



Christian Ngô

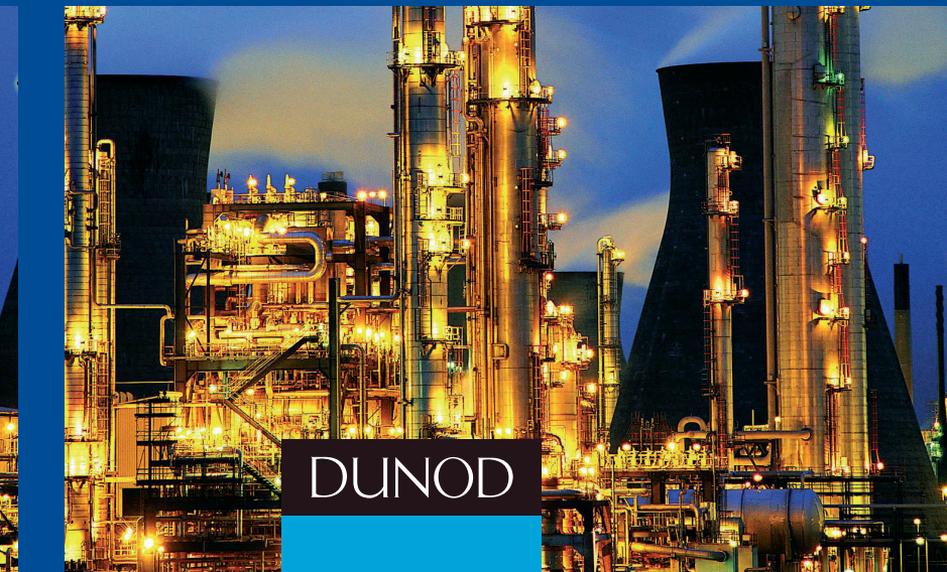
# L'énergie

Ressources,  
technologies  
et environnement

3<sup>e</sup> édition

Préface de Bernard Bigot

UniverSciences



DUNOD

# Table des matières

AVANT-PROPOS	XI
CHAPITRE 1 • NOTIONS DE BASE	1
1.1 Qu'est-ce que l'énergie ?	2
1.1.1 Unités	4
1.1.2 Équivalences	5
1.2 Énergie et développement	6
1.3 Le soleil	9
1.4 Consommation énergétique	12
1.5 L'effet de serre	15
1.6 Conclusion	17
CHAPITRE 2 • LES ÉNERGIES FOSSILES	19
2.1 Le Charbon	20
2.2 Le Pétrole	23
2.3 Le Gaz	26
2.4 L'Effet de serre	28
2.5 Les Réserves de combustibles fossiles	29
2.5.1 Réserves de pétrole	29
2.5.2 Réserves de gaz	33
2.5.3 Réserves de charbon	35
2.6 Conclusion	37

---

<b>CHAPITRE 3 • LES ÉNERGIES RENOUVELABLES</b>	<b>39</b>
3.1 L'énergie hydraulique	41
3.2 L'énergie solaire	45
3.2.1 Le solaire thermique	46
3.2.2 Le solaire photovoltaïque	48
3.3 L'énergie éolienne	52
3.4 La biomasse	57
3.5 L'énergie géothermale	61
3.6 L'énergie des déchets	64
3.7 Conclusion	66
<b>CHAPITRE 4 • L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE</b>	<b>71</b>
4.1 Atomes et noyaux	72
4.2 La Radioactivité	73
4.3 Masse et énergie	76
4.4 La fission	78
4.5 Les Réactions en chaîne	79
4.6 Les Réacteurs nucléaires	80
4.7 Les Réacteurs naturels	82
4.8 Les réacteurs électrogènes	83
4.9 Le combustible	86
4.10 Production d'électricité	88
4.11 Les réacteurs à neutrons rapides	90
4.12 Les déchets	92
4.13 Que faire des déchets ?	94
4.14 Les réserves d'uranium	97
4.15 Conclusion	99
<b>CHAPITRE 5 • UTILISATION ET STOCKAGE</b>	<b>101</b>
5.1 L'électricité	101
5.1.1 Évolution de la consommation	102
5.1.2 Production	102
5.1.3 Courant alternatif ou continu ?	103
5.1.4 Production centralisée ou décentralisée ?	103
5.1.5 Transport	104
5.2 La chaleur	105
5.3 Cogénération et trigénération	106
5.4 Les transports	107
5.5 Le stockage de l'énergie	108
5.5.1 Hydraulique	108
5.5.2 Batteries	108
5.5.3 Supercondensateurs	109

5.5.4	Volants d'inertie	110
5.5.5	Air comprimé	110
5.5.6	Stockage de la chaleur	111
5.6	L'hydrogène	112
5.6.1	Production	113
5.6.2	Transport	114
5.6.3	Stockage	115
5.6.4	Utilisations	115
5.6.5	Les dangers	116
5.7	Les piles à combustible	117
5.8	Conclusion	120

## CHAPITRE 6 • ÉNERGIE ET ENVIRONNEMENT 123

6.1	L'Effet de serre	124
6.1.1	Un climat toujours en évolution	124
6.1.2	L'environnement	125
6.1.3	L'effet de serre	127
6.2	Les Combustibles fossiles	130
6.3	Les transports	131
6.4	Les énergies renouvelables	133
6.5	L'énergie nucléaire	135
6.5.1	Unités de radioactivité	135
6.5.2	Radioactivité naturelle et artificielle	136
6.5.3	Incidents et accidents	138
6.6	La radioactivité et le vivant	140
6.7	Conclusion	142

## CHAPITRE 7 • PERSPECTIVES 145

7.1	Les combustibles fossiles	146
7.2	Les Énergies renouvelables	147
7.3	Le nucléaire du futur	149
7.4	L'habitat	152
7.5	Les transports	153
7.6	La fusion thermonucléaire	156
7.7	Le stockage de l'énergie	160
7.8	Les négawattheures	162
7.9	Conclusion	164

## BIBLIOGRAPHIE 145

## INDEX 151

# Unités de mesure de l'énergie et facteurs de conversion

Unités	
1 calorie	4,186 joules
1 kWh	$3,6 \times 10^6$ joules
1 thermie	$4,186 \times 10^6$ joules
1 Btu ( <i>British thermal unit</i> )	$1,055 \times 10^3$ joules
1 quad	$10^{15}$ Btu
1 baril de pétrole	159 litres
1 U.S. gallon	3,785 litres
Facteurs de conversion [1]	
1 tep (PCI)	$42 \times 10^9$ joules
1 tec (PCI)	$29,3 \times 10^9$ joules
1 000 m <sup>3</sup> gaz naturel (PCI)	$36 \times 10^9$ joules
1 tonne gaz naturel liquide	$46 \times 10^9$ joules
1 000 kWh (primaire)	0,0857 tep (hydraulique)
1 000 kWh (primaire)	0,26 tep (nucléaire)
1 tonne uranium naturel (REP)	$4,2 \times 10^{14}$ joules

# Préface

L'énergie est, au même titre que l'eau et la nourriture, une ressource indispensable à la vie. Son abondance relative a contribué de façon décisive au développement économique et technique au cours des âges. Celui-ci s'est accéléré dans des proportions exceptionnelles au cours du  $xx^e$  siècle, en premier lieu grâce à la découverte de sources d'énergies concentrées et aisément récupérables. L'apparition de l'électricité au  $xix^e$  siècle, et plus encore son développement au  $xx^e$ , a révolutionné l'usage de l'énergie dans de nombreux domaines : habitat et vie domestique, circulation et traitement de l'information, transports... Cependant, malgré les progrès considérables accomplis, les besoins élémentaires en énergie d'une part encore trop importante de l'humanité ne sont pas satisfaits.

