

BERNARD WIESENFELD

# L'ÉNERGIE EN 2050

Nouveaux défis et faux espoirs



Extrait de la publication





# L'énergie en 2050

Nouveaux défis et faux espoirs

Bernard Wiesenfeld



17, avenue du Hoggar  
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112  
91944 Les Ulis Cedex A, France

ISBN : 2-86883- 818-9

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1<sup>er</sup> de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2005

# Table des matières

---

<b>Introduction : Énergie et activité humaine</b> .....	9
<b>Partie I Les composantes de l'énergie</b> .....	13
<b>Chapitre 1 : Notion d'énergie</b> .....	15
1.1. Qu'est-ce que l'énergie ? .....	15
1.2. Les différentes formes d'énergie .....	16
1.2.1. Énergie libre .....	16
1.2.2. Les transformations de l'énergie libre .....	19
1.2.3. Énergie stockée .....	21
1.3. Énergie et matière .....	28
1.3.1. Structure de la matière .....	29
1.3.2. Les fermions .....	29
1.3.3. Les bosons .....	30
1.3.4. L'antimatière .....	30
1.3.5. La naissance de l'Univers .....	31
1.3.6. La théorie de Tout .....	32
1.4. La mesure de l'énergie .....	36
1.5. Les systèmes énergétiques .....	37
1.5.1. Énergies primaires .....	37
1.5.2. Énergies secondaires (ou vecteurs énergétiques) .....	39
1.5.3. Énergie finale .....	40
1.6. L'énergie électrique .....	41
1.6.1. Spécificité de l'énergie électrique .....	41
1.6.2. Modes de production de l'électricité .....	42
<b>Chapitre 2 : Les énergies non renouvelables</b> .....	45
2.1. Les énergies fossiles .....	45
2.1.1. Généralités .....	45
2.1.2. Les centrales thermiques .....	49

2.2. L'énergie nucléaire .....	54
2.2.1. Généralités .....	54
2.2.2. La centrale électro-nucléaire .....	62
2.2.3. L'origine des premières applications de l'énergie nucléaire .....	72
2.2.4. Nucléaire et environnement .....	79
<b>Chapitre 3 : Les énergies renouvelables</b> .....	<b>85</b>
3.1. L'hydraulique .....	87
3.1.1. Description des principaux composants d'une centrale de lac .....	89
3.1.2. L'aménagement du barrage chinois des Trois-Gorges sur le Yang Tsé Kiang .....	91
3.2. Le solaire .....	91
3.2.1. Soleil et énergie .....	91
3.2.2. L'électricité solaire .....	95
3.3. L'éolien .....	101
3.3.1. L'origine du vent .....	101
3.3.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne .....	104
3.3.3. La carte des vents et le potentiel éolien .....	108
3.3.4. Éolien et environnement .....	109
3.3.5. Les éoliennes dans le monde (année 2000) .....	111
3.4. La biomasse .....	112
3.4.1. Les végétaux .....	112
3.4.2. Les déchets organiques .....	114
3.4.3. En conclusion .....	117
3.5. La géothermie .....	118
3.5.1. Origine de la chaleur terrestre .....	118
3.5.2. La production d'électricité par la géothermie .....	122
<b>Chapitre 4 : L'hydrogène et la pile à combustible</b> .....	<b>129</b>
4.1. La problématique des transports routiers .....	129
4.1.1. Les carburants alternatifs .....	130
4.1.2. Les nouvelles technologies .....	132
4.2. Principe de la pile à combustible (PAC) .....	135
4.3. Principaux types de piles à combustible .....	138
4.4. Perspectives industrielles .....	139
4.4.1. Les centrales électriques .....	139
4.4.2. Les centrales à cogénération .....	139
4.4.3. Les transports .....	139
4.4.4. L'exemple islandais .....	141

