Énergies d'aujourd'hui et de demain

Si la planète veut un développement durable pour tous ses habitants, elle doit diminuer le recours aux énergies fossiles au bénéfice des énergies les moins polluantes et dévoreuses de ressources. Les énergies renouvelables et nucléaire sont les seules à offrir des perspectives suffisantes à cet égard.

charbon	496 Gtep
lignite	110 Gtep
pétrole	137 Gtep
gaz	108 Gtep
schistes bitumineux + sables asphaltiques	centaines de Gtep
hydrates de méthane	plus de 1 000 Gtep
uranium (en réacteurs à eau)	80 Gtep
uranium (en réacteurs surrégénérateurs)	8 400 Gtep

Tableau 1. Ordre de grandeur des réserves énergétiques en milliards de tonnes équivalent pétrole (Gtep). (Source : CME 1993 : dernières données considérées comme fiables à l'échelle du globe).

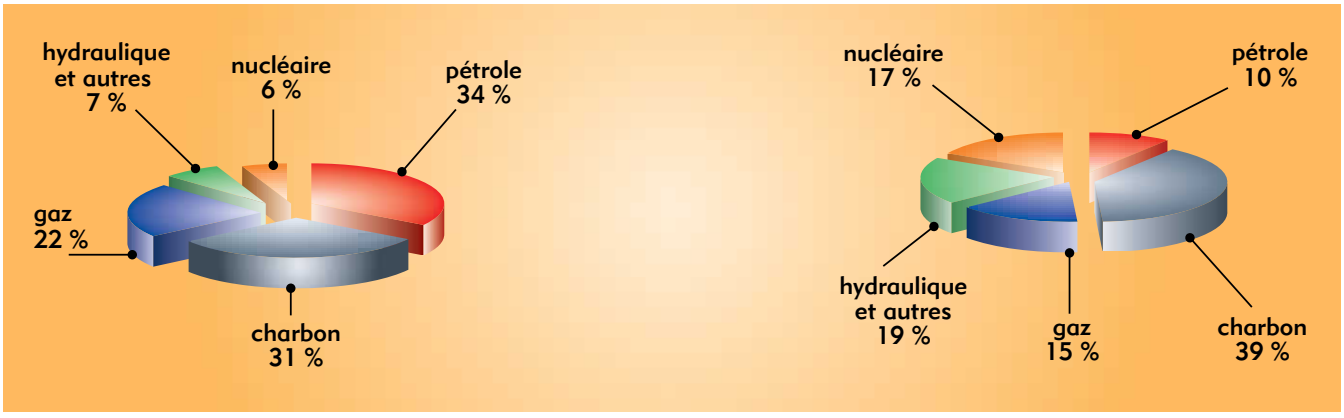
	hypothèse basse	hypothèse haute(1)
charbon	860	1 290
gaz naturel	480	780
hydraulique	4	18
nucléaire	8	59
éolien	11	75
solaire photovoltaïque	30	280
biomasse	0	116

Tableau 2. Contenu en CO_2 équivalent par kWh produit (en g).
(1) L'hypothèse haute correspond pour : le charbon, à une mauvaise qualité et un transport assez long ; le gaz, aux fuites de CH_4 sur longue distance (cas de la Russie) ; l'hydraulique, à la production de CH_4 lors des mises en eau ; le nucléaire, à l'enrichissement obtenu par de l'électricité à base de charbon (cas des États-Unis) ; l'éolien et le solaire photovoltaïque, à l'électricité à base de gaz naturel en complément à leur production intermittente ; la biomasse, à l'absence de reboisement.

Que l'on considère la pente de l'augmentation de la température du globe sous l'effet des gaz à effet de serre (encadré A, ***L'effet de serre***), l'échéance des réserves d'énergies fossiles (tableau 1), ou l'évolution de la demande mondiale d'énergie, il devient urgent, après la prise de conscience de Kyoto en 1997, de développer les sources d'énergie les plus respectueuses de l'environnement et économes en ressources naturelles. Il faut parallèlement optimiser la consommation pour obtenir un service donné avec la quantité d'énergie minimale.

Une augmentation inéluctable de la demande

La consommation énergétique ne peut que croître, pour deux raisons : l'une est l'accroissement accéléré de la population, qui devrait atteindre 10 à 12 milliards d'individus en 2100, l'autre le fait que les pays en voie de développement ne peuvent élever leur niveau de vie qu'en augmentant notablement leur consommation énergétique. Si la consommation électrique annuelle de la population mondiale est de l'ordre de 12 000 térawatt.heure (TWh), deux individus sur trois consomment moins que la moyenne de 230 watts, quatre fois moins que ce qu'utilise le Français qui, avec 940 watts, compte parmi les 10 % de Terriens qui dépassent les 7 000 kWh/an. Or le taux de mortalité infantile augmente quand la consommation d'énergie baisse : il est multiplié par 70 pour les chiffres les plus



Source : OCDE

A

L'effet de serre

L'énergie solaire qui parvient au sol réchauffe la Terre et se transforme en rayons infrarouges. Comme les vitres d'une serre – d'où le nom donné à ce mécanisme – des gaz présents dans l'atmosphère piègent une partie de ces rayons qui tendent à la réchauffer. Ainsi, en termes de puissance, la Terre reçoit en moyenne un peu plus de 240 watts/m^2. Sans effet de serre, la température moyenne sur la Terre serait de - 18 °C et peu d'eau serait sous forme liquide. Cet effet a donc une influence bénéfique puisqu'il permet à notre planète d'avoir une température moyenne de 15 °C.