Cette période d'énergie facile et peu coûteuse pour nos pays développés pourrait avoir une fin prochaine si nous ne savons pas nous projeter dans l'avenir et préparer la nouvelle génération de ressources énergétiques. En effet, alors que quelque 80 % de la production d'énergie primaire mondiale repose sur la combustion massive des combustibles fossiles, nous savons désormais qu'au rythme où nous les consommons, sauf changement radical de nos comportements, nous allons bouleverser le fonctionnement de la planète à une vitesse et dans des proportions qu'elle n'avait jamais connu sous le jeu des phénomènes-

nes naturels. Et nous rapprocher dangereusement du moment de l'épuisement de ces ressources. Il nous faut réagir sans délai.

On focalise souvent l'attention du public sur des sources d'énergie qui ont un potentiel marginal de contribution au bilan énergétique, et qui plus est sans respecter suffisamment l'environnement, alors qu'on parle moins de celles qui peuvent dominer ce bilan et offrir des perspectives à long terme. En fait, le problème est complexe et aucun mode de production d'énergie ne peut répondre seul à tous les besoins. Les solutions dépendent de nombreux paramètres dont l'importance relative évolue au cours du temps.

Sachant ces enjeux, c'est pour moi un plaisir que de préfacer ce livre, car il représente une excellente introduction aux questions que l'on se pose naturellement sur l'énergie. Il donne les bases nécessaires pour comprendre ce sujet complexe sans privilégier une source plutôt qu'une autre. Cet ouvrage fournit de nombreux ordres de grandeur utiles et pertinents pour l'analyse des problèmes énergétiques. Il offre de manière simple, claire et fiable les éléments nécessaires pour que le lecteur se forge une opinion en fonction de ses propres critères et valeurs.

Après avoir présenté le contexte énergétique et les principales sources d'énergies (fossiles, renouvelables et nucléaire), ce livre décrit quelques utilisations de l'énergie et insiste sur son stockage qui est le point le plus difficile à résoudre. Le problème de l'impact de l'utilisation de l'énergie sur l'environnement et la santé est ensuite développé avant de conclure sur quelques perspectives. Cet ouvrage montre de manière précise que chaque source énergétique a ses avantages et ses inconvénients, et qu'il n'existe pas d'énergie parfaite permettant de satisfaire à tous nos besoins, à bas coût et sans impact sur l'environnement et la santé.

Il faut se garder de tout dogmatisme et essayer d'aborder les problèmes de la façon la plus objective possible. Cet ouvrage va dans ce sens et j'espère qu'il sera utile à tous ceux intéressés par ce domaine complexe, mais passionnant.

Bernard Bigot

Haut commissaire à l'énergie atomique

*À Benjamin, Laurence et Hélène*

## **Avant-propos**

L'énergie est présente partout. Elle apparaît dès qu'il y a une interaction entre des systèmes qu'ils soient vivants ou inertes. C'est le cas de la puce qui dépense de l'ordre de  $10^{-7}$  J pour sauter, de l'homme qui a besoin d'environ  $10^7$  J de nourriture par jour, de la chaleur qu'il lui faut pour se chauffer quand il a froid, de l'énergie mécanique pour décupler sa force physique. C'est aussi le cas des phénomènes naturels qui peuvent mettre en jeu des quantités considérables d'énergie comme un cyclone dans les Caraïbes ( $3,8 \times 10^{18}$  J) [1]. Quel que soit le phénomène, des échanges d'énergie sont nécessaires dans tout comportement dynamique.

Pendant très longtemps l'homme s'est contenté de sa force physique, de celle des animaux, de l'énergie que l'on peut tirer du bois, du vent ou de l'eau. Les quantités mises en jeu étaient très faibles et ses conditions de vie ont évolué lentement. L'utilisation massive du charbon a permis un accroissement considérable de son niveau de vie. Le pétrole, le gaz et l'énergie nucléaire ont ensuite amplifié ce phénomène. On a ainsi constaté que l'énergie joue un rôle essentiel dans le développement économique. L'élément le plus spectaculaire du progrès étant sans doute l'augmentation d'un facteur supérieur à deux de l'espérance de vie en 200 ans.

Ce livre est une initiation à l'énergie. Son objectif est de faire un rapide survol de l'ensemble du domaine. En effet, le sujet est complexe,

multidisciplinaire, et plusieurs aspects doivent être pris en compte : scientifiques, économiques, politiques, fiscaux, environnementaux, etc. L'irrationnel s'ajoute aussi au rationnel rendant le problème encore plus complexe.

Les combustibles fossiles, les énergies renouvelables et le nucléaire sont présentés après une introduction du contexte énergétique. Quelques utilisations de l'énergie et son stockage sont ensuite décrits avant d'aborder son impact sur l'environnement car il n'y a pas d'activité humaine sans nuisance. Quelques perspectives sont enfin présentées dans le dernier chapitre.

Dès que l'on a de gros besoins en énergie, ce qui est le cas pour une grande partie de la planète même si tout le monde ne peut les satisfaire, on s'aperçoit vite qu'il n'y a pas de bonne ou de mauvaise énergie. Il n'y a que des compromis et de multiples solutions sont possibles pour chaque situation. Loin d'en écarter certaines, il faut au contraire essayer de trouver le panachage qui permet de mieux répondre aux contraintes du problème posé qui est spécifique à chaque pays.

Trois acteurs jouent un rôle important en matière de consommation d'énergie : la technologie qui permet de réduire la consommation à service égal ou meilleur ; les pouvoirs publics qui, avec des réglementations, des normes, des taxes... orientent le choix du consommateur vers telle ou telle source d'énergie ou manière de la consommer ; enfin le consommateur qui, en bout de chaîne, a un rôle crucial à jouer car c'est lui qui choisit un appareil gros consommateur d'énergie plutôt qu'un autre plus économe, par exemple. Il est donc important qu'il ait tous les éléments pour le guider dans ses choix et protéger notre planète, tout en assurant son développement économique.

J'ai pris beaucoup de plaisir à écrire ce livre car l'énergie est un sujet passionnant, présent dans la vie de tous les jours. J'espère que le lecteur en sera aussi convaincu et que cet ouvrage lui permettra d'élaborer sa propre opinion sur les différentes sources d'énergie et leur utilisation.

### *Remerciements*

L'énergie est un sujet vaste et complexe dont on ne peut acquérir une vue d'ensemble qu'après de multiples interactions avec des gens d'expérience. J'ai eu l'occasion d'en rencontrer beaucoup, de multiples origines, et je souhaiterais tous les remercier pour les discussions fructueuses et enrichissantes qu'ils ont eu la gentillesse de m'accorder. Ces experts appartiennent aux grands organismes de recherche (CEA,

CNRS, IFP, BRGM...) à l'industrie (EDF, GDF, AREVA...), à l'ADEME, aux pouvoirs publics, etc. Certains sont retraités et sont des mines de connaissances. Je remercie le club Ecrin-énergie qui est un lieu de rencontre entre les laboratoires et les industriels où l'on apprend toujours beaucoup de choses sur le sujet. Enfin, c'est surtout grâce au CEA que j'ai pu m'investir dans les questions énergétiques ; je souhaiterais remercier cet organisme d'excellence qui a des activités allant de la recherche la plus fondamentale à la recherche appliquée la plus avancée.