4.4.5. La pile à combustible et la concurrence internationale .....	142
4.5. L'hydrogène : un vecteur énergétique d'avenir .....	142
4.5.1. Production de l'hydrogène .....	143
4.5.2. Transport et stockage de l'hydrogène .....	147
<b>Partie II Énergie et développement durable .....</b>	<b>151</b>
<b>Chapitre 5 : Développement durable             et politiques énergétiques .....</b>	<b>153</b>
5.1. Le concept de développement durable .....	153
5.1.1. Introduction au développement durable .....	153
5.1.2. Définition du concept de développement durable .....	155
5.1.3. Les indicateurs de la « durabilité » .....	157
5.1.4. Les enjeux du développement durable .....	157
5.1.5. La Charte de l'environnement .....	158
5.2. Réchauffement climatique .....	162
5.2.1. Variation du climat au cours du temps .....	163
5.2.2. Effet de serre et changement climatique .....	166
5.2.3. Aperçu des conséquences probables d'une augmentation de température de 1,4 à 5,8 °C d'ici à la fin du siècle .....	168
5.2.4. Les gaz responsables de l'effet de serre .....	169
5.3. Engagement des pays contre le réchauffement climatique .....	172
5.4. Impact sur les politiques énergétiques .....	175
5.4.1. La Maîtrise de l'énergie .....	176
5.4.2. La gestion du cycle du carbone .....	177
5.4.3. L'évolution du mix énergétique .....	178
<b>Chapitre 6 : Les besoins et les réserves en énergie             dans le monde .....</b>	<b>187</b>
6.1. Les facteurs déterminants de la demande énergétique .....	187
6.1.1. La démographie .....	191
6.1.2. La croissance économique et l'intensité énergétique .....	192
6.2. Les réserves mondiales en énergie non renouvelables .....	193
6.2.1. L'énergie fossile .....	194
6.2.2. L'énergie nucléaire .....	196
6.3. Évolution des politiques énergétiques dans le monde .....	197
6.3.1. Généralités .....	197
6.3.2. Évaluation des besoins en électricité de la France dans les 50 prochaines années .....	199

---

6.3.3. Les perspectives en Europe .....	204
6.3.4. Les perspectives aux USA .....	209
6.3.5. Les perspectives en Asie .....	211
<b>Conclusion : Énergie et choix de société</b> .....	217
<b>Annexes</b> .....	223
<b>Index</b> .....	233

# **Introduction**

## ***ÉNERGIE ET ACTIVITÉ HUMAINE***

*La civilisation technicienne est d'essence universalisatrice*

Georges Friedmann



Rien n'est infini.

Rien n'est éternel.

L'Univers est limité dans l'espace et dans le temps.

L'Homme a longtemps cru que la Terre était infinie et ses ressources illimitées.

Il découvre aujourd'hui qu'il vit dans un espace restreint et que la pénurie menace son existence.

L'Homme sait depuis toujours que le climat peut perturber son activité.

Il apprend maintenant que son activité peut provoquer un désastre climatique.

Cette prise de conscience collective remonte à 1972 lorsque le Club de Rome s'élève contre la surexploitation des ressources naturelles liée à la croissance économique et démographique, et prône la croissance zéro. Il apparaît alors clairement qu'un développement économique incontrôlé est incompatible avec la protection de la planète à long terme.

Vingt ans plus tard, la conférence de Rio légitime le concept de développement durable, qui vise à concilier progrès économique, développement social et respect de l'environnement.

\*\*\*

L'objet de cet ouvrage est de décrire les différentes énergies mises à la disposition de l'Homme par la nature et de tenter de dresser le paysage énergétique à l'horizon 2050. Ce dernier dépend des politiques énergétiques engagées dans le monde, qui définissent les besoins en ressources.

Il dépend également de l'état des réserves d'énergie primaire et des exigences en matière de développement durable (économie d'énergie, diminution des déchets, lutte contre le réchauffement climatique...).

La première partie de l'ouvrage traite des énergies et de leurs applications industrielles.

Dans le premier chapitre est définie la notion d'énergie, et sont explicitées les différentes formes d'énergies et les inter-conversions entre elles.

L'équivalence entre masse et énergie nous amène à nous intéresser de plus près à la matière. Qu'est-ce que la matière ? D'où vient-elle ? Comment s'est formé l'Univers ? Qu'y avait-il avant le Big Bang ?

Il est également évoqué les travaux des physiciens à la recherche d'une loi unique pour décrire les phénomènes fondamentaux de la nature. C'est la théorie de Tout, qui nous permettrait par le calcul de remonter le temps jusqu'au Big Bang.

Les chapitres 2 et 3 développent les énergies primaires mises à la disposition de l'homme et leurs applications industrielles, à savoir les énergies non renouvelables (hydrocarbures – gaz, pétrole), le charbon et le nucléaire (uranium, plutonium, thorium) (chap. 2) et les énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, biomasse et géothermie) (chap. 3).

Pour chaque énergie, une explication est donnée sur son origine physique : par exemple, sur la formation des gisements d'hydrocarbures, ou encore sur l'origine du vent et de la chaleur souterraine.

