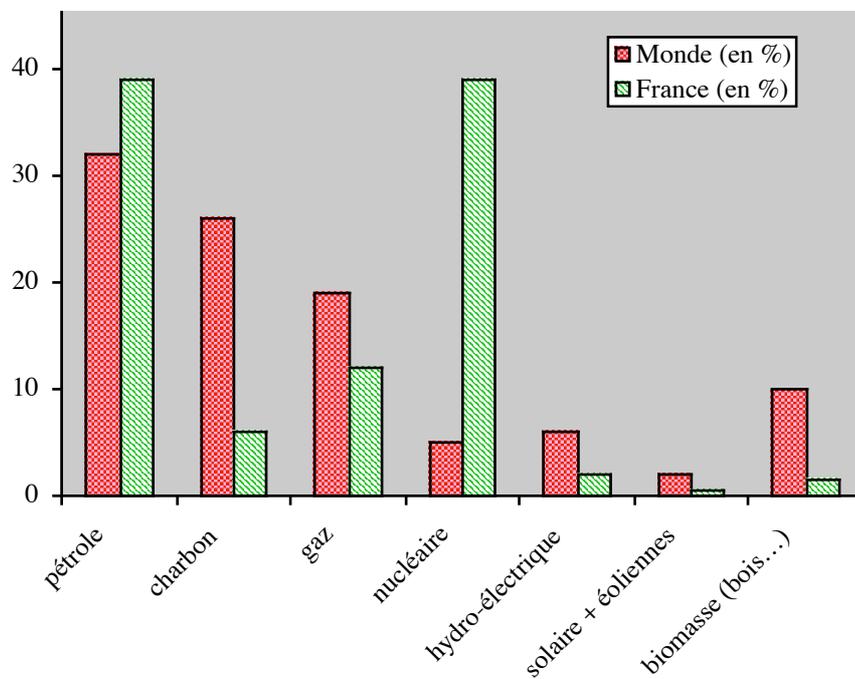


Chapitre 11 : Les énergies

Au cours du siècle dernier, la consommation mondiale d'énergie a été multipliée par 40, pendant que la population passait de 1,5 à 6 milliards d'habitants. Elle est aujourd'hui équivalente à environ 10 milliards de tonnes de pétrole par an (10 GTep), ce qui représente une puissance de l'ordre de 14 000 gigawatt (voir encadré). Cette consommation mondiale augmente à un rythme d'environ 1 % par an. Elle provient, en moyenne, pour 32 % du pétrole, 26 % du charbon, 19 % du gaz, 5 % du nucléaire, 6 % de l'hydroélectrique, 10 % de ce qu'on appelle la biomasse (essentiellement le bois), et 1 à 2 % d'autres énergies dites « renouvelables » telles que le solaire et les éoliennes¹. C'est dire que les « combustibles fossiles » (pétrole, gaz, charbon essentiellement), représentent 77 % des sources actuelles d'énergie. En France où un important programme électro-nucléaire a été développé, ces proportions sont un peu différentes (voir figure 11.1). Jusque vers la fin du XX^e siècle, dans les pays développés, on trouvait normal de consommer l'énergie en grande quantité parce qu'elle était bon marché, parce qu'on ne percevait pas les conséquences que cela pouvait avoir sur l'équilibre de notre planète, enfin parce que les sources d'énergie utilisées semblaient inépuisables.

Cette belle tranquillité vient brutalement de prendre fin. Toutes les réserves énergétiques sont à peu près connues, au moins dans les zones continentales, et il semble difficile de continuer à extraire des combustibles fossiles au rythme actuel et à bon marché au-delà de 2040. D'autre part il est maintenant démontré que brûler des combustibles fossiles dégage dans l'atmosphère de telles quantités de gaz carbonique (CO₂) que le climat de la Terre est en train d'évoluer de manière inquiétante (figure 10.2). Plusieurs conférences mondiales successives (Rio, Kyoto, La Haye, Johannesburg) ont donc proposé de prendre d'urgence des mesures radicales pour limiter l'émission de « gaz à effet de serre » dans l'atmosphère. Par ailleurs, en construisant un parc important de centrales nucléaires, des pays comme la France ou la Suède ont certes réussi à limiter leur production de CO₂, mais la filière nucléaire produit des déchets radioactifs que l'on ne sait pas

¹ Ces chiffres varient considérablement selon les sources, chacun n'utilisant pas la même définition de la tonne d'équivalent pétrole, et certains ne comptabilisant que l'énergie commercialisée, d'autres confondant puissance installée et puissance effectivement produite. Nous reproduisons ici ceux que l'on peut trouver sur le site de la société française de physique (http://sfp.in2p3.fr/Debat/debat_energie) et qui utilisent une ancienne équivalence entre énergie électrique disponible et énergie chimique produite par la combustion du pétrole. Avec la définition officielle de la tep, la part du nucléaire est deux fois plus faible. On trouvera une utile discussion de ces équivalences sur le site de Jean-Marc Jancovici, qui a été président du comité consultatif du débat national sur l'énergie: <http://www.manicore.com/documentation/equivalences.html>



encore suffisamment bien traiter ni stocker. Le monde moderne se retrouve donc face à un choix difficile : réchauffement global de la Planète ou déchets nucléaires ?

Figure 11.1. Répartition des sources d'énergie utilisées dans le Monde et en France.

