



Qu'est-ce que l'énergie ?

Jacques Villain

2018- Juin

Niveau de Lecture : Difficile

Rubrique : Bases théoriques

Mots-clés : énergie

Chapeau :

Electricité, combustibles, carburants : les sources d'énergie sont connues de tous, mais l'énergie elle-même l'est moins. Pour comprendre cette réalité et ses principales conséquences sur l'approvisionnement énergétique, les explications du physicien s'imposent. Aimablement cédé par l'Encyclopédie de l'Environnement qui l'a déjà publié, l'article de Jacques Villain aidera le lecteur le plus exigeant à les découvrir.

Sommaire

1. L'énergie sous toutes ses formes	3
1.1. Rien ne se perd, tout se transforme	3
1.2. La chaleur	5
1.3. La matière, réservoir d'énergie électrique et nucléaire	5
1.4. L'énergie lumineuse	6
2. Unités et ordres de grandeur.....	7
3. Pas de vie sans énergie.....	8
3.1. L'apport des plantes	8
3.2. La conquête de l'énergie par l'homme	8
3.3. L'énergie nucléaire	10
3.4. Les énergies renouvelables.....	11
3.5. Biomasse, biogaz, biocarburants	11
4. L'énergie et l'environnement	12
4.1. Le dioxyde de carbone et l'effet de serre	14
5. Comment réduire la pollution et les émissions de CO2 ?	15
5.2. Le stockage de l'énergie	17
5.3. Quelques nouveautés technologiques	17
5.4. Economies d'énergie	18
5.5. Economistes, au boulot !	18
6. Que nous réserve l'avenir ?	18
Bibliographie Complémentaire :.....	19

L'énergie existe sous diverses formes (énergie mécanique, potentielle ou cinétique, électrique, chimique, nucléaire, et enfin chaleur), mais quel est le principe qui les unit ? D'où vient l'énergie, base de toute vie sur terre ? L'évolution des technologies permettant de la mettre au service des sociétés humaines menace-t-elle l'environnement ? Quelles pistes explorer pour parer à ce danger ? On retrouvera ci-après des réponses qui ont déjà été apportées dans **une publication de l'Encyclopédie de l'Environnement**¹.

1. L'énergie sous toutes ses formes

L'énergie prend diverses formes qui vont être successivement passées en revue : énergie potentielle, énergie cinétique, chaleur, entre autres. Mais qu'est ce qui les unit ?

1.1. Rien ne se perd, tout se transforme

Un grand principe de la Physique est qu'une certaine quantité, qui s'appelle énergie, est constante. Elle revêt diverses formes et passe de l'une à l'autre sans création ni disparition : c'est le principe de conservation de l'énergie.

Commençons par l'énergie potentielle associée à une force. L'énergie potentielle de gravité d'un objet à hauteur h au-dessus du sol est (à une constante additive près) le travail du poids P de cet objet quand il chute d'une hauteur h , soit $W_{pot} = Ph$. Le poids est proportionnel à la masse m , soit $P = mg$, où g est l'accélération de la pesanteur (ou gravité). Si l'objet est un ascenseur, il faut pour l'amener à un étage supérieur une énergie électrique au moins égale à mgh , en fait plus élevée car l'ascenseur gaspille de l'énergie (c'est-à-dire qu'il convertit aussi une partie de l'énergie électrique en chaleur). Si maintenant l'objet est une pomme juchée dans son arbre à hauteur h_0 , il peut arriver que la pomme se détache et tombe. Elle perd alors de la hauteur, mais acquiert une vitesse $v(t) = -dh/dt$ qui dépend du temps t , et par conséquent une énergie cinétique $W_{cin} = mv^2(t)/2$. Le principe de la conservation de l'énergie nous dit que l'énergie totale $mgh(t) + mv^2(t)/2$ est constante. Sa dérivée par rapport au temps est donc nulle, soit $mgv(t) = mv(t) dv(t)/dt$ et en simplifiant : $dv(t)/dt = g$. La constante g est donc bien une accélération.



Fig. 1. Représentation de Newton, une fraction de seconde avant sa découverte de la loi de l'attraction universelle.

¹ <http://www.encyclopedie-environnement.org/physique/lenergie/>

² La force entre deux charges distantes de r s'exprime comme $|qq'|/(4\pi\epsilon_0 r^2)$ (dans le vide) et l'énergie potentielle coulombienne

Au 17^{ème} siècle, dit-on, l'Anglais Isaac Newton vit une telle pomme tomber (Figure 1) alors qu'il méditait au mouvement des planètes, que l'Allemand Johann Kepler avait élucidé quelques années avant (**Lire : Une brève histoire de l'énergie**). Il eut alors une idée géniale : la chute de la pomme et l'ellipse décrite par les planètes autour du Soleil n'étaient-elles pas deux aspects d'un phénomène universel ? Le calcul confirma l'intuition de Newton, qui put affirmer que deux objets de masses m et m' à distance r s'attirent avec une force F égale à Gmm'/r^2 , où G est une constante universelle, la même si les deux objets sont le Soleil et la Terre, ou bien la Terre et la Lune, ou encore une pomme et un morceau de Terre. Ce phénomène est appelé la gravitation. A cette force F correspond une énergie potentielle $W_{pot} = -Gmm'/r$, qui est le travail mécanique de la force F quand on rapproche les deux objets, initialement à distance infinie l'un de l'autre. Autrement dit, $F = -dW_{pot}/dr$. La force de gravitation est attractive. Une règle générale est que la force tend à faire décroître l'énergie potentielle.



Fig. 2. Les Hasards heureux de l'escarpolette, du peintre Fragonard. Quand la balançoire descend, l'énergie potentielle diminue et l'énergie cinétique augmente. C'est l'inverse quand la balançoire monte.

La chute de la pomme illustre la conservation de l'énergie totale $W_{tot} = W_{pot} + W_{cin}$, appelée énergie mécanique. Un autre exemple moins éphémère est l'oscillation d'une balançoire (Figure 2), qui permet d'observer alternativement la croissance de l'énergie cinétique aux dépens de l'énergie potentielle, puis le phénomène inverse. On peut réaliser des oscillations analogues en accrochant une masse (pas trop lourde) à un ressort à boudin. Tirons un peu sur le ressort et lâchons-le : il se contracte, puis s'étire, puis se contracte, ainsi de suite. Ici encore la somme des énergies potentielle et cinétique est constante, ou du moins le serait si le ressort n'absorbait pas l'énergie (c'est à dire qu'il convertit une partie de l'énergie en chaleur). L'énergie potentielle W_{pot} est ici de nature élastique, proportionnelle au carré de l'écart δz entre la longueur de ressort et sa valeur à l'équilibre : $W_{pot} = \gamma \delta z^2$.