Cependant, depuis le début de l'ère industrielle, soit plus d'une centaine d'années, l'homme a rejeté dans l'atmosphère des gaz (gaz carbonique, méthane, oxydes d'azote, etc.) qui augmentent artificiellement l'effet de serre ; depuis 1750, cette augmentation, pour ce qui est des gaz "bien mélangés", a été de 2,43 W/m^2. Avec un "forçage radiatif supplémentaire" de 1,46 W/m^2, le gaz carbonique (CO_2) compte pour plus de la moitié de cet "effet de serre additionnel", loin devant le méthane (0,48 W/m^2), les halocarbures (chlorofluorocarbures CFC, hydrochlorofluorocarbures HCFC et hydrofluorocarbures HFC) avec 0,34 W/m^2 et le dioxyde d'azote avec 0,15 W/m^2. En outre, l'ozone troposphérique présente un forçage radiatif *positif* de 0,35 W/m^2 (mais on estime que l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique constaté entre 1979 et 2000 a entraîné un forçage radiatif *négatif* de 0,15 W/m^2).

Cet ajout à l'effet de serre naturel (155 W/m^2) est faible, correspondant à un accroissement de l'ordre de 1 %. Néanmoins, il est presque certain qu'il a contribué à l'augmentation de la température moyenne de notre planète d'environ 0,5 °C observée au cours du vingtième siècle. Si rien n'est fait pour réduire ces émissions, la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère pourrait doubler d'ici 2100. À partir de la consommation mondiale actuelle(1) de combustibles fossiles (7 700 Mtep), il est aisé de calculer la masse de CO_2 actuellement produite : 20 milliards de tonnes par an !

Cela pourrait conduire à une augmentation substantielle de l'effet de serre et mener, par des effets amplificateurs non linéaires, à de profondes altérations du climat. La plupart des modèles prévoient que le double de la concentration de gaz carbonique actuelle conduirait, à la fin du vingt et unième siècle, à une élévation de la température de l'ordre de 2 à 3 °C. Certains donnent même une fourchette entre 1,5 et 4,5 °C, laissant prévoir des conséquences dramatiques sur l'environnement comme la montée notable du niveau de la mer.

Ces chiffres peuvent sembler petits et n'avoir que de faibles conséquences sur le climat ; il n'en est rien. Pour s'en convaincre il faut se rappeler que lors du "petit âge glaciaire", entre 1450 et 1880, la température moyenne ne s'est abaissée en France que de 1 °C en moyenne. Il y a 6 000 à 8 000 ans, alors que l'Europe occidentale a connu une période plus chaude, avec une température moyenne supérieure de 2 °C à 3 °C à celle d'aujourd'hui, le Sahara n'était pas un désert mais le siège de pluies abondantes. C'est moins l'augmentation de la température qui est préoccupante que sa variation rapide (en un siècle). Les grandes variations déjà observées dans la nature se sont produites sur des échelles de temps beaucoup plus longues, au moins pour celles qui ont un caractère global. Ainsi la dernière glaciation a duré 100 000 ans et la déglaciation correspondante 10 000 ans. La variation rapide que nous sommes en train de vivre peut induire des perturbations importantes et inattendues du climat et de l'écosystème, qui n'aura pas toujours le temps de s'adapter.

(1) CEE DG XVII (1996), scénario "Sagesse traditionnelle".

Les principales conférences sur l'environnement global

L'évolution de l'environnement global a suscité l'organisation d'importantes conférences au cours de la décennie écoulée.

Au Sommet de la Terre de **Rio de Janeiro** (juin 1992) a été signée la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques qui adopta l'objectif d'une stabilisation des émissions de gaz à effet de serre (entrée en vigueur le 21 mars 1994).

À la Conférence de **Kyoto** (décembre 1997) a été signé le protocole de réduction globale des émissions de ces gaz, de 5,2 % en moyenne en 2008-2012 par rapport à 1990, pour les pays de l'OCDE et les pays de l'Europe de l'Est (dont la Russie). Les objectifs de réduction pour l'Union européenne et la France sont de respectivement 8 % et 0 %. Les moyens de les atteindre ont été débattus sans succès en novembre 2000 à **La Haye**.

Sous l'impulsion du programme des Nations unies pour l'environnement, les problèmes posés par les substances appauvrissant la couche d'ozone atmosphérique ont été traités à **Vienne** (1985) et surtout à **Montréal** (septembre 1987) où a été signé le protocole imposant une réduction de la production et de l'utilisation des chlorofluorocarbures (CFC). Ce protocole a fait l'objet des amendements de **Londres** (1990), qui a imposé l'abandon des CFC au 1er janvier 2000 et étendu la réglementation à d'autres produits, de **Copenhague** (1992), **Montréal** (1997) et **Pékin** (1999).

bas et l'espérance de vie chute brusquement lorsque la puissance utilisée est inférieure à 180 watts. Si ces situations ne sont pas la conséquence de la seule sous-consommation énergétique, celle-ci reflète l'indigence d'une partie des humains.