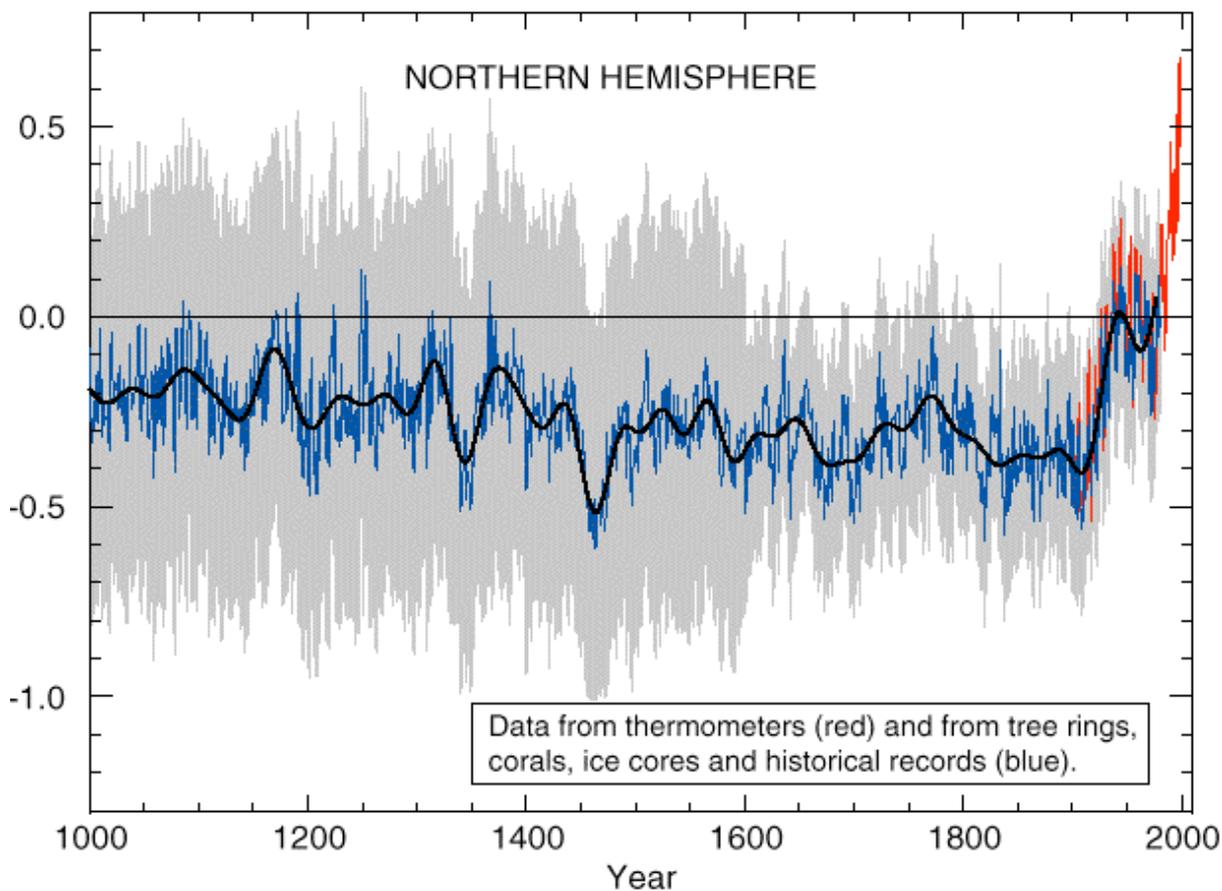


Figure 11. 2. Evolution probable des températures sur 1000 ans. La légende en Anglais signifie : "valeurs mesurées avec des thermomètres (en rouge) ou déduites d'analyses de cernes d'arbres, de coraux, de carottes de glace et d'archives diverses (en bleu).

Source : Climate Change, the scientific basis, GIEC, 2001.

La courbe noire est la valeur moyenne (sur l'hémisphère Nord) la plus probable, la zone grise la plage des températures « possibles » (ou encore la marge d'erreur).

Face à cette situation, la mobilisation des scientifiques est indispensable. Assurer à la population de la Planète un avenir énergétique à la fois confortable et sûr pose de nombreux problèmes scientifiques et techniques qui sont difficiles. Il est urgent de les considérer avec toute la rigueur nécessaire. C'est le rôle des scientifiques, en particulier des physiciens, de faire connaître la nature réelle de ces problèmes, ainsi bien sûr que de contribuer à les résoudre. En fait, la physique ne permet pas d'imaginer la découverte de nouvelles sources d'énergie dans un avenir proche. Mais de nombreux problèmes se posent, concernant par exemple le stockage de l'énergie et son utilisation optimale, et la science doit être mobilisée pour trouver le meilleur compromis entre le coût, la nécessaire protection de l'environnement et de légitimes exigences de sécurité.

Combustibles fossiles et réchauffement global

Les membres du Groupe International d'Etudes sur le Climat, organisme mis en place en 1988 à la demande du G7 (USA, Japon, Allemagne, France, Grande Bretagne, Canada, Italie), ont estimé l'augmentation de la température moyenne de la Planète à environ 0,5 °C au cours de la deuxième moitié du XX^e siècle. Ce réchauffement s'accélère et peut entraîner des bouleversements profonds du climat dans les cent ans à venir. Il est associé à l'augmentation de la teneur de l'atmosphère en « gaz à effet de serre » dégagés par l'activité humaine. Au premier rang de ces gaz se trouve le CO₂ dont le dégagement a atteint 22 milliards de tonnes (22 gigatonnes) par an en 1990 et ne cesse de croître. La teneur actuelle de l'atmosphère en CO₂ est de 365 ppmv (parties par million en volume), alors que, depuis 400 000 ans, elle oscillait entre 180 ppmv lors des périodes glaciaires et un maximum de 280 ppmv dans les périodes chaudes. Conformément à la dernière résolution de Kyoto, 178 pays ont décidé de se fixer un objectif qui peut sembler modeste mais sera difficile à atteindre : réduire l'émission de CO₂ pour atteindre 2 % de moins que le niveau de 1990 (22 Gigatonnes par an) à l'horizon 2010. Un peu plus ambitieuse, l'Europe a décidé de réduire l'émission de gaz à effet de serre de 1 % par an jusqu'en 2020. Si l'on atteignait ces objectifs, l'augmentation de température pourrait cependant atteindre 6 °C en 2100. Pour limiter l'augmentation de température à environ 2 °C, il faudrait réduire l'émission de CO₂ des deux tiers d'ici à 2050, car le CO₂ actuellement présent dans l'atmosphère ne pourrait être résorbé

suffisamment vite pour faire mieux. Il faut noter qu'une part d'incertitude entache bien sûr ces prédictions car elles dépendent de facteurs économiques et politiques difficiles à prévoir, tels que l'évolution de la population et de l'activité économique ainsi que la manière dont l'énergie sera consommée.

Quoi qu'il en soit, il faut comparer ces quelques degrés de réchauffement à ce que l'on sait du passé de notre Planète. Par exemple, lors de la dernière période glaciaire, il y a 21 000 ans, la température moyenne de la Terre n'était que de 5 à 6 °C inférieure à ce qu'elle est aujourd'hui, mais cela suffisait à recouvrir de 2 à 3 km de glace le Nord de l'Europe, de la Russie et des Etats Unis. Le niveau des mers était, à l'époque, inférieur de 120 m au niveau actuel. Un réchauffement de 4 °C d'ici à 2100 ferait monter le niveau des mers d'environ 60 cm, pour moitié à cause de la dilatation de l'eau en surface et de la fonte des glaciers aux latitudes moyennes, pour l'autre moitié à la fonte partielle des glaces polaires du Groenland et de l'Antarctique. A plus long terme, si toutes les glaces fondaient, le niveau des mers monterait d'environ 80 m. Assez préoccupante aussi est l'hypothèse qu'une variation de la salinité de l'Atlantique Nord pourrait changer le cours du Gulf Stream. Il est possible aussi que le réchauffement intensifie les cycles d'évaporation-condensation de l'eau dans l'atmosphère, ce qui pourrait conduire à une intensification des tempêtes et cyclones ainsi qu'à une modification de leurs routes de déplacement actuelles. On voit donc que continuer à brûler les combustibles fossiles au rythme actuel pourrait avoir des conséquences dramatiques à l'échelle de la Planète entière et à long terme. Dans ces conditions, est-il envisageable de réduire substantiellement la production de CO₂ et des autres gaz qui contribuent à l'augmentation de l'« effet de serre », c'est-à-dire au réchauffement de la planète ?