La part consacrée au nucléaire est importante étant donné la complexité du sujet (il est plus difficile d'expliquer le processus de production de chaleur par la fission nucléaire que par la combustion du bois ou du charbon) et le rôle majeur que cette énergie est appelée à jouer dans les 50 prochaines années.

Un chapitre entier est consacré à l'hydrogène, qui n'est pas une énergie primaire mais un vecteur énergétique, et à son utilisation comme combustible dans la pile à combustible.

En effet, l'épuisement annoncé des réserves d'hydrocarbures oblige l'Homme à réfléchir à des solutions de substitution dans les transports, et l'hydrogène peut constituer en ce sens une voie de progrès.

La deuxième partie de l'ouvrage traite des relations entre énergie et société.

Dans le chapitre 5 sont définis le développement durable, ainsi que la charte de l'environnement et ses trois grands principes : le principe de prévention, le principe de précaution et le principe pollueur-payeur.

Plusieurs paragraphes sont consacrés au réchauffement climatique, aux gaz à effet de serre et à leurs effets à moyen terme sur les climats de la planète.

Quels sont les risques que nous encourons ? Quelles sont les mesures prises par les États ? Quelles sont les conséquences du développement durable sur les politiques énergétiques ?

Le chapitre 6 définit les besoins en énergie à l'horizon 2050, donne une évaluation des réserves en énergies non renouvelables et décrit les évolutions des politiques énergétiques dans le monde jusqu'à 2050, année de transition vers l'« après-pétrole ».

Enfin, la conclusion fait le point, à la lumière des analyses faites dans l'ouvrage, sur la répartition souhaitable du mix énergétique, ainsi que sur les politiques qui doivent être menées afin de lutter efficacement contre le réchauffement climatique et, plus généralement, de respecter les préceptes du développement durable.

# **Partie I**

## ***LES COMPOSANTES DE L'ÉNERGIE***

*La société tout entière repose sur l'industrie*

Saint-Simon



# Chapitre **1**

## Notion d'énergie

---

### 1.1. Qu'est-ce que l'énergie ?

Tout dans l'univers est énergie.

Nous savons en effet depuis le début du siècle dernier qu'il existe une équivalence entre l'énergie et la masse. Cette équivalence est formalisée par la célèbre formule  $E = mc^2$  (Albert Einstein, 1905) dans laquelle E représente l'énergie, m la masse et c la vitesse de la lumière.

Ainsi, sans énergie, pas de matière et sans matière, pas d'univers.

Mais qu'est-ce vraiment que l'énergie ?

L'énergie est la grandeur qui représente la capacité d'un système à produire du mouvement. Dans la notion d'énergie, il y a donc non seulement le mouvement lui-même, mais également la capacité à en créer.

C'est un des concepts fondamentaux de la physique, dont l'une des propriétés est de se conserver, quel que soit le processus physique mis en jeu. Il ne peut donc y avoir ni création, ni disparition d'énergie, mais simplement transformation d'une

forme d'énergie en une autre, ou encore transformation de la matière, par transfert d'énergie d'un système à un autre. C'est le principe général de conservation de l'énergie ou premier principe de la thermodynamique.

Il existe deux formes d'énergie. L'une, liée à la tension, est l'énergie stockée. L'autre, appelée énergie libre, est associée au mouvement.

L'énergie mécanique, par exemple, se décompose en une énergie stockée, dite potentielle, et en une énergie libre dite cinétique : la pomme sur l'arbre contient une énergie potentielle, liée à sa hauteur, qui se transforme en énergie cinétique associée à sa vitesse lorsqu'elle tombe de l'arbre. Ainsi, dans sa chute, la pomme perd de la hauteur mais gagne en vitesse et son énergie totale reste constante.

L'énergie permet également, comme il vient d'être dit, de transformer la matière, de créer des substances nouvelles.

Ainsi, lorsqu'on traite des déchets ménagers, on fabrique de nouveaux produits propres à la consommation. On fabrique par exemple des vêtements polaires à partir de bouteilles de plastique recyclées (voir § 3.4.2).

De même, quand nous retirons le combustible utilisé d'une centrale nucléaire, nous fabriquons un nouveau combustible. On récupère ainsi le plutonium créé dans le réacteur nucléaire qui, sans retraitement, serait éliminé comme déchet.

Dans ces deux exemples, le recyclage est une économie de matière. C'est également une économie d'énergie.

## 1.2. Les différentes formes d'énergie

À l'instar de la pomme, on observe dans la nature diverses formes d'énergies qui peuvent s'inter-converter.