Sources d'énergie épuisables et renouvelables

Les sources d'énergie non renouvelables (charbon, pétrole, gaz, uranium) s'épuisent au fur et à mesure de leur exploitation contrairement à l'hydraulique, au solaire, au vent, à la biomasse… qui seront disponibles pendant encore environ 5 milliards d'années. Or la consommation énergétique mondiale, (gauche de la figure de la page précédente), de même que la production d'électricité (droite de la figure) est largement dominée par les énergies fossiles (pétrole, **gaz naturel** et charbon) qui représentent plus de 85 % de l'**énergie primaire** (encadré B, ***Chaînes et systèmes énergétiques***). Le gaz est devenu particulièrement compétitif avec les progrès des turbines à gaz et la technologie du "cycle combiné" qui ont permis de diminuer fortement le coût du kWh, dont 70 % restent toutefois représentés par le gaz lui-même, ce qui ne permet pas d'assurer des prix stables sur une longue période.

Réserves finies et effet de serre

L'utilisation massive des énergies fossiles expose la planète à deux problèmes majeurs – accroissement de l'effet de serre à relativement court terme et épuisement des

Modules photovoltaïques pour l'alimentation en énergie d'un bâtiment près d'un des plus hauts sommets de l'Himalaya occidental, le Dapsang (K2). L'énergie solaire est particulièrement indiquée dans les sites isolés.

ENEL

réserves à plus long terme – qui ne sont pas complètement dissociables. Ce sont, en effet, les atomes de carbone extraits sous forme de gaz naturel, pétrole ou charbon qui conduisent à la production inexorable de gaz carbonique (CO_2), les sources les plus hydrogénées étant celles qui en émettent le moins (tableau 2).

Nous vivons une période d'énergie abondante dont le prix reste inférieur à ce qu'il devrait être si nous avions une attitude responsable vis-à-vis des ressources naturelles et des générations futures. Dès la seconde moitié du XXIe siècle, gaz et pétrole se feront plus rares et plus chers. Il faudra, à terme, les réserver à des utilisations plus nobles que la combustion, comme la chimie. Pour le charbon, les réserves devraient couvrir plusieurs siècles. Pour le nucléaire, elles se chiffrent en milliers d'années avec les réacteurs "rapides", qui permettent d'extraire plus de 50 % de l'énergie du combustible alors que l'échelle de temps serait du même ordre de grandeur que pour les hydrocarbures avec des réacteurs à neutrons "lents", qui n'en exploitent que 0,5 à 1 %. Et il sera peut-être un jour rentable d'utiliser d'autres sources d'uranium, comme l'eau de mer.

À plus long terme, la fusion thermonucléaire assurerait des réserves pour plusieurs centaines de millions d'années. Loin d'être industriellement maîtrisée, son exploitation fait l'objet de recherches intensives dans le cadre de l'association Euratom-CEA et du projet international ITER. Enfin les réserves de la planète en hydrates de méthane, supérieures à celles du charbon, du pétrole et du gaz réunies, seront sans doute exploitables dans l'avenir.

Renouvelables mais pas encore compétitives

Un regain d'intérêt se manifeste pour les énergies *a priori* inépuisables et perturbant moins l'environnement que les énergies fossiles. Leur avantage majeur ? Une contribution négligeable à l'accroissement de l'effet de serre. Leurs inconvénients ? Elles sont diluées, pas toujours disponibles et, pour la plupart, pas encore compétitives dans la majorité des situations. Seule l'**hydraulique**, qui permet d'obtenir de l'électricité bon marché au prix de coûteux investissements, est utilisée à grande échelle. Cela peut entraîner des nuisances, des perturbations de l'environnement(1) voire des accidents. La rupture du barrage de Morvi (Inde) en 1979 n'a-t-elle pas fait 30 000 morts ?

Première source d'électricité en France en 1960, l'énergie hydraulique n'en représentait plus que 12 % en 2000. Le prix de son kWh n'en reste pas moins particulièrement bas, l'investissement étant fait. Elle a un fort potentiel en Asie, en Amérique du Sud et dans l'ex-Union soviétique. L'hydraulique, c'est aussi l'énergie des marées, celle des vagues (1 watt au mètre carré) et, avec un potentiel cent fois plus important, la très coûteuse énergie thermique des océans.

La plupart des énergies renouvelables et fossiles ont pour origine celle du Soleil. Le solaire au sens large recouvre toutes les formes d'énergies à l'œuvre dans la machine atmosphérique terrestre : le solaire proprement dit, l'éolien, l'hydraulique, la photosynthèse et l'énergie des vagues. Il n'inclut ni l'énergie marémotrice, due aux mouvements lunaires, ni l'énergie géothermique, qui provient essentiellement de la radioactivité terrestre et représente 0,06 watt au m^2 (environ 3 500 fois moins que le flux solaire). La Terre reçoit du Soleil une puissance totale de 170 000 TW : plus de 2 500 fois, au niveau des seuls continents, la consommation mondiale d'électricité ! Mais si les énergies renouvelables sont "gratuites", leur récupération ne l'est pas !

L'**énergie solaire** *stricto sensu* peut être utilisée directement (thermique) ou transformée en électricité (photovoltaïque). Son problème ? Un coût du kWh encore dix fois plus élevé que celui obtenu avec le gaz ou le nucléaire. D'un grand intérêt pour les sites isolés (économie du raccordement), elle n'est pas appropriée pour fournir de grosses puissances et génère aussi des déchets, notamment lors de la fabrication des capteurs. Diminuer fortement le coût des modules photovoltaïques nécessite des ruptures technologiques comme la réalisation de couches minces minérales ou organiques, une piste notamment suivie au CEA.