Dans les pays comparables à la France, la consommation se répartit en 35 % pour le chauffage, 30 % pour l'industrie, 25 % pour les transports et 10 % pour les usages domestiques et le tertiaire. En ce qui concerne le pétrole, son utilisation pour le transport individuel semble difficile à éviter dans l'état actuel des technologies. Cependant, il importerait de parvenir, à l'échelle mondiale, à réserver ce qui reste pour l'industrie chimique au lieu de le brûler pour produire de l'électricité ou pour chauffer les habitations. Le remplacer par le gaz ne serait pas suffisamment judicieux. En effet, brûler du gaz produit un peu moins de CO₂ (49 g par kWh au lieu de 71 pour le pétrole), mais l'exploitation des gisements de gaz naturel et son transport sur de longues distances semblent difficilement réalisables sans fuites importantes de méthane, en particulier dans l'ex-URSS actuelle. Or, le méthane est un gaz à effet de serre 10 à 20 fois plus actif que le CO₂. De toute façon, au rythme actuel de leur exploitation, il ne reste du pétrole facile à extraire que pour environ 50 ans et du gaz naturel pour 100 ans peut-être. Quant au charbon, dont les réserves sont importantes

(environ 200 ans au rythme d'exploitation actuel), c'est un combustible très polluant dont la combustion dégage 86 g de CO₂ par kWh, soit 20 % de plus que le pétrole, et surtout 50 % de plus d'oxydes d'azote (NO₂) et de soufre (SO₂) qui provoquent de dangereuses pluies acides, sans parler d'une radioactivité non négligeable. C'est pourquoi des pays gros consommateurs de charbon comme la Belgique, le Royaume-Uni, la Pologne, l'Allemagne, les Etats-Unis, la Chine et surtout le Canada dégagent entre 43 et 140 kg de SO₂ par habitant et par an, alors que la Suisse, la Norvège, les Pays-Bas, la France ou la Suède n'en dégagent qu'entre 10 et 20. En fait, une centrale thermique standard ne produit qu'environ 35 % de l'énergie chimique disponible, et ce rendement peut être sensiblement amélioré. Les progrès réalisés dans le domaine des matériaux par l'industrie aérospatiale ont déjà permis de réaliser des turbines à gaz fonctionnant à 900 °C et qui utilisent directement les gaz de combustion. A la sortie de ces turbines haute température, les gaz sont encore suffisamment chauds pour chauffer de la vapeur d'eau et mettre en œuvre une turbine classique. Ce « cycle combiné » permet d'atteindre des rendements de 50 %. Si, de plus, la vapeur est utilisée à la fois pour produire de l'électricité et alimenter un réseau de chauffage urbain, on peut atteindre 85 %. Ces nouvelles centrales, « cogénératrices » et « à cycle combiné », si elles étaient généralisées, pourraient permettre une diminution substantielle des émissions de gaz à effet de serre pour une même production d'énergie.

Dans ces conditions, peut-on se passer du nucléaire ? En moyenne au niveau mondial, l'énergie consommée provient pour plus des trois quarts de combustibles fossiles. Même en France, où l'on a investi dans la construction d'un important parc de centrales nucléaires dans les années 70, l'utilisation des combustibles fossiles reste importante : le nucléaire produit 80 % de l'électricité, soit 39 % de l'énergie totale, à peu près autant que le pétrole qui sert principalement aux transports, et l'ensemble pétrole+gaz+charbon fournit toujours 57 % de l'énergie totale. En raison de leur dilution, les énergies renouvelables telles que le solaire et les éoliennes ont des possibilités limitées, et de plus, on a déjà équipé tous les sites possibles en barrages hydro-électriques dans de très nombreux pays. Il semble donc extrêmement difficile d'imaginer que l'on puisse limiter efficacement les risques d'une modification profonde du climat sans augmenter la production d'électricité d'origine nucléaire. Or, ceci n'est pas possible partout sans risque de détournement à des fins militaires, et l'on ne maîtrise pas suffisamment les risques que cela comporte du fait de la production de déchets radioactifs.

L'énergie nucléaire : sécurité et déchets.

L'exemple de la France est particulièrement instructif en ce domaine. Avec un parc de 59 centrales de 0,8 à 1,3 GW chacune, la France produit environ 63 GW de puissance électrique qui est propre

du point de vue du climat. C'est ce qui lui permet de n'émettre que 6 tonnes de CO₂ par habitant au lieu de 8 en moyenne en Europe et 20 aux Etats-Unis (il faut aussi noter qu'un Européen moyen consomme une puissance moyenne de 5 kW, alors qu'un Nord-Américain en consomme 11).

La sécurité des centrales nucléaires modernes est bonne et ne cesse de s'améliorer, ainsi que la transparence de l'information qui les concerne. L'accident de la centrale de Three Mile Island, en 1979 aux Etats-Unis, n'a conduit à aucune dissémination de matière radioactive à l'extérieur du réacteur accidenté. Seules deux personnes ont été irradiées et les doses reçues n'étaient pas mortelles. Le seul accident vraiment grave est celui survenu à Tchernobyl en 1986. Il fut la conséquence d'une exceptionnelle accumulation d'erreurs humaines dans un réacteur dont la conception comportait de graves lacunes en matière de sécurité. Il a causé la mort de quelques dizaines de personnes et risque de provoquer quelques milliers de cancers parmi les intervenants au moment de la catastrophe et dans la population environnante². Aussi tragique qu'il soit, cet accident est néanmoins à comparer à d'autres drames survenus dans des mines de charbon, lors de la rupture de certains barrages ou de l'explosion de certaines usines chimiques telles que celle de Bhopal (20 000 morts), sans parler des 20 000 morts annuels dus, rien qu'en France, à la consommation de tabac.

Le problème principal du nucléaire n'est pas celui de sa sécurité, qui est grande au moins en France, mais celui des déchets générés par cette forme de production d'énergie. Ces déchets sont généralement classés en trois catégories:

- **Les déchets A** sont faiblement radioactifs et leur radioactivité décroît rapidement avec le temps. Dans les centrales nucléaires, ils sont constitués de tous les objets contaminés : gants, filtres, résines... Chaque réacteur produit environ 100 m³ de déchets A par an. Ils sont placés dans les centres de stockage de la Manche et de l'Aube. Leur radioactivité résiduelle est comparable à la radioactivité naturelle au bout de 300 ans.
- **Les déchets B** sont moyennement radioactifs. Ils représentent 3 % de la radioactivité totale produite en France jusqu'à ce jour. A raison de 20 m³ par réacteur et par an, leur volume a atteint 37200 m³ répartis en 97500 colis en l'an 2000, et leur radioactivité cumulée est considérable, 89 millions de curies. Ils dégagent cependant peu de chaleur et ne présentent pas de problème pour la santé publique. Ils pourraient être enfouis dans une couche

² En fait, ces estimations sont très difficiles à chiffrer, certains prédisant quelques centaines alors que d'autres vont jusqu'à environ 20 000. L'incertitude provient principalement du fait qu'une irradiation ne provoque l'apparition d'un cancer qu'à partir d'un certain seuil. Bien que l'existence de ce seuil ne fasse aucun doute, sa valeur exacte est mal connue. Mais les données sur l'irradiation elle-même sont connues avec une très grande précision grâce aux instruments de physique qui sont extrêmement sensibles.

profonde de qualité géologique et tectonique analogue à la couche d'argile étudiée au laboratoire souterrain de l'Est. Toutefois, il y reste des problèmes à résoudre, qui nécessitent des études scientifiques complexes : protection des sites d'entreposage en attendant l'enfouissement profond, mise au point de conteneurs hermétiques à très long terme, choix d'un site susceptible de rester accessible tant que les mesures et les contrôles sont nécessaires, processus d'enfouissement progressif, réversible en cas de nouvelle découverte relative à la sécurité. L'entreposage des déchets B en surface ou en subsurface n'est pas suffisamment sûr au regard d'un certain nombre de risques tels que : événements climatiques extrêmes, détérioration due à l'évolution des déchets eux-mêmes comme des dégagements de gaz, action de l'humidité, déclenchements accidentels de dispositifs de sécurité, possibles incendies ou erreurs humaines, non-respect des consignes, malveillance, attentats, etc.