Christian Ngô

## Chapitre 1

# Notions de base

Sans énergie, pas de vie, pas d'activité économique. L'énergie nous est, comme l'eau et la nourriture, indispensable. Elle a joué un rôle fondamental dans l'évolution des civilisations. Elle a été source de guerres entre les peuples qui ont cherché, tout au long de l'histoire, à contrôler l'accès aux ressources énergétiques. Au XX<sup>e</sup> siècle, l'accès facile à des sources d'énergie abondantes, peu chères et concentrées a permis d'accélérer notablement le développement de l'humanité. L'apparition de l'électricité, vecteur énergétique très commode, a révolutionné l'usage de l'énergie et une maison moderne peut difficilement se concevoir sans électricité. Toutefois, malgré tous ces progrès, une partie encore trop importante de l'humanité ne peut malheureusement pas satisfaire tous ses besoins énergétiques. Depuis les âges les plus reculés, les besoins de l'être humain en matière d'énergie ont toujours augmenté. On est dans le règne du « toujours plus ! » même si on sent qu'on atteint aujourd'hui les limites d'une telle croissance. Il va nous falloir résoudre la difficile équation de « comment progresser sans consommer plus ».

Si tout le monde a une idée de ce qu'est l'énergie, on s'aperçoit, en y regardant de plus près que c'est une notion qu'il n'est pas aussi simple de définir. Ce concept a de multiples facettes et celle qui nous intéresse ici en est un aspect particulier que nous allons maintenant préciser.

## 1.1 QU'EST-CE QUE L'ÉNERGIE ?

Les scientifiques ont constaté que les processus élémentaires (phénomènes physiques, réactions chimiques, processus biologiques, etc.) qui gouvernent notre monde macroscopique (objets et êtres vivants) sont régis par une loi dans laquelle une quantité, que l'on appelle *énergie*, est conservée pour un système isolé. Cette loi à une origine profonde puisqu'elle est associée à l'*uniformité du temps*. En termes simples, cette propriété traduit le fait que les résultats d'une expérience ne dépendent pas de la date à laquelle elle a été réalisée pour autant que celle-ci soit faite exactement dans les mêmes conditions<sup>1</sup>.

Si l'énergie est une quantité physique parfaitement définie pour le physicien, sa définition est beaucoup moins claire si l'on consulte un dictionnaire. Pour ce qui nous intéresse ici, disons, de manière pragmatique, qu'un système ou qu'un corps possède de l'énergie s'il peut fournir du *travail* ou de la *chaleur*.

Selon cette définition, l'essence contient de l'énergie puisque nous pouvons l'utiliser pour propulser un véhicule. Cette même essence, en brûlant, peut fournir de la chaleur.

Au niveau microscopique, l'énergie peut exister sous forme *organisée* ou *désorganisée*. Dans le premier cas il s'agit de *travail*, dans le second on parle de *chaleur*. La chaleur représente la forme la plus dégradée de l'énergie car elle est répartie sur tous les degrés de liberté du système que l'on considère et ceux-ci sont très nombreux<sup>2</sup>.

La particularité de l'énergie est d'exister sous différentes formes : mécanique, chimique, chaleur, nucléaire... et l'on doit donc très souvent convertir une forme d'énergie en une autre. Ceci se fait avec un certain rendement, donc des pertes. Lorsque l'on passe d'une énergie désorganisée (chaleur) à une énergie organisée comme le travail, le

---

1. L'espace est aussi homogène et isotrope ce qui conduit respectivement à deux lois de conservation : celle de l'impulsion et celle du moment cinétique. L'homogénéité (isotropie) de l'espace traduit le fait qu'une expérience donne le même résultat si l'on fait une translation (ou une rotation) du système expérimental.

2. Dans une vingtaine de gramme d'eau, soit un petit verre, le nombre de degrés de liberté des molécules d'eau est un multiple du nombre d'Avogadro ( $\mathcal{N} = 6,02 \times 10^{23}$ ). Il y a donc plus de  $10^{24}$ , i.e. plus d'un million de milliards de milliards de molécules. La chaleur contenue dans cette eau est partagée entre tous ces degrés de liberté. Chacun en possède donc très peu.

rendement est rarement très bon. C'est au cours des transformations, d'une forme à une autre, que l'homme récupère une partie qu'il exploite pour ses besoins. Ce n'est donc pas l'énergie contenue dans un corps qui est intéressante mais celle que l'on récupère lors d'une transformation.

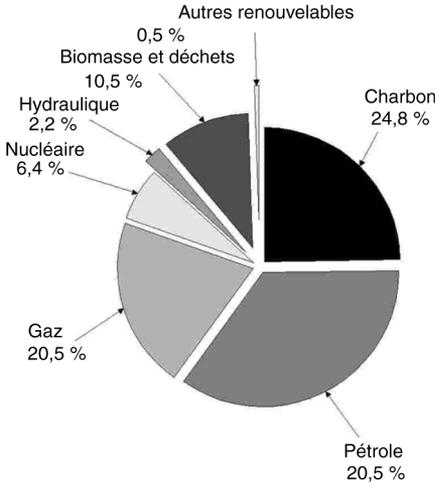
Toutes les formes d'énergie n'ont donc pas toute la même qualité pour fournir du travail. Ainsi, une source chaude à 300 °C est bien plus performante pour fournir du travail qu'une source de chaleur à la température de 50 °C.

L'usage de l'énergie permet d'améliorer le bien être de l'homme en lui permettant de se nourrir, de se chauffer, etc. On distingue les *énergies primaires* des *énergies finales*. Une *énergie primaire* n'a subi aucune conversion entre la production et la consommation<sup>3</sup>. C'est le cas du pétrole, du charbon, du gaz naturel, de l'hydraulique, du bois, de l'énergie solaire et de l'énergie éolienne. L'*énergie finale*, fournie aux consommateurs, peut être utilisée pour satisfaire des besoins énergétiques ou non énergétiques.

Cette distinction entre primaire et secondaire peut avoir des conséquences sur les évaluations et comparaisons entre différentes sources comme on peut le voir dans la figure 1.1. Ainsi l'énergie nucléaire et l'hydraulique produisent, au niveau mondial, à peu près la même quantité d'électricité. Pour l'utilisateur ces deux sources ont donc la même production. Or les statistiques indiquent que l'énergie nucléaire a une contribution trois fois plus grande que l'hydraulique (figure 1.1). La raison vient de ce que l'hydraulique est une énergie primaire et l'électricité est produite avec un rendement proche de 100 %. L'électricité produite par le nucléaire n'est par contre pas comptabilisée comme énergie primaire, celle-ci étant l'énergie libérée lors de la fission de l'uranium. Le rendement de production des centrales actuelles étant de 33 %, l'énergie nucléaire contribue donc 3 fois plus que l'hydraulique si l'on parle d'énergie primaire et au même niveau si l'on parle d'énergie utilisable par le consommateur.