Ainsi l'énergie est exprimée par des formules différentes suivant les cas. Souvent on préfère exprimer la puissance fournie ou absorbée, c'est-à-dire l'énergie par unité de temps. Ainsi, si

nous branchons un appareil (notre ascenseur par exemple) sur une source de courant de tension $V = 220 \text{ V}$, et qu'il passe un courant I , la puissance dépensée est $W = VI$. Si notre ascenseur met un temps $t = 20$ secondes à monter, l'énergie qu'il faudra payer au fournisseur d'électricité sera $VI t$.

1.2. La chaleur

Mais l'énergie que nous procure ce fournisseur ne sert pas qu'à faire tourner des moteurs. Elle nous permet de nous chauffer, car on peut la transformer en chaleur. La chaleur emmagasinée par l'air est essentiellement la somme des énergies cinétiques des molécules, ($mv^2/2$ pour une molécule de vitesse v et de masse m). Comme il n'est pas question de connaître les vitesses des millions de milliards de milliards de molécules contenues dans une pièce, on préfère dire que la chaleur emmagasinée dans un corps est une fonction de sa température et de la pression, fonction qu'on peut calculer au moins approximativement.

C'est ici l'occasion de revenir aux exemples évoqués plus haut, et de se demander pourquoi le ressort cesse assez rapidement d'osciller, ainsi que la balançoire, si l'on n'entretient pas son mouvement. C'est qu'il y a des frottements et qu'ils engendrent de la chaleur, même si nous ne nous en apercevons pas. L'énergie est bien constante, mais une partie est dissipée sous forme de chaleur.

1.3. La matière, réservoir d'énergie électrique et nucléaire

Un siècle après que Newton ait découvert la loi de la gravitation, le physicien français Charles Coulomb établit une loi analogue pour l'interaction entre deux charges électriques q et q' (Figure 3). La force est ainsi proportionnelle au produit qq' et inversement proportionnelle au carré de la distance². Cependant, à la différence de la masse, la charge peut être soit positive soit négative : la force est alors attractive si les charges sont de signes opposés, mais répulsive si elles sont de même signe.



² La force entre deux charges distantes de r s'exprime comme $|qq'|/(4\pi\epsilon_0 r^2)$ (dans le vide) et l'énergie potentielle coulombienne correspondante est $W_{el}=qq'/(4\pi\epsilon_0 r)$. La constante universelle ϵ_0 est appelée perméabilité diélectrique du vide (le facteur 4π au dénominateur fut arbitrairement introduit dans cette formule par les physiciens du 20^e siècle afin de le faire disparaître dans d'autres formules).

Fig. 3. Charles Coulomb 1736-1806 – Source : <http://leradiofil.com/COULOMB.htm>, via Wikimedia Commons

Dans une pile électrique ou autre générateur, des charges électriques de signe positif se distribuent sur le pôle positif tandis que des charges électriques de signe négatif se distribuent sur le pôle opposé. Un électron ou toute autre charge q' se déplaçant dans le champ électrique ainsi produit possède une énergie potentielle qu'il pourra convertir en chaleur (dans une résistance) ou en énergie mécanique (dans un moteur). Le potentiel électrique est obtenu en divisant cette énergie potentielle par la charge q' . C'est l'équivalent du produit gh pour le champ de pesanteur. Pour une différence de potentiel V , l'énergie disponible est donc Vq' et la puissance dépensée VI , où le courant I est la charge par unité de temps parcourant le circuit entre les deux pôles.

Outre ses manifestations en électricité, cette interaction « coulombienne » est responsable de la stabilité de la matière. Les noyaux, de charge électrique positive, attirent les électrons négatifs, ce qui les amène à former des atomes qui eux-mêmes s'attirent mutuellement. En outre, quand une réaction chimique a lieu, il en résulte une réorganisation des noyaux et des électrons et une modification de l'énergie coulombienne. On parle alors d'énergie chimique. Un combustible tel que le charbon, l'essence ou l'hydrogène, est un réservoir d'énergie chimique, mais cette énergie n'est pas autre chose que de l'énergie coulombienne.

Un exercice intéressant est de comparer la force gravitationnelle $F_g = Gmm'/r^2$ et la force coulombienne $F_{el} = qq'/(4\pi\epsilon_0 r^2)$, entre un électron et un proton. Le rapport $F_g/F_{el} = 4\pi\epsilon_0 Gmm'/qq'$ est indépendant de la distance r . La constante de gravitation vaut $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2.\text{kg}^{-2}$. Les masses valent $m = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ et $m = 0,91 \times 10^{-30} \text{ kg}$. On en déduit $F_g = 10^{-47} \text{ N}$. Par ailleurs, $1/(4\pi\epsilon_0) = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$, la charge étant exprimée en coulomb (C). La charge du proton, opposée à celle de l'électron, vaut $q = -q' = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ de sorte que $F_{el} = 2,3 \times 10^{-8} \text{ N}$. Il en résulte que F_g/F_{el} est de l'ordre de 10^{-39} ; la force de gravitation est donc totalement négligeable.

A l'intérieur des noyaux atomiques, il y a aussi des interactions nucléaires, qui sont à très courte portée et par suite importantes seulement à l'intérieur de ces noyaux. Elles lient entre eux les nucléons, c'est-à-dire les protons et les neutrons. On peut ainsi libérer une énergie énorme en combinant des noyaux légers (ce qu'on fait dans une bombe H par fusion nucléaire). On obtient aussi une énergie énorme en scindant des noyaux lourds tels que l'uranium, ce qu'on fait dans une bombe A ou dans un réacteur nucléaire par fission nucléaire (**Lire : Les réacteurs nucléaires**). C'est alors la force électrique de répulsion entre protons qui prend le dessus et libère l'énergie coulombienne. Dans ces deux cas l'énergie potentielle, nucléaire ou coulombienne, est convertie en énergie cinétique des noyaux puis en chaleur.

1.4. L'énergie lumineuse

Il existe encore une autre forme d'énergie : celle que transporte la lumière et plus généralement le rayonnement électromagnétique. Elle est soumise aux lois étranges de la mécanique quantique et de la relativité. La mécanique quantique impose à l'énergie lumineuse de ne pouvoir être absorbée que par quantités finies ou photons, chaque photon ayant une énergie $h\nu$, où ν est la fréquence (liée à la couleur) et h la constante de Planck. La relativité permet de comprendre comment les photons peuvent avoir à la fois une énergie, et une masse m nulle. Si

l'énergie cinétique est $mv^2/2$, et si $m = 0$, le photon devrait avoir une énergie nulle même si sa vitesse $c = 300\,000$ km/s n'est pas nulle. La solution du mystère, trouvée par Einstein (Figure 4), est que la formule $W_{cin} = mv^2/2$ n'est qu'une approximation valable pour des vitesses v petites par rapport à celle de la lumière. La formule correcte (relativiste)³ conduit à une augmentation infinie de l'énergie lorsqu'on approche de la vitesse de la lumière, si bien qu'une particule de masse nulle comme le photon possède une énergie non nulle à la vitesse de la lumière.