- **Les déchets C** proviennent du cœur des centrales et restent fortement radioactifs pendant des temps substantiels. En l'an 2000 en France, les déchets C cumulaient une radioactivité totale de 3 milliards de curies pour 8300 colis correspondant à 1500 m³. Ils sont noyés dans une matrice vitrifiée, selon un procédé mis au point en France et adopté dans le monde entier. Ces verres C contiennent les résidus du retraitement du plutonium et de l'uranium : leurs produits de fission, d'autres actinides en quantité plus faible appelés « actinides mineurs », etc. Ils sont actuellement entreposés dans des puits et ces conditions d'entreposage sont bonnes, mais, si possible, il serait préférable de les enfouir en profondeur, comme les déchets B. Or, pour cela, il faudrait attendre que leur dégagement de chaleur ait suffisamment décru pour que les températures maximales soient sans risque pour la longévité des conteneurs. Certes, la température de ces déchets décroît rapidement au début parce que différents isotopes ont une durée de vie faible (plutonium 241 : 14 ans, curium 244 : 18 ans, strontium 90 : 28 ans, césium 137 : 30 ans, plutonium 238 : 88 ans, americium 241 : 433 ans). Mais à long terme la radioactivité reste importante, dominée par celle du plutonium 239 dont la durée de vie est 24 100 ans. La mise au point de conteneurs fiables à très long terme nécessite des études approfondies qui ne semblent guère avancées, sauf peut-être en Suède. D'autre part, les connaissances actuelles sur la durée nécessaire au refroidissement des déchets C sont insuffisantes. Cette durée dépend évidemment du degré de retraitement que l'on fait subir aux déchets. Il pourrait s'agir de quelques décennies pour les UOX qui sont les combustibles usés à base d'oxydes d'uranium enrichi, provenant des réacteurs à eau pressurisée. Pour les MOX qui sont des mélanges d'oxydes d'uranium

appauvri et de plutonium, cette durée serait plutôt de l'ordre du siècle. Dans l'immédiat, il semble à la fois prématuré d'enfouir les déchets C et urgent que les scientifiques concernés poursuivent les études nécessaires pour résoudre ce problème.

En matière de déchets, le principal problème est celui du plutonium. Il a donc été proposé³ de mobiliser les compétences nécessaires sous forme d'un « Plan plutonium » au niveau européen. Les idées en discussion sont les suivantes :

- Afin de limiter la production de plutonium, il est souhaitable de le recycler dans le combustible lui-même. C'est ce que permet le « moxage » des réacteurs à eau sous pression: le combustible UOX est à base d'oxyde d'uranium enrichi en U235, alors que le combustible MOX incorpore du plutonium. Une voie intéressante est l'utilisation de réacteurs à neutrons rapides, c'est-à-dire de « surgénérateurs » de type Phénix ou Superphénix en France. Par an, en France, on fissionne environ 50 tonnes de matière fissile ce qui produit 8 tonnes de plutonium (sans le moxage ce serait davantage). Les stocks français actuels sont de l'ordre de 240 tonnes. Si l'on remplaçait tous les réacteurs actuels par des réacteurs à neutrons rapides, on pourrait stabiliser ce stock de plutonium au lieu de le voir augmenter d'année en année, malheureusement au niveau de 800 tonnes, ce qui est beaucoup. D'autre part, la fiabilité des réacteurs à neutrons rapides n'est pas encore jugée suffisante. On sait en effet que, dans ces réacteurs, l'utilisation de sodium liquide comme fluide échangeur thermique a posé des problèmes techniques qui ont été pris comme prétexte pour la décision politique de l'arrêt de Superphénix.
- Le physicien des particules Carlo Rubbia a proposé plusieurs idées intéressantes qui sont à l'étude. La première consiste à incinérer les déchets radioactifs réellement dangereux tels que le plutonium en les irradiant dans un réacteur couplé à un accélérateur de particules. Un tel réacteur, dit « hybride », serait particulièrement sûr car il fonctionnerait avec une quantité de combustible « sous-critique » (cela signifie que l'arrêt de l'accélérateur provoquerait l'arrêt spontané de la production de chaleur dans le réacteur). Ces réacteurs consommeraient de l'énergie, mais élimineraient le plutonium. Ils produiraient cependant d'autres éléments radioactifs, des actinides qu'il faudrait stocker à leur tour.
- Rubia a aussi proposé d'utiliser le thorium 232 comme combustible, un élément plus abondant que l'uranium 235 dans la nature. Plus récemment, on a proposé d'incorporer ce thorium dans le combustible liquide de réacteurs à neutrons thermiques; on brûlerait un peu

³ voir par exemple le rapport récent de l'Académie des sciences « L'énergie nucléaire civile dans le cadre temporel des changements climatiques », Robert Dautray, éditions Tec et Doc, Paris décembre 2001.

de thorium , mélangé à de l'uranium 233 qui serait régénéré en permanence comme le plutonium dans les réacteurs à neutrons rapides actuels. Ce nouveau type de réacteurs produirait beaucoup moins de déchets. Pour une puissance totale de 60 GW, la production d'électricité nucléaire française totale, il suffirait d'un stock stable de 100 tonnes d'uranium 233, au lieu de 800 tonnes de plutonium dans la filière actuelle à l'uranium 235. Malgré leur intérêt potentiel, ces idées sont assez récentes, et les problèmes techniques à résoudre sont tels que le développement éventuel d'une filière thorium n'est pas envisageable à court terme.

- Un effort de recherche important est évidemment à faire sur la séparation des déchets les plus nocifs. Il est proposé de commencer par l'iode 129 et le technetium 99 avec l'ambition d'obtenir des résultats dès 2006 pour continuer évidemment ensuite avec tous les autres isotopes et aboutir à une solution du problème du Plutonium à moyen terme.
- Une étude approfondie des matériaux susceptibles de confiner les corps radiotoxiques dans des environnements hostiles doit être faite de façon à pouvoir fabriquer des conteneurs (clé à la fois de l'entreposage et du stockage), des matrices (idem) et des conditionnements, des barrières dites ouvragées contenant les conteneurs. Le stockage fait intervenir de nombreux processus qui relèvent de la chimie sous rayonnement, de la physicochimie du milieu artificiel du stockage, de la physique de la diffusion dans le milieu naturel, des sciences de la Terre telles que la géomécanique, etc.
- Les expériences dans le Laboratoire souterrain de l'Est de la France ont pris un retard regrettable ; elles doivent être activement poursuivies et l'ouverture d'un laboratoire complémentaire dans un autre environnement géologique doit être envisagée. Certains pays comme la Suède possèdent des sites granitiques de très haute qualité et ont aussi progressé dans la mise au point de conteneurs particulièrement résistants.
- Un effort enfin doit être fait en matière de simulation numérique dans ces problèmes dont la complexité est grande, tant le nombre de paramètres pertinents est lui-même élevé.



