L’énergie

Auteur :
VILLAIN Jacques, Directeur de recherche honoraire au CEA-Grenoble et à l’ILL (Institut Laue-Langevin), membre de l’Académie des Sciences.

27-06-2018

L'énergie existe sous diverses formes : énergie mécanique, potentielle ou cinétique, énergie électrique, chimique, nucléaire, et enfin chaleur. L'énergie est indispensable à tous les êtres vivants, et d'abord aux plantes, qui transforment l'énergie solaire sous forme d'oxygène et de nutriments au profit des animaux. Parmi ceux-ci, les hommes, avec leurs machines, consomment bien plus d'énergie que les autres. Et cela pose bien des problèmes, liés notamment à la pollution par le dioxyde de carbone, aux risques d'accidents, enfin à l'épuisement des ressources à plus ou moins long terme. Certains espèrent trouver la solution du problème dans les énergies renouvelables et les économies d'énergie. D'autres pensent que le recours massif à l'énergie nucléaire, fission ou fusion, est inévitable.

1. L'énergie sous toutes ses formes

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. L'énergie prend diverses formes que nous allons successivement passer en revue : énergie **potentielle**, énergie **cinétique**, **chaleur**, etc. L'énergie passe d'une forme à une autre sans création ni disparition : c'est le principe de **conservation de l'énergie**.

Commençons par l'**énergie potentielle** associée à une force (lire « Les lois de la dynamique » pour une introduction). 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.



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

Au 17e 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. 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.



Figure 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 nous 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, etc. 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** $V = 220$ 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 VIt.

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 (lire « Pression, température et chaleur »).

C'est ici l'occasion de revenir aux exemples évoqués plus haut, et de nous 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'. La force est ainsi proportionnelle au produit qq' et inversement proportionnelle au carré de la distance [1]. 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.

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. L'énergie élastique du ressort dont nous avons parlé plus haut est aussi une conséquence de l'interaction coulombienne.

Un exercice intéressant est de comparer la force gravitationnelle $F_g = Gmm'/r^2$ et la force coulombienne $F_{el} = qq'/(4\pi\varepsilon_0 r^2)$, entre un électron et un proton à distance de 0,1 nm. La constante de gravitation vaut $G = 6{,}67 \times 10^{-11}$ N.m^2.kg^{-2}. Les masses valent $m = 1{,}67 \times 10^{-27}$ kg et $m = 0{,}91 \times 10^{-30}$ kg. On en déduit $F_g = 10^{-47}$ N. Par ailleurs, $1/(4\pi\varepsilon_0) = 9 \times 10^9$ N. m^2/C^2 , la charge étant exprimée en **coulomb** (C). La charge du proton, opposée à celle de l'électron, vaut $q = -q' = 1{,}6 \times 10^{-19}$ C de sorte que $F_{el} = 2{,}3 \times 10^{-8}$ N. On voit que la force de gravitation est totalement négligeable, dans un rapport $2{,}3 \times 10^{39}$!

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**. C'est alors la force électrique de répulsion entre protons qui prend le dessus et libère l'énergie coulombienne (lire « Radioactivité et réactions nucléaires »). 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 hv, où v 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, 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) 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.

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 [2] 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 secret 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 $kg.m^2/s^2$. 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.

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/s^2. Cela fait à peu près 20 000 joules.

La consommation mondiale annuelle d'énergie est d'environ 0,6 x 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.

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, évaluée à 42 x 10^9 joules.

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 x 10^{-19} C, il en résulte 1 eV = 1,6 x 10^{-19} coulomb-volt = 1,6 x 10^{-19} 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 (lire « Pression, température et chaleur »).

3. Pas de vie sans énergie

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 (lire « La biosphère, un acteur géologique majeur »), dans lesquelles l'énergie du Soleil a joué un rôle essentiel. Cette énergie est 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 extraordinaire de la lumière solaire est la **photosynthèse**, grâce à laquelle les plantes fabriquent l'oxygène nécessaire aux animaux. La suite de réactions chimiques est complexe mais peut être globalement résumée par :

$6\ CO_2 + 6\ H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$

Ainsi la plante fabrique à la fois de l'oxygène O_2, et du glucose $C_6H_{12}O_6$ 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. Et de multiples façons. D'abord au travers de la domestication du feu, il y a des centaines de milliers d'années, plus récemment appliquée à la fabrication de céramique et à la métallurgie (les vestiges métallurgiques les plus anciens qu'on ait trouvés remontent à 10 000 ans environ).