---

3. Le pétrole brut est une énergie primaire alors que l'essence ou le gasoil obtenus par transformation sont des énergies secondaires. L'électricité d'origine hydroélectrique ou photovoltaïque est primaire, celle d'origine nucléaire est secondaire. Le charbon de bois (énergie secondaire) est obtenu à partir du bois (énergie primaire).



**Figure 1.1** Consommation mondiale d'énergie primaire mondiale en 2004. Les erreurs d'arrondis font que la somme n'est pas exactement égale à 100 %.

(Source : IEA, *world energy outlook 2006*.)

### 1.1.1 Unités

L'unité d'énergie dans le système international est le *joule* (J). Pour des transformations macroscopiques, elle est très petite aussi utilise-t-on le kilojoule (kJ) ou le mégajoule (MJ). On a  $1 \text{ kJ} = 1000 \text{ J}$  et  $1 \text{ MJ} = 10^6 \text{ J}$ . Le tableau 1.1 rappelle les principaux préfixes utilisés devant les unités.

**Tableau 1.1** Préfixes utilisés.

Préfixe	× par	Symbole	Préfixe	× par	Symbole
yocto	$10^{-24}$	y	yotta	$10^{24}$	Y
zepto	$10^{-21}$	z	zetta	$10^{21}$	Z
atto	$10^{-18}$	a	exa	$10^{18}$	E
femto	$10^{-15}$	f	pecta	$10^{15}$	P
pico	$10^{-12}$	p	tera	$10^{12}$	T
nano	$10^{-9}$	n	giga	$10^9$	G
micro	$10^{-6}$	$\mu$	mega	$10^6$	M
milli	$10^{-3}$	m	kilo	$10^3$	k
centi	$10^{-2}$	c	hecto	$10^2$	h
déci	$10^{-1}$	d	deca	$10^1$	da

Pour les énergies mises en jeu au niveau des atomes, des molécules ou des noyaux, qui sont les entités constituant la matière, on utilise plutôt l'*électronvolt* (eV) et ses multiples. On a  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ . Les énergies mises en jeu dans les réactions chimiques élémentaires sont de l'ordre de quelques eV, celles dans les réactions nucléaires sont supérieures au MeV, soit plus d'un million de fois plus. Ces valeurs élémentaires paraissent très petites mais il y a un grand nombre de réactions élémentaires dans les processus qui se font à notre échelle. Rappelons que 16 grammes de méthane (une mole), constituant essentiel du gaz naturel, contiennent  $\mathcal{N} = 6,02 \times 10^{23}$  molécules.

La puissance est une quantité d'énergie par unité de temps. L'unité de base est le *watt* ( $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ ). Dans le domaine de l'énergie on emploie souvent le mégawatt ( $1 \text{ MW} = 10^6 \text{ W}$ ), le gigawatt ( $1 \text{ GW} = 10^9 \text{ W}$ ) et le térawatt ( $1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$ )<sup>4</sup>.

Dans le domaine électrique on utilise aussi comme unité d'énergie le watt-heure (Wh) et ses multiples. Le watt-heure représente une énergie de 1 J/s pendant 1 heure, soit :  $1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J}$  et  $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$ . Il ne faut donc pas confondre le kWh qui est une quantité d'énergie avec le kW qui est une unité de puissance. On emploie le MWh ( $1 \text{ MWh} = 10^6 \text{ Wh}$ ), le GWh ( $1 \text{ GWh} = 10^9 \text{ Wh}$ ) et le TWh ( $1 \text{ TWh} = 10^{12} \text{ Wh}$ ).

### 1.1.2 Équivalences

Pour comparer différentes sources d'énergies, il est d'usage de les rapporter à l'énergie fournie par le pétrole brut. Pour cela on utilise une unité, la tep (tonne équivalent pétrole), dont la valeur est fixée, par convention, à  $10^{10}$  calories ( $1 \text{ calorie} = 4,18 \text{ J}$ )  $\simeq 42 \text{ GJ}$  ( $\simeq 11\,700 \text{ kWh}$ )<sup>5</sup> [3]. En fait l'équivalence  $42 \text{ GJ} \simeq 11\,700 \text{ kWh}$  cor-

4. Le *cheval vapeur* ( $1 \text{ CV} = 736 \text{ W}$ ) est une vieille unité, introduite par J.Watt, maintenant abandonnée. Elle était basée sur le travail que peut accomplir un cheval particulièrement vigoureux si bien que la puissance d'un cheval vapeur équivaut à peu près à celle de 3 chevaux normaux [2]. Un peu avant le début du 20<sup>e</sup> siècle, il fallait entretenir 16 500 chevaux pour assurer le fonctionnement des 38 lignes de tramways de Paris. (<http://fr.wikipedia.org/wiki/Cheval-vapeur>).

5. Nous conseillons au lecteur de se procurer trois petits fascicules relatifs à l'énergie : *Informations utiles*, *Mémento sur l'énergie* et *Electronuc*, édités par le CEA. Ils contiennent une mine d'informations et de données sur l'énergie. Ils sont gratuits et il suffit d'en faire la demande à l'adresse suivante : CEA/DCOM, Service éditions multimédia/documentation, BP n° 6, Bât.11, Route du Panorama, 92 265 Fontenay-aux-Roses.

respond à une conversion directe entre le joule et le kWh, donc avec un rendement de 100 %. Dans les conversions faites en pratique, on inclut la notion de rendement de la centrale ce qui conduit à 1 MWh = 0,26 tep lorsque l'électricité est produite par une centrale nucléaire (rendement 33 %), à 1 MWh = 0,86 tep pour une centrale géothermique (rendement de 10 %) et à 1 MWh = 0,086 tep pour l'électricité produite par une centrale thermique, du photovoltaïque, etc. (rendement de 100 %). C'est ce qui explique que 1 000 kWh d'électricité représentent 0,0857 tep s'ils sont produits par l'hydraulique et 0,26 tep s'ils le sont par les réacteurs nucléaires et d'où le facteur 3 dont nous avons parlé plus haut.

Lorsque l'on parle de combustion, on peut se référer au pouvoir calorifique inférieur (PCI) ou au pouvoir calorifique supérieur (PCS). Le PCS inclut la chaleur latente de la vapeur d'eau produite lors de la combustion alors que le PCI ne l'inclut pas. Comme on ne récupère habituellement pas cette chaleur latente dans les usages courants, on parle plutôt de PCI et la tep est définie selon cette convention. Le pouvoir calorifique du pétrole brut varie légèrement d'un gisement à l'autre ; il est également différent pour les produits pétroliers raffinés (1 tonne d'essence = 1,048 tep, 1 tonne GPL = 1,095 tep, 1 tonne de fioul lourd = 0,952 tep [3]).

Le charbon a un pouvoir calorifique moins élevé que le pétrole, typiquement compris entre 0,6 à 0,75 tep selon sa qualité (houille, coke, anthracite, etc.). On définit parfois, par convention, le tec (tonne équivalent charbon) dont l'équivalence est 1 tec = 0,697 tep [3]. Le gaz naturel a un pouvoir calorifique légèrement supérieur à celui du pétrole puisqu'une tonne de gaz naturel liquide vaut 1,096 tep (1000 m<sup>3</sup> valent 0,857 tep) mais 1000 m<sup>3</sup> de gaz naturel 0,857 tep.