L'**éolien**, qui correspond à la transformation en énergie mécanique de 1 % de l'énergie reçue sur Terre, est en plein essor, mais produit un kWh dont le prix reste 2 à 4 fois supérieur à celui du nucléaire ou du gaz. Une éolienne fournit une puissance proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Une installation de 750 kW fournit cette puissance pour un vent de 15 m/s (force 7), n'en délivre plus qu'une trentaine pour un vent de 5 m/s (force 3), et …zéro les jours sans vent : un site bien venté peut fournir de 20 à 30 % de la puissance *installée*. Les éoliennes peuvent être placées en mer (*offshore*) où les vents sont plus forts et réguliers. Leurs inconvénients (surface occupée, nuisances visuelle et sonore) sont mieux connus que des avantages comme l'effet de haie, favorable à l'agriculture.

La **biomasse** est un bon moyen de stocker l'énergie solaire, diffuse et intermittente, mais avec un rendement faible : 1 % ou moins dans les zones tempérées. Les plantes consomment du gaz carbonique, ce qui compense en partie celui émis lors de leur combustion. Pour le bois, par exemple, le bilan CO_2 est 7 à 12 fois inférieur à celui du gaz. Mais il convient d'améliorer les méthodes de combustion de la biomasse, à la faible densité énergétique : le CEA y travaille. Comme pour les autres sources, il est important de faire un bilan global avant

(1) Il faut rappeler parmi ses effets bénéfiques la régulation du réseau fluvial.

de parler de rendement : il faut par exemple 1 litre de carburant fossile pour produire 1,5 litre de bio-éthanol ou 2 litres d'ester de colza. Mais il est possible de récupérer de l'hydrogène à partir des sous-produits de la transformation. Enfin, bien que l'objectif soit avant tout de les détruire, les réduire ou les rendre inertes, les **déchets** peuvent représenter une source d'énergie d'appoint (au mieux 1 % de la consommation en France).

Le cas difficile des transports

Le pétrole est aujourd'hui irremplaçable dans les transports, dont il couvre 95 % des besoins. La consommation d'énergie de secteur représente en France le quart de la consommation totale et augmente plus vite. La technologie actuelle ne pourra perdurer très longtemps à cause de sa contribution à l'effet de serre (une voiture relâche dans l'atmosphère environ 1 tonne de CO_2 tous les 5 000 km), de la raréfaction et du renchérissement des énergies fossiles.

Pour l'automobile, une évolution peut être le véhicule **hybride** doté à la fois d'un moteur thermique et d'une **batterie** électrique. À plus long terme, de l'hydrogène alimentera sans doute directement un moteur à explosion, soit la **pile à combustible** d'un véhicule électrique.

L'hydrogène, vecteur énergétique de l'avenir

L'hydrogène devrait s'imposer comme second vecteur énergétique après l'électricité. Le CEA, conscient de ces perspectives, accroît ses recherches dans ce domaine ainsi que dans celui des piles à combustible, qui peuvent avoir bien d'autres utilisations que les transports, stationnaires comme source d'électricité et de chaleur ou mobiles pour l'alimentation d'appareils "nomades" (téléphones, ordinateurs…).

Les besoins en électricité et ceux de la production d'hydrogène (d'abord par électrolyse de l'eau) demanderont des quantités d'énergie considérables. Il serait rationnel d'utiliser le nucléaire, qui n'accroît pas l'effet de serre, pour en produire une partie.

Le nucléaire du futur

Outre son prix très compétitif, surtout aux heures creuses (moins de 10 centimes le kWh), et l'indépendance qu'il procure, le nucléaire génère une grande part de sa valeur ajoutée dans le pays utilisateur. Aussi sa contribution dans le cadre d'un développement durable devrait-elle rester significative.

Le nucléaire du futur devra satisfaire à cinq conditions, dont celle de produire un kWh à un prix inférieur ou égal aux autres sources d'énergie. Il devra être encore plus sûr, même si la plupart des filières des générations précédentes ont un niveau de sûreté très satisfaisant, et produire plus d'énergie avec la même quantité de combustible. Il devra générer moins de déchets, surtout à vie longue(2), être capable de brûler une partie de ceux des réacteurs plus anciens et ne pas être militairement utilisable.

J.-C. Raoul/ LA MÉDIATHÈQUE EDF

Centre nucléaire de production d'électricité d'EDF à St-Laurent-des-Eaux. La stabilité du coût du kW d'origine nucléaire reste un atout sur le long terme.

Les économies d'énergie : les "négawatts"

Il est tout aussi important d'utiliser au mieux l'énergie produite. L'optimisation des dispositifs, s'appuyant sur la modélisation numérique et des systèmes programmés et intelligents, permet d'obtenir le même service avec moins d'énergie. Il reste beaucoup à faire dans le domaine des économies d'énergie où le CEA a déjà acquis une longue expérience. La micro-électronique fournit le plus bel exemple de réduction de la consommation d'énergie (et de prix) assortie d'une augmentation fantastique des performances.