Parmi ces différentes formes, distinguons celles de type libre de celles de type stocké.

### 1.2.1. Énergie libre

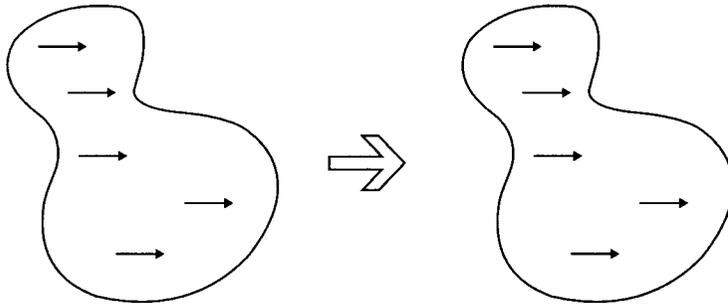
L'énergie libre peut se présenter sous quatre formes différentes :

- cinétique,
- thermique,
- électrique,
- rayonnante.

#### 1.2.1.1. Énergie cinétique

L'énergie mécanique apparaît lorsque le système observé bouge. À titre d'illustration, la figure 1.1 représente un objet solide en mouvement linéaire vers la droite.

En réalité, si l'objet est en mouvement, c'est parce que toutes les molécules qui le composent se déplacent dans la même direction, dans le même sens et à la même vitesse.



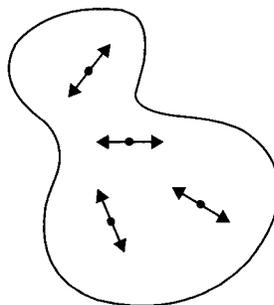
Tous les atomes se déplacent de façon ordonnée.

**Figure 1.1. Objet solide en mouvement linéaire.**

### 1.2.1.2. Énergie thermique (ou chaleur)

Supposons que l'objet observé soit un gaz enfermé dans une enceinte étanche. Chaque molécule de gaz se déplace de façon désordonnée, heurte d'autres molécules sur son passage et rebondit contre les parois de l'enceinte. Au niveau du gaz dans son ensemble, l'agitation thermique provoquée par les mouvements désordonnés des molécules, ainsi que par les vibrations des atomes à l'intérieur des molécules, définit la température du milieu. Ainsi, la chaleur est-elle une manifestation de l'énergie cinétique. À chaque collision, les molécules transmettent de l'énergie cinétique de proche en proche. C'est le phénomène de propagation de la chaleur. Plus les molécules bougent, plus l'agitation thermique du milieu est grande et plus la température ambiante est élevée. Si les molécules sont inertes, la température est thermodynamiquement nulle. On obtient alors le 0 degré absolu ou 0 Kelvin ( $-273,15$  degrés Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ )). Il n'existe pas de température qui lui soit inférieure.

Dans le cas d'un objet solide, les molécules restent en apparence fixes dans la matière mais les atomes vibrent de façon désordonnée à l'intérieur des molécules et ce, d'autant plus fortement que la température est élevée.



Tous les atomes vibrent de façon désordonnée à l'intérieur des molécules.

**Figure 1.2. Objet solide immobile à une température donnée.**

### 1.2.1.3. Énergie électrique

Cette énergie correspond au déplacement de particules chargées électriquement, appelées électrons, dans la matière.

Un atome est constitué d'un noyau autour duquel gravite un cortège d'électrons. Si certains de ces électrons peuvent s'échapper de leur atome d'origine et évoluer librement dans la matière, on est en présence d'une matière conductrice.

Ces électrons libres pourront être canalisés pour créer un courant électrique.

Si tous les électrons du cortège restent liés à l'atome d'origine, on a affaire à un isolant électrique. Aucun courant électrique ne peut alors être créé.

### 1.2.1.4. Énergie rayonnante (ou rayonnement)

Il s'agit du déplacement de particules de masse nulle, appelées photons, qui sont intimement associées à une onde électromagnétique, visible (lumière) ou invisible (infrarouge, ultraviolet, rayon X, rayon gamma...). Ce couplage entre onde et photon, généralisé aux autres particules (dualité onde-corpuscule), fut mis en évidence par Louis de Broglie, qui reçut le prix Nobel de physique en 1929 pour ses travaux sur ce nouvel axe de développement de la physique appelé mécanique ondulatoire. Ces particules de masse nulle se déplacent à la vitesse de la lumière (300 000 km/s).