## 1.2 ÉNERGIE ET DÉVELOPPEMENT

L'énergie a toujours été un élément majeur dans le développement de l'humanité. Sa consommation a rapidement augmenté depuis l'ère industrielle, particulièrement au cours du vingtième siècle. Toutefois, le développement énergétique a été, dans le passé, un processus lent. Celui que nous vivons actuellement est singulièrement accéléré comparé à celui qu'ont vécu nos ancêtres lors des derniers millénaires. L'histoire de l'énergie est passée par une succession de découvertes qui ont progressivement permis d'améliorer la condition humaine jusqu'à celle que nous connaissons aujourd'hui. Pendant des millénaires

L'homme s'est contenté d'une puissance de quelques centaines de watts, d'abord avec sa seule force physique puis en exploitant celle des animaux. Rappelons-en brièvement les premières étapes [4].

La première consommation énergétique de l'homme est bien sûr la nourriture. Elle lui permet de vivre et d'assurer ainsi sa descendance. Ce besoin indispensable doit être complété par d'autres formes d'énergie qui ont pris une part de plus en plus importante au cours de l'évolution de l'humanité.

Il y a 500 000 ans environ, l'homme a découvert et maîtrisé le feu. Celui-ci lui a fourni la lumière pour voir la nuit et effrayer les animaux, la chaleur pour lutter contre le froid et faire cuire ses aliments. Pour alimenter ce feu de manière plus efficace, l'homme a inventé le charbon de bois il y a environ 7 000 ans, ce qui lui a permis de développer de nouvelles techniques : poterie, métallurgie du plomb et du cuivre, fabrication du plâtre et de la chaux... Puis, il y a environ 3 000 ans, il a découvert la métallurgie du fer.

Tant que l'homme s'est nourri de chasse et de cueillette, sa seule force physique, alliée à son intelligence et son habileté, et le feu ont suffi. Mais, lorsqu'il s'est sédentarisé, de nouveaux besoins énergétiques sont apparus pour travailler la terre de manière plus efficace, pour moudre le grain... Il a trouvé ces sources d'énergie dans la force des animaux domestiques et dans celle des esclaves. Ce besoin de main d'œuvre servile explique les conquêtes de l'empire romain, par exemple. Plus tard, les énergies renouvelables ont en grande partie remplacé les esclaves.

Les transports sont l'autre volet du besoin d'énergie dont ont eu besoin nos ancêtres. Ils sont au cœur des civilisations d'aujourd'hui. Les premiers transports se sont fait à dos d'homme et d'animal. Puis, la voile, utilisant l'énergie du vent, est employée dans le transport maritime. Le charbon a permis d'utiliser les locomotives à vapeur et l'essence les voitures.

Si, pour les pays industrialisés, la demande en énergie, après avoir fortement augmentée, se stabilise et diminuera sans doute légèrement grâce à une meilleure *efficacité énergétique*<sup>6</sup>, celle des pays en voie de développement est en pleine croissance. Ces derniers aspirent en effet à atteindre le niveau économique des pays développés et ont, pour cela, besoin d'énergie.

---

6. L'efficacité énergétique est d'autant meilleure que l'on peut faire la même chose, ou plus, avec moins d'énergie.

On estime qu'il y avait 5 millions d'habitants sur la terre – 10 000 ans avant Jésus-Christ, 250 000 millions en l'an 1. Le premier milliard d'habitants a été atteint en 1820 et il a fallu seulement 105 ans pour que la population double et atteigne, en 1925, les deux milliards d'habitants. Cette progression s'est encore fortement accélérée avec 3 milliards d'habitants en 1961 et 4 milliards en 1976. Les 6 milliards d'habitants ont été atteints en l'an 2000 et nous dépassons maintenant les 6,5 milliards d'habitants. Les démographes prévoient, s'il n'y a pas de catastrophe, que la population de la terre sera de 8 milliards vers 2020-2025. Pour la fin du siècle, les incertitudes sont grandes et la population mondiale sera sans doute inférieure à ce qui avait été prévu il y a une dizaine d'années. Elle pourrait être de l'ordre de 10 milliards d'habitants<sup>7</sup>. L'augmentation de la population accroît la demande énergétique.

En 2004, la consommation mondiale d'électricité a été de 17 400 TWh pour une population de 6,4 milliards d'individus. La consommation moyenne est de 2 700 kWh/habitant/an mais ce chiffre ne reflète pas la situation réelle dans laquelle plus de 4 milliards de personnes sont au-dessous de cette valeur. La consommation électrique intérieure de la France a été, en 2004, de 477 TWh, dont 32 TWh de pertes [5], ce qui représente (pour une population française d'environ 61 millions d'habitants) une consommation moyenne de l'ordre de 7 800 kWh/habitant/an.

L'espérance de vie semble en partie corrélée à la consommation d'énergie électrique qui donne un ordre de grandeur du niveau de vie des pays. Elle chute brusquement (elle peut descendre jusqu'à 36,5 ans) lorsque l'énergie consommée est inférieure à environ 1 600 kWh/habitant/an. À la fin du siècle dernier, 3,5 milliards d'habitants disposaient de moins de 875 kWh/habitant/an dont 2,2 milliards de moins de 440 kWh/habitant/an et 1 milliard de moins de 260 kWh/habitant/an [6]. Le taux de mortalité infantile augmente aussi fortement lorsque la puissance consommée, toutes énergies confondues, est inférieure à environ 4 400 kWh/habitant/an [6].

Donnons quelques ordres de grandeur supplémentaires montrant la conséquence sur l'espérance de vie des inégalités dans l'accès à l'éner-

---

7. Une population mondiale de 8 milliards en 2020 représente une croissance moyenne de 1,4 % depuis l'an 2000. Si l'on appliquait ce taux de croissance sur 1 000 ans, par exemple, on trouverait 6,5 millions de milliards d'habitants, ce qui est, bien sûr, tout à fait irréaliste. Pour atteindre seulement 50 milliards d'habitants dans 1000 ans, il faudrait un taux de croissance de 0,2 %. Inversement, un taux de décroissance de 0,2 % aurait pour conséquence de faire passer la population mondiale de 6 milliards à 810 millions d'habitants en mille ans.

gie. 80 % de l'énergie mondiale est consommée par 20 % des habitants de la planète : ils ont une espérance de vie supérieure à 75 ans. 60 % de la population consomme 19 % de l'énergie mondiale et l'espérance de vie est supérieure à une cinquantaine d'année. Il reste 20 % de la population mondiale qui consomme 1 % de l'énergie : son espérance de vie est inférieure à 40 ans.

En 1796, avec 28 millions d'habitants, la France consommait en moyenne 0,3 tep/habitant/an. En 1996, soit 200 ans plus tard, cette consommation était de 4,15 tep/habitant/an. Elle a été multipliée par 14 par français et par 28 pour la France car la population a doublé dans l'intervalle. Ceci correspond à une croissance moyenne de 1,3 %/an et, pour la France, de 1,75 %/an. Actuellement, la croissance prévue au niveau mondial est de 2-2,5 %/an. En 200 ans, l'espérance de vie est passée de 27,5 ans pour les hommes en 1780-89 à 73,5 ans en 1994 alors qu'elle passait de 28,1 ans à 81,8 ans pour les femmes. En 2006, l'espérance de vie d'un français était de 80 ans.

