergie ont été élaborés au cours des années 70 pour la période 1975 à 2030 proposant une hypothèse faible et une hypothèse forte qui prolongent théoriquement l'évolution actuelle. Dix ans ont maintenant passé et il s'est avéré que l'hypothèse faible était pour le moins une bonne approximation, par défaut, de ce qui s'est passé dans l'intervalle (voir le graphique). Par ailleurs, quelques nouvelles projections ont été faites. Citons notamment celles de l'Institut mondial du pétrole, de New York, et celles de la Conférence mondiale de l'énergie, qui sont, elles aussi, assez proches de l'hypothèse faible de l'IIAAS. Il est donc permis de considérer ce scénario comme une représentation assez valable de l'évolution future de la production d'énergie et de l'élimination des déchets.

Offre potentielle de combustibles fossiles

Cette question, vue à long terme, doit faire l'objet d'une étude très fine. Un simple inventaire des réserves énergétiques découvertes et estimées ne suffit pas à caractériser la situation, car les venues naturelles ne sont pas toutes de la même qualité. Par exemple, le type et la concentration de la matière première, le rendement du gisement et l'infrastructure disponible sont autant de facteurs qui déterminent les possibilités économiques de



son exploitation. Pour le secteur énergétique, les matières premières qui présentent un intérêt immédiat sont celles que l'on peut utiliser ou produire selon les critères techniques et économiques actuels. Elles constituent ce que l'on appelle les *réserves* si elles ont été confirmées avec certitude ou sont déjà mises en exploitation. Des réserves supplémentaires peuvent toutefois apparaître, si l'on fait de nouvelles découvertes ou si l'on décide à nouveau de mettre en valeur des ressources économiques. Quand nous parlons de nos ressources énergétiques, nous plaçons généralement au premier rang les réserves actuellement exploitées. Celles-ci ne représentent toutefois qu'une très faible proportion de l'ensemble de nos ressources fossiles confirmées ou estimées.

Une réévaluation des réserves et des ressources d'hydrocarbures liquides et gazeux a récemment été présentée par C.D. Masters au douzième Congrès mondial du pétrole qui s'est tenu à Houston, aux Etats-Unis, en avril 1987 (voir le tableau). On y établit une distinction entre les réserves ou ressources qui sont économiquement exploitables et celles qui ne le sont pas encore. Le pétrole et le gaz classiques sont considérés comme ressources confirmées ou probables. Les ressources non classiques comprennent les pétroles lourds et les goudrons, les bitumes naturels et les sables asphaltiques, ainsi que les schistes bitumineux. Comme exemples représentatifs, citons les produits de la région de l'Orénoque, au Venezuela, les sables asphaltiques d'Athabasca, au Canada, et les schistes bitumineux du Colorado, aux Etats-Unis. Ils diffèrent des produits classiques par leur qualité très inférieure, contiennent beaucoup de déchets et de matières toxiques et ne donnent des produits directement utilisables qu'après un traitement à forte composante technologique. Il est clair que nombre de difficultés techniques, économiques et écologiques doivent être surmontées lorsqu'on veut exploiter en grand des ressources énergétiques auparavant considérées sans grande valeur. Toutefois, si l'on raisonne en quantités relatives, il devient évident que même l'épuisement des réserves actuelles ne signifie nullement la fin du recours aux combustibles fossiles. Bien au contraire, la pratique de l'industrie de l'énergie, qui consiste à créer de nouvelles réserves en réhabilitant des ressources jusque là sans grand intérêt et en opérant de nouveaux investissements, laisse prévoir une transition progressive vers les ressources fossiles non classiques.

Les conditions économiques et technologiques de cette transition ont fait l'objet d'une étude approfondie au Centre d'études nucléaires de Juliers, notamment pour déterminer comment cette transition peut se faire dans le temps. En gros, on peut affirmer que la demande mondiale croissante d'hydrocarbures liquides pourrait fort bien être satisfaite par la production des hydrocarbures classiques pratiquement jusqu'à l'an 2000. Il est néanmoins possible qu'il faille s'attendre, dans l'intervalle, à un changement de la distribution régionale de la production mondiale de pétrole, car la capacité réduite de production ou la diminution du potentiel de production dans certaines régions devront être plus que compensées par un relèvement de la production dans d'autres régions. Aussi les riches gisements du golfe Persique verront-ils croître leur importance. Il en