Figure 3. Don Quichotte et les moulins, gravure de Gustave Doré

L'homme a aussi su tirer parti de l'énergie de l'eau - les moulins à eau sont apparus peu avant l'ère chrétienne - et du vent - les moulins à vent chers à Cervantès (Figure 3) 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 19e siècle, quand se généralisèrent les **machines thermiques**, déjà objets de recherche au 17e siècle et dont les premiers prototypes apparaissent au 18e siècle. 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 (lien vers article *thermodynamique*).

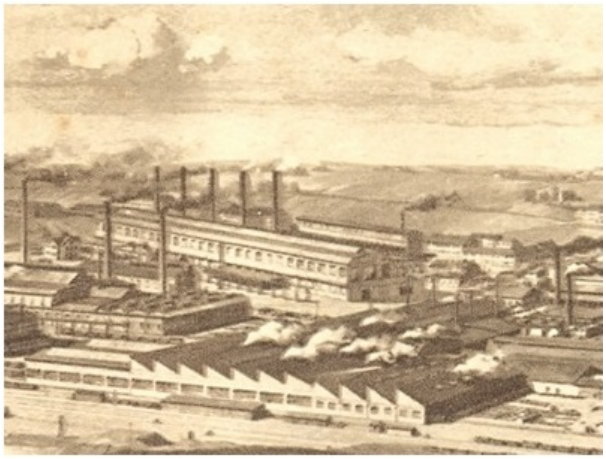


Figure 4. L'usine Henrichshütte dans la Ruhr en 1880 [source : Slg. LWL-Industriemuseum) http://www.zeitreise-ruhr.de/chronik/420-politische_wirtschaftliche_entwicklung_1850-1890.html]

C'est au 19e siècle que l'industrie commence à transformer certains paysages et que les cheminées d'usine commencent à polluer de façon inquiétante (Figure 4). Ce 19e siècle fut aussi celui de recherches majeures sur l'**électricité**, marquées par les découvertes d'Ampère, Volta, Faraday, Maxwell. L'emploi de l'électricité dans l'industrie se généralisa dans la seconde moitié du 20e siècle. L'électricité est moins polluante que les machines à charbon du 19e siècle, mais comment est produite cette électricité au 20e siècle ? Le plus souvent, par du charbon, ce qui ne fait que déplacer la source de pollution. On utilise aussi 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**. Mais cela ne suffit pas à nourrir l'appétit d'une humanité de plus en plus nombreuse et de plus en plus gourmande en énergie.

3.3. La maîtrise de l'énergie nucléaire

C'est aussi dans la seconde moitié du 20e siècle qu'on commence à utiliser l'**énergie nucléaire**, la même source 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 même (lire « L'énergie nucléaire ») : on utilise des noyaux lourds (par exemple l'isotope ^{235}U de l'uranium) qu'on bombarde avec des neutrons. 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.

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 et nous chauffer. On ne sait pas encore contrôler la réaction de fusion nucléaire et 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 lente ; l'étape actuelle est représentée par le réacteur ITER qui sera mis en service dans les années qui viennent. Grâce à ITER on espère démontrer la « faisabilité » du projet.

3.4. Des alternatives innovantes

Or les matières premières risquent de manquer. Les réserves de pétrole et de gaz, carburants très commodes, risquent de s'épuiser avant la fin du 21e 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. Les États-Unis se sont résolument engagés dans cette voie. La France doit-elle suivre leur exemple et exploiter son gaz de schiste ? 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.

Les **biocarburants** sont une autre tentation : au lieu de cultiver les plantes pour les manger ou les faire manger par les animaux, on les cultive pour en faire de l'alcool qui servira de carburant. Il serait évidemment dangereux d'aller trop loin dans cette voie. Il y a un optimum à rechercher : une partie du sol doit être consacrée à la culture, mais les plantes ont d'autres fonctions, dont celle de nous nourrir, comme elles le font depuis des millénaires. Et, bien sûr, renouveler notre oxygène.