L'évolution du PIB (produit intérieur brut) par habitant donne une estimation de la richesse des individus. Il a augmenté de 0,2 % par an entre 1400 et 1820, ce qui correspond, en 420 ans, à une multiplication par 2,3 de la richesse. Depuis 1950, cette augmentation est de 2,8 % par an soit une multiplication par 4 des richesses en 50 ans.

Il ne faut pas gaspiller l'énergie car si elle est bon marché aujourd'hui<sup>8</sup>, il est fort possible que ce ne soit plus le cas demain. Il faut préparer l'avenir en envisageant les différentes sources possibles tout en tenant compte des aspects économiques, politiques, de sûreté d'approvisionnement et environnementaux. Il faut en particulier évoluer vers un vrai coût de l'énergie qui inclut ce que les économistes appellent les externalités (pollutions, effet de serre, restauration des sites, etc.). Celles-ci ne sont généralement pas prises en compte sauf dans de rares cas comme l'énergie nucléaire.

### 1.3 LE SOLEIL

Le soleil est une étoile sphérique qui est source de vie car elle nous fournit la plus grande partie de l'énergie que nous utilisons. En effet, à part l'énergie géothermique et l'énergie nucléaire, toutes les énergies viennent du soleil.

---

8. Le « baril » de certaines eaux minérales vaut encore environ 140 \$ soit 2 fois plus cher qu'un baril de pétrole à 70 \$.

Le soleil a un rayon de 696 000 km et une masse de l'ordre de  $1,99 \times 10^{30}$  kg. Sa température en surface est de 5 780 K<sup>9</sup>. Selon le « modèle standard solaire », admis par l'ensemble de la communauté scientifique, elle augmente fortement lorsque l'on s'enfonce dans le soleil pour atteindre 15,6 millions de degrés au centre. Cette étoile est formée (en masse) de 71 % d'hydrogène<sup>10</sup>, 27 % d'hélium et 2 % d'éléments lourds comme le carbone, l'oxygène et le fer. La densité et la pression au centre sont respectivement de 148 000 kg/m<sup>3</sup> pour la première et  $2,29 \times 10^{16}$  Pa pour la seconde ( $2,3 \times 10^{11}$  fois la pression atmosphérique).

Le soleil s'est formé il y a 4,55 milliards d'années de la contraction gravitationnelle d'un nuage constitué d'hydrogène, d'hélium et de traces d'autres éléments chimiques [7]. Ce processus a été rapide jusqu'à ce que les atomes du nuage soient ionisés. L'énergie ne pouvait plus s'échapper de celui-ci et il s'est lentement contracté. La moitié de l'énergie gravitationnelle libérée a été convertie en radiations et l'autre moitié a servi à chauffer le nuage. La contraction a continué et le nuage s'est échauffé. Lorsque la température fut proche du million de Kelvins, les réactions de fusion thermonucléaire entre l'hydrogène et les éléments légers, deutérium, lithium, béryllium et bore, s'amorcèrent. Comme les éléments légers étaient en faible proportion, la libération d'énergie a été limitée mais a permis de former un gaz à très haute température et d'amorcer des réactions de fusion entre l'hydrogène, ou plus précisément les protons, qui étaient en grande quantité.

La majorité des réactions thermonucléaires ont lieu au centre du soleil dans un volume correspondant à celui d'une sphère dont le rayon n'est que d'environ 20 % de celui du soleil [8]. Elles lui fournissent l'énergie et conduisent à la formation de noyaux d'hélium, <sup>4</sup>He, qui est un élément particulièrement stable. Dans le soleil, l'hydrogène est consommé dans les réactions de fusion qui font intervenir, dans une première étape, l'interaction entre deux protons<sup>11</sup>. Il faut, au total,

---

9. La valeur de cette température fait qu'une grande part du rayonnement émis se trouve dans le visible. La puissance rayonnée par le soleil est d'environ  $4 \times 10^{26}$  W.

10. Soit plus de 90 % en nombre d'atomes.

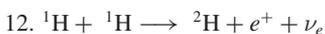
11. Lors des réactions de fusion des neutrinos ( $\nu_e$ ) et des photons ( $\gamma$ ) sont créés. La probabilité pour qu'un neutrino formé au centre du soleil sorte de celui-ci sans interaction est de  $10^{-9}$ , ce qui signifie qu'un seul neutrino sur un milliard interagit avant de sortir. Il est par contre beaucoup plus difficile à un photon de sortir du soleil par suite des interactions successives qu'il va subir. Un photon formé à l'intérieur du soleil va mettre environ 50 000 ans pour s'échapper de celui-ci.

4 protons pour conduire à un noyau d'hélium. Ces réactions de fusion se classent en trois familles. La première<sup>12</sup> se produit dans 85 % des cas et libère 26,2 MeV. La deuxième famille dans 15 % des cas libérant 25,7 MeV. Enfin, une troisième famille de réactions se produit dans seulement 0,02 % des cas et libère 19,1 MeV.

L'énergie libérée en moyenne par proton lors d'une fusion est de 15 MeV. La première réaction de chacune des familles correspond à une interaction entre deux protons. La probabilité pour que deux d'entre-eux réagissent est très faible ; parmi les  $3 \times 10^{31} \text{ m}^{-3}$  protons présents, il n'y en a que  $5 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}/\text{s}$  qui conduisent à la fusion. La puissance libérée est de  $120 \text{ W/m}^3$ , soit 10 fois moins que la puissance qu'utilise le corps humain pour se maintenir en vie ( $\simeq 1400 \text{ W/m}^3$ ) [7].

Lors de la fusion, c'est la première interaction entre deux protons qui est la plus lente et qui gouverne le processus. Il faut environ 5 milliards d'années pour qu'un proton ( $^1\text{H}$ ) fusionne avec un autre proton [7] pour produire un deuton ( $^2\text{H}$ ). Il ne faut qu'environ une seconde pour que le deuton formé lors de cette réaction réagisse avec un proton pour former un  $^3\text{He}$ . Il faudra environ 300 000 ans pour que deux  $^3\text{He}$  se rencontrent et forment un noyau d'hélium,  $^4\text{He}$ . Cette faible probabilité d'interaction a pour conséquence que la densité de puissance émise dans l'espace par le soleil est très faible :  $200 \text{ nW/g}$ , soit 7 000 fois moins que l'énergie mise en jeu par l'activité métabolique d'un être humain ( $\simeq 1,4 \text{ mW/g}$ )<sup>13</sup>.

Pour le soleil, l'hydrogène n'est pas une énergie renouvelable. Ce carburant s'épuise peu à peu et, dans environ 5 milliards d'années, le soleil deviendra une « géante rouge ». La partie centrale du cœur se contractera et s'échauffera jusqu'à ce que la température et la densité de matière soient suffisamment grandes pour que la fusion thermonucléaire de l'hélium démarre. Parallèlement, la partie externe du soleil sera en expansion pour former une « géante rouge ». La terre sera détruite au cours de cette expansion [9].



13. Le métabolisme d'un enfant, qui demande plus d'énergie que celui d'un adulte, est d'environ  $3 \text{ mW/g}$ . Pour une bactérie il peut atteindre  $100 \text{ W/g}$  [1].

## 1.4 CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE

Les différentes sources d'énergie primaire que nous pouvons utiliser sont les ressources fossiles et minérales (charbon, pétrole, gaz, uranium...) et les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, biomasse, géothermie...). Le problème de certaines sources est leur disponibilité et leur coût.