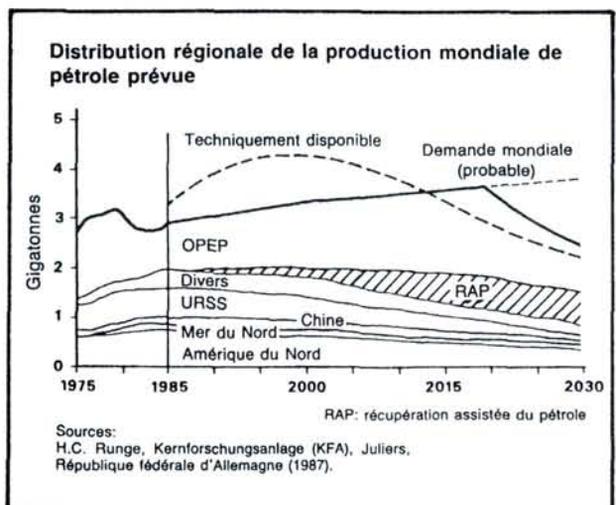
Réserves et ressources modiales de pétrole/gaz et d'énergie non classique

	Classique		Non classique	
	Pétrole (10 ⁹ m ³)	Gaz (10 ¹² m ³)	Pétrole lourd, huile de schiste, bitume naturel (10 ⁹ m ³)	
Production cumulée	83,3	33,2	5,5	Economiquement exploitables
Réserves découvertes	126,5	110,7	10,0	
A découvrir	86,1	119,0	—	
Ressources découvertes	—	—	656,7	Non encore économiquement exploitables
A découvrir	—	—	1700,1	
Total	296	263	2372	
Encore disponible	≈ 500 térawatts-an		≈ 3000 térawatts-an	

Sources: C.D. Masters, Douzième Congrès mondial du pétrole, Houston, Etats-Unis, 1987.

résultera évidemment certaines faiblesses du côté de la sûreté des approvisionnements, laquelle exige que l'on prenne à temps les précautions nécessaires, lors de l'élaboration de la stratégie et de la technologie de l'énergie. Le scénario de Juliers prévoit une amélioration continue du rendement à la production grâce aux progrès technologiques: par exemple, la récupération assistée du pétrole. Vers 2010, la demande mondiale d'hydrocarbures liquides ne pourra pas être satisfaite par les ressources classiques de pétrole, de sorte qu'il faudra mettre en valeur de plus en plus de ressources non classiques dans les années qui suivront. Cette pénurie qui s'annonce à l'horizon suscitera probablement des solutions de remplacement dès le début des années 2000 (voir le graphique). Les années citées ne doivent pas être considérées comme des repères absolus, mais plutôt comme l'expression quantitative d'une situation qualitative. L'évolution prévue pourrait tout aussi bien commencer cinq ans plus tôt ou plus tard.

La variation dans le temps de la demande et de la production classique de gaz est qualitativement analogue. Le moment à partir duquel la production ne



suivra plus la demande et aura même tendance à régresser se situera un peu plus tard que dans le cas du pétrole, peut-être vers 2020, à cause des particularités du marché du gaz et de l'état des réserves. Quant aux dates, la même remarque que précédemment s'applique évidemment aussi.

La transition vers la situation nouvelle

On peut conclure, d'après les dates citées, que la période actuelle, caractérisée par une exploitation intensive et à moindres frais des gisements d'hydrocarbures naturels de grande qualité, prendra probablement fin entre 2010 et 2030. On peut aussi dire, sans crainte de se tromper, que la demande d'hydrocarbures de haute qualité pourra être satisfaite longtemps encore par la suite grâce aux abondantes ressources disponibles mais actuellement jugées de moindre intérêt. En d'autres termes, le système énergétique est en pleine mutation.