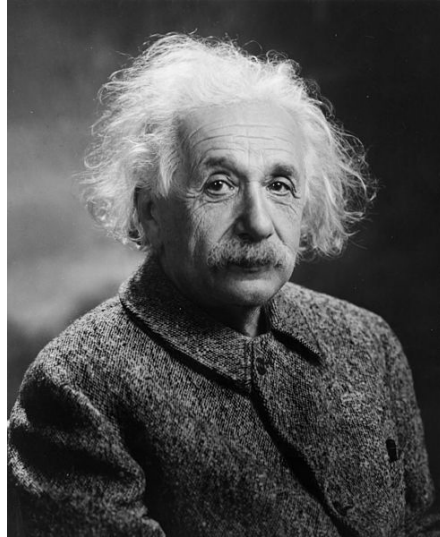


Fig. 4. Albert Einstein 1879-1955 – Source : The Library of Congress, via Wikimedia Commons

Une autre découverte d'Einstein est qu'une particule de masse m possède une énergie même au repos (si $v=0$), égale à $W=mc^2$. Cette célèbre formule d'Einstein est confirmée par la physique nucléaire : si deux noyaux légers se combinent pour en former un plus lourd avec émission d'énergie, le gros noyau est un peu plus léger que la somme des masses des deux petits noyaux, et la différence est égale à l'énergie émise. C'est le principe de la bombe H.

2. Unités et ordres de grandeur

Quelles sont les unités d'énergie ? Dans le système international c'est le joule. Il vaut un $\text{kg.m}^2/\text{s}^2$. Une autre unité importante du système international est le watt (symbole W), unité de puissance. La puissance fournie ou dépensée est l'énergie fournie ou dépensée par unité de temps. Un watt est donc égal à un joule/seconde (**Lire : Les unités d'énergie**).

Par exemple, pour faire monter un ascenseur de masse $m = 200$ kg au troisième étage à la hauteur $h = 10$ m, il faut (en supposant que l'ascenseur ne gaspille pas du tout d'énergie) une énergie $W = mgh$, avec $g = 9,81$ m/s². Cela fait à peu près 20 000 joules.

La consommation mondiale annuelle d'énergie est d'environ $0,6 \times 10^{21}$ J, ce qui représente 1/10 000 de l'énergie totale rayonnée par le Soleil sur la Terre, mais près de 1/5 de l'énergie totale de la photosynthèse, source de toute vie terrestre. Quant à l'énergie cinétique de rotation de la Terre sur elle-même, elle de l'ordre de 10^{29} J.

³ Selon la relativité, l'énergie d'une particule de masse m et de vitesse v est $W(v) = mc^2 / (1 - v^2/c^2)^{1/2}$. L'énergie cinétique est donc $W_{cin} = W(v) - mc^2 = mc^2 / (1 - v^2/c^2)^{1/2} - mc^2$. Si v/c est très inférieur à 1, elle se réduit à $W_{cin} = mv^2/2$.

Pour des raisons plus ou moins justifiables, les physiciens, les chimistes et les ingénieurs utilisent volontiers des unités diverses autres que le joule. Par exemple, les fournisseurs d'électricité font leurs comptes en kilowatt-heures, kWh. La conversion est assez simple : 1 heure = 3600 s, donc 1 kWh = 3 600 000 watt.seconde = 3 600 000 joules, et nos 20 000 joules mentionnés plus haut font donc (2/360) kWh, soit un peu plus de 0,005 kWh. Les économistes utilisent souvent la tonne équivalent pétrole (tep) : c'est la chaleur produite en moyenne par la combustion d'une tonne de pétrole, soit environ 42×10^9 joules (**Lire : Le bilan énergétique**).

Les physiciens, eux, utilisent volontiers l'électron-volt (eV) et ses multiples (KeV, MeV, GeV) ou sous-multiples (milli-eV ou meV). L'électron-volt est la variation d'énergie d'un électron qui franchit une différence de potentiel d'un volt. Le volt (V) est l'unité de potentiel électrique, et correspond donc à un joule/coulomb. La charge d'un électron étant $1,6 \times 10^{-19}$ C, il en résulte $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ coulomb-volt} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$.

Mais certains scientifiques utilisent d'autres unités encore, par exemple :

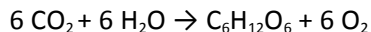
- la calorie, qui est souvent utilisée pour mesurer la chaleur. Elle vaut 4,18 J.
- le Kelvin. Il faut alors multiplier par la constante de Boltzmann pour obtenir des joules.

3. Pas de vie sans énergie

D'où vient l'énergie qui est à la base de toute vie sur terre ?

3.1. L'apport des plantes

L'apparition de la vie sur Terre est un miracle qui n'a été possible que grâce à une extraordinaire réunion de conditions favorables dans lesquelles l'énergie du Soleil a joué un rôle essentiel (**Lire : Énergie solaire : les bases théoriques pour la comprendre**). Cette énergie est d'origine nucléaire et résulte de la fusion de noyaux légers, mais elle nous arrive sous forme de rayonnement lumineux. Son rôle est d'abord de maintenir une température appropriée, mais c'est évidemment insuffisant. Un effet remarquable de la lumière solaire est la photosynthèse, grâce à laquelle les plantes ont fabriqué et fabriquent encore l'oxygène nécessaire aux animaux (**Lire : Photosynthèse et biomasse**). La suite de réactions chimiques est complexe mais peut être globalement résumée par :



Ainsi la plante fabrique à la fois de l'oxygène O_2 , et du glucose $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ qui est pour elle une réserve d'énergie. Pour elle... et aussi pour les hommes, avides d'énergie. Les plantes nous rendent un immense service : transformer l'énergie solaire, intermittente, en énergie chimique, qui se conserve et s'utilise quand on veut et là où on veut.

3.2. La conquête de l'énergie par l'homme

Mais que faire de cette énergie chimique ? L'absorber en mangeant des plantes, c'est une bonne solution, à portée de tout animal. Un seul animal a su faire mieux, c'est l'homme. Il y a des centaines de milliers d'années, il domestiqua le feu, qu'il utilisa d'abord pour améliorer son

alimentation, avant de l'utiliser pour la fabrication de céramique et la métallurgie : les vestiges métallurgiques les plus anciens qu'on ait trouvés remontent à 10 000 ans environ.



Fig. 5. Don Quichotte et les moulins, gravure de Gustave Doré

L'homme a aussi su tirer parti de l'énergie de l'eau et du vent ; les moulins à eau sont apparus peu avant l'ère chrétienne, alors que les moulins à vent chers à Cervantes (Figure 5) datent du Moyen Age. Ces machines industrielles ont probablement contribué à la régression de l'esclavage dans le monde chrétien avant sa réapparition dans les colonies. Elles rendirent d'immenses services jusqu'au 19^{ème} siècle, quand se généralisèrent les machines thermiques, déjà objets de recherche au 17^{ème} siècle et dont les premiers prototypes apparaissent au 18^{ème} siècle (**Lire : Consommation mondiale d'énergie avant l'ère industrielle**). Une machine thermique chauffe de la matière (par exemple de l'eau) et transfère de la chaleur de cette « source chaude » à une « source froide ». Au passage, on prélève une partie de cette chaleur qu'on transforme en énergie mécanique ou en électricité. Malheureusement, on ne peut transformer qu'une partie de la chaleur, d'autant plus grande que la différence de température entre source chaude et source froide est plus grande (**Lire : Thermodynamique : les lois et Thermodynamique : énergie et entropie**).