Plus novatrices sont les **piles à combustible** [3]. Comme peut le faire une machine thermique, elles utilisent l'énergie chimique, mais elles la transforment directement en énergie électrique sans porter le combustible à une température élevée. Le procédé peut avoir un meilleur rendement.

La **pompe à chaleur** peut aussi être une nouveauté intéressante. Elle sert au chauffage. On pompe la chaleur dehors et on la transporte dans la maison 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.

Le **chauffage au bois** est aussi une technique qui s'est considérablement améliorée récemment. Avec les méthodes utilisées depuis des siècles, on gaspillait la majeure partie de l'énergie. On peut actuellement obtenir de meilleurs rendements, et limiter la pollution par les fumées, en optimisant la récupération de la chaleur produite.

3.5. Les énergies renouvelables



Figure 5. Un moulin sur le Cher, en Touraine.

Les sources d'énergie dites renouvelables utilisent pour la plupart l'énergie du Soleil, soit directement soit par les mouvements atmosphériques ou hydrauliques qu'il engendre. La méthode la plus courante est l'utilisation de l'eau des rivières (énergie **hydroélectrique**) ou du vent (énergie **éolienne**). L'énergie solaire est aussi 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** qui transforment l'énergie solaire en électricité. On exploite aussi les marées et on envisage d'exploiter la houle marine.

La plupart de ces techniques ont un inconvénient : l'**intermittence**. Il y a des jours sans vent, et la nuit il n'y a pas de Soleil. Il faut donc pouvoir stocker l'énergie. Or, si on produit de l'électricité, cette forme d'énergie a tout pour plaire, sauf qu'elle est très difficile à stocker. Il faut la transformer en énergie mécanique ou chimique. On peut par exemple remonter l'eau des barrages le jour, et la faire redescendre la nuit. Ou alors on électrolyse de l'eau dans la journée pour produire de l'hydrogène : globalement $2\,H_2O \rightarrow 2\,H_2+O_2$. Et la nuit, la réaction inverse restitue l'énergie, soit grâce à une machine thermique, soit par des piles à combustibles.



Figure 6. Eoliennes à Pellafol, département de l'Isère [Source: Diverticimes, www.diverticimes.com].

Une solution plus simple est de 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. Le problème du **stockage** de l'énergie, n'est pas encore résolu de façon satisfaisante, c'est pourquoi l'énergie solaire et l'énergie éolienne ne peuvent représenter actuellement qu'une contribution faible par rapport aux autres sources : charbon, énergie nucléaire, pétrole, et même hydroélectricité.

4. L'environnement en paye le prix

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 5), et nos éoliennes actuelles ne sont pas si vilaines (Figure 6). 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.

Depuis la fin du 19e 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, 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. Les ruptures de barrage sont au moins aussi redoutables. Celle du barrage de Malpasset, 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.

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. L'anhydride sulfureux 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 (CO_2). Ce gaz est produit en très grande quantité dans les centrales thermiques par la combustion du charbon ou du pétrole et par les transports (combustion d'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 CO_2 est également absorbé en partie par les mers, mais cela ne fait que limiter l'augmentation de la concentration dans l'atmosphère (Figure 7). Il en résulte des effets sur le climat et notamment un réchauffement (effet de serre).

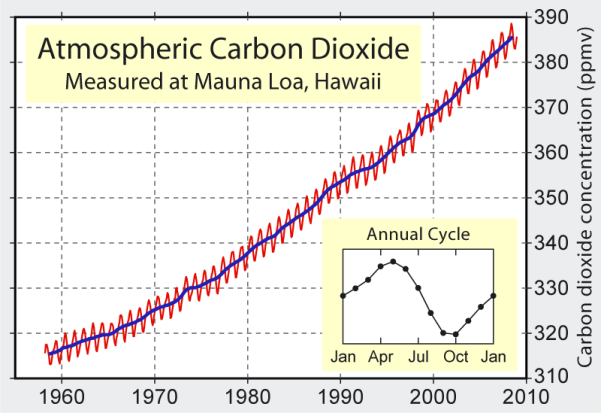


Figure 7. Évolution sur 57 ans de la concentration de CO_2 dans l'air à l'observatoire de Mauna Loa. La Figure en encart détaille la chute saisonnière du CO_2 durant la saison de végétation (d'avril à octobre) et son élévation en automne/hiver de l'hémisphère nord (la végétation terrestre est plus importante dans l'hémisphère nord). [source : Delorme. Travail personnel. Données de Dr. Pieter Tans, NOAA/ESRL and Dr. Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography]