Les nouveaux critères d'évaluation et d'exploitation des ressources impliquent des interactions technologiques, économiques et géopolitiques tout à fait nouvelles. C'est l'évidence même, non seulement en ce qui concerne la production, mais aussi pour ce qui est de l'élimination des déchets. Nous en sommes encore à brûler des combustibles propres et relativement de bonne qualité. Néanmoins, nous avons déjà recours à des techniques de limitation des émissions, telle l'épuration des gaz rejetés par les centrales électriques, afin de maintenir la pollution de l'environnement dans certaines limites. Or, la demande croissante d'énergie et le passage à des combustibles de moindre qualité se traduiront par une augmentation des quantités de résidus rejetés. Cela est particulièrement vrai de l'anhydride carbonique dégagé par les combustibles fossiles. Selon le scénario faible de l'IIAAS, le total cumulé de l'énergie produite à l'aide de ces combustibles atteindra 633 Twa en 2030. Une partie de cette production, quelque 400 Twa, correspondra à la combustion du carbone chimiquement lié des hydrocarbures et du gaz. La quantité d'anhydride carbonique ainsi produite sera proche de la quantité naturellement présente dans l'atmosphère. En d'autres termes, l'équivalent de 633 Twa de combustibles fossiles signifie pratiquement le doublement de la teneur de l'atmosphère en anhydride carbonique. Depuis quelque temps, on a des raisons de penser qu'il en résultera une élévation de la température moyenne de la planète d'environ 3°C, à 1,5°C près, en plus ou en moins. Au niveau des pôles, le réchauffement sera beaucoup plus important et fera fondre les glaces dans toute la région de l'océan Arctique et du Groenland, ce qui se traduira par une montée du niveau des mers de plusieurs mètres. Rares sont ceux qui voient un premier symptôme du phénomène dans l'accentuation des variations climatiques. Certains météorologues ont cependant exprimé l'avis que les anomalies du climat observées depuis quelques années peuvent être interprétées comme les premiers indices d'une surcharge critique de l'atmosphère.

L'anhydride carbonique

L'effet de serre dû au gaz carbonique est un phénomène physique qui résulte d'un accroissement de l'absorption du rayonnement infrarouge par l'atmosphère. Il

est difficile de l'étudier à fond d'une manière scientifique, au sens strict du terme, à cause de la multiplicité des causes, de leurs effets et des interactions qui interviennent dans ce processus géophysique. C'est ainsi que le doublement de la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique a été calculé d'une façon très simple à partir des chiffres cumulés de la consommation retenus dans le scénario faible de l'IIAAS. Une partie — environ la moitié — du gaz carbonique d'origine humaine qui se dégage dans l'atmosphère est absorbé assez rapidement, c'est-à-dire en 10 ou 20 ans, par les eaux superficielles des océans, mais l'effet de serre que peut provoquer l'autre moitié est considérablement renforcé par les traces de certains gaz utilisés par l'homme (notamment les hydrocarbures fluorochlorés, le méthane et le protoxyde d'azote).

L'effet tampon des couches superficielles des océans est atténué par les constantes de temps de séjour qui règlent les échanges dans les eaux océaniques profondes, de sorte que l'excédent d'anhydride carbonique de l'atmosphère ne peut être réduit que lentement. Selon des études faites récemment, il faut compter une période de transition de 600 à 900 ans pour que l'anhydride carbonique se précipite sous forme de carbonate au fond des mers et soit ainsi définitivement éliminé*. La méthode habituelle pour éliminer l'anhydride carbonique, produit le plus abondant de la combustion des combustibles fossiles, comporte des facteurs temps que nous connaissons bien par analogie avec les problèmes de l'élimination des déchets nucléaires. Les problèmes à résoudre sont à peu près de même nature, mais la formule idéale qui résoudrait toutes nos difficultés n'existe probablement pas.

La conférence de Toronto

En 1988, à l'occasion de la très intéressante conférence de Toronto ouverte par le Premier Ministre du Canada, la question de l'anhydride carbonique a été longuement débattue. Parfaitement conscients de la gravité de la situation, les délégués ont définis plusieurs objectifs audacieux. On compte obtenir en 2005 une réduction de 10 % des émissions d'anhydride carbonique provenant tant du consommateur que du producteur, et cela par coercition. Parmi les mesures prévues figure naturellement l'amélioration des rendements, problème ardu de technologie dont les solutions commencent à porter leurs fruits. On recommande aussi d'utiliser le gaz et les hydrocarbures, de préférence au charbon — conseil rarement entendu dans les années 70. On encouragera en outre un usage mieux adapté et plus généralisé des sources d'énergie dites de remplacement, et l'on procédera à un réexamen prudent de l'exploitation de l'énergie nucléaire.

Il ne faut ni surestimer ni sous-estimer les mérites de ces objectifs. Il est relativement aisé de démontrer qu'ils sont peut-être inaccessibles. Ce qu'ils expriment — la conscience des problèmes que révèle une meilleure connaissance des phénomènes géophysiques — ne doit pas être mal interprété.