Fig. 6. L'usine Henrichshütte dans la Ruhr en 1880 - Source : Slg. LWL-Industriemuseum)
http://www.zeitreise-ruhr.de/chronik/420-politische_wirtschaftliche_entwicklung_1850-1890.html

C'est au 19^{ème} siècle que l'industrie commence à transformer certains paysages et que les cheminées d'usine commencent à polluer de façon inquiétante (Figure 6). Ce 19^{ème} siècle fut aussi celui de recherches majeures sur l'électricité, marquées par les découvertes d'Ampère, Volta, Faraday, Maxwell (**Lire : Histoire de l'électricité**). L'emploi de l'électricité dans l'industrie se généralisa dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle. L'électricité est moins polluante que les machines à charbon du 19^{ème} siècle, mais comment est produite cette électricité au 20^{ème} siècle ? Le plus souvent, par du charbon, ce qui ne fait que déplacer la source de pollution.

Mais la pollution n'est pas la seule menace qui pèse sur notre système économique actuel. Les matières premières risquent de manquer. Les réserves de pétrole et de gaz, carburants très commodes, risquent de s'épuiser avant la fin du 21^{ème} siècle, du moins les réserves faciles à exploiter, celles qui viennent des nappes souterraines. On cherche donc des réserves plus cachées, celles qui imprègnent certaines roches (**Lire : La transition énergétique : un concept à géométrie variable**). Les États-Unis se sont résolument engagés dans cette voie. La France doit-elle suivre leur exemple et exploiter son gaz de schiste ? (**Lire : Le gaz de schiste et Le pétrole de schiste : formation et extraction**). La question est controversée, car cela implique d'infliger à notre sous-sol des traitements qui peuvent compromettre sa stabilité. D'autre part, l'ampleur des ressources n'est pas connue.

3.3. L'énergie nucléaire

C'est aussi dans la seconde moitié du 20^e siècle qu'on commence à utiliser l'énergie nucléaire, la même forme d'énergie qui a contraint le Japon à capituler en 1945. Le principe d'un réacteur nucléaire et de la bombe de 1945 est à peu près le même⁴ : on utilise des noyaux lourds, par exemple l'isotope ²³⁵U de l'uranium qu'on bombarde avec des neutrons (Lire : Histoire de l'énergie nucléaire). Les neutrons provoquent la fission du noyau d'uranium en deux noyaux plus légers, avec émission de quelques neutrons (de l'ordre de 3). Si le morceau d'uranium n'est pas trop gros, les neutrons s'échappent dans l'atmosphère et il ne se passe rien. Si le bloc d'uranium dépasse une certaine masse critique, les neutrons ont de bonnes chances de provoquer une nouvelle fission, il y a une réaction en chaîne qui dégage de plus en plus de chaleur et finalement une explosion qui, d'une part, met fin à la réaction, et d'autre part provoque des dégâts plus ou moins importants. Dans une bombe atomique on fait en sorte que ces dégâts soient aussi grands que possible. Dans un réacteur nucléaire on s'efforce au contraire de contrôler la réaction en chaîne, de façon que la masse critique soit atteinte mais jamais dépassée. Ce n'est pas facile, et il y a quelquefois des accidents dont certains sont graves. Il n'y a eu que trois accidents suffisamment graves pour entraîner l'évacuation de la population (Three Miles Island aux Etats Unis en 1979, Tchernobyl en URSS en 1986, Fukushima au Japon en 2011). Mais un autre problème de l'industrie nucléaire, qui est, lui, inéluctable, est la production de déchets radioactifs (**Lire : Production et gestion des déchets radioactifs des industries électronucléaires**).

Au lieu d'utiliser la fission des noyaux lourds, on peut envisager d'utiliser la fusion des noyaux légers. C'est ce qui se fait dans une bombe H. C'est aussi ce que fait le Soleil pour nous éclairer

⁴ Voir l'article de Bertrand Barré : « Maîtriser l'énergie nucléaire »
<http://www.encyclopedie-environnement.org/physique/l-energie-nucleaire/>

et nous chauffer. On ne sait pas encore contrôler la réaction de fusion nucléaire de façon à faire de l'électricité. En effet, les noyaux légers se combinent volontiers s'ils sont très proches ; ils dégagent alors une énergie énorme ; mais il est très difficile, sur la Terre, de les rapprocher suffisamment. Le Soleil est bien plus gros que la Terre, et la gravitation impose une pression énorme qui, au centre de l'étoile, dépasse 200 milliards de fois celle de l'atmosphère terrestre. Sur Terre, la marche vers l'utilisation industrielle de la fusion est lente⁵ ; l'étape actuelle est représentée par le réacteur ITER qui sera mis en service en 2025. Grâce à ITER on espère démontrer la « faisabilité » de la production d'électricité par fusion nucléaire.

3.4. Les énergies renouvelables

Les sources d'énergie dites renouvelables utilisent pour la plupart l'énergie du Soleil, soit directement soit par le biais des mouvements atmosphériques ou hydrauliques qu'il engendre. Depuis le début du vingtième siècle, on exploite l'énergie potentielle de l'eau qui descend des montagnes : la quantité mgh par laquelle cet article commence. C'est ce qu'on appelle l'hydroélectricité. (**Lire : Hydroélectricité au fil de l'eau : du projet à l'exploitation**). Mais cette ressource ne suffit pas à nourrir l'appétit d'une humanité de plus en plus nombreuse et de plus en plus gourmande en énergie. Depuis plus longtemps encore on utilise l'énergie du vent (énergie éolienne). Au temps de Don Quichotte elle servait à moudre le blé. Aujourd'hui on préfère en tirer de l'électricité (**Lire : L'éolien en haute altitude**).

L'énergie solaire peut aussi être directement exploitée : on peut utiliser le rayonnement solaire pour chauffer de l'eau, on peut utiliser cette même chaleur pour actionner une machine thermique qui produira de l'électricité, on peut enfin utiliser les cellules photovoltaïques (**Lire : L'énergie solaire photovoltaïque (PV) : une filière compétitive en site isolé**) qui transforment l'énergie solaire en électricité.

D'autres types d'énergie renouvelable ne font pas appel au rayonnement solaire. Citons les marées et la géothermie. On envisage aussi d'exploiter la houle marine.

L'énergie solaire et l'énergie éolienne ont un inconvénient : l'intermittence. Il y a des jours sans vent, et la nuit il n'y a pas de Soleil. Nous reviendrons plus loin sur ce problème.