Figure 11.3. Vue schématique du site du laboratoire de stockage de l'Est de la France. (document ANDRA)



Figure 11.4. Les conteneurs de déchets vitrifiés. Vue d'une coulée de verre à gauche et conteneur CSD-V à droite. Lors du retraitement, les produits de fission et les transuraniens sont « vitrifiés », c'est-à-dire incorporés dans un verre au borosilicate en fusion. Le mélange est coulé à 1150 °C dans des conteneurs étanches en acier inoxydable appelés CSD-V (Conteneur Standard de Déchets-Vitrifiés). Leur hauteur est de 1,35 m, leur diamètre de 0,43 m, et leur volume utile de 150 litres. Le poids moyen d'un conteneur CSD-V est de 490 kg soit 90 kg de conteneur et 400 kg de verre solide (dont 14 % de produits de fission). Un conteneur CSD-V correspond à environ 1,3 tonne de combustible retraité. Il se caractérise par un dégagement de chaleur important, en moyenne 2,5 kilowatts par conteneur, au moment de sa production. Les conteneurs sont entreposés en puits ventilés, pour leur refroidissement, sur les sites de production de Cogéma à La Hague et Marcoule. (documents ANDRA)

Par ailleurs, la production d'énergie par fusion nucléaire est l'un des défis de ce siècle. La fusion des deux isotopes de l'hydrogène, le deutérium et le tritium, produit de l'hélium plus un neutron et dégage une énergie de 17,6 millions d'électron-volts (MeV). Cette fusion aurait lieu dans un réacteur dans lequel la génération du tritium se ferait à partir de l'action des neutrons sur une couverture en lithium 6. Seule la structure interne des réacteurs sera activée, c'est-à-dire rendue radioactive, par ces neutrons produits par la réaction de fusion (qui emportent une énergie de 14 MeV) ; cette activation doit être limitée par un choix judicieux des matériaux. Cette étude expérimentale, qui doit précéder la réalisation d'un réacteur de fusion, n'a pas encore été entreprise.

L'obtention de réactions de fusion demande une température supérieure à 100 millions de degrés. Deux voies font l'objet d'une recherche intense : les machines toriques de type Tokamak où le plasma est confiné par un champ magnétique et le confinement inertiel. La machine européenne JET, un Tokamak, a obtenu une puissance de fusion de 16 MW pendant une seconde. Les performances visées par la machine internationale en projet, ITER, pourraient permettre d'atteindre 400 MW avec une impulsion durant jusqu'à 400 secondes. Cette machine ne sera qu'une étape, préalable à la construction d'un réacteur de démonstration de la faisabilité de cette filière. Il faudra donc encore plusieurs décennies de recherche avant que l'énergie de fusion en soit utilisable industriellement.

L'autre voie, le confinement inertiel, fait appel à une série de micro explosions de cibles contenant un mélange de deutérium et de tritium, comprimé par l'action d'un laser de très haute puissance. À l'heure actuelle les recherches sur cette voie sont essentiellement d'intérêt militaire.

Energies renouvelables : biomasse, solaire, éoliennes...

Peut-on sortir du dilemme réchauffement global – déchets nucléaires ? La première idée à mettre en œuvre est évidemment de faire des économies d'énergie. Le problème n'est pas le même dans des pays en voie de développement qui aspirent à une augmentation légitime de leur consommation et dans les pays développés qui gaspillent outrageusement leur énergie. On a déjà vu que le rendement des centrales thermiques standard pouvait être grandement amélioré. Par ailleurs, une isolation thermique systématique des habitations devrait permettre de faire de substantielles économies puisque, rappelons-le, le chauffage dans un pays comme la France représente un tiers de la consommation totale d'énergie! Rappelons cependant que ventiler les habitations est indispensable sous peine de voir s'aggraver l'asthme et allergies, pour éviter aussi l'accumulation du radon, un gaz

radioactif qui s'échappe en permanence du sol où que l'on soit sur la Terre. En ce qui concerne les transports (un quart de la consommation d'énergie), une politique de développement des transports en commun aurait un impact non négligeable et la consommation des automobiles pourrait être substantiellement réduite, surtout si on limitait leur vitesse. Quant à l'éclairage (environ 12 % de l'énergie, 25 % de l'électricité), on peut aussi en améliorer considérablement le rendement. Une lampe fluorescente compacte moderne consomme 4 fois moins d'électricité qu'une lampe à incandescence traditionnelle : environ 60 lumens par watt électrique (60 lpw) contre 15 lpw pour une lampe ordinaire. A moyen terme, on prévoit d'utiliser les diodes électroluminescentes qui servent déjà à l'affichage lumineux et dont l'utilisation progresse pour les feux de circulation et sur les automobiles. Les diodes rouges ont un bon rendement, mais les diodes blanches actuelles ne sont pas encore très efficaces (environ 20 lpw) ; on espère toutefois atteindre 150 à 200 lpw vers 2010-2015. Là aussi, de substantielles économies d'énergie sont donc prévisibles si les progrès scientifiques confirment les espoirs actuels. On devrait enfin considérer une amélioration systématique du traitement des déchets.

Qu'en est-il des sources d'énergie propre ? On parle beaucoup d'éoliennes. Une éolienne de grande taille (50 m de diamètre) peut générer une puissance maximale de 1 MW. Mais cette puissance correspond aux périodes de vent maximal. La puissance moyenne fournie n'est donc qu'un tiers de cette valeur. Pour produire 5 % seulement de l'énergie française, c'est-à-dire générer une puissance de 10 GW, il faudrait donc installer au moins 30 000 éoliennes géantes, surtout s'il fallait aussi transporter cette énergie loin des côtes ou la stocker, ce qui ne se ferait pas sans pertes. Les côtes sont en effet à la fois les endroits les plus ventés et ceux où le bruit de ces grandes machines serait le moins gênant. A raison d'une éolienne tous les 50 m cela signifierait un rideau continu d'éoliennes sur 1500 km de long et il paraît douteux que la population française soit prête à accepter cela. Il est donc difficile de croire que les éoliennes puissent représenter l'avenir énergétique de la France, mais on aurait tort de négliger la recherche en ce domaine et l'apport complémentaire de l'énergie éolienne pour des usages particuliers.