La diminution de la consommation contribue à créer des négawatts (watts non consommés) sans diminution du service rendu et du niveau de confort.

Une partie du futur énergétique

Le CEA a fortement contribué à mettre en place la filière nucléaire qui fournit actuellement 78 % de l'électricité française à un prix qui restera longtemps stable. Grâce aux compétences développées, il s'est très tôt investi dans des domaines comme l'optimisation des systèmes énergétiques ou le photovoltaïque. Il contribue aux recherches visant à diminuer le coût trop élevé des énergies renouvelables. Il accentue ses efforts dans le développement des nouveaux vecteurs et **convertisseurs d'énergie**, en travaillant sur la production et le stockage de l'hydrogène, sur les piles à combustible afin d'en baisser fortement les coûts et en augmenter la fiabilité ainsi que sur les batteries afin d'en améliorer la capacité et la longévité, et sur les technologies qui permettent de consommer moins d'énergie. Les pages qui suivent situent les travaux, hors nucléaire, pour réaliser certaines des ruptures nécessaires et préparer une partie du futur énergétique.

Christian Ngô
Direction de la recherche technologique
CEA/Fontenay-aux-Roses

(2) Ces déchets sont parfaitement localisés alors que la pollution des gaz à effet de serre est planétaire. À noter aussi que même une centrale thermique au charbon a, en fonctionnement normal, des rejets radioactifs bien supérieurs à ceux d'une centrale nucléaire.

Chaînes et systèmes énergétiques

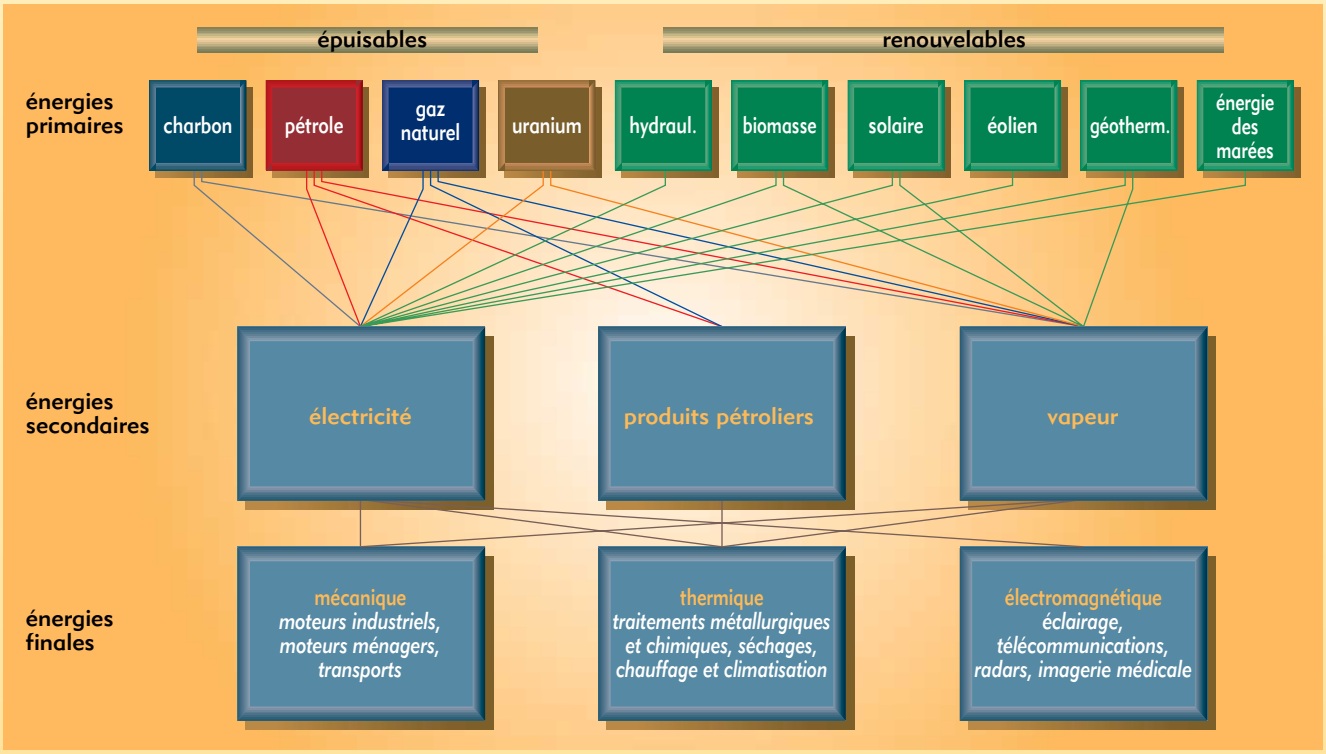
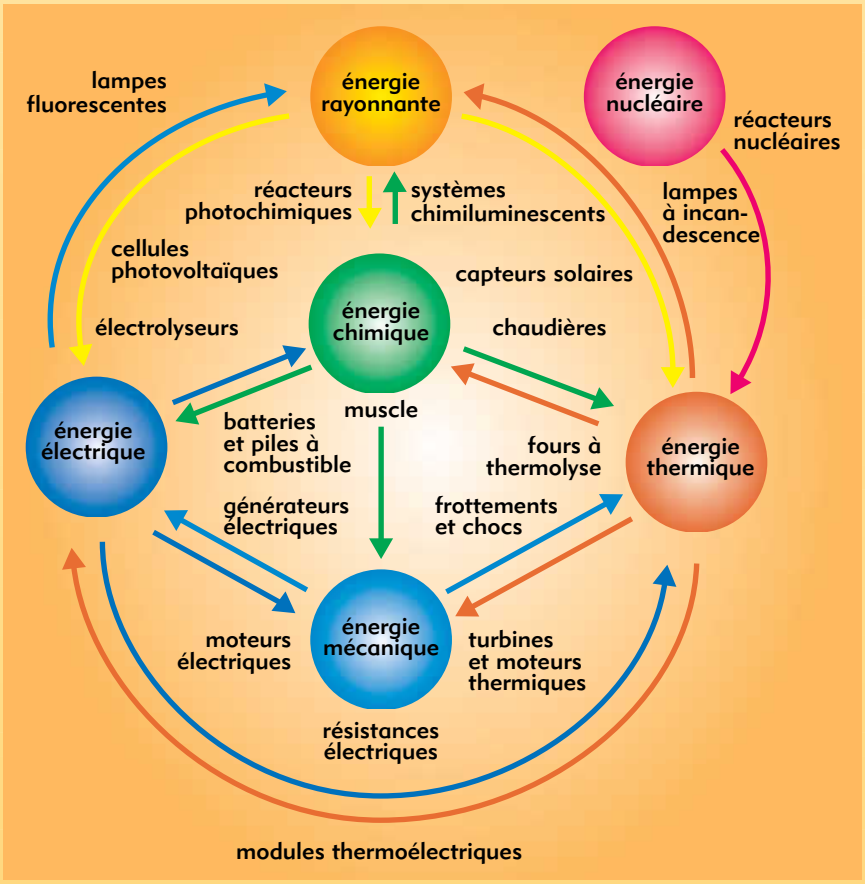