3.5. Biomasse, biogaz, biocarburants

Ce qu'on appelle depuis quelque temps biomasse, c'est en particulier le bois. L'homme l'utilise depuis des millénaires pour se chauffer (**Lire : Biomasse et énergie: des ressources primaires aux produits énergétiques finaux**). Cet usage n'est nullement en contradiction avec le rôle essentiel joué par les arbres dans l'équilibre écologique de la terre⁶: la séquestration du carbone avec régénération de l'oxygène (**Lire : Photosynthèse et biomasse**). Une autre fonction essentielle du sol terrestre est évidemment la production de végétaux comestibles nécessaires à l'alimentation des hommes et des autres bêtes.

⁵ Guy Laval (coordinateur) *La fusion nucléaire* (EDP Science, 2006)
<https://www.edp-open.org/images/stories/books/fulldl/rapport6.pdf>

⁶ Voir l'article de Sommeria et Joyard : « Un cycle du carbone perturbé par les activités humaines » <http://www.encyclopedie-environnement.org/vivant/cycle-du-carbone/>

Depuis quelques dizaines d'années on demande au sol terrestre de remplir une troisième fonction : produire du carburant (par exemple de l'alcool) pour faire rouler les automobiles. Les Brésiliens ont suffisamment de canne à sucre pour se le permettre.

Outre la biomasse provenant directement de la végétation, il existe une biomasse générée par les eaux usées (**Lire : Méthanisation : du traitement des eaux usées à l'injection de biométhane dans le réseau**) ou par les déchets agricoles ou par diverses autres sources (**Lire : La valorisation énergétique des déchets alimentaires**). Plus généralement on peut exploiter une énergie de récupération (**Lire : Valorisation de chaleur fatale par production d'électricité**) qui n'est pas forcément d'origine biologique.

La biomasse fournit manifestement une énergie renouvelable. Son exploitation requiert toutefois des précautions : en ce qui concerne le bois de chauffage, sa combustion selon les procédés traditionnels se fait avec un rendement médiocre et avec dégagement de particules fines et autres polluants. L'amélioration de la technique du chauffage est un sérieux problème. Quant aux biocarburants, leur rendement annuel est actuellement de l'ordre de 3 tep par hectare (le **tep** vaut à peu près 42 gigajoules comme on l'a vu). La consommation mondiale finale (c'est-à-dire celle que paie le consommateur) étant d'environ 8 milliards de tep par an, il faudrait une surface d'à peu près 30 millions de km² pour produire une telle énergie. L'aire totale du globe terrestre est d'environ 500 millions de km², dont 135 sont émergés et 15 sont cultivées (cf. par exemple statistiques de la FAO⁷). La tentation peut être forte de prélever des km² pour faire du carburant, mais on peut évidemment craindre que ce prélèvement fasse reculer les cultures alimentaires et la forêt. Le rapport du GIEC de 2014 mentionne des études qui laissent prévoir à l'horizon 2100 des augmentations de prix de l'ordre de 75% pour les denrées alimentaires⁸. Cela implique un haut risque de famines, de guerres, de migrations.

4. L'énergie et l'environnement

L'effet le plus visible des machines à produire de l'énergie fut d'abord la transformation du paysage. Une transformation souvent harmonieuse. Les moulins à vent, comme les moulins au bord des fleuves, étaient souvent fort beaux (Figure 7), et nos éoliennes actuelles ne sont pas si vilaines. On les accuse toutefois de faire fuir certains animaux et même d'être un danger mortel pour d'autres, comme les chauves-souris, mettant ainsi en danger la biodiversité et par suite, l'équilibre écologique.

⁷ <http://www.fao.org/docrep/005/y4252e/y4252e06.htm>

⁸ Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, section 11.4.4 http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg3/ipcc_wg3_ar5_full.pdf



Fig. 7. Un ancien moulin sur le Cher, en Touraine.

Depuis la fin du 19^{ème} siècle, l'industrie est responsable d'accidents et de pollution, durable ou temporaire, de l'air, de l'eau, du sol. La production et la création d'énergie ne sont pas toujours directement coupables, mais elles le sont souvent. Les accidents de centrales nucléaires sont particulièrement préoccupants à cause du nombre élevé de ces établissements dans certains pays (États-Unis, Japon ou France). Le plus grave fut celui de Tchernobyl, en Ukraine, en 1986, responsable de milliers de morts et d'une pollution radioactive massive, qui rend les environs inhabitables même trente ans après (**Lire : Retour d'expérience sur les accidents nucléaires**). Les ruptures de barrage sont au moins aussi redoutables. Celle du barrage de Malpasset (Figure 8), dans le Sud-est de la France, fit plus de 400 morts en 1959. Ce barrage n'était pas tant destiné à produire de l'énergie qu'à réguler l'alimentation en eau de la région, mais le danger menace évidemment tous les barrages, et défie toute prévention si la rupture est due à un tremblement de terre majeur.



Fig. 8. Rupture du barrage de Malpasset, en amont de Fréjus

Si de tels accidents sont exceptionnels, la pollution due à l'industrie est, quant à elle, chronique. La plus caractérisée est celle des centrales thermiques à charbon. La plus disséminée est celle due à la circulation automobile, notamment dans les grandes villes. Elle produit, entre autres du dioxyde de soufre (SO_2) qui cause la disparition des lichens. La concentration de ce gaz à Paris en l'an 2000 était près du double de celle qu'ils peuvent tolérer. Dans certaines villes anglaises et américaines sévit le smog, combinaison de brouillard (fog), de poussières et de gaz comme le dioxyde de soufre. Certaines mesures anti-pollution ont été prises, et le smog tend à reculer. Le dioxyde de soufre disparaît assez vite après avoir formé de l'acide sulfurique qui se combine

avec le premier corps organique ou minéral qu'il rencontre. Il n'en est pas de même du dioxyde de carbone (CO₂).

4.1. Le dioxyde de carbone et l'effet de serre

Le dioxyde de carbone est produit en très grande quantité dans les centrales thermiques par la combustion du charbon ou du pétrole et par les transports (par combustion de l'essence). Il est certes décomposé par les plantes, et celles-ci le font avec une efficacité considérable pendant leur vie ; mais après leur mort elles reconstituent, par fermentation, la majorité du dioxyde de carbone qu'elles avaient décomposé. Le CO₂ est également absorbé en partie par les mers, mais cela ne fait que limiter l'augmentation de la concentration dans l'atmosphère (Figure 9). Il en résulte des effets sur le climat et notamment un réchauffement de l'atmosphère et de la surface terrestre (effet de serre). Rappelons le principe de l'effet de serre : l'énergie solaire, sous forme de lumière, traverse l'atmosphère et vient chauffer la surface terrestre qui réémet un rayonnement infrarouge, lequel est absorbé par certains gaz tels que la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone. Il en résulte un échauffement de l'atmosphère, que celle-ci communique à la surface terrestre⁹.