Les potentialités du solaire sont plus grandes. La Terre reçoit du Soleil un flux moyen de 340 W par mètre carré de surface au sol, dont environ 30 pourcents sont réfléchis et 30 autres pourcents absorbés par l'atmosphère. Selon leur latitude, les différents départements français reçoivent entre 100 et 200 W/m². C'est important. Il est important de savoir que, si l'on veut produire son eau chaude ou se chauffer à l'énergie solaire, au moins partiellement, il n'est pas nécessaire d'habiter dans le Sud, contrairement à certaines idées reçues. Cependant, si l'on veut transformer l'énergie solaire en énergie électrique, les pertes sous forme de chaleur sont importantes. Le rendement

maximal théorique d'une photopile au silicium est de 25 %. Les meilleurs capteurs réalisés à ce jour avec du silicium monocristallin sont chers, difficiles à fabriquer et n'ont qu'un rendement de 12 %. Les capteurs au silicium polycristallin sont moins chers et ont un rendement de 10 %. L'avenir semble plutôt résider dans des dispositifs photovoltaïques obtenus en déposant un film mince semiconducteur sur différents matériaux tels que des plastiques, des métaux ou du verre. Ces nouveaux matériaux ont l'avantage de pouvoir être incorporés directement dans la construction des habitations. Ils sont d'ores-et-déjà bon marché et leur coût baisserait évidemment encore s'ils étaient produits massivement. Mais leur rendement est d'environ 5 %. Pour produire 20 GW de puissance électrique, environ 10 % de la puissance totale consommée en France, il faudrait donc couvrir au moins 2 000 km² de capteurs de ce type, environ quatre millièmes du territoire, soit 30 m² par habitant. C'est encore davantage que la surface totale des toitures françaises, mais un recours systématique à cette technologie pourrait apporter un complément utile aux autres sources d'énergie, surtout dans de nombreux pays en voie de développement, d'autant que son utilisation sur place éviterait les pertes dues au transport. Néanmoins, cette énergie, qui n'est produite que le jour, aurait besoin d'être stockée. Il semble qu'une solution à ce nouveau problème qu'est le stockage serait l'hydrogène, qui est utilisable dans des piles à combustible (voir ci-dessous).

Qu'en est-il enfin de la biomasse ? On appelle ainsi l'ensemble des végétaux utilisables comme combustibles, tels que le bois ou différents alcools. Ils sont considérés comme « énergie renouvelable » à condition que l'on replante autant que l'on consomme. Les partisans de cette filière avancent que le CO₂ dégagé est ensuite refixé (à condition toujours que l'on replante les végétaux consommés). De plus, le bois est évidemment facile à stocker, ce qui en fait une source d'énergie surtout utilisée dans les pays en voie de développement (mais ces pays replantent-ils ?). En fait, un raisonnement de physique simple remarque d'abord que ce procédé utilise l'énergie solaire nécessaire à la photosynthèse. Le calcul de son rendement prouve que celui-ci est malheureusement très faible, inférieur à 0,5 %. Les cultures sucrières, qui sont les plus productives en énergie biochimique, fournissent seulement l'équivalent de 0,6 W/m². Les perspectives de la biomasse sont donc très limitées. L'homme utilise la biomasse surtout pour son alimentation. Or, un homme consomme en moyenne 2700 kilocalories par jour, soit 130 W de puissance, et c'est faible par rapport à sa consommation totale d'énergie (2 kW en moyenne mondiale, 5kW en Europe, 11 kW aux Etats-Unis)⁴. Il semble douteux, dans ces conditions, que la biomasse puisse remplacer les

⁴ C'est l'occasion de remarquer qu'à une époque où la source première d'énergie était l'esclavage humain, chaque esclave fournissait environ 200 W de puissance crête, 100 W en moyenne journalière. Chaque Européen moyen actuel consomme donc la puissance que fourniraient 50 esclaves (chaque Américain du Nord, environ 110 esclaves).

sources principales d'énergie. On voit en effet qu'il faudrait consacrer à la culture de biocarburants une surface environ 20 à 100 fois plus grande que la surface actuellement consacrée à l'alimentation pour subvenir aux besoins énergétiques de la Planète. La biomasse ne sera jamais qu'un complément énergétique. De plus, le développement d'une telle filière ne serait pas sans risque de dégagements importants de méthane provenant de la fermentation, ou d'utilisation abusive d'engrais qui présentent, comme on le sait, d'autres inconvénients pour l'environnement : on sait que l'approvisionnement en eau potable sera sans doute un problème majeur pour le siècle à venir.

Une solution d'avenir pour le stockage et les transports : les piles à combustible



Shizuo Kambayashi / AP

Figure 11.5. Un téléphone portable à micropile à combustible (Energy Related Devices) avec son réservoir de méthanol amovible, et le prototype Honda FCX-V3 équipé d'un réservoir d'hydrogène sous pression.

Les problèmes de l'énergie ne se limitent pas à la production ou à la consommation. Il faut aussi stocker l'énergie et la transporter, soit parce que les sources sont éloignées des lieux de consommation, soit parce que, bien sûr, les véhicules (automobiles, avions...) doivent généralement embarquer leur combustible. Le problème des transports a été résolu au XX^e siècle à l'aide du pétrole, à la fois source d'énergie et moyen de stockage, ainsi que du moteur à explosion, moyen relativement efficace de transformation en énergie mécanique. Il est impératif de trouver d'autres solutions pour le XXI^e siècle. Le pétrole présentait beaucoup d'avantages, même s'il ne faut pas oublier différents désastres écologiques provoqués par le naufrage de super-pétroliers. Dans un avenir sans pétrole, quel carburant nos automobiles et nos avions pourront-ils embarquer ? Les batteries électriques classiques sont lourdes. Leur capacité par unité de masse est limitée : 35 Wh par kg pour une batterie au plomb, 150 Wh/kg pour les meilleures batteries, dites « lithium-ion » qui utilisent le plus léger des métaux. Or, ces limites sont incontournables parce qu'elles sont liées à l'intensité des forces électromagnétiques dans la matière. Il ne semble donc pas possible de faire sensiblement mieux, sauf en utilisant l'hydrogène. L'électrolyse inverse de l'eau peut en effet consommer de l'hydrogène en produisant de l'électricité. C'est le principe des « piles à combustible ».

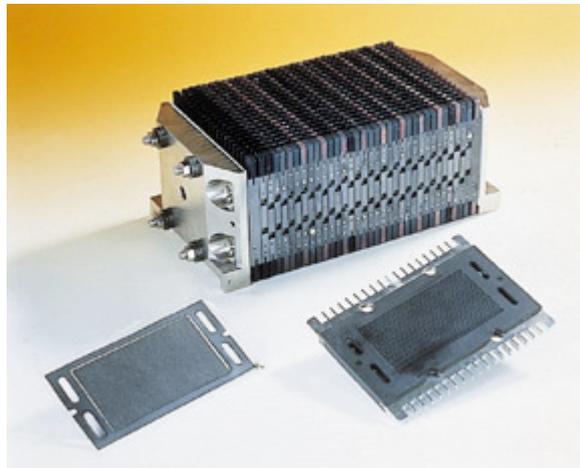


Figure 11.6. Module de pile à combustible de type PEM, de 1 kW (CEA).