Figure 1. Schéma du système énergétique.

Le schéma le plus simple d'un système énergétique est celui que l'homme exploite depuis des millénaires en utilisant le bois pour cuire ses aliments ou se chauffer, et la force animale ou la force du vent pour moudre le grain ou se déplacer. D'une énergie primaire puisée dans la nature, le bois et le vent en l'occurrence, l'homme tire une énergie utile qui correspond à un service, le chauffage ou le mouvement. Ce n'est qu'à partir du 18e siècle que le concept d'énergie s'est dégagé peu à peu. L'énergie est devenue un moteur essentiel de l'économie. Elle se déguise en effet en de multiples formes : chimique dans les **combustibles fossiles** ou la biomasse, cinétique dans les chutes d'eau ou le vent, électromagnétique dans le solaire, nucléaire dans l'uranium, mais encore électrique ou thermique dans de nombreux usages (figure 1). Ce qui donne son unité à ce concept, ce sont les nombreuses transformations d'une forme à l'autre, mais dans lesquelles la quantité d'énergie reste invariable, selon le **premier principe de la thermodynamique**.

Ces formes ne sont pas de qualité égale, elles ne se transforment pas intégralement de l'une dans l'autre (figure 2). Lorsque l'énergie chimique contenue dans le charbon est transformée dans une centrale en énergie électrique, cette dernière ne représente qu'une fraction de l'énergie initiale (42 % environ) ; le reste est passé à l'état thermique à basse température dans le



Source : CEA/DSE/SEE

Figure 2. Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.

B

condenseur et se dissipe dans la nature. L'énergie s'est conservée, mais s'est dégradée, conformément au **second principe de la thermodynamique**. Toute transformation non strictement réversible entraîne des pertes d'énergie utile par rapport à l'usage optimal recherché.

Le système énergétique est devenu très complexe avec le développement de l'industrie et l'apparition de nouvelles technologies : sa connaissance est à la base de toute réflexion sur l'énergie. Il est structuré en plusieurs niveaux.

Le niveau **primaire** est donc constitué de toutes les sources énergétiques non transformées disponibles dans la nature, qui se subdivisent en énergies épuisables (le charbon, le pétrole brut, le gaz naturel, l'uranium naturel) et énergies renouvelables (l'hydraulique, le solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, la géothermie, l'énergie marémotrice). En fait, aucune énergie n'est, bien sûr, "renouvelable" au sens strict. Ainsi, le Soleil va s'éteindre, la Terre se refroidir, sa rotation se ralentir et avec elle les forces marémotrices.

Le niveau **secondaire** est celui des conversions (figure 2) et du transport de l'énergie après un stade donné de transformation, éventuellement son stockage, niveau dans lequel la production d'électricité est prépondérante, mais où se classent aussi le raffinage du pétrole, la production de vapeur industrielle et, à l'avenir, la production d'hydrogène, appelé à devenir à côté de l'électricité un **vecteur énergétique** majeur.

Le niveau **final** correspond aux usages de l'énergie par le dernier consommateur (essence à la pompe, électricité au compteur) que l'on peut regrouper en trois catégories, présentes dans tous les secteurs de l'économie : l'énergie mécanique, l'énergie thermique et les rayonnements. À ce niveau, il convient de distinguer l'énergie *finale* effectivement consommée et l'énergie *utile* strictement nécessaire au service rendu, la différence entre les deux représentant les pertes diverses liées à l'utilisation de l'appareil. Par rapport à l'énergie utile qui ne représente qu'un peu plus du tiers de l'énergie primaire utilisée, les pertes se décomposent ainsi : 24,5 % à la conversion, 4,4 % à la distribution, 34,4 % à l'usage final, soit environ 63 %.