Il y a seulement 200 ans, les hommes n'utilisaient que des énergies renouvelables : bois pour le chauffage, traction animale pour les transports, chutes d'eau et vent pour l'énergie mécanique. Au cours du XIX<sup>e</sup> siècle, on utilise le charbon et l'on invente la machine à vapeur. Au XX<sup>e</sup> siècle, le pétrole, le gaz et le nucléaire sont exploités.

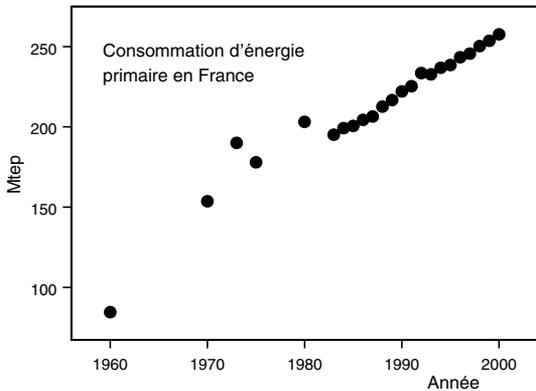
La consommation totale d'énergie (commerciale et non commerciale) dans le monde a été, en 2004, de 11,2 Gtep. Les combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz) couvraient plus de 80 % des besoins (cf. tableau 1.2). L'importance des combustibles fossiles se voit aussi visuellement sur la figure 1.1.

Au niveau de la France, la figure 1.2 montre la croissance de la consommation d'énergie primaire entre 1960 et 2000. On voit qu'elle a triplé entre 1960 et 2000 soit une croissance moyenne pour cette période de 2,82 %. En 2005, elle était de 276,3 Mtep. Il y a toutefois des pertes énormes entre l'énergie primaire et l'énergie finale utilisée par

**Tableau 1.2** Consommation d'énergie primaire commerciale dans le monde en 2004. Les erreurs d'arrondis font que la somme n'est pas exactement égale à 100.

(Source : *World energy outlook 2006*, IEA).

Énergie	Gtep	%
Pétrole	3,940	35,2
Gaz	2,302	20,5
Charbon	2,773	24,8
Nucléaire	0,714	6,4
Hydraulique	0,242	2,2
Biomasse et déchets	1,176	10,5
Autres renouvelables	0,057	0,5
<b>Total</b>	<b>11,204</b>	<b>100</b>



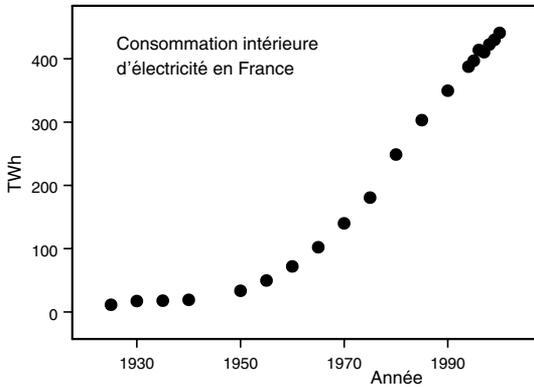
**Figure 1.2** Évolution de la consommation d'énergie primaire en France. [5]

le consommateur. Ainsi, en France en 2005, l'énergie finale était de 160,6 Mtep, soit 68 % de l'énergie primaire. La répartition de la consommation d'énergie en France, pour les différentes sources, est indiquée dans le tableau 1.3 pour l'année 2004 [11].

L'électricité est de plus en plus utilisée. La figure 1.3 montre l'évolution de la consommation électrique intérieure en France jusqu'en 2000 [5]. Elle a été multipliée par 6,125 entre 1960 et 2000, soit une croissance moyenne de 4,64 % par an. Entre 1970 et 2000, la consommation est passée de 140 TWh à 441 TWh (482 TWh en 2005). Il fallait donc, dans les années 70, prévoir de nouveaux moyens de production de l'électricité. En 1960, la grande hydraulique produisait 56 % de

**Tableau 1.3** Consommation d'énergie primaire en France pour l'année 2000. Compte tenu des arrondis, il y a un petit écart sur les totaux. Source DGEMP [11].

Source	Mtep	%
Charbon	13	4,7
Pétrole	93	33,6
Gaz naturel	40	14,6
Électricité (nucléaire + renouvelables)	117	42,5
Énergies renouvelables thermiques	13	4,6
<b>Total</b>	<b>276</b>	<b>100</b>



**Figure 1.3** Évolution de la consommation intérieure d'électricité en France [5].

l'électricité française mais les sites possibles étaient pratiquement tous utilisés. Le charbon et le pétrole ont pris la relève avant que le nucléaire ne soit choisi après le choc pétrolier de 1973. Cela a amélioré notre balance des paiements car il aurait fallu sortir des devises pour payer les importations de combustible (cela correspondrait à environ 1000 € par français et par an, pour un prix du baril égal à 80 \$, pour acheter le pétrole nécessaire pour produire l'électricité dans des centrales thermiques au fuel).

Le tableau 1.4 montre la répartition de la consommation énergétique finale corrigée du climat en 2005 pour l'énergie finale totale et l'élec-

**Tableau 1.4** Répartition de la consommation d'énergie totale finale et de l'électricité selon les différents secteurs économiques. Les erreurs d'arrondis peuvent conduire à une somme totale légèrement différente. (Source [11] et [5]).

Secteur	Énergie finale totale		Électricité	
	Mtep	%	TWh	%
Industrie	37,7	23,4	135,8	32,0
Agriculture	2,9	1,8	3,4	0,8
Résidentiel tertiaire	69,8	43,4	246,4	64,3
Transports	50,4	31,3	10,4	2,8
<b>Total</b>	<b>160,7</b>	<b>100</b>	<b>423,7</b>	<b>100</b>

tricité. L'énergie finale totale est de 160,7 Mtep qu'il faut comparer aux 276,2 Mtep d'énergie totale primaire consommée en 2005. L'électricité représente 42,5 % de l'énergie totale primaire consommée.

Au siècle prochain, le monde sera confronté à deux problèmes principaux. Le premier concerne les réserves des énergies fossiles bon marché ; le second est relatif à l'effet de serre.

## 1.5 L'EFFET DE SERRE

Sans l'effet de serre, la température moyenne de notre planète serait à  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Grâce à ce phénomène, elle est de  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Il représente<sup>14</sup> en moyenne  $150\text{ W/m}^2$ . Depuis le début de l'ère préindustrielle, l'effet de serre a augmenté de  $2,45\text{ W/m}^2$ , soit de 1 % de l'énergie rayonnée par notre planète. Ceci a eu pour conséquence d'accroître la température moyenne, entre 1850 et 1995, d'environ un demi degré. Cette augmentation est préoccupante.

La vapeur d'eau est le gaz qui a la plus grosse influence sur l'effet de serre (60 à 70 % de l'effet). Néanmoins, la quantité rejetée par l'hom-

---

14. À l'entrée de l'atmosphère terrestre, perpendiculairement à l'axe terre-soleil, la puissance reçue du soleil est actuellement en moyenne de  $1\,367\text{ Wm}^{-2}$ , quantité que l'on désigne sous le nom de *constante solaire*. L'intensité moyenne reçue sur la terre se calcule en remarquant que si la surface de la terre, qui est une sphère de rayon  $R$ , vaut  $4\pi R^2$ , le soleil ne voit qu'un disque dont la surface vaut  $\pi R^2$ . La puissance moyenne reçue sur la terre est donc égale au quart ( $\pi R^2/4\pi R^2 = 1/4$ ) de la constante solaire, soit environ  $340\text{ W/m}^2$ .