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

Les centrales nucléaires sont actuellement peu polluantes. Cependant elles accumulent des déchets radioactifs qui commencent à poser des problèmes (lire « L'énergie nucléaire »). 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.

5. Comment réduire la pollution

Il est évidemment souhaitable de développer des énergies renouvelables : principalement les énergies solaire et éolienne. Les énergies des marées et de la houle méritent aussi d'être développées mais leurs possibilités sont plus limitées. Quant aux barrages sur les cours d'eau, ils ne sont pas loin d'avoir atteint leur limite. L'obstacle principal au développement des énergies solaire et éolienne est lié à leur caractère intermittent, le problème du stockage de l'énergie n'ayant pas actuellement de solution satisfaisante. Toutefois, certains pays comme le Danemark et l'Allemagne ont déjà entrepris une « transition énergétique » pour augmenter la part des énergies renouvelables. Le développement de cette entreprise mérite d'être suivi avec intérêt (Figure 8).

Par ailleurs, des économies d'énergie sont possibles. D'abord le rendement des installations peut être amélioré.

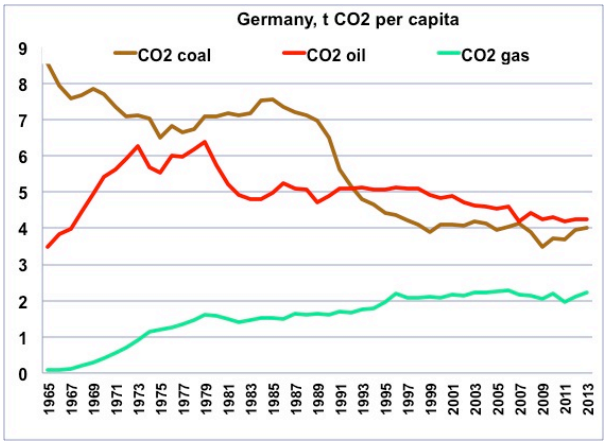


Figure 8. Émissions de CO_2 fossile par personne en Allemagne de 1965 à 2013. La réunification a été suivie d'une réduction notable de la pollution. [source : Jean-Marc Jancovici - http://www.manicore.com/documentation/transition_allemagne.html]

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 pouvait 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, faisant ainsi reculer le smog.

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.

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. 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, mais son exploitation est très polluante, difficilement envisageable à moins de trouver un moyen de « séquestrer » le dioxyde de carbone émis.

De l'uranium ? Il y en a pour deux ou trois 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.

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. Quoiqu'il en soit, la transition énergétique est nécessaire et elle modifiera considérablement notre mode de vie.

Références et notes

Photo de couverture : Éoliennes et lignes à haute tension près de Rye, en Angleterre [source : DAVID ILIFF. licence CC BY-SA 3.0].

[1] La force entre deux charges distantes de r s'exprime comme $|qq'|/(4\pi\varepsilon_0 r^2)$ (dans le vide) et l' énergie potentielle coulombienne correspondante est $W_{el}=qq'/(4\pi\varepsilon_0 r)$. 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 20e siècle afin de le faire disparaître dans d'autres formules).

[2] 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 $W_{cin}=mv^2/2$.

[3] Chatenet M. et Maillard F. «Les piles à combustible».

L'Encyclopédie de l'environnement est publiée par l'Université Grenoble Alpes - www.univ-grenoble-alpes.fr

Pour citer cet article: **Auteur :** VILLAIN Jacques (2018), L'énergie, Encyclopédie de l'Environnement, [en ligne ISSN 2555-0950] url : http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=529

Les articles de l'Encyclopédie de l'environnement sont mis à disposition selon les termes de la licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 4.0 International.