Toute quantité d'énergie qui passe du stade de l'énergie primaire à un autre suit une série de processus de transformation et de transports, c'est-à-dire une chaîne énergétique. Un système énergétique est constitué d'un grand nombre de chaînes possibles, mais toutes ne sont pas viables d'un point de vue économique ou environnemental.

Enjeux et moyens des choix énergétiques

Les choix énergétiques répondent à des enjeux socio-politiques, économiques et industriels complexes et souvent contradictoires. Leur évaluation intègre de plus en plus de facteurs et leur mise en œuvre implique de nouveaux moyens pour les décideurs.

NOVOSTI/SIPA PRESS

Émanations d'un complexe industriel dans le bassin de Kouzbass (Sibérie occidentale). L'évaluation d'une chaîne énergétique doit tenir compte de toutes les pertes entre énergie primaire et énergie utile.

L'évaluation économique des systèmes énergétiques est déjà délicate au plan statistique, comme l'illustre l'estimation du système mondial faite par le Conseil mondial de l'énergie (CME) pour l'année 1990, la dernière portant sur la planète et non sur les seuls pays de l'OCDE comme des statistiques plus récentes (tableau 1). Les valeurs présentées ne peuvent être qu'indicatives : elles dépendent de conventions d'équivalence entre formes d'énergie qui sont approximatives et non universellement admises et, s'il est relativement facile de comptabiliser l'énergie commerciale, ce n'est pas le cas de la biomasse (essentiellement le bois), ressource essentielle de 2 milliards d'hommes.

La situation énergétique, si elle ne suscite pas d'inquiétude quant au volume global des ressources, devient préoccupante en raison des fortes inégalités à la fois dans la répartition des ressources d'hydrocarbures et dans les niveaux de consommation entre pays pauvres et pays riches (voir *Énergies d'aujourd'hui et de demain*). Atténuer ces inégalités sources de conflits potentiels doit être un axe majeur de toute bonne politique énergétique. Tout choix en la matière doit par ailleurs prendre en considération les atteintes à l'environnement provoquées par la consommation d'énergie.

Dans cette optique, les *chaînes énergétiques* envisageables sont à examiner dans leur intégralité et sous tous les aspects, afin de minimiser les coûts de production et les impacts sur l'environnement (tableau 2). Aucune énergie n'est exempte d'aléas économiques ou de dangers. Les divers critères de son évaluation peuvent se situer au niveau local, national, régional ou mondial. Les implications d'un choix sont multiples, parfois contradictoires, et portent souvent sur le long terme en raison des délais de réalisation et de la durée de fonctionnement des équipements de production et de transport.

L'électricité a pris une place considérable dans les économies modernes. Sa contribution à l'énergie finale atteint 13 % en moyenne dans le monde et 40 % dans les pays industrialisés ; sa croissance (3,2 % entre 1995 et 1996) reste supérieure à celle de l'énergie (2,9 %). La production d'électricité est donc l'objet d'une attention particulière dans la politique énergétique d'un pays, d'autant que cette forme d'énergie offre une grande flexibilité dans ses moyens de production et une multiplicité d'usages, captifs ou concurrentiels.

Le coût de production du kilowattheure (kWh) a toujours fait l'objet d'une analyse approfondie. Mais il est bon de ne pas focaliser la réflexion sur un seul segment comme celui représenté par la centrale électrique. Il apparaît ainsi que la chaîne du gaz est aussi capitalistique que celle du nucléaire et que, si elle a l'avantage de moins peser de ce point de vue sur l'électricien, en revanche la valeur ajoutée correspondante est moins favorable à l'économie nationale. Par ailleurs, la stabilité du coût du kWh hydraulique ou nucléaire est un facteur appréciable pour tout industriel. D'autres aspects sont à considérer sur le long terme, comme la sécurité d'approvisionnement, et les implications géopolitiques, même si d'aucuns veulent les négliger au prétexte de la libéralisation du marché.

L'impact sur l'environnement relève aussi de l'économie de la production d'électricité. Le coût des déchets et leur contribution au coût

énergies	charbon	pétrole	gaz naturel	nucléaire	hydraulique	biomasse	électricité	chaleur	total
1996 (9,5 Gtep)	22,7	34,6	19	6,3	6,5	10,8*			100
1990 (9 Gtep)									
primaire	24,6	30,8**	18,9*	5,1	5,7	14,9			100
finale	9,7	24,8	10,8			14,3	9,4	2,1	71,1
dont :									
industrie	6,7	4,1	5,9			0,8	4,6	1	23,1
transport	0,3	15,9	0			0	0,2		16,4
résidentiel* **	2,7	4,8	4,9			13,5	4,6	1,1	31,6
utile	6	8,2	8,1			5,4	7,5	1,5	36,7

Tableau 1. Consommation énergétique dans le monde (en %).
La consommation d'énergie primaire en 1996 s'élevait à environ 9,5 milliards de tonnes équivalent pétrole (9,5 Gtep). *Source : AIE (1996) CME (1990)*
* *biomasse et géothermie*
** *hors utilisation comme matière première dans l'industrie chimique*
*** *secteur résidentiel, tertiaire et agriculture*

du kWh nucléaire sont estimés de façon correcte. En revanche, le coût du kWh d'origine fossile ne reflétait pas jusqu'à maintenant les conséquences des émissions de gaz à effet de serre, ni le coût de leur élimination. D'où l'intérêt des études les plus récentes, qui prennent aussi en compte ces "externalités" pour comparer divers scénarios de renouvellement des moyens de production d'énergie. C'est ainsi que les auteurs de l'étude économique *Prospective de la filière électrique nucléaire* remise en juillet dernier au Premier ministre(1) ont pu estimer qu'en cas de hausse sensible des prix des énergies fossiles, c'est dans les scénarios où une large partie du parc nucléaire est renouvelée que le coût est le plus faible.