* Dans l'hypothèse de deux à trois constantes de temps d'un échange exponentiel.

La question qui se pose saute aux yeux. Dans quelle mesure peut-on considérer que les rejets d'anhydride carbonique dans l'atmosphère sont inoffensifs à longue échéance, en ce sens qu'ils ne perturberont pas l'équilibre dynamique des phénomènes climatiques ? Le problème est difficile à cerner. Quels critères utiliser, par exemple, pour mesurer la sensibilité du milieu ? Au cours de son histoire, la planète a subi d'importants changements climatiques. Les spécialistes de la météorologie cherchent depuis longtemps les réponses aux questions que pose ce complexe très particulier. Pour avancer des hypothèses qui naturellement ne peuvent être que des approximations assorties de conditions et de réserves, il faut faire intervenir de vastes modèles combinant l'atmosphère et les océans et recourir à des programmes informatiques qui n'ont pu être élaborés et exploités que récemment, lorsque les super-ordinateurs modernes en ont donné la possibilité.

Une première réponse est proposée dans une récente étude de Maier-Reimer et Hasselmann*. Les auteurs expliquent qu'une émission d'anhydride carbonique représentant un équivalent stoechiométrique de 2,5 gigatonnes de carbone par an (soit 9,2 gigatonnes d'anhydride carbonique par an pendant les 100 prochaines années) ne provoquera qu'une légère augmentation de la teneur de l'atmosphère en anhydride carbonique. A noter que les effets des biotes océaniques n'ont pas été pris en considération. Ce n'est là qu'une approximation préliminaire qui est présentée et qu'il faut accepter avec des réserves, car elle sera certainement révisée. Quoi qu'il en soit, la production d'anhydride carbonique est actuellement deux fois supérieure à ce chiffre. La consommation mondiale annuelle d'énergie industrielle était en effet de 10 TWA en 1985, ce qui représente un dégagement d'anhydride carbonique correspondant à 5,7 gigatonnes de carbone. Si l'on prend comme critères les proportions des divers combustibles utilisés en 1985, le chiffre de 2,5 gigatonnes de carbone par an serait dépassé avec une consommation de 4,3 TWA, laquelle représente 43 % de la consommation réelle d'énergie cette année-là. Ces valeurs limites doivent être prises en considération dans tout débat sur le développement ou la réduction de l'usage des combustibles fossiles.

Apport de l'énergie nucléaire

Passons maintenant à l'énergie nucléaire, qui est pour le moment la source d'énergie dont nous tirons les meilleurs rendements. Au début de 1987, 165 centrales nucléaires étaient en service dans les pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) et représentaient une puissance installée de quelque 222 gigawatts électriques**. Les Etats-Unis

* «Transport and Storage of carbon dioxide in the ocean — an inorganic ocean-circulation carbon cycle model», par E. Maier-Reimer et K. Hasselmann, *Climate Dynamics*, 2, 63-90 (1987).

** Les pays membres de l'OCDE sont les suivants: Allemagne (République fédérale d'), Australie, Autriche, Belgique, Canada, Danemark, Espagne, Etats-Unis, Finlande, France, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Japon, Luxembourg, Norvège, Nouvelle-Zélande, Pays-Bas, Portugal, Royaume-Uni, Suède, Suisse, Turquie et Yougoslavie (statut spécial).

Production d'électricité d'origine nucléaire, 1986

	Centrales nucléaires (terawatts-heure, électriques)	Production totale (terawatts-heure, électriques)	Part du nucléaire (en pourcentage)
Amérique du Nord	481	3076	15,6
Europe occidentale	597	1967	30,3
Région du Pacifique	166	814	20,5
Europe orientale	198	2134	9,3
Asie	57	962	6,0
Amérique Latine	5,5	509	1,1
Afrique et le Moyen-Orient	8,8	386	2,3
Total mondial	~ 1515	~ 9849	15,4
Pays de l'OCDE (part du total mondial)	1244	5857	21,2