Le rayonnement contiendra d'autant plus d'énergie que la fréquence de l'onde associée sera élevée. Ainsi, le rayonnement ultraviolet est plus énergétique que le rayonnement visible ou infrarouge et le rayon gamma emmagasine plus d'énergie que le rayon X.

L'onde électromagnétique se caractérise par sa fréquence ou par sa longueur d'onde  $\lambda$ , qui est liée à la fréquence  $\nu$  par l'expression :  $\lambda = c/\nu$ ,  $c$  représentant la vitesse de la lumière.

Le tableau suivant donne l'ordre de grandeur des longueurs d'onde des principaux types d'ondes de photons :

**Tableau 1.1. Longueur d'onde des principaux types d'onde.**

Longueur d'onde	Type d'onde
En-dessous de 10 pm	Rayon gamma
10 pm à 10 nm	Rayon X
0,3 $\mu\text{m}$ à 0,4 $\mu\text{m}$	Ultraviolet
0,4 $\mu\text{m}$ à 0,7 $\mu\text{m}$	Lumière visible
0,7 $\mu\text{m}$ à 2,5 $\mu\text{m}$	Infrarouge
mm à m	Micro-onde
m à km	Onde radio

p (pico) :  $10^{-12}$     n (nano) :  $10^{-9}$      $\mu$  (micro) :  $10^{-6}$   
 m (milli) :  $10^{-3}$     m (mètre)

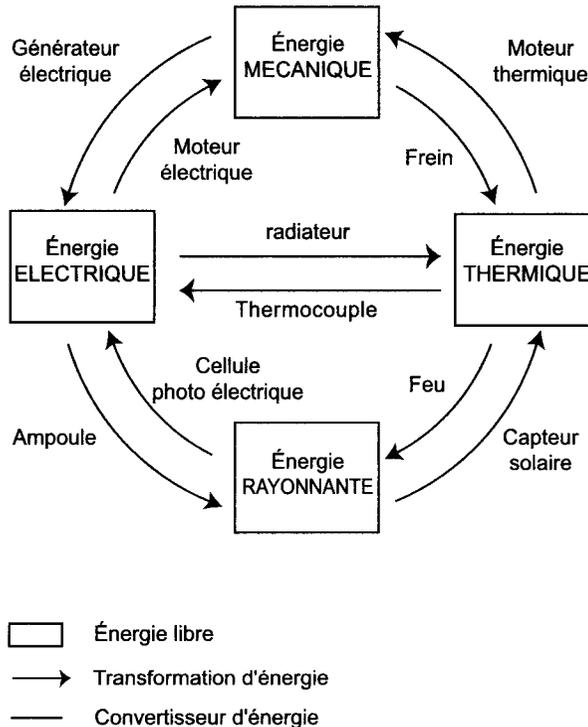
k (kilo) :  $10^3$

**Remarque :** dans le domaine de la radioactivité, on est amené à considérer des rayonnements de particules autres que le photon (appelé radioactivité gamma).

En effet, on considère la radioactivité alpha (rayonnement de noyaux d'hélium) et la radioactivité bêta (rayonnement d'électrons ou de positons).

## 1.2.2. Les transformations de l'énergie libre

Les quatre formes d'énergie libre peuvent s'inter-converter grâce à des dispositifs appropriés, appelés convertisseurs d'énergie (voir fig. 1.3).



**Figure 1.3. Transformations des énergies libres et exemples de convertisseurs d'énergie.**

**Remarque :** il n'existe pas de procédé industriel convertissant directement le rayonnement en énergie mécanique bien que le phénomène physique existe (moteur à pression de radiation ou voile solaire). Il en est de même pour la conversion réciproque.

Toutes les énergies libres n'ont pas le même niveau de qualité. Certaines sont en effet plus facilement convertibles en d'autres formes et sont ainsi considérées comme plus nobles.

Lorsqu'un objet se déplace, emmagasinant une énergie mécanique, nous avons vu que toutes les molécules se déplacent de façon ordonnée contrairement à l'énergie thermique qui impose aux atomes des mouvements désordonnés.

Le passage de l'énergie mécanique à l'énergie thermique peut se faire spontanément (sans apport d'énergie) alors que dans le sens inverse il faut disposer d'un moteur thermique qui apportera une énergie extérieure au système.

# **Conclusion**

## ***ÉNERGIE ET CHOIX DE SOCIÉTÉ***

*Ad augusta per angusta*  
(à des résultats magnifiques par des voies étroites)

Victor Hugo (Hernani, acte 4)