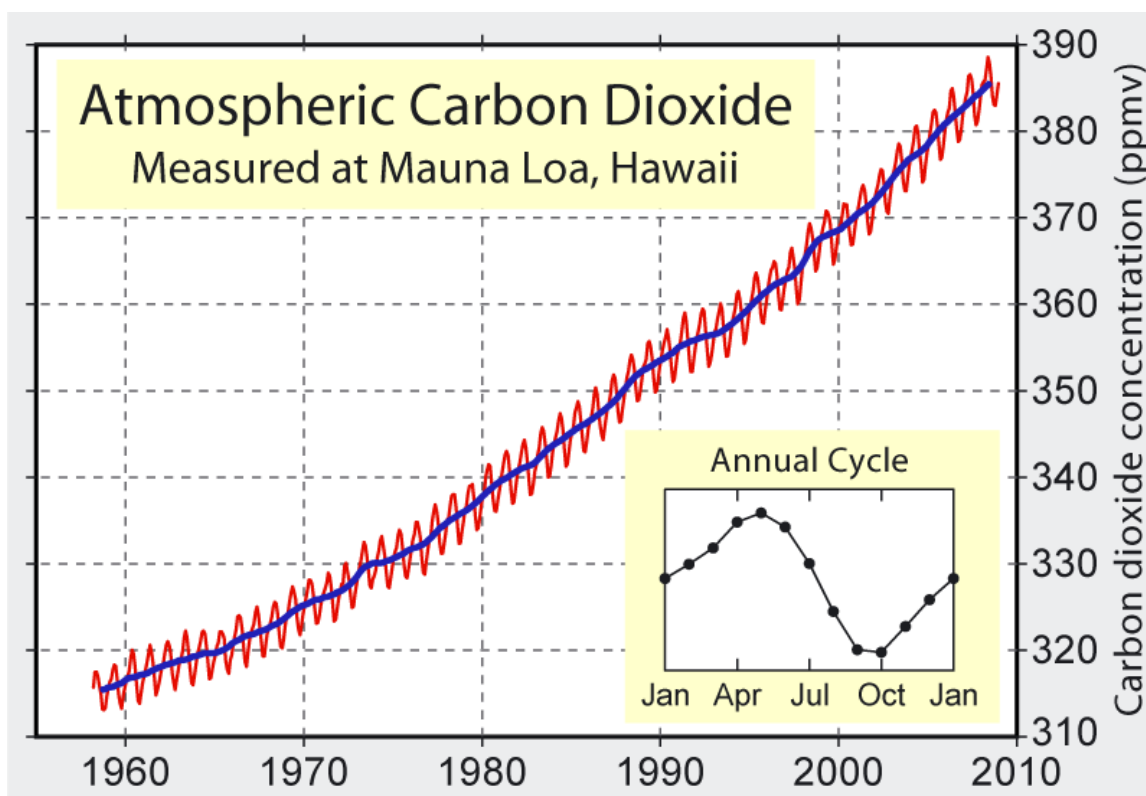


Fig. 9. Évolution sur 57 ans de la concentration de CO₂ dans l'air à l'observatoire de Mauna Loa. La Figure en encart détaille la chute saisonnière du CO₂ durant la saison de végétation (d'avril à octobre) et son élévation en automne/hiver de l'hémisphère nord (la végétation terrestre est plus importante dans l'hémisphère nord). Source : Delorme. Travail personnel. Données de Dr. Pieter Tans, NOAA/ESRL and Dr. Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography.

⁹ <http://www.encyclopedie-environnement.org/zoom/leffet-de-serre-atmospherique/>

En outre, l'accumulation de dioxyde de carbone dans les océans risque à terme de perturber la vie marine. Cette pollution des mers s'ajoute à bien d'autres, qui ne sont pas directement liées à l'énergie.

Les centrales nucléaires n'émettent pas de gaz à effet de serre mais, comme on l'a vu, produisent des déchets radioactifs (**Lire : L'homme, les rayonnements, la radioprotection**). D'autre part, les centrales nucléaires sont souvent installées au bord des fleuves, qui servent de source froide à la machine thermique, et sont ainsi soumis à un réchauffement local.

Pour les scientifiques et les responsables politiques, le type de pollution le plus préoccupant est actuellement l'émission de dioxyde de carbone, à cause de sa persistance très longue dans l'atmosphère et de son effet sur le climat.

5. Comment réduire la pollution et les émissions de CO2 ?

Il est impossible de poursuivre le développement de l'approvisionnement énergétique mondial sans se préoccuper de ses impacts environnementaux. Mais comment faire ? Dans la plupart des nations, les citoyens et les gouvernants estiment qu'il faut procéder à une « transition énergétique », qui serait plutôt une révolution dans nos habitudes.

La définition la plus claire est sans doute celle du gouvernement allemand¹⁰ : « le but de la transition énergétique est d'atteindre dès que possible l'ère des énergies renouvelables ». Par exemple l'électricité serait presque entièrement hydraulique, éolienne et solaire. Selon une étude détaillée (**Lire: Allemagne, la faisabilité d'un mix électrique à base d'énergies renouvelables intermittentes**) en 2016, 29 % de l'électricité produite en Allemagne a été d'origine renouvelable. Est-il techniquement possible d'atteindre 100 % ? Selon cette étude, ce ne serait possible qu'avec un stockage de l'énergie à grande échelle qui reste à être mis au point. Nous reviendrons plus loin sur le stockage de l'énergie, qui est le plus gros problème à résoudre pour accomplir la transition énergétique telle que la conçoivent les Allemands. A défaut de stockage, on arrive à une saturation comme le montre la Figure 10. Un autre exemple est le Danemark, une des nations les plus en avance dans la transition énergétique. Selon un document publié en mars 2017 par l'agence danoise de l'énergie (Denmark's Energy and Climate Outlook 2017¹¹) la part d'énergie renouvelable est actuellement de 40%. Elle ne devrait pas varier jusqu'en 2030, ce qui semble indiquer un phénomène de saturation. Le résultat de 40%, déjà fort honorable, est obtenu notamment grâce à la biomasse, à l'électricité éolienne, et aux importations d'électricité hydraulique norvégienne pendant les périodes sans vent. Quand il y a du vent, l'électricité en excès est exportée en Norvège pour y être stockée par pompage-turbinage (voir § 5.2).