viennent largement en tête. Il faut le souligner, car le bruit court en Allemagne fédérale que les Américains ont tout juste quelques centrales nucléaires. En fait, ils mettent en service l'une après l'autre des centrales en projet ou en construction depuis longtemps déjà. La France suit elle aussi une politique d'expansion continue, son parc nucléaire représentant au moins 50 % de celui des Etats-Unis. L'énergie nucléaire est une composante économique importante, même chez nous, en République fédérale, et aussi dans d'autres pays. Cela est encore plus évident si l'on considère la contribution du nucléaire à la production totale d'électricité tant dans le principaux pays industriels qu'à l'échelon régional et mondial (voir le tableau). Les centrales nucléaires ont fourni aux réseaux 1515 terawatts-heure en 1986, soit 15,4 % de la production mondiale d'électricité, laquelle atteignait 9849 terawatts-heure. Par comparaison avec l'ensemble du monde, et même avec l'Amérique du Nord, la part du nucléaire en Europe occidentale est considérable. Elle atteint 30 %. Lorsqu'on nous propose, pour quelque raison que ce soit, de renoncer à l'énergie nucléaire, il faut poser la question «Par quoi la remplacer ?». Si elle reste sans réponse, la discussion est close.

Retraitement des combustibles nucléaires

Les approvisionnements en combustible nucléaire ne posent pas de problème grâce à l'abondance des ressources d'uranium et à l'existence du réacteur surgénérateur, mais des difficultés se présentent au niveau de l'élimination des déchets nucléaires, et plus spécialement en rapport avec le traitement systématique des éléments combustibles épuisés. Cela apparaît clairement si l'on compare les quantités de combustible épuisé produites chaque année et la capacité de retraitement disponible dans l'ensemble des pays de l'OCDE. En 1986, 5300 tonnes de combustible épuisé ont été produites dans le périmètre de l'OCDE, dont 35 tonnes de plutonium fissile destiné au recyclage. Pour l'an 2000, il faut s'attendre à 8300 tonnes et 54 tonnes respectivement. En 1987, la capacité des usines de retraitement en service dans les pays de l'OCDE atteignait 1980 tonnes par an; viendra s'y ajouter une capa-

citée de 2800 tonnes, ce qui fera un total de 4780 tonnes, si toutes les installations en projet ou en construction sont effectivement mises en service. Dans le meilleur des cas, 3520 tonnes de combustible épuisé demeureront non traitées en l'an 2000; au pire, ce sera 6320 tonnes, c'est-à-dire 23 tonnes ou 42 tonnes de plutonium respectivement. En extrapolant jusqu'à 2030, on arrive à plusieurs milliers de tonnes de plutonium. Or, on ne saurait accumuler ce plutonium sous forme de combustible épuisé; il faudra le consommer dans les réacteurs, car on ne peut envisager de laisser aux générations futures le souci de conserver indéfiniment des éléments combustibles épuisés.

Comme nous l'avons vu, l'élimination des résidus de la combustion des combustibles fossiles n'est pas sans difficultés, quoique celles-ci soient d'un autre ordre. Bien que l'on puisse difficilement comparer des choses de nature différente, il faudra bien mettre en regard et peser les avantages et les inconvénients respectifs des diverses possibilités si nous voulons être en mesure de juger et de prendre des décisions fondées sur des critères objectifs. Dans cette optique, il est utile de considérer les quantités en cause.

Pour une production annuelle de 10 Twa d'origine exclusivement nucléaire, il y aurait 4680 tonnes de déchets nucléaires par an, c'est-à-dire une quantité raisonnable qu'il est techniquement possible d'éliminer. En revanche, l'emploi exclusif de combustibles fossiles pour la même production d'énergie dégagerait 21 milliards (10^9) de tonnes d'anhydride carbonique par an dans l'atmosphère, soit 5,7 milliards de tonnes de carbone. Le rapport entre les flux de déchets est donc de un million à un. Si le traitement des déchets nucléaires demande un soin particulier, le problème de l'anhydride carbonique, comme nous le savons, mérite aussi que l'on s'en occupe.

Les options énergétiques

Nous avons vu qu'il sera possible, pendant longtemps encore, de brûler des hydrocarbures liquides et gazeux, dans certaines limites néanmoins, pour produire tout au plus de 4 à 5 Twa. Nous ne serons donc pas obligés de renoncer totalement à ces combustibles.

A l'heure actuelle, nous disposons de trois sources — trois seulement — d'énergie primaire sans émission de carbone pour assurer une production d'électricité de l'ordre de 10 Twa et plus. Il s'agit, rappelons-le, du réacteur surgénérateur, de l'énergie solaire et de la fusion. Pour la production d'une énergie primaire sans émission de carbone de l'ordre d'un térawatt-an, des sources d'énergie de remplacement, telles l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne et l'énergie solaire (utilisée localement), peuvent être prises en considération. Capables de fournir environ 10 % de l'énergie que le monde consomme à l'heure actuelle, elles ne constituent donc pas une option de remplacement, mais plutôt une ressource complémentaire.