Ce principe a été découvert par Grove en 1839, lorsqu'il s'est aperçu que sa cuve à électrolyse, constituée de deux électrodes de platine plongées dans l'acide sulfurique, pouvait fonctionner de manière réversible : l'hydrogène apporté à l'anode et l'oxygène de l'air capturé à la cathode se recombinaient pour former de l'eau en produisant une tension électrique de l'ordre du volt. Le véritable démarrage de ces piles date cependant de 1960, lorsque General Electric construisit pour le programme spatial Gemini une pile à polymère électrolyte solide de 1 kW. De nombreux progrès ont été réalisés depuis, en particulier grâce à la mise au point de la membrane Nafion par Dupont de Nemours. Cette membrane réalise un excellent milieu semi-perméable indispensable à ces piles, qui laisse passer les ions H^+ mais pas les électrons. Mais il reste encore d'énormes progrès à accomplir pour améliorer les rendements, la fiabilité, le refroidissement, etc.

Il existe de nombreux types de piles à combustible (voir tableau) qui se classent en deux catégories principales : les piles qui fonctionnent à basse température, typiquement entre 50 et 130 °C, et les piles haute température (650 à 1000 °C). Les piles à polymère acide PEMFC sont les plus répandues ; elles ont été choisies pour la quasi-totalité des générateurs mobiles car elles sont très compactes, capables de fournir plus de 1 kW par kg.

Type de pile	Electrolyte	T (°C)	Domaine d'utilisation
Alcaline (AFC)	Potasse (liquide)	80	Espace, transports Gamme : 1 – 100 kW
Acide polymère (PEMFC)	Polymère (solide)	60 - 120	Portable, transports, stationnaire Gamme : 10 mW – 250 kW

Acide phosphorique (PAFC)	Acide phosphorique (liquide)	200	Stationnaire Gamme : 200 kW – 10 MW
Carbonate fondu (MCFC)	Sels fondus (liquide)	650	Stationnaire Gamme : 200 kW – 10 MW
Oxyde solide (SOFC)	Céramique (solide)	700 - 1000	Stationnaire, transports Gamme : 1kW – 1MW

A échéance de quelques années seulement, on devrait donc voir les batteries classiques remplacées par des piles à combustible sur les téléphones et les ordinateurs portables. Les constructeurs automobiles ont déjà investi massivement dans la mise au point de véhicules électriques ou mixtes utilisant des piles à combustible. Le rendement d'un moteur électrique alimenté par une telle pile est nettement supérieur à celui d'un moteur diesel, surtout à faible charge. Ces piles sont en cours d'expérimentation dans les transports en commun où le problème de poids est moins crucial. En particulier, 27 bus expérimentaux équipés de piles à combustibles circulent dans 9 villes européennes depuis 2003. L'Islande entend remplacer l'ensemble de son pétrole par de l'hydrogène dès 2030. On serait donc tenté de considérer que la pile à combustible résout le problème des transports s'il ne fallait se demander aussitôt d'où vient l'hydrogène lui-même.

Actuellement, l'hydrogène est essentiellement produit par « réformage » de combustibles fossiles liquides ou gazeux. Par kWh fourni, il est cependant 2 à 20 fois plus cher que le gaz naturel selon la façon dont il est pressurisé ou même liquéfié. Tant que l'on disposera de pétrole et de gaz, le procédé dominant sera sans doute ce réformage, à condition que l'on améliore considérablement les coûts de production, en particulier celui de la nécessaire capture du CO₂ que ce réformage émet. Si l'on dispose d'électricité, on peut aussi produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Ce serait un bon moyen de stocker l'énergie produite aux heures creuses par les centrales nucléaires, les panneaux solaires ou les éoliennes. On voit néanmoins que l'hydrogène n'est pas une nouvelle source d'énergie, mais plutôt un futur moyen de stocker et de transporter l'énergie, particulièrement adapté aux transports. Parmi les autres problèmes que les scientifiques auront à résoudre, on trouve celui du stockage de l'hydrogène lui-même. On songe à l'injecter dans des puits ou dans des mines. Sous haute pression, ce n'est pas facile dans de grands volumes, mais les voitures ou les bus pourront transporter des cylindres en matériaux composites légers qui contiendront de l'hydrogène à 700 bar, de quoi leur fournir une autonomie de plusieurs centaines de kilomètres. Sous forme d'hydrures métalliques, cela pèse trop lourd et ce n'est pas très efficace (il faut aussi désorber l'hydrogène en chauffant). On peut aussi le transformer en un composé chimique riche en

hydrogène tel que le méthanol. De fait, de nombreuses piles à combustible fonctionnent déjà au méthanol. Toutefois, alimenter un pile avec du méthanol produit alors du CO₂ (et même parfois du monoxyde CO qui est toxique) et l'on se retrouve, sauf capture de ce CO₂, face aux problèmes du réchauffement de la Planète... Enfin, l'hydrogène étant un gaz inflammable, qui peut même exploser spontanément s'il est mélangé à l'air dans les proportions voulues, les scientifiques auront à démontrer que son utilisation à grande échelle est sans danger, mais cette réticence semble surtout psychologique, car l'essence elle-même est hautement inflammable et son utilisation n'est pas pour autant remise en cause. Ceci confirme qu'aucune solution technologique n'est exempte d'inconvénients mais qu'en même temps, à l'heure des choix, les décisions doivent être prises à la lumière de bilans coûts-avantages très étayés, bilans pour l'élaboration desquels la recherche scientifique de pointe doit jouer un rôle de premier plan.

La recherche en sciences des matériaux, omniprésente.

Il serait aventureux de prétendre que l'on connaît, en ce début de XXI^e siècle, la solution à l'un des problèmes majeurs de la fin du XX^e siècle, celui de l'énergie. Il est désormais démontré que si nous ne modifions pas radicalement nos sources d'énergie et nos modes de consommation d'énergie, l'activité humaine va dégrader le climat de manière irréversible. C'est un véritable défi pour les scientifiques que de trouver des solutions le plus rapidement possible puisque cette dégradation est amorcée et que toute modification de nos technologies ne fera effet qu'avec un certain temps de retard. Mais, d'une part, les solutions à trouver ne pourront pas être les mêmes dans des pays de niveaux économiques ou de conditions climatiques ou géographiques différents, d'autre part, aucune des solutions envisagées actuellement n'est exempte de difficultés à résoudre.

Il est particulièrement frappant de constater l'omniprésence des problèmes de matériaux dans les problèmes évoqués ci-dessus: tenue sous irradiation des conteneurs de déchets radioactifs, retraitement de ces déchets en particulier du plutonium, stabilité mécanique à long terme du sous-sol géologique, membranes et électrolytes solides pour piles à combustible, nouveaux matériaux semiconducteurs pour diodes électroluminescentes ou pour panneaux solaires, matériaux pour turbines haute température, etc. Par ailleurs, imaginer des procédés économes est plus que jamais à l'ordre du jour, qu'il s'agisse de transports, de procédés industriels, d'isoalation thermique, d'éclairage, etc.

Etre exhaustif sur un problème aussi vaste que l'avenir énergétique de la planète étant pratiquement impossible, nous n'avons pas pu considérer ici les recherches en cours sur les lits de charbon fluidifiés, les puits de carbone, les pompes à chaleur, etc. Une chose est cependant certaine : les

physiciens ont matière à réfléchir, inventer, optimiser, en liaison avec les chimistes, les géologues, les mécaniciens et bien sûr tous les ingénieurs concernés par ces technologies en constante évolution. Sans leur concours, la société ne trouvera pas de bonne solution au problème majeur qu'elle vient de découvrir.