De nouveaux instruments

Quoi qu'il en soit, de nouveaux instruments économiques devront être mis en place afin d'appliquer le protocole de Kyoto (encadré A, ***L'effet de serre***). Une taxation des émissions de gaz à effet de serre est un moyen simple, souple et efficace de les réduire, mais elle est susceptible d'entraîner des perturbations économiques ainsi que des distorsions de concurrence entre pays en l'absence de coordination internationale sérieuse.

(1) Rapport établi par Jean-Michel Charpin, commissaire au plan, Benjamin Dessus, directeur du programme Ecodev (CNRS) et René Pellat, Haut-Commissaire à l'énergie atomique.

Un autre instrument consisterait en un marché des permis d'émission : les pollueurs se verraient allouer des quotas d'émission de CO_2 qu'ils pourraient ensuite échanger, à charge pour chaque émetteur de CO_2 de s'assurer qu'il détient autant de permis d'émission qu'il va émettre de gaz. Dans le cas contraire, il se trouverait contraint ou bien de réduire ses émissions ou d'acheter des permis à ceux qui en posséderaient un excédent grâce à leurs efforts de maîtrise des émissions. Toutefois, la mise en place d'un tel marché, admise dans son principe à la conférence de Kyoto et discutée à La Haye, pose des problèmes considérables, surtout à l'échelle internationale. Les questions énergétiques et économiques sont aujourd'hui tellement imbriquées que la façon la plus pertinente de comparer les politiques est d'en évaluer les conséquences macro-économiques à l'aide d'un modèle adéquat, comme le sont ceux construits par le CEA depuis dix ans. Non seulement un tel modèle permet d'estimer l'évolution à terme des principaux agrégats économiques, tels le PIB, la balance des paiements, l'emploi, etc., mais aussi les effets de redistribution des taxes ou des permis d'émission éventuels.

Un moyen différent mais indispensable d'intervention est d'investir dans la recherche des énergies renouvelables et des économies d'énergie, et de subventionner leur lancement industriel : l'enjeu est à la fois de réduire les émissions de gaz à effet de serre, d'atténuer à terme la vulnérabilité énergétique de l'Europe et de promouvoir des technologies adaptées aux pays en développement. Cet effort doit contribuer à infléchir le coût de production des énergies nouvelles par l'amélioration de leurs performances et par les économies d'échelle attendues d'un programme industriel. À terme en effet ces énergies seront, comme les autres, soumises aux critères du marché. Une taxation sur les émissions de gaz à effet de serre ou le marché des permis d'émission les favoriseront par rapport aux énergies fossiles, du moins dans la mesure où elles se montreront efficaces à travers une évaluation complète basée sur l'analyse des chaînes énergétiques. Un des aspects importants de la question est le contenu en gaz à effet de serre par kWh produit par les énergies primaires, exprimé en CO_2 équivalent. Le tableau 2 de l'article précédent montre les disparités et les variations possibles selon les conditions réelles le long de la chaîne énergétique.

L'évaluation de **convertisseurs d'énergie** en électricité comme les piles à combustible, par exemple, doit de ce fait inclure l'analyse de la chaîne spécifique de leur combustible, en l'occurrence l'hydrogène, vecteur énergétique de l'avenir. Au cas où celle-ci ne se révélerait pas entièrement positive du point de vue économique ou environnemental, les avantages indéniables de ces convertisseurs, qu'il s'agisse de leur commodité d'emploi ou de l'amélioration de l'atmosphère des villes par leur application à la voiture électrique, pourraient toutefois faire rendre un arbitrage légitime en leur faveur et permettre leur essor.

Dans tous les cas, les perspectives de demande énergétique, tout particulièrement dans les pays pauvres, sont énormes. Les avancées technologiques des nouvelles énergies pour les rendre attractives et concurrentielles constituent donc un enjeu important pour la recherche et l'industrie françaises, comme continuent de l'être les activités nucléaires.

Gilbert Naudet
Professeur en génie atomique
Institut national des sciences
et techniques nucléaires

Tableau 2. Pour produire 1 000 mégawatts électriques pendant un an, il faut :

photovoltaïque	100 kilomètres carrés (rendement : 10 %, Europe centrale)
éolien	5 600 éoliennes (disponibilité de 30 %, Mer du Nord)
charbon	2 600 000 tonnes
pétrole	1 800 000 tonnes
fission nucléaire	25 tonnes d'uranium enrichi à 4 %
fusion thermonucléaire	100 kg de deutérium et 150 kg de tritium

(Source : CEA/DRFC)