L'intérêt économique réel des sources d'énergie renouvelables est remis en question par les nouvelles évaluations effectuées au cours des dernières années. Le potentiel exploitable en République fédérale d'Allemagne a été étudié à plusieurs reprises et chaque estimation était inférieure à la précédente. Ce n'est donc

pas par hasard que le problème des économies d'énergie est devenu le thème central des meilleurs scénarios où interviennent les énergies de remplacement, mais une option dans cette direction ne peut que s'insérer dans un système énergétique faisant appel à ces sources.

La question des économies d'énergie est quelque peu faussée par le fait que les uns proposent l'idéal alors que les autres s'en tiennent à des objectifs matériellement réalisables. Il faut évidemment commencer par définir ce que l'on entend par une consommation d'énergie indispensable ou raisonnable. Chacun sait que la consommation annuelle par habitant dans le monde varie considérablement: entre 0,6 kWa pour les plus déshérités qui doivent se contenter d'un minimum pour survivre (0,3 kWa d'énergie industrielle, plus 0,3 kWa de bois et déchets combustibles) et les 11 kWa des Américains du Nord, le rapport est de un à 20.

Quand on parle de consommation d'énergie, il ne faut pas oublier que l'effet de cette utilisation de l'énergie (c'est-à-dire le service qu'elle rend) dépend de plusieurs facteurs de production, tels les investissements, la main d'œuvre, les connaissances et les qualifications. Ces facteurs sont en partie interchangeable, c'est-à-dire qu'un même résultat peut être obtenu de différentes manières si l'on sait combiner les facteurs pertinents comme il convient. On peut avoir le même service avec un bien moindre apport d'énergie si le capital, le travail et les connaissances techniques sont augmentés en conséquence. Ce phénomène n'est pas toujours bien compris. Lorsqu'on parle aujourd'hui de technologie énergétique à haut rendement, ou des économies d'énergie potentielles, on pense généralement à la substitution du capital à l'énergie. Les besoins d'investissement et la question de l'emploi le plus judicieux de capitaux limités ne sont généralement pas les conditions les plus importantes. Le calcul des économies d'énergie potentielles n'est donc plus seulement une question physico-technique, mais un problème d'interaction entre la technologie, l'économie et la société. Le sujet très discuté des besoins d'énergie devrait être considéré dans le même esprit.