¹⁰ <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/Energiekonzept/0-Buehne/buehnenartikel-links-energiewende-im-ueberblick.html>

¹¹ https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Analyser/denmarks_energy_and_climate_outlook_2017.pdf

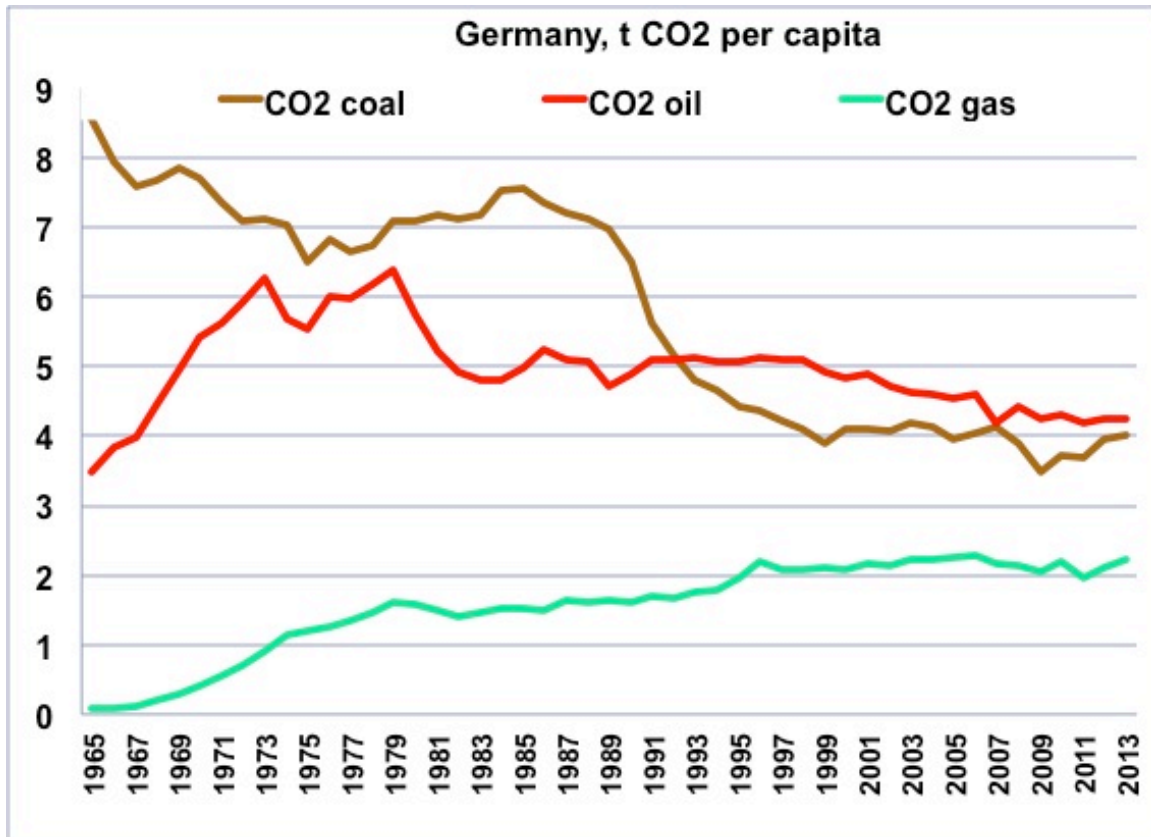


Fig. 10. Émissions de CO₂ fossile par personne en Allemagne de 1965 à 2013. La réunification a été suivie d'une réduction notable de la pollution. Source : Jean-Marc Jancovici – http://www.manicore.com/documentation/transition_allemande.html

On voit donc qu'en l'absence de stockage, les échanges d'énergie à l'échelle nationale ou internationale permettent, localement, de tirer parti au mieux des énergies renouvelables intermittentes. Ainsi, les élus écologistes (majoritaires) de la municipalité de Grenoble se donnent comme objectif « 100% des besoins des Grenoblois-e-s couverts en électricité verte en 2022 » [10]. Cette performance serait « en partie permise par l'existence, sur le territoire grenoblois, d'une entreprise publique intervenant sur toute la chaîne énergétique : GEG. » (Gaz Electricité Grenoble). GEG se donne comme « objectif les 400 GWh d'électricité verte en 2022, soit l'équivalent de 100 % des besoins des Grenoblois-e-s ». Toutefois cette électricité verte (principalement éolienne) est ou sera produite en divers coins de France (Pyrénées Orientales, Picardie, Somme, Oise) et sera transportée par les mêmes câbles que l'électricité nucléaire. Il est évident que les électrons nucléaires et verts sont indiscernables et ne seront pas triés. Néanmoins la municipalité grenobloise, par son action, contribue utilement au développement de l'énergie verte et aide ainsi la France à remplir ses engagements.

Un autre volet de la transition énergétique est l'appel aux biocarburants. Nous avons vu que c'est là une ressource limitée et non exempte de dangers.

Par ailleurs, en France, nombreuses sont les voix qui font remarquer que si on veut de l'électricité « décarbonée », l'énergie nucléaire est actuellement la meilleure recette.

5.2. Le stockage de l'énergie

Comme on l'a vu plus haut, l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont abondantes et propres, quasiment inépuisables, mais intermittentes. Pour les utiliser au mieux, il faut donc pouvoir stocker l'énergie. Mais ces formes d'énergie produisent de l'électricité, et l'électricité n'a guère qu'un défaut : elle est très difficile à stocker. Le stockage nécessite de la transformer en énergie mécanique ou chimique. On peut par exemple aménager une circulation d'eau entre deux lacs à deux niveaux différents. Quand il y a de l'énergie électrique en excès, on la transforme en énergie mécanique potentielle en hissant l'eau dans le lac supérieur, et quand on a besoin d'énergie électrique, on fait redescendre l'eau qui actionne une turbine. C'est le pompage-turbinage, qui se fait par des stations de transfert d'énergie par pompage ou STEP (**Lire : Les stations de pompage**).

Une autre possibilité est d'électrolyser de l'eau en produisant de l'hydrogène : globalement, $2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}_2 + \text{O}_2$. Quand on en a besoin, la réaction inverse restitue l'énergie, soit grâce à une machine thermique, soit par des piles à combustibles. Pour s'informer sur les perspectives concernant les véhicules à hydrogène lire : Des véhicules hybrides à l'hydrogène.

On peut aussi transformer directement de l'énergie solaire en énergie chimique, facile à stocker. C'est ce que la nature fait fort bien, par photosynthèse. Le procédé est malheureusement un peu lent pour les animaux très pressés que nous sommes. On obtient un meilleur rendement au moyen d'accumulateurs rechargeables par passage d'un courant électrique. Leur poids est un obstacle majeur si on veut par exemple propulser une automobile. L'accumulateur lithium-ion a actuellement la meilleure contenance énergétique : 720 kJ par kilogramme.

Le problème du stockage de l'énergie n'est pas encore résolu de façon satisfaisante, c'est pourquoi, pour l'instant, l'énergie solaire et l'énergie éolienne ne représentent globalement qu'une contribution faible par rapport aux autres sources : charbon, énergie nucléaire, pétrole, et même hydroélectricité.