Pour en savoir plus

- le site de la société française de physique (http://sfp.in2p3.fr/Debat/debat_energie)
- le site de Jean Marc Jancovici, président du Comité consultatif du débat national sur l'énergie : <http://www.manicore.com/documentation/equivalences.html>
- le rapport récent de l'Académie des sciences « L'énergie nucléaire civile dans le cadre temporel des changements climatiques », Robert Dautray, éditions Tec et Doc, Paris décembre 2001.

Encadré : Chiffres et ordres de grandeur

- Joule (abréviation J) : unité internationale d'énergie. L'énergie existe sous différentes formes convertibles entre elles avec des rendements variables : chaleur, travail, énergie potentielle ou cinétique, électrique, chimique, nucléaire, etc. Sur Terre, pour soulever d'un mètre une masse d'1 kg, il faut fournir un travail de 9,8 J.
- Watt (abréviation W) : unité internationale de puissance. L'activité interne du corps humain dégage une chaleur d'environ 100 W, c'est-à-dire 100 Joules par seconde. Un athlète de haut niveau peut fournir 400 W pendant quelques heures. Au niveau du sol en Europe, on reçoit en moyenne du Soleil entre 100 et 200 W par mètre carré. Compte tenu de leur rendement, il faudrait environ 300 m² de panneaux solaires à chaque Européen pour assurer en moyenne ses besoins en énergie.
- kilowatt (abréviation kW) : $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W} = 10^3 \text{ W}$. En moyenne, un Européen consomme actuellement 5 kW contre 11 kW pour un Nord-Américain, 1 kW pour un chinois, beaucoup moins dans beaucoup d'autres pays.
- Kilowatt-heure (abréviation kWh). Unité courante d'énergie. Une puissance d'un kW consommée pendant une heure, c'est une consommation d'énergie d'un kWh, de sorte que le kWh vaut $3.6 \cdot 10^6 \text{ J}$. Actuellement en France, le kWh revient à environ 6 centimes d'euro s'il est produit à partir de combustibles fossiles, 4 centimes d'euro s'il provient d'une centrale nucléaire, 13 centimes d'euro pour le solaire.
- Mégawatt (abréviation MW) : $1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$. C'est la puissance maximale que peut fournir une éolienne de 50 m de diamètre en période de vent fort. Même un rideau compact de 100 000 éoliennes réparties sur 5000 km de côtes ne pourrait pas fournir plus de 100 GW, c'est-à-dire la moitié des besoins en énergie de la France.
- Gigawatt (abréviation GW) : $1 \text{ GW} = 10^9 \text{ W}$. C'est la puissance typique d'une grande centrale thermique ou d'un réacteur nucléaire. Les 59 réacteurs français fournissent environ 63 GW électriques, 39 % des besoins énergétiques de la France, et 80 % de ses besoins en électricité.
- tep (tonne d'équivalent pétrole). Quantité de combustible nécessaire pour fournir la même énergie que la combustion d'une tonne de pétrole. En principe, $1 \text{ tep} = 42 \text{ GJ} = 11\,620 \text{ kWh}$. C'est sa définition officielle et, en 1990, la consommation mondiale d'énergie était de 8,8 Gtep par an. Mais ces 42 GJ correspondent à l'énergie thermique fournie en brûlant une

tonne de pétrole. S'il s'agissait de produire des kWh électriques, il faudrait brûler davantage de pétrole puisque le rendement moyen d'une centrale thermique n'est pas parfait. Certains utilisent donc parfois une autre équivalence : 1 tep = 4500 kWh électrique.

- Becquerel (abréviation Bq) : 1 Bq est la radioactivité correspondant à une désintégration par seconde. C'est une unité très faible, adaptée à la mesure de la radioactivité naturelle. Par exemple, le corps humain a une radioactivité d'environ 100 Bq par kg, soit 8000 Bq pour un individu de 80 kg. Les deux tiers de cette radioactivité sont dus au potassium 40 qui se trouve dans les os, le reste au carbone 14. Un litre de lait a une radioactivité de 80 Bq, 1 kg de café 1000 Bq, 1 kg d'engrais phosphaté 5000 Bq, 1 kg de granit 8000 Bq, un détecteur d'incendie 30 000 Bq et 1 kg de minerai d'uranium 25 millions de Bq.
- Curie (abréviation Ci) : ancienne unité qui est beaucoup plus grande que le becquerel (1 Ci = $3.7 \cdot 10^{10}$ Bq). 1 Ci est la radioactivité d'un gramme de radium 226, dont la durée de vie est de 1600 ans (cela signifie qu'en 1600 ans, la radioactivité du radium décroît de moitié). En radiothérapie dans les hôpitaux, on utilise des sources au cobalt 60 dont la radioactivité vaut 4000 Ci. Il y en a 15 en France.
- Gray (abréviation Gy). Unité de dose radioactive absorbée égale à 1 J/kg.
- Sievert (abréviation Sv). Dose d'irradiation absorbée par les tissus vivants. C'est un Gray pondéré selon la nature de la radiation car les effets biologiques en dépendent. La radioactivité naturelle est très variable en France selon les régions, plus importante dans les régions granitiques, telles que le Massif Central ou la Bretagne, qu'ailleurs. Tout compris (radioactivité du sol, rayons cosmiques (soleil, étoiles, galaxies), respiration de radon, radioactivité interne du corps humain et ingestion d'aliments), la dose moyenne de radioactivité naturelle que l'on reçoit par an est d'environ 0.001 Sv = 1 mSv. C'est la limite légale admise pour le public. Une radio des poumons ou des dents représente environ 0.1 mSv. Un séjour d'un mois à 2000 m d'altitude représente 0.05 mSv et un vol de 5h en avion 0.007 mSv. A des niveaux d'irradiation aussi faibles, aucune augmentation de la probabilité de cancer n'est détectable. C'est seulement à partir de 50 mSv par an que l'on peut détecter une augmentation de la probabilité de cancer. Une dose de 1000 mSv reçue en une fois (en quelques heures) provoque des nausées passagères et une baisse temporaire du nombre de globules blancs. Une irradiation cumulée de 10 000 Sv = 10 Sv en quelques heures est une dose entraînant la mort en quelques semaines. Il faut enfin retenir que l'effet des radiations est un phénomène à seuil qui n'est pas linéaire, c'est-à-dire pas proportionnel

à la dose reçue. Une irradiation faible est apparemment inoffensive, en raison des mécanismes de réparation spontanée de l'ADN dans nos cellules. Par exemple, au Kerala, la radioactivité naturelle atteint 20 mSv/an, 20 fois plus que la moyenne ailleurs, sans provoquer une mortalité supérieure. La radioactivité rejetée par l'usine de retraitement de la Hague représente 0.01 mSv/an. Des expériences sur l'animal n'ont pas montré d'incidence du rayonnement jusqu'à 200 mSv/an.