Le choix des priorités

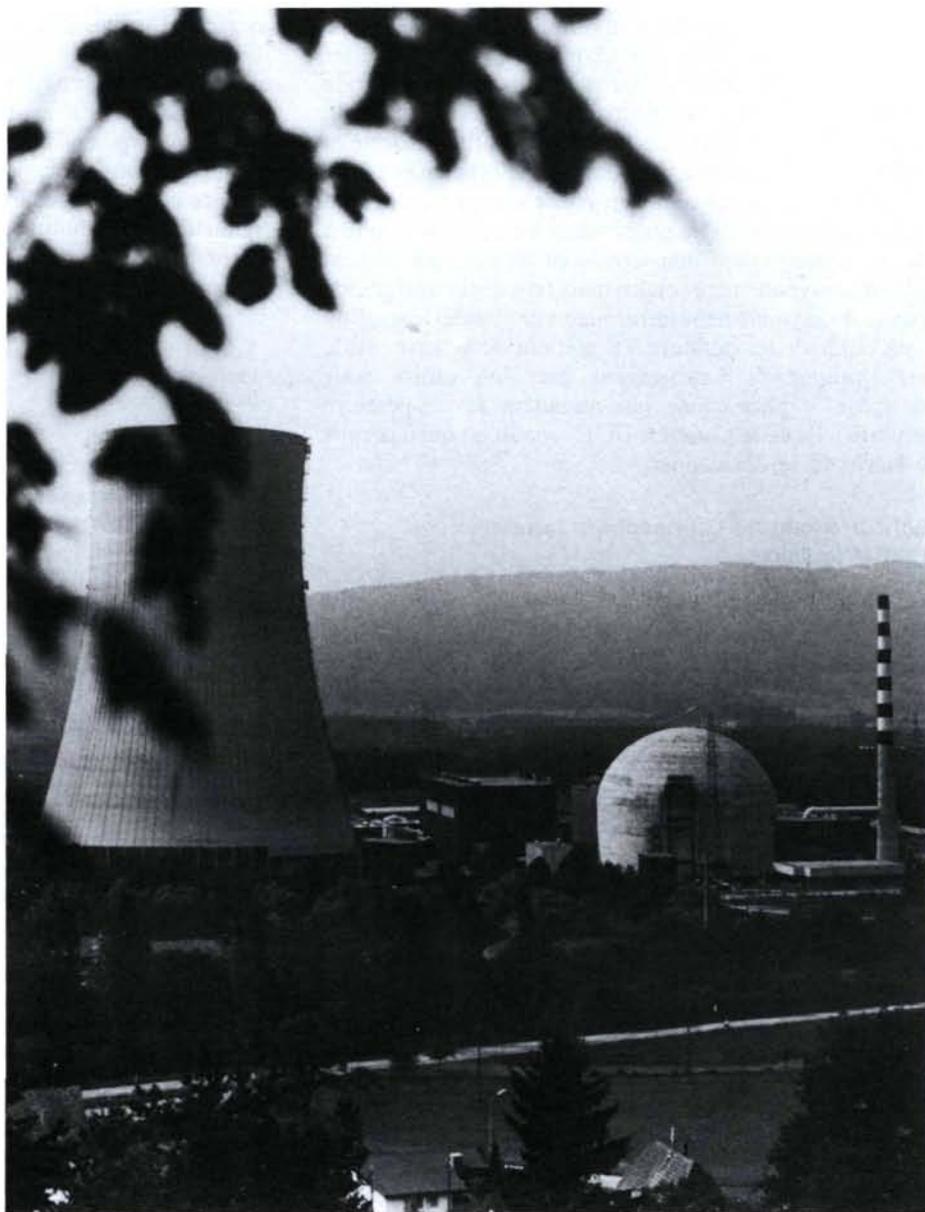
Quelles orientations faut-il choisir et quelles voies faut-il emprunter si l'on veut passer outre le sectarisme et les contradictions? Faut-il faire une synthèse? Il est probable que l'ensemble dépasse la somme de ses parties. Il est indispensable de fixer des priorités, et cela en tenant compte de divers horizons temporels. Dans le domaine énergétique, la tâche la plus urgente des techniciens d'aujourd'hui est la réduction des rejets de polluants dans l'environnement, en particulier des émissions d'oxydes d'azote et d'anhydride sulfureux. Avant 50 ans, l'anhydride carbonique fera son entrée. L'accumulation de concentrations critiques de ce gaz dans l'atmosphère coïncide avec la fin de la période du pétrole et du gaz classiques. Nous n'avons pas encore évoqué la technologie des systèmes énergétiques pauvres en carbone et inoffensifs pour l'environnement, dont la mise au point demandera de 100 à 140 ans, selon des stratégies de transition orientées vers des buts précis. Elle consiste essentiellement à adopter l'hydrogène

comme porteur d'énergie secondaire, ainsi que l'électricité, tandis que l'énergie primaire devra provenir principalement de sources sans carbone. Les combustibles fossiles non classiques devraient encore durer au moins 250 ans.

La réduction des émissions prévues d'anhydride carbonique demandera environ 50 ans. Celle de la fraction imputable à l'homme, opérée par les échanges entre les eaux océaniques superficielles et les eaux profondes (lesquelles sont la destination finale de l'anhydride carbonique atmosphérique) exige un délai de 500 à 1000 années — cadre temporel généralement attribué à la décroissance des déchets radioactifs. Les horizons à prévoir pour les productions des réacteurs surgéné-

rateurs ou des réacteurs à fusion se situent aux alentours de 15 000 ans et celui de l'énergie solaire se projette à des milliards d'années. On voit ainsi que le grand problème n'est pas le manque de ressources, comme on le croyait encore dans les années 70, mais plutôt l'urgence de l'élimination des résidus des combustibles fossiles.

Le tableau que je viens de brosser, pour impressionnant qu'il soit, ouvre des perspectives qui vont bien au-delà des idées partisans et des contradictions, et auxquelles nous devons nous tenir si nous voulons refaire avec calme et objectivité l'analyse des interactions de tous les éléments du problème de l'énergie en vue d'une action rationnelle et responsable.



Centrale nucléaire
Gösgen (Suisse)
(Photo: Siemens)