5.3. Quelques nouveautés technologiques

- *Les pompes à chaleur*
La pompe à chaleur sert au chauffage. On prend la chaleur dehors et on la transporte dans le local à chauffer. C'est la même fonction que celle d'un réfrigérateur qui prélève la chaleur dans une enceinte qu'on souhaite refroidir et la transporte en dehors ; le fonctionnement d'une pompe à chaleur est donc celui d'un réfrigérateur. Ce transport de chaleur demande de l'énergie, qu'il nous faut payer à notre fournisseur d'électricité. Mais il faut payer moins, pour un résultat donné, si l'énergie que nous achetons alimente une pompe à chaleur que si elle est intégralement transformée en chaleur. Au moins s'il ne fait pas trop froid dehors.
- *Les piles à combustibles*
La très grande majorité de nos automobiles actuelles transforment l'énergie chimique contenue dans leur carburant en énergie mécanique. Cette transformation se fait par un processus thermique dont le rendement est limité par le second principe de la thermodynamique et ne dépasse guère 40%. Peut-être pourra-t-on bientôt utiliser plutôt des piles à combustible (**Lire : Les piles à combustibles**). Elles transforment

directement l'énergie chimique en énergie électrique sans porter le combustible à une température élevée. Le rendement peut atteindre 85%. Elles pourraient par exemple réaliser la combinaison de l'oxygène avec un hydrogène issu de l'électrolyse de l'eau par un courant électrique issu de cellules photovoltaïques recueillant la lumière du Soleil.

5.4. Economies d'énergie

Par ailleurs, des économies d'énergie sont possibles. D'abord le rendement des installations peut être amélioré (**Lire : Les politiques d'efficacité énergétique**). La pollution qu'elles imposent peut aussi être réduite. C'est ainsi qu'après la réunification de l'Allemagne, les vieilles centrales à charbon de la République Démocratique Allemande ont fait place à des usines modernes qui polluaient nettement moins. Nous avons vu aussi que le rendement du chauffage au bois de nos ancêtres devrait être considérablement amélioré. L'usage de dispositifs novateurs, tels que pompes à chaleur et piles à combustible, est aussi un moyen d'économiser l'énergie. D'autres voies font appel à une transformation de notre mode de vie. Nous avons pris l'habitude de nous loger très loin de notre travail, ce qui est une cause de gaspillage de temps et d'énergie. Nous avons pris l'habitude de nous coucher bien après le Soleil et de nous lever après lui. Changer cette habitude sera difficile, mais peut-être faudra-t-il y venir. Déjà, dans nos villes, les habitants ont recommencé massivement à utiliser les transports en commun au lieu de leur voiture.

5.5. Economistes, au boulot !

Enfin, on peut s'interroger sur la nécessité de la croissance économique. Nos économistes et nos politiciens sont actuellement incapables de concevoir une économie sans croissance de l'activité et de la consommation d'énergie. C'est un effet du progrès technique, qui permet d'augmenter les rendements et d'automatiser de plus en plus d'activités. La tâche des travailleurs devient ainsi moins pénible, mais, en l'absence de croissance, le chômage augmente. Et la croissance de la consommation d'énergie produit les effets délétères évoqués plus haut, en termes de pollution, d'impact sur le climat et l'environnement. Par ailleurs, la croissance peut-elle se poursuivre indéfiniment dans un monde fini où les ressources sont limitées et commencent à manquer ? Certains économistes sont conscients du problème et y réfléchissent (**Lire : Le scénario négaWatt 2011**).

6. Que nous réserve l'avenir ?

Où en sont les ressources ?

Du pétrole et du gaz ? Il n'y en a plus pour très longtemps : quelques dizaines d'années en ne comptant que les nappes faciles à exploiter (**Lire : Géologie et géodynamique des hydrocarbures**). Un jour viendra où nos voitures ne pourront être qu'électriques, ou utiliser un carburant artificiel, l'hydrogène, peut-être.

Du charbon ? Il y en a pour plusieurs siècles, même en ne comptant que les ressources prouvées (**Lire : Charbon, géologie, ressources et réserves**), mais son exploitation est très polluante, difficilement envisageable à moins de trouver un moyen de « séquestrer » le dioxyde de carbone émis (**Lire : Captage et stockage du carbone**).

De l'uranium ? Il y a des ressources pour environ deux siècles, ou quelques millénaires avec des surgénérateurs. Mais le stockage des déchets, le démantèlement des vieilles centrales, les impératifs de sécurité vont rendre l'énergie plus chère (**Lire : Uranium : un marché paradoxal**).

Comment faire ? La fusion nucléaire peut être une solution. Mais probablement pas avant la fin du vingt et unième siècle. Les énergies renouvelables peuvent être une partie de la solution. La sobriété énergétique, une autre. Quoi qu'il en soit, la transition énergétique est nécessaire et elle modifiera considérablement notre mode de vie (**Lire : La transition énergétique, un enjeu majeur pour la planète**).

Bibliographie Complémentaire :

Quelques sites internet :

1. www.manicore.com, Site de Jean-Marc Jancovici. On peut ne pas partager la méfiance de Jancovici vis-à-vis des énergies renouvelables. Son article sur la transition énergétique allemande, bien documenté, est intéressant : http://www.manicore.com/documentation/transition_allemande.html. On pourra comparer avec un point de vue assez différent : http://fr.wikipedia.org/wiki/Transition_%C3%A9nerg%C3%A9tique
2. Site interactif et anglophone sur le climat : www.realclimate.org
3. www.eoearth.org
4. <http://www.ademe.fr/> Site de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME). Des analyses, des expertises, mais aussi des conseils pour vivre écologiquement, équiper sa maison, etc.
5. <http://www.cea.fr/> Sur ce site du Commissariat à l'Énergie Atomique aux Énergies Alternatives, on trouvera par exemple le compte des dépenses d'énergie de diverses sources dans divers pays et dans le Monde : <http://www.cea.fr/multimedia/Documents/publications/ouvrages/memento-energie-2014.pdf>

Trois ouvrages en libre accès sur Internet :

1. David MacKay *Sustainable Energy – without the hot air* <http://www.withouthotair.com/> Réflexions personnelles sur les énergies avec et sans effet de serre avec « des nombres, pas des adjectifs ».
2. Comité de prospective de l'Académie des sciences. *La recherche scientifique face aux défis de l'énergie* (EDP Sciences, 2012). On y trouve notamment les dernières nouvelles d'ITER. <https://www.edp-open.org/images/stories/books/fullldl/rapport-defis-energie.pdf>
3. Patricia de Rango, Daniel Bellet, Adrien Bidaud, Henri Mariette (coordinateurs) *Demain l'énergie* C.R. Physique 18, Issues 7–8 (2017)

Deux autres livres parmi bien d'autres :

1. Encyclopaedia Universalis. Articles *Energie* (J. Bok, J.M. Chevalier) *Energies renouvelables* (B. Chabot), *Pollution* (F. Ramade)
2. G. Charpak, R.L. Garwin, V. Journé. *De Tchernobyl en Tchernobyls*. Le lauréat franco-polonais du Prix Nobel de Physique, et ses deux coauteurs, expliquent comment l'énergie

nucléaire fonctionne ; comment elle a parfois été mal utilisée par les ingénieurs. Ils rappellent aussi qu'elle est une menace épouvantable entre les mains des militaires et des politiciens : « la persistance d'armes nucléaires, à une époque où des armes conventionnelles guidées feraient bien mieux le travail, témoigne d'une pesanteur bureaucratique et d'une répugnance à abandonner la plupart de leurs armes nucléaires même lorsque la menace qu'elles font peser sur la civilisation dépasse de loin les bénéfices pour la sécurité de leur pays. »