Le bilan radiatif de notre planète, en équilibre avec le soleil, se traduit par le fait que l'énergie reçue du soleil est égale à celle émise par la terre. Pour calculer cela, on utilise la loi de Stephan qui dit que l'énergie  $\varepsilon$  émise par unité de surface d'un corps porté à la température  $T$  vaut  $\varepsilon = \sigma T^4$ , soit approximativement  $\varepsilon = (\frac{T}{64,5})^4\text{ W/m}^2$ , où  $\sigma$  est une constante ( $\sigma = 5,674 \times 10^{-8}\text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ). Sur les  $340\text{ W/m}^2$  qui arrivent en moyenne du soleil, près de 30 % sont réfléchis ( $100\text{ W/m}^2$ ) vers l'espace et  $240\text{ W/m}^2$  sont absorbés par notre planète (70 %). Sur ces  $240\text{ W/m}^2$ ,  $70\text{ W/m}^2$  sont absorbés par l'atmosphère (environ 20 %) qui est réchauffée, et le reste ( $170\text{ W/m}^2$  soit 50 %) chauffe le sol continental ou océanique.

Si la température de la terre était de  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , soit  $255,16\text{ K}$ , son émission serait de  $240\text{ W/m}^2$ . Grâce à l'effet de serre, la température moyenne est de  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  ce qui conduit à une émission de  $390\text{ W/m}^2$ . Comme  $240\text{ W/m}^2$  doivent être émis dans l'espace pour respecter l'équilibre énergétique terre-soleil, cela signifie que  $150\text{ W/m}^2$  sont absorbés par l'atmosphère par l'effet de serre.

me ne fait pas varier de façon sensible sa concentration dans l'atmosphère et le cycle de l'eau est très rapide [10]. Ce n'est pas le cas d'autres gaz comme le gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ) et le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Les composés halogénés (CFC, halons<sup>15</sup>...) sont rejetés en quantité moindre et leur impact est plus faible. En revanche, leur durée de vie est plus importante. Ces composés halogénés jouent aussi un rôle important dans la destruction de la couche d'ozone qui nous protège des rayons ultraviolets nocifs. Des mesures ont été prises au niveau international pour en limiter l'usage (Convention de Vienne en 1985, puis protocole de Montréal en 1987). Malgré celles-ci, il faudra encore quelques décennies pour restaurer la couche d'ozone à son niveau des années 1970.

De manière quantitative, l'augmentation de l'effet de serre se répartit de la façon suivante :  $1,56 \text{ Wm}^{-2}$  pour le  $\text{CO}_2$ <sup>16</sup>,  $0,5 \text{ Wm}^{-2}$  pour le  $\text{CH}_4$ ,  $0,14 \text{ Wm}^{-2}$  pour le  $\text{N}_2\text{O}$  et  $0,25 \text{ Wm}^{-2}$  pour les CFC. Les combustibles fossiles rejettent tous du  $\text{CO}_2$  par combustion, puisqu'ils contiennent du carbone. Une meilleure gestion de la combustion et le choix du combustible fossile (par exemple, pour une même quantité d'énergie fournie, la combustion du gaz naturel émet environ deux fois moins de  $\text{CO}_2$  que celle du charbon) peut optimiser l'émission de gaz à effet de serre mais on ne pourra jamais la faire disparaître complètement car la combustion des composés carbonés donne toujours du gaz carbonique. Les énergies renouvelables et le nucléaire, par contre, ne contribuent pas, en fonctionnement, à accroître l'effet de serre.

L'augmentation des émissions anthropiques<sup>17</sup> de gaz à effet de serre au rythme actuel pourrait avoir de graves conséquences sur l'environnement comme le prédisent certains modèles [10]. Plusieurs scénarios ont été proposés pour évaluer la température moyenne en 2100. Ils conduisent à un réchauffement moyen compris entre  $2 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Les valeurs hautes auraient des conséquences dramatiques sur l'environnement avec notamment la montée du niveau de la mer, l'apparition de

---

15. Les CFC (chlorofluorocarbures) sont des composés carbonés dans lesquels des atomes d'hydrogène ont été remplacés par des atomes de chlore et/ou de fluor. Dans les halons, des atomes d'hydrogène ont été remplacés par des atomes de brome et/ou de fluor.

16. Depuis le début de l'ère industrielle, la concentration en  $\text{CO}_2$  a augmenté de 28 %, en passant de 280 ppm (parties par million) en volume au début de cette ère à 358 ppm en 1994 [12]. L'augmentation se fait au rythme de 1,5 ppm par an. À titre de comparaison, pendant la même période, la concentration atmosphérique de  $\text{CH}_4$  a augmenté de 145 % et celle de  $\text{N}_2\text{O}$  de 15 % [12].

17. C'est-à-dire dues à l'homme.

maladies tropicales pour certains pays qui n'en n'ont pas aujourd'hui...[10]. Le Giec<sup>18</sup> prédit ainsi, sur la base de modèles, que le niveau des mers pourrait s'élever de 15 à 95 cm en 100 ans, que 95 % des glaciers européens disparaîtraient, que le régime de précipitations pourrait être modifié (il y aurait de fortes pluies sur l'Europe), que des perturbations importantes (cyclones, ouragans, tornades...) seraient plus fréquentes, *etc.* Ces prédictions sont suffisamment inquiétantes pour que l'on recherche, au niveau mondial, un accord pour limiter l'émission des gaz à effet de serre. La conférence de Kyoto, en décembre 1997, a permis une amorce dans ce sens, bien que les experts la jugent encore bien timide.

## 1.6 CONCLUSION

Deux facteurs concourent à une demande énergétique plus forte dans l'avenir. Ce sont l'accroissement de la population mondiale et le fait que les pays en voie de développement souhaitent accroître leur niveau de vie. En prenant une croissance énergétique annuelle mondiale de 2 à 2,5 % par an, cela revient à doubler la consommation énergétique de la planète à l'horizon d'une trentaine d'année. Pour satisfaire à ces besoins supplémentaires, sans pour autant trop accroître l'effet de serre, il sera nécessaire de développer l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables, qui ne représentent pour le moment que de l'ordre de 20 % de la consommation énergétique mondiale.

Chacune des sources d'énergie a des avantages et des inconvénients, en terme de coût, de sécurité d'approvisionnement, d'impact sur l'environnement... Il n'y a pas de solution universelle et le panachage permettant d'avoir la meilleure solution énergétique est spécifique à chaque pays.

La consommation d'énergie primaire reste et restera encore, pendant de nombreuses décennies, largement dominée par les combustibles fossiles, notamment le pétrole. Ils représentent près de 90 % de l'énergie commerciale (80 % si l'on inclut l'énergie non commerciale) et rien ne peut encore les remplacer ni quantitativement ni économiquement. Entre le début et la fin du xx<sup>e</sup> siècle, la consommation d'énergie primaire mondiale est passée d'environ un Gtep à une dizaine de Gtep. C'est grâce à cela que l'humanité a pu assurer son développement économique.

---

18. Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat.