



Presses universitaires de Louvain

Énergie, pollution de l'air et développement durable
| Claude Ronneau

Chapitre 1. Qu'est- ce que l'énergie ?

p. 15-48

Texte intégral

- 1 Le monde industrialisé est totalement tributaire de l'énergie sous toutes ses formes. Celle-ci est le moteur de notre dynamisme, le support de notre indolence, la base de la productivité industrielle et agricole et de l'accès aux biens de consommation. Elle est surtout, pour l'homme, le gage de son émancipation : elle lui permet d'échapper à cette condition qui fut la sienne pendant des millénaires, celle de porte-faix, de bête de somme. Elle lui permet, éventuellement, de se consacrer à des tâches plus nobles.

1. Qu'est-ce que l'énergie ?

- 2 Les notions que l'on peut avoir de l'énergie sont parfois bien vagues mais, pour comprendre ses bienfaits et ses limitations ainsi que les problèmes qu'elle suscite, il est nécessaire de raisonner sur des bases suffisamment précises afin d'éviter trop d'illusions sur ce que l'on peut attendre d'alternatives et de perspectives par trop utopiques.

1.1. L'énergie, c'est du mouvement ou la possibilité d'en créer

- 3 Il existe deux formes d'énergie, l'une faite de tensions, c'est l'énergie potentielle, celle que l'on peut stocker. L'autre est faite de mouvement, c'est l'énergie vive, qu'elle soit mécanique, thermique, lumineuse (radiations), acoustique ou encore électrique. Cette énergie de mouvement interagit avec la matière qu'elle rencontre : de ce fait, elle se dissipe progressivement en transférant son impulsion aux électrons, aux atomes, aux molécules de la matière rencontrée.

1.2. L'énergie, c'est aussi la possibilité de façonner la matière

- 4 C'est la possibilité de créer ou de façonner des substances nouvelles, inconnues dans la nature, des substances plus performantes, plus résistantes. Cet aspect de l'énergie doit

être retenu ; il permet de comprendre que le gaspillage de biens de consommation, de matériaux, est aussi le gaspillage de l'énergie qu'il a fallu consommer pour les élaborer. Le recyclage est économie de matière mais il est aussi fondamentalement économie d'énergie.

1.3. L'énergie : aspects quantitatifs

5 Malgré ses différentes formes et qualités, l'énergie n'est jamais qu'un seul et même phénomène ; il est donc logique que toutes ses formes se désignent par un même vocable. L'unité d'énergie, que ce soit de l'énergie potentielle, mécanique, électrique, chimique ou thermique est le

Joule (symbole **J**),

6 unité adoptée en hommage à James Preston Joule qui démontra et mesura l'équivalence des énergies mécanique et thermique. Rappelons que le joule a remplacé la calorie qui, jusqu'il y a peu, servait à mesurer l'énergie thermique. La correspondance entre les deux unités est donnée ici pour mémoire : 1 calorie = 4,187 joules A notre échelle, le joule est une quantité minime d'énergie : aussi en utilise-t-on couramment les multiples qui sont :

7 le kilojoule (kJ) = 1 000 joules

8 le mégajoule (MJ) = 1 million de joules

9 le gigajoule (GJ) = 1 milliard de joules¹

10 Malheureusement pour la simplicité des discussions, il existe également d'autres unités, largement utilisées par les techniciens de l'énergie et qui n'ont d'autre avantage que de se révéler très pratiques à l'emploi : par exemple, le kilowatt-heure (kWh) :

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ millions de joules} = 3,6 \text{ MJ}$$

11 C'est une unité pratique parce qu'elle correspond au travail (énergie *mécanique*) fourni par une machine d'une puissance de 1 000 watts mise à l'œuvre pendant une heure. Les calculs d'énergie fournie par les machines s'en trouvent

ainsi simplifiés :

travail mécanique (en kWh) = puissance en kW x durée du travail (en heures).

Les principales unités d'énergie et de puissance

Unités usuelles	Valeur	Unités désuètes
Energie : Le joule (J)	1 J = 1 newton-mètre	1 calorie = 4,186 J
Travail mécanique Le kilowatt-heure (kWh)	3,6 MJ	
Energie thermique La tonne d'équivalent pétrole	1 TEP = 42 GJ = 1,6 TEC	1 thermie = 10 ⁶ calories
La tonne d'équivalent charbon	1 TEC = 26 GJ = 0,62 TEP	
1000 m ³ de gaz naturel 1 t d'uranium naturel	36 GJ = 0,857 TEP 10 000 TEP	
L'électron-volt (eV) Énergie à l'échelle atomique	1 eV = 1,6 10 ⁻¹⁹ J	
Puissance Le watt (W)	1 W = 1 J/s	1 cheval-vapeur = 736 W

- 12 Pour ce qui concerne les consommations d'énergie thermique, on utilise aussi souvent la notion de tonne d'équivalent pétrole (TEP) :

$$1 \text{ TEP} = 41,86 \text{ milliards de joules} = 41,86 \text{ GJ}$$

- 13 C'est la quantité moyenne d'énergie dégagée lors de la combustion d'une tonne de pétrole.

1.4. La mesure de la puissance

- 14 Energie et puissance sont deux notions différentes. L'énergie, qu'elle soit potentielle, mécanique ou thermique, c'est du mouvement ou, à tout le moins, de la tension, du mouvement accumulé, potentiellement prêt à se déclencher. La puissance, par contre, exprime la *capacité de produire un*

certain travail en un laps de temps donné, ce qui est tout à fait différent. L'unité de puissance est le **watt** (W). Il correspond à la puissance d'une machine ou d'une source de chaleur capable de dégager, de produire une énergie *d'un joule par seconde* (1 J / s).

- 15 Une voiture automobile dont la puissance est de 40 kW (40.000 watts) est donc capable de produire une énergie mécanique (un travail) de 40.000 joules chaque seconde. L'énergie produite par cette voiture, après que le moteur ait fonctionné au maximum de sa puissance pendant une heure, vaut donc :

40 kW pendant une heure = 40.000 joules par seconde pendant

3.600 secondes. Soit $40.000 \text{ J / s} \times 3.600 \text{ s} = 144 \cdot 10^6 \text{ J}$

- 16 Exprimons cette énergie en kWh :

1 kWh = 1.000 W durant une heure

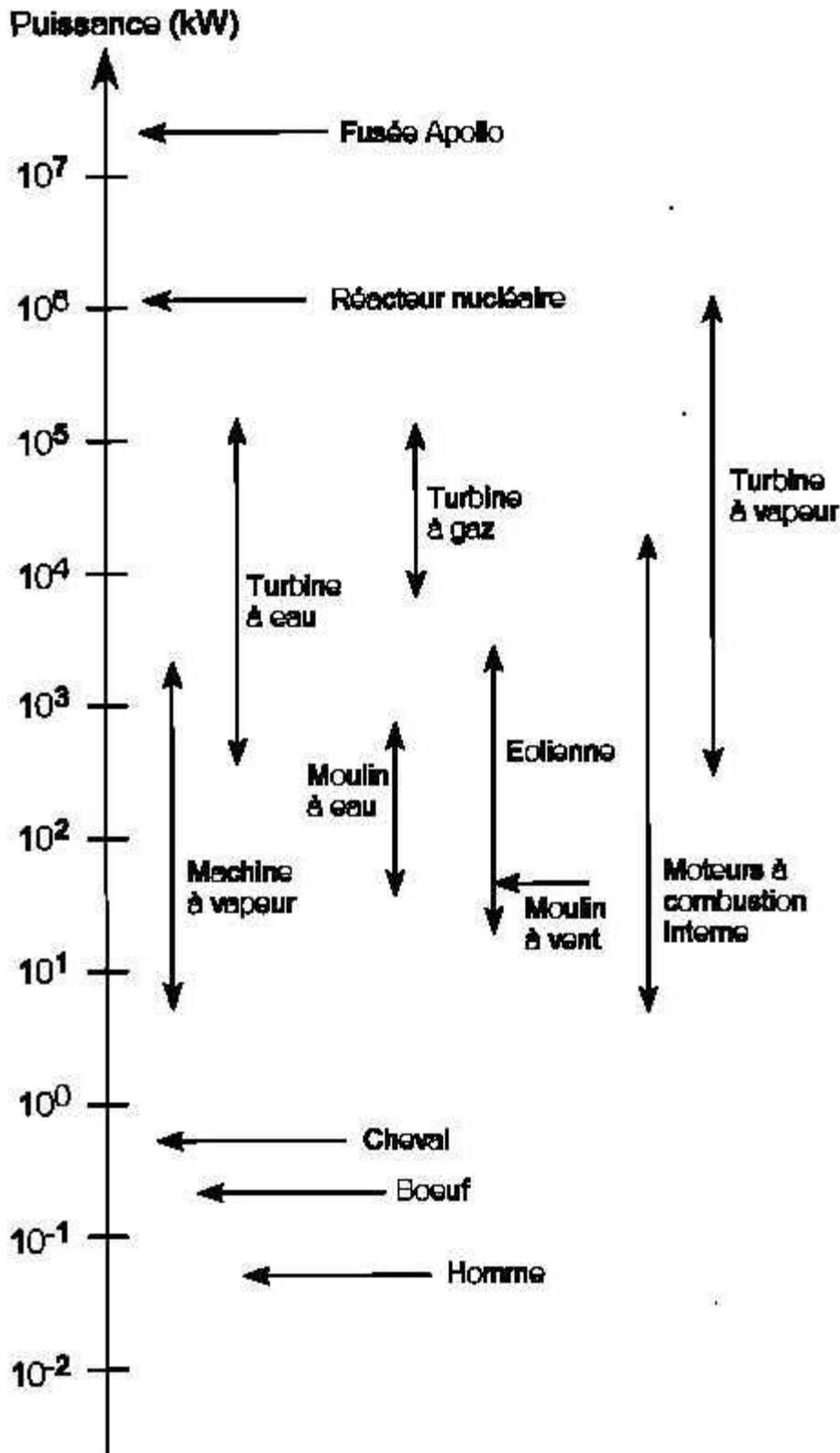
40 kW pendant une heure = 40 kWh

- 17 calcul un peu plus rapide, on en conviendra, qui justifie l'emploi de cette unité saugrenue mais très répandue et bien pratique qu'est le kWh².

2. Echelles d'énergie et de puissance

- 18 Les différentes sources d'énergie mécanique disponibles actuellement peuvent se représenter sur une échelle, disposées par ordre croissant de puissance. La disproportion entre les machines les plus puissantes et les machines les plus faibles est telle qu'une échelle arithmétique ne pourrait couvrir la gamme des possibilités offertes. On va donc classer ces machines sur une échelle logarithmique dans laquelle la progression d'un échelon à l'autre signifie la multiplication par un facteur dix de la puissance représentée. Il est déroutant de constater combien est faible notre puissance corporelle : en régime de travail manuel normal, un individu

mâle moyen est doté d'une puissance de l'ordre de 60-70 watts, c'est-à-dire qu'il peut, s'il est « en forme », produire un travail qui suffirait à peu près à alimenter une bonne ampoule d'éclairage. Disons qu'un adulte quelque peu entraîné pourrait, pendant une journée de travail de dix heures, fournir une énergie mécanique totale d'environ 0,6 kWh ! Considérant que le kWh électrique coûte environ 0,15 € au consommateur européen, voilà donc, en équivalent monétaire, la valeur dérisoire de l'énergie mécanique que des individus de sexe masculin sont capables de fournir en une longue journée de travail ardu. On comprendra aisément que, à ce tarif-là, il y a intérêt à remplacer l'homme par la machine. Etant donné la consommation des ménages en Europe, on peut estimer que chaque citoyen bénéficie personnellement, *sous forme d'énergie électrique uniquement*, d'une quantité de travail équivalant à celle que pourraient produire une dizaine d'esclaves. De ce seul point de vue, nous constatons que notre développement actuel a atteint des niveaux incomparablement supérieurs à ceux des époques antérieures. Les grandes civilisations du passé n'ont pu déployer leurs fastes et entretenir, dans un confort relatif, une élite minoritaire que par la mise au travail forcé d'une majorité d'humains asservis. Durant son « siècle d'or », la démocratie Athènes avait à son service deux fois plus d'esclaves que de citoyens ! Plus tard, dans l'Europe du Moyen Age, l'esclavage est devenu servage : l'aristocratie ne pouvait décidément se passer de l'énergie mécanique humaine, base de la croissance économique qui se profila dès le 10^e siècle³. Le servage n'a disparu de la Russie qu'en 1851, à une époque où l'esclavage des enfants était une institution bien établie dans la plupart des cités industrielles d'Europe. Faut-il aussi rappeler que 9 à 10 millions d'esclaves africains ont été déplacés vers le Nouveau Monde en un peu plus de deux siècles, pour développer la culture du coton et de la canne à sucre ?



Puissance de quelques machines

- 19 On comprend ainsi combien la machine, on y revient, a permis à l'homme de se libérer de l'asservissement du travail

manuel. Le bœuf et, surtout, le cheval avaient quelque peu allégé son labeur, mais avec des restrictions sérieuses : les animaux de trait, comme l'homme, assurent leurs huit heures de travail et puis se reposent et, pendant qu'ils se reposent, ils mangent, ils consomment de l'énergie (solaire, bien sûr, puisque végétale). Même quand ils sont inactifs, comme au milieu de l'hiver, ils continuent à manger, sans produire d'énergie mécanique utile. Il se fait que les cultures nécessaires à l'alimentation des chevaux dans les fermes d'avant la mécanisation, occupaient un quart de la superficie cultivable dans l'exploitation (cas de la Hesbaye, en Belgique). On comprendra que, ne fût-ce que de ce point de vue-là, il soit plus facile de produire des excédents agricoles aujourd'hui qu'il y a cent ans ! Le tracteur, les moissonneuses et toutes les autres machines agricoles ont fait énormément pour nous aider à manger plus abondant et moins cher. Elles ont fait beaucoup aussi pour libérer d'un travail harassant une main d'œuvre qui a pu se consacrer à des tâches plus « nobles ». Pour prendre l'exemple d'une région fertile, avant 1940, de grosses exploitations agricoles du Brabant belge (200 à 300 hectares) occupaient, durant les récoltes, une bonne centaine de personnes (en majorité des saisonniers) et quelques dizaines de bêtes de trait. Aujourd'hui, ces mêmes exploitations « tournent » avec quelques ouvriers moyennant, cela va de soi, l'importation de quelques milliers de litres de fuel léger (essence Diesel) chaque année.

- 20 Des constatations toutes pareilles restent évidemment valables pour les autres tâches manuelles dans lesquelles l'homme n'intervenait que comme mécanique. La machine fournit ses kWh à 0,15 € (au pire) ; si l'on veut se débarrasser de la machine pour revenir au travail humain, alors l'alternative est simple : ou bien on paie le travailleur manuel 0,15 € par kWh produit, c'est-à-dire par journée de travail (somme d'ailleurs bien insuffisante pour assurer ne fût-ce

que sa nourriture), ou bien l'énergie sera payée au prix fort, et le kWh reviendra au prix d'une journée de travail. On peut affirmer que c'est là une solution actuellement impensable et les machines pourvoyeuses d'énergie mécanique ont encore beaucoup de beaux jours devant elles !

- 21 Les machines, bien sûr, ne consomment pas de fourrage, de viande ou de féculents, énergies chimiques dérivées du soleil ; elles n'en ont pas moins besoin d'une « alimentation » que nous prélevons aujourd'hui dans les réserves de combustibles fossiles accumulées en gisements durant des millions d'années. Ce sont des réserves que l'on consomme actuellement à un rythme effréné et nous voyons poindre le moment où cette abondance factice se verra un jour réduite à la portion congrue. A ce moment-là, évidemment, il faudra sans doute se résoudre à revoir à la hausse le coût des mécaniques humaine et animale !

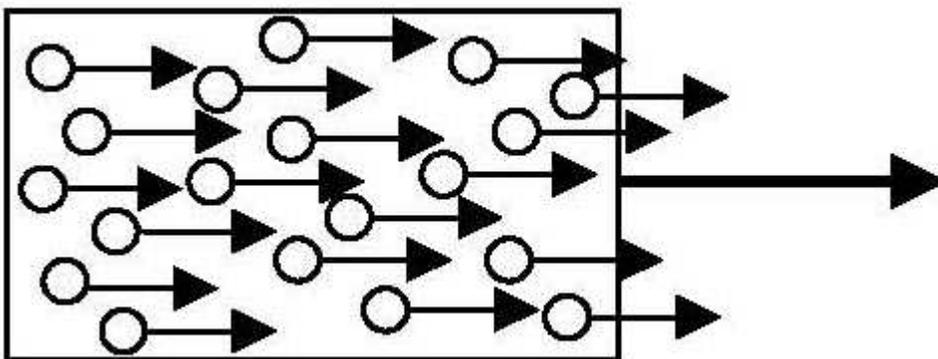
3. L'énergie : aspects qualitatifs

- 22 J.P. Joule a démontré l'homogénéité des formes d'énergie mais cette découverte, par ailleurs révolutionnaire, négligeait l'appréciation de *qualité* que l'on doit attribuer à l'énergie : 1 000 joules d'énergie cinétique, c'est exactement la même quantité d'énergie que 1 000 joules de chaleur, mais l'une diffère de l'autre sur le plan qualitatif. Ignorer cet aspect peut être source de confusions, voire d'erreurs. Considérons d'abord l'énergie de mouvement ou énergie vive, concept sans doute plus directement compréhensible parce que plus aisément perçu par nos sens. Elle prend trois formes principales pour ce qui concerne nos besoins : mécanique, électrique et thermique.

3.1. L'énergie mécanique

- 23 L'énergie mécanique apparaît lorsque de la matière se meut. Proposons ici un schéma simple, mais qui se révélera utile lorsqu'il conviendra d'introduire la distinction entre énergie

mécanique et chaleur. Le rectangle schématisé ci-dessous représente un objet en mouvement vers la droite, mouvement symbolisé par une flèche solidaire de l'objet, orientée vers la droite. En réalité, si l'objet est en mouvement, s'il possède une certaine forme d'énergie qu'on appelle énergie cinétique, c'est parce que les atomes qui le composent sont tous animés d'un mouvement d'ensemble (vers la droite). Pour souligner combien ce mouvement cohérent est nécessairement bien ordonné, représentons-le en affectant d'une flèche orientée vers la droite, les atomes qui composent l'objet :



- 24 Les atomes sont représentés (d'une manière fort simpliste et en tout petit nombre) par des boules blanches, chacune solidaire de la flèche qui symbolise son mouvement.

3.2. L'énergie électrique

- 25 Il serait abusif de dissocier les notions d'énergie mécanique et électrique car, en fait, le *courant électrique* se traduit par un mouvement cohérent d'électrons dans un milieu conducteur (généralement un métal) : il suffit, pour le schématiser, de convertir les atomes du schéma ci-dessus en électrons se faufilant entre les atomes du métal, eux-mêmes au repos. L'électricité peut ainsi s'assimiler à de l'énergie mécanique. Et cette forme d'énergie est très précieuse par sa facilité de distribution qu'un câble de cuivre assume aisément, par sa versatilité, sa disponibilité et surtout, actuellement, par son immense potentiel de support et de

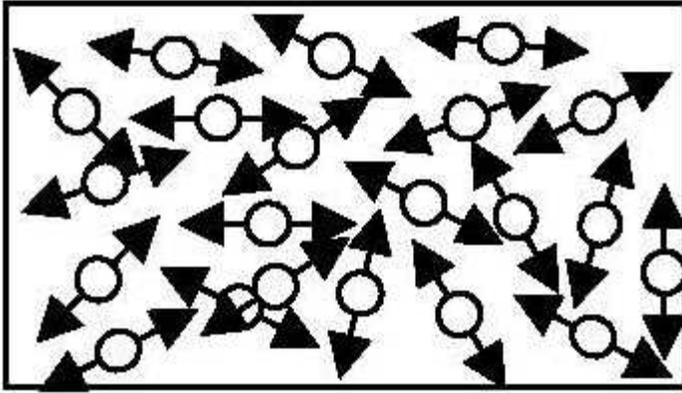
traitement de l'information. Cette énergie électrique est tellement extraordinaire qu'il paraît abusif de la dégrader à l'état d'énergie thermique dans des appareils de chauffage. Les appareils de chauffage électrique (à résistance ohmique) ne font rien d'autre, en effet, que de transformer une forme d'énergie noble (l'électricité) en une forme dégradée, de piètre valeur (la chaleur). Pour mieux comprendre cette dégradation, prenons un exemple simple et revenons à l'objet en mouvement que nous avons abandonné un instant.

3.3. L'énergie thermique

26 Imaginons donc que l'objet décrit ci-dessus, initialement en mouvement, heurte un obstacle et se trouve ainsi arrêté net. S'il est suffisamment résistant et rigide, il n'en subit aucun dommage. Mais le résultat de cet arrêt brusque est que l'énergie de déplacement de l'objet se transforme en chaleur : sa température s'élève très légèrement. En fait, cette chaleur n'est rien d'autre que la transformation intégrale du mouvement ordonné des atomes de l'objet (énergie cinétique : E_k) en un mouvement désordonné (énergie thermique : E_{th}) après le choc. La loi de conservation de l'énergie impose, sans restriction aucune, que :

$$E_k = E_{th} \text{ (1}^{\text{re}} \text{ loi de la thermodynamique)}$$

27 Dès lors, la seule différence qui caractérise l'objet entre l'état de mouvement et l'état d'arrêt forcé par le freinage, c'est que le mouvement des atomes est passé de l'ordre (mouvement cohérent) au désordre (mouvement désordonné) ... mais il s'agit là d'une différence importante.



Objet échauffé par le choc qui l'a arrêté : les atomes s'agitent en tous sens ; l'objet se dilate très légèrement

- 28 Cette observation constitue un point fondamental dans la compréhension des diverses formes d'énergie. Ce qui distingue l'énergie mécanique de l'énergie thermique, c'est leur *qualité*. L'énergie mécanique est de haute qualité parce qu'elle est une forme cohérente d'énergie vive, un mouvement homogène d'atomes, d'électrons, tandis que l'énergie thermique en est une forme dégradée parce qu'elle correspond au désordre dans le mouvement (agitations en tout sens à l'échelle atomique). Remarquons au passage que, si l'objet s'est dilaté à l'échauffement, c'est parce que le mouvement désordonné des atomes requiert plus d'espace. Le même raisonnement prévaut quand on considère la transformation, dans une résistance chauffante, de l'énergie électrique (mouvement ordonné d'électrons dans un câble) en chaleur ambiante (mouvement désordonné des atomes du métal transmis ensuite à l'air ambiant).
- 29 Revenons encore aux deux premiers schémas pour rappeler que la quantité d'énergie contenue dans l'objet n'a pas changé avant ou après le choc (ou le freinage) ; ce qui a changé, encore une fois, c'est la qualité de l'énergie qu'il contient : cette qualité s'est manifestement dégradée en passant de l'ordre au désordre. En réalité, le passage d'une forme d'énergie à l'autre :

Cinétique → Thermique

30 n'a pu s'effectuer spontanément que dans la mesure où il y eu a perte de qualité (dégradation) dans le sens :

Ordre → Désordre

31 L'objet en mouvement a pu s'arrêter spontanément en heurtant un obstacle et transformer son énergie cinétique en chaleur, mais l'inverse est irréalisable : il est impossible que, en chauffant l'objet, on le remette spontanément en mouvement. En d'autres mots, il est impossible que, par une synchronisation infiniment peu probable, les myriades d'atomes chauds de l'objet se mettent, à un moment précis, à se diriger par hasard *tous ensemble* dans une même direction pour retrouver ainsi la cohérence du mouvement d'ensemble initial. Avec la même évidence, il est impossible de déclencher l'apparition d'un courant électrique dans une résistance ohmique en la chauffant. La spontanéité de certaines évolutions se manifeste à travers d'autres exemples tels qu'un château de cartes qui s'écroule sous l'effet d'une chiquenaude : il évolue ainsi de l'ordre vers le désordre. Il est impensable que la transformation inverse puisse se dérouler *spontanément*, que, en secouant des cartes mises en tas (désordre), un château (ordre) apparaisse comme par miracle.

32 La transformation ou, mieux, la dégradation du mouvement en chaleur se déroule tout à fait spontanément : l'ordre du mouvement d'ensemble devient désordre. Il est évident que la transformation inverse ne peut pas se dérouler. Ainsi donc, si toute évolution spontanée va dans le sens :

Ordre → Désordre

33 dans le cas de l'énergie, la spontanéité des transformations s'observera-t-elle dans le sens :

Energie mécanique → Energie thermique

34 L'énergie mécanique est inéluctablement destinée à se dégrader en chaleur. La transformation inverse est bien entendu possible mais elle n'est pas spontanée : elle

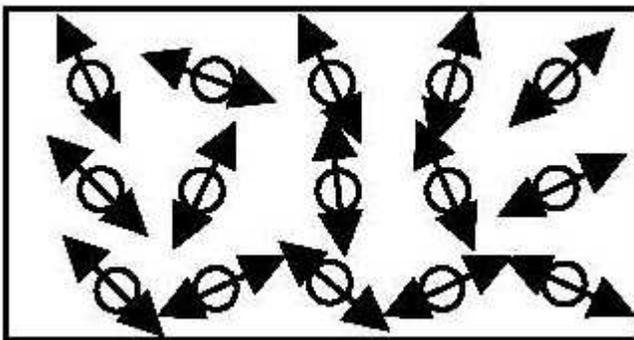
nécessite l'intervention d'une machine thermique, par exemple, une machine à vapeur, un moteur à essence :

Energie thermique → **Machine** → Energie mécanique

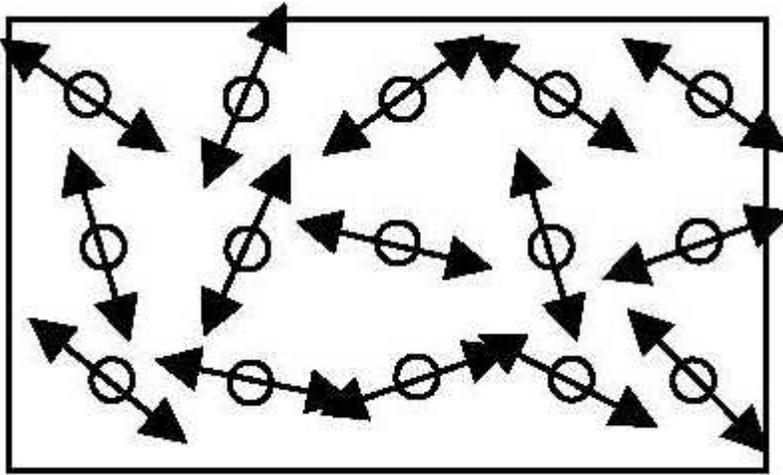
- 35 Nous le verrons par la suite, on ne parvient jamais à transformer la totalité de l'énergie thermique en énergie mécanique ; une partie se perd nécessairement dans l'opération que l'on devine complexe puisqu'elle nécessite de remettre de l'ordre dans le mouvement des atomes ou des molécules. On doit donc ici faire intervenir la notion de rendement de la transformation et, de ce point de vue, il est un principe qu'il faut absolument garder à l'esprit, c'est que aucune transformation non spontanée n'est gratuite, ni en énergie, ni en termes d'argent.

4. La dégradation de la chaleur

- 36 L'énergie thermique elle-même est sujette à dégradation. En fait, l'énergie thermique, bien que désordonnée, possède quand même un reliquat de « qualité » : il s'agit de sa température. On peut se représenter un corps chaud comme étant composé d'atomes en état d'agitation plus ou moins intense : plus forte est l'agitation et plus chaud est le corps c'est-à-dire plus élevée est sa température (et plus l'objet est dilaté parce que ce mouvement désordonné, plus intense, des atomes requiert plus d'espace).

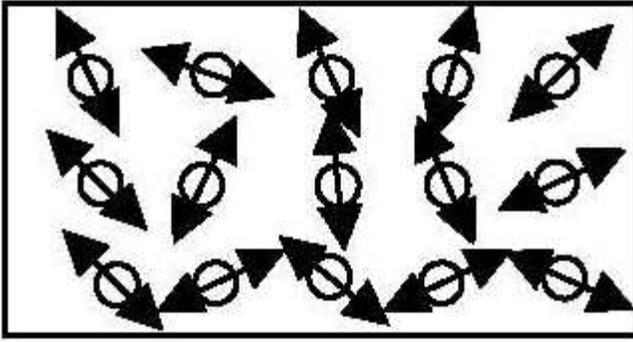
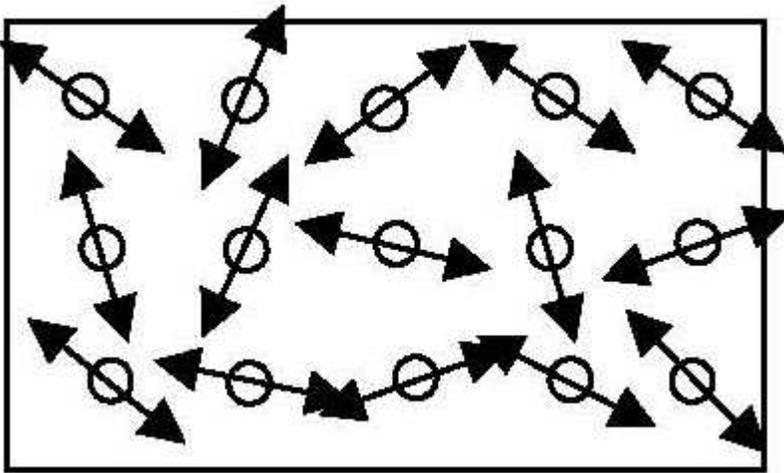


Objet à **basse** température

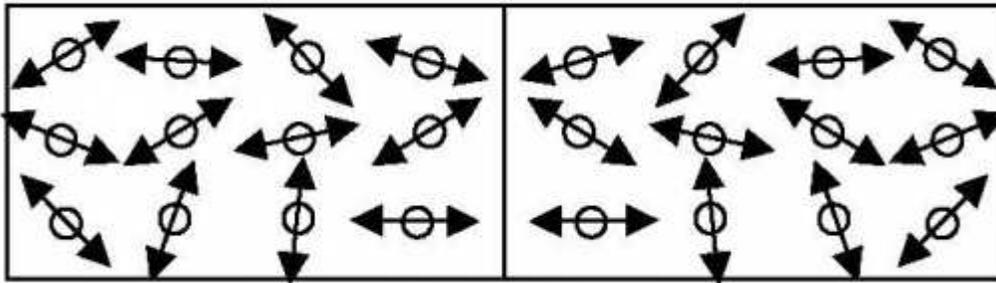


Objet identique à **haute** température

- 37 Une température élevée est de meilleure qualité qu'une basse température. On sait qu'on peut effectuer plus d'opérations utiles avec une source de chaleur à haute température : on peut, par exemple, faire cuire des aliments sur une plaque de fer très chaude, ce qui serait impossible sur une plaque à basse température. On peut chauffer un bâtiment avec de l'eau à 70-80°C circulant dans quelques radiateurs alors que de l'eau à 30-40°C y serait pratiquement inefficace. Une flamme de chalumeau à 2 000°C fait facilement fondre de l'acier, ce qui est irréalisable avec une flamme à 1 200°C. Bien sûr, il y a une raison profonde à ce concept de qualité, concept qui, une fois encore, va trouver son explication dans l'ordonnance du monde microscopique des atomes puisque nous revenons à la notion d'ordre et de désordre. Pour démontrer ce point de vue, reprenons le schéma des deux objets à haute et basse température ; mais, à présent, mettons-les en contact l'un avec l'autre, en supposant qu'ils ne peuvent pas perdre d'énergie thermique vers le milieu ambiant. En d'autres mots, ils sont isolés thermiquement et ne peuvent échanger leur énergie qu'entre eux et, pour simplifier la discussion, nous proposons également que ces objets soient faits du même matériau et qu'ils aient la même masse.

Objet à **basse** températureObjet à **haute** température (dilaté)

- 38 Effectivement, l'objet à haute température (à forte concentration d'énergie thermique) va progressivement transmettre son énergie à l'objet plus froid au point que les températures vont finir par s'égaliser. En fin d'opération, les deux objets sont amenés à une température moyenne, intermédiaire entre les températures de départ. Il y a eu « nivellement » de l'intensité des oscillations atomiques et le flux de calories s'est tari : la température s'est équilibrée. On conçoit ainsi que la température d'un corps définit sa capacité de céder de la chaleur à un autre corps, moins chaud. La température est donc *une mesure du potentiel de transfert d'énergie thermique*.



Les deux objets sont à présent à la même température **moyenne**

- 39 Il faut à présent émettre deux constats : il y a autant d'énergie dans l'ensemble des deux corps avant leur mise en contact qu'après la mise à l'équilibre thermique (loi de conservation de l'énergie). Mais le processus est non réversible pour les deux objets abandonnés à eux-mêmes : il est impossible que, une fois la température uniformisée, l'un des deux objets commence *spontanément* à se refroidir en transférant l'énergie d'agitation de ses atomes vers l'autre objet qui va alors commencer à s'échauffer. De la même manière, il est impossible que, après avoir mélangé de l'encre et de l'eau, les deux liquides se séparent sans intervention extérieure.
- 40 Manifestement, une fois encore, le système constitué par les deux corps mis en contact a évolué spontanément vers plus de désordre : ce *désordre* correspond ici à une dispersion de l'énergie thermique (oscillations des atomes) du corps chaud vers le corps froid. Il s'agit là d'une question de probabilité des états : l'évolution spontanée vers l'égalisation finale des températures est infiniment plus probable qu'un retour vers la situation initiale de ségrégation des énergies.
- 41 Revenir à la situation de départ dans laquelle l'objet de droite présente une température supérieure à celle de l'objet de gauche, exige, une fois encore, faire intervenir une machine : en l'occurrence, une « pompe à chaleur », qui prélève de l'énergie thermique à l'un des deux objets pour la transférer vers l'autre. Cette pompe à chaleur fonctionne sur le principe d'une machine frigorifique qui prélève de

l'énergie thermique dans l'enceinte à refroidir pour la transférer vers l'atmosphère extérieure. Et, là aussi, un apport d'énergie extérieure (électricité) est nécessaire pour remettre plus d'ordre dans le système constitué par l'intérieur et l'extérieur de la machine frigorifique. Remettre de l'ordre dans un « système », quel qu'il soit, demande un investissement en termes de travail : il en va de même dans le monde de l'énergie.

- 42 L'égalisation des températures que l'on vient de schématiser répond, une fois encore, à la loi naturelle générale d'évolution spontanée vers un plus grand désordre, vers une situation plus « probable », statistiquement parlant. Cette loi, incontournable, de la nature interdit de stocker de l'énergie thermique de qualité (à haute température) pour des laps de temps trop longs. Il n'existe aucune solution satisfaisante : il s'établira toujours un flux de chaleur vers des températures inférieures à celles auxquelles on voudrait conserver cette énergie thermique, si précieuse en hiver. La chaleur, se comporte comme un fluide qui tend à se répandre partout, jusqu'à égalisation des niveaux de température et pour lequel on ne connaît pas de conteneur absolument étanche.
- 43 Un sort aussi inéluctable attend l'énergie mécanique qui, elle, est érodée par le frottement : si on tente d'accumuler l'énergie cinétique sous forme de mouvement ordonné (par exemple une roue très lourde en rotation), inévitablement ce « volant » va subir des frottements qui vont progressivement transformer son énergie cinétique en chaleur : il finira par s'arrêter après avoir dispersé le mouvement ordonné de ses atomes dans le désordre thermique de l'environnement. La seule possibilité qui reste de stocker de l'énergie sous une forme relativement inaltérable, c'est sous la forme *d'énergie potentielle*.

5. L'énergie potentielle

44 L'énergie potentielle arrive bien à point pour constituer des stocks durables, ce que ne permettent pas les formes d'énergie vive examinées jusqu'à présent. L'énergie potentielle est faite de tensions : ce n'est pas du mouvement, elle n'est donc pas condamnée à se dégrader. On peut la conserver pendant des durées pratiquement indéfinies sans qu'elle perde ses qualités. Quelques exemples permettront de mieux comprendre ce point :

un ressort tendu, un arc bandé peuvent transformer leur énergie intégralement, à tout moment, sous forme de mouvement ;

un objet placé sur une étagère peut, après une période indéfiniment longue, restituer son énergie potentielle sous forme de mouvement et de chaleur en tombant au sol ;

l'eau des rivières accumulée derrière les barrages constitue un stock d'énergie stable pour de très longues périodes ;

l'énergie électrique stockée dans une pile ou dans une batterie de voiture peut, en théorie, se conserver indéfiniment, ... n'étaient les « fuites » inévitables de courant entre les électrodes,

l'énergie potentielle chimique présente dans certaines substances telles que, le pétrole, le gaz naturel ou le charbon est conservée dans le sol depuis des millions d'années ; les explosifs en sont un autre exemple, les aliments constituent une réserve d'énergie chimique corporelle.

45 En pratique, ce sont là des formes d'énergie que l'on met à profit pour constituer des réserves à long terme. Comme telles, ces différentes formes ne sont d'aucune utilité. Elles ne sont appréciées que dans la mesure où elles ont le *potentiel* de se transformer en énergie mécanique ou en chaleur qui, elles, sont directement utiles. Dans la vie de tous

les jours, nous n'employons pratiquement que ce type de stocks d'énergie. Les quelques maigres réservoirs d'énergie vive (mouvement ou chaleur) dont nous profitons quand même, sont trop fugaces : par exemple, une maison, si elle est bien isolée, peut conserver pour quelques heures la chaleur dégagée par la combustion d'une fraction de sa réserve de fioul. La chaudière conserve de l'eau chaude, mais, à nouveau, pour quelques heures seulement. En voiture, si on relâche la pédale de l'accélérateur, l'engin gardera l'impulsion créée par le moteur sur quelques dizaines de mètres.

46 Bien entendu, des réservoirs *naturels* d'énergie vive sont largement mis à profit à notre insu : le meilleur exemple en est sans doute l'océan, capable d'accumuler d'énormes réserves de chaleur pendant l'été et de les restituer pendant les périodes de froid. A l'inverse, les glaciers polaires captent une partie de l'énergie thermique des tropiques. Ce sont des réserves colossales de calories ou de « frigories » que la technique est tout à fait incapable de réaliser à un coût acceptable. Au mieux peut-on tenter de valoriser ce que la nature met à notre disposition. Il existe beaucoup d'idées pour réaliser des réservoirs d'énergie vive ; ils sont nécessairement encombrants et coûteux. L'énergie vive se dégrade beaucoup trop vite, trop facilement : elle nous « file entre les doigts » pour se disperser irrémédiablement dans l'environnement : il coûte très cher de vouloir l'emprisonner en quantités appréciables.

47 L'électricité est une forme d'énergie noble, vive, pratiquement non stockable comme telle, sinon à très basse température (grâce à la supraconductivité). La seule manière qui soit actuellement donnée de maîtriser et de gérer l'énergie électrique, c'est de la produire, dans les centrales, à un rythme très exactement ajusté à la demande. Les piles et les batteries peuvent constituer un réservoir d'énergie électrique (sous forme de potentiel chimique) mais leur

emploi est coûteux et limité en puissance. Une autre manière de stocker l'énergie est de retenir l'eau de rivières derrière des barrages pour finalement transformer cette énergie potentielle gravifique en électricité grâce aux turbines à eau : c'est une solution largement exploitée, qui entre dans la catégorie des énergies dites « douces ».

6. La lumière, une énergie noble, difficile à valoriser

48 La lumière est une énergie vive, de mouvement. A l'instar de toute onde électromagnétique, elle est constituée de myriades de photons qui se meuvent indépendamment les uns des autres, mais tous dans une même direction pourvu qu'ils participent à un rayonnement parfaitement collimaté ne subissant aucune interférence avec de la matière. L'énergie des photons se mesure d'une manière un peu particulière : en effet, ces « grains de lumière » n'ont pas de masse et ils voyagent tous dans le vide à une vitesse uniforme ($c = 300.000 \text{ km/s}$). On ne peut donc, ainsi qu'à un objet macroscopique, leur attribuer une énergie cinétique dans les sens classique du terme. En 1905, se basant sur la découverte des quanta faite par Planck, Einstein dérive une équation qui relie l'énergie des photons (E) à leur fréquence (ν) c'est à dire, à l'inverse de leur longueur d'onde ($\nu = c/\lambda$ et h est constante de Planck) :

$$E=h\nu$$

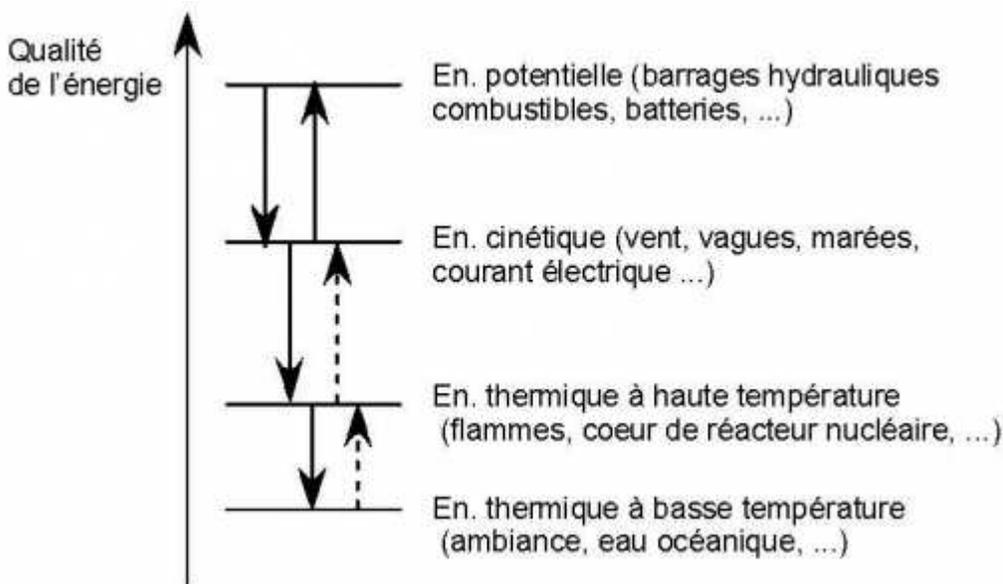
49 En *moyenne*, la puissance du rayonnement solaire qui arrive directement au sol, à l'équateur, est de l'ordre de 380 W/m^2 : énergie significative qui a d'ailleurs permis à la vie de se développer sur terre. Il s'agit, répétons-le, d'une énergie noble. Malheureusement, il n'est pas facile de valoriser sa cohérence (son mouvement d'ensemble) par une transformation directe en un mouvement mécanique de la matière. Un objet en mouvement (par exemple une boule de

billard⁴⁾ est susceptible de transférer la quasi totalité de son énergie cinétique à un autre objet, parce que les atomes de l'objet matériel en mouvement entrent directement et massivement en collision avec l'ensemble cohérent des atomes de l'objet impacté (chaque atome pouvant être lui-même considéré comme une bille solidaire de ses voisines). Les photons, eux, interfèrent isolément avec les électrons des atomes de la matière rencontrée et non avec l'ensemble cohérent des atomes. Ils leur communiquent ainsi, individuellement, une énergie *d'excitation électronique*, sans orientation précise, condamnée à se dégrader rapidement sous forme de chaleur et il est très difficile de gérer une telle excitation pour en extraire une énergie noble ... ce que réalisent cependant les cellules photovoltaïques, mais avec un rendement médiocre, de même que les lasers, avec un rendement encore plus faible. En définitive, seules des cellules photovoltaïques et la synthèse chlorophyllienne parviennent à tirer le meilleur parti de cette énergie. On parlera plus tard de l'énergie photovoltaïque. Constatons pour l'instant que la chlorophylle valorise l'énergie solaire en transformant CO₂ et H₂O en sucres mais avec un rendement fort modeste, au mieux de 2 %.

7. Les interconversions de l'énergie

50 A ce stade, il est utile de résumer par un schéma les différentes formes d'énergie le plus souvent mises en oeuvre. Elles sont disposées sur une échelle qui symbolise leur qualité : les énergies les plus nobles (spontanément convertibles en d'autres formes) sont situées en haut de l'échelle. Les flèches reportées en trait gras sur le diagramme symbolisent les diverses conversions possibles de *manière spontanée*. C'est le cas de l'énergie potentielle et de l'énergie mécanique (mouvement ordonné). Les flèches en pointillé du graphique, montrent les conversions qui doivent s'effectuer *avec l'aide de machines* (moyennant

consommation d'énergie). Le pendule fournit un bon exemple d'un processus d'interconversion : durant ses oscillations, il transforme en permanence l'énergie potentielle de la masselotte (position haute) en énergie cinétique (passage en position basse) et vice-versa. Et lorsque le pendule est en mouvement, l'énergie mécanique se dissipe en chaleur par les frictions subies au contact de l'air ambiant. Il y a donc transformation alternative d'énergie potentielle en énergie mécanique et transformation progressive de cette dernière en chaleur, par friction. La spontanéité des transformations, une fois encore, va dans le sens de la dégradation et le pendule va s'arrêter progressivement, en échauffant (légèrement) l'air ambiant, c'est à dire en dispersant dans l'environnement l'énergie potentielle qu'il possédait au départ de ses oscillations.



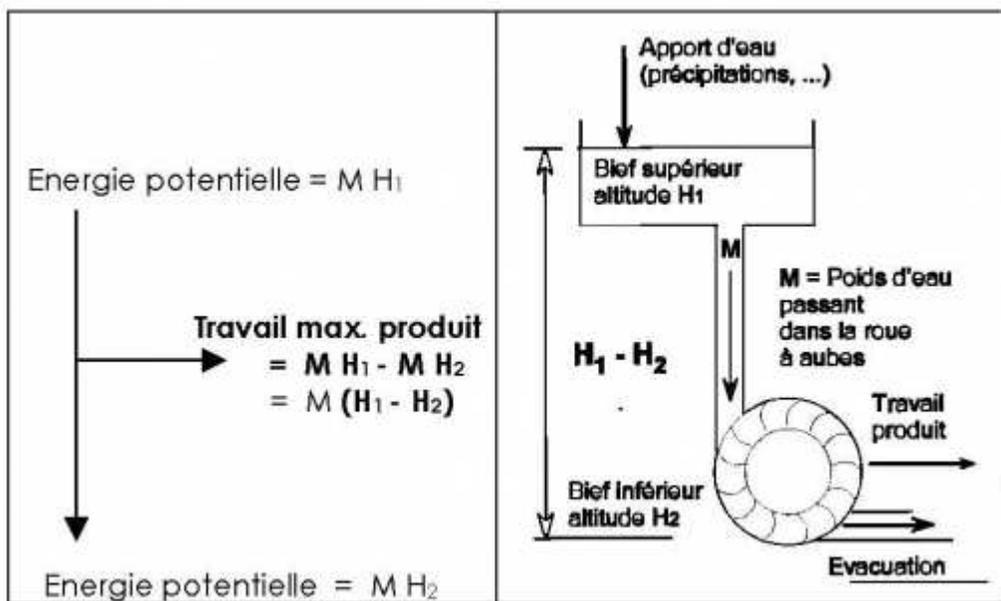
- 51 Dans une flamme, l'énergie chimique potentielle d'un combustible (gaz, pétrole, charbon, bois, ...) mis en présence d'oxygène se transforme directement en chaleur, suite à l'oxydation du carbone et de l'hydrogène contenus dans ses molécules. A l'exception de ce qui se passe dans les piles, il est difficile de transformer directement une énergie potentielle chimique en énergie mécanique⁵ et, dans la majorité des cas, on est obligé de passer par la combustion de ces substances dans une machine thermique pour en tirer

de l'énergie mécanique avec, c'est la règle, une perte de rendement appréciable puisqu'il faut rejeter une partie des calories dans l'environnement. C'est ainsi que l'intervention d'une machine thermique est toujours consommatrice d'énergie, nous l'avons déjà signalé : une machine consomme généralement plus d'énergie thermique qu'elle n'en peut fournir sous forme mécanique. Une pompe à chaleur, quant à elle, a besoin d'énergie mécanique pour rehausser la qualité (la température) de l'énergie thermique. Remettre de l'ordre dans le mouvement n'est jamais gratuit !

8. Le rendement des machines thermiques

52 La mise au point de la machine à vapeur par James Watt, entre 1769 et 1800, a d'abord consisté à améliorer le concept de la machine de Thomas Newcomen (1711)⁶, grande dévoreuse de charbon. Diverses adaptations ultérieures ont progressivement rendu la machine à vapeur acceptable sur le plan de la consommation de combustible. Il n'en reste pas moins que le problème des économies d'énergie aiguës l'intérêt des industriels : se posait entre autres la question de savoir comment et dans quelle mesure l'énergie thermique pouvait ainsi se transformer en énergie mécanique. Un jeune polytechnicien français, Sadi Carnot, alors âgé de 28 ans, vint à la rescousse en publiant, en 1824, un traité intitulé : « Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance », traité dans lequel il démontrait le principe qui porte son nom. Il y affirme que le rendement de transformation de l'énergie effectuée par une machine thermique dépend directement de la *différence* de température entre ce qu'il est convenu d'appeler la « source chaude », c'est à dire la température du fluide moteur (ici, la vapeur pénétrant dans le cylindre de la machine) et la température de la « source froide », température à laquelle sont évacuées les calories après que la vapeur se soit détendue dans le cylindre en transmettant son

action sur le piston. En réalité, Carnot avait basé sa réflexion sur une hypothèse, admissible à l'époque, mais qui allait bien vite se révéler erronée : il assimilait la chaleur à un fluide (le « calorique ») s'écoulant à travers la machine, sous un certain flux. La différence de température entre l'entrée et la sortie du cylindre pouvait ainsi s'assimiler à la différence de niveau entre le bief supérieur et le bief inférieur d'un moulin à eau. Modèle erroné sans doute, mais simple et qui déboucha sur l'élaboration d'une des lois fondamentales de la thermodynamique. Les deux schémas repris ci-dessous montrent le moulin à eau ou, plutôt, la roue à aubes placée entre ses deux biefs (haut et bas niveau) et la machine à vapeur « installée » entre les deux sources de chaleur (haute et basse température). D'une part, la roue à aubes travaille sous un débit donné d'eau (kg par seconde) et, de l'autre, la machine à vapeur travaille sous un certain flux d'énergie thermique (J par seconde). Cette énergie thermique est véhiculée par un gaz (vapeur produite par une chaudière, gaz brûlés de l'essence, ...) que nous appellerons « fluide moteur ».

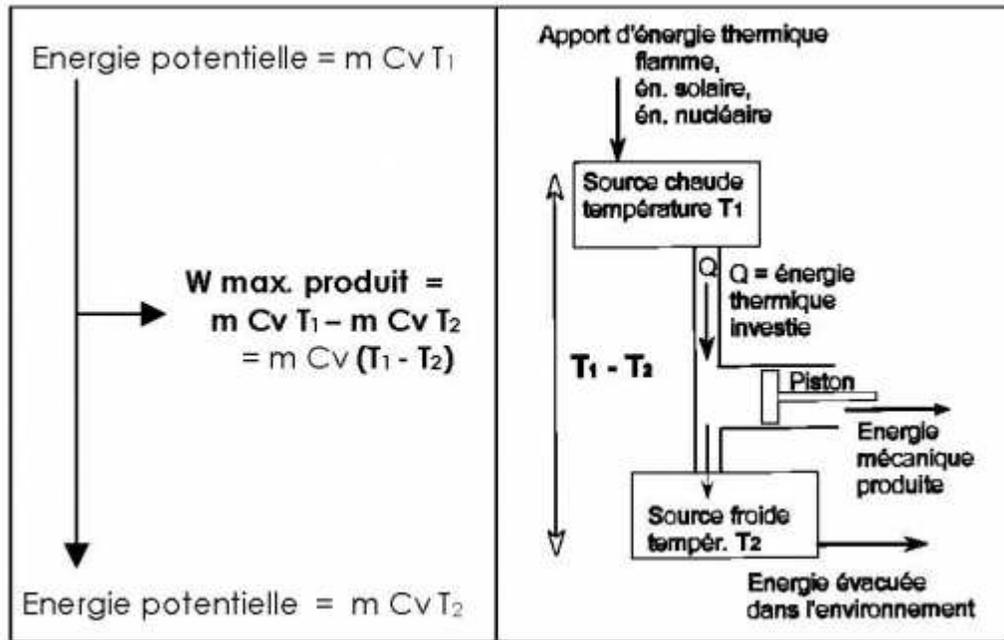


Production d'énergie mécanique par la roue à aubes

53 Quelques formules sont à rappeler :

l'énergie potentielle d'une masse de matière (l'eau qui alimente la roue à aubes) se mesure par :

masse de matière \times accélération de la pesanteur \times hauteur =
 $m \times g \times H$ (en joules : $m \times g =$ poids de la matière = M)



Production d'énergie mécanique par le moteur thermique

la différence de contenu en énergie thermique d'une certaine masse de matière (gaz chauds qui vont agir sur le piston de la machine thermique) passant d'une température T₁ à une température T₂ se mesure par :

masse de matière \times capacité calorifique \times différence de température = $m \times Cv \times (T_1 - T_2)$ (en joules)

la masse d'eau qui actionne la roue à aubes se retrouve intégralement dans le bief inférieur, à ceci près qu'elle a perdu son énergie potentielle : de la même manière, la masse de fluide qui entre dans la machine thermique à température élevée T₁ est égale à celle qui en sort à basse température T₂, après détente.

le travail (W) produit par les deux types de machines sera, *au maximum*, égal à la différence entre l'énergie

injectée dans les machines, diminuée de l'énergie rejetée dans l'environnement : (*au maximum*, car des pertes sont en effet inévitables, en conséquence des frottements, des fuites d'eau et des « fuites » d'énergie thermique :

W_{maximum} produit (W_{max}) = Energie injectée -Energie rejetée

54 Pour ce qui concerne la roue à aubes :

$$W_{\text{max}} = m g (H_1 - H_2)$$

55 Pour ce qui concerne la machine thermique :

$$W_{\text{max}} = m C_v (T_1 - T_2)$$

56 On voit ainsi apparaître la similitude : dans le cas de la roue à aubes (ou d'une turbine à eau), pour une quantité donnée d'eau sassée du bief supérieur au bief inférieur, le travail produit est proportionnel à la *différence d'altitude* entre les deux biefs. Dans le cas du moteur thermique, pour une quantité donnée de fluide ayant activé le piston (ou la turbine à vapeur ou bien à gaz), le travail est proportionnel à la *différence de température* entre la source chaude et la source froide. En fin de compte, Carnot a ainsi pu estimer le rendement maximum de la machine thermique c'est à dire la quantité de travail qu'elle est idéalement capable de fournir étant donné l'investissement en énergie thermique (en combustible) consenti pour la faire fonctionner : ce *rendement maximal* de la machine est défini par :

$$\frac{\text{énergie mécanique produite par la machine}}{\text{énergie thermique investie dans la machine}}$$

57 Soit donc :

$$\frac{\text{masse} \times C_v \times (T_1 - T_2)}{\text{masse} \times C_v \times T_1}$$

58 Et, après simplification par m et C_v , on a que le rendement est égal à :

$$\frac{(T_1 - T_2)}{T_1}$$

- 59 Cette équation constitue le fondement thermodynamique des machines thermiques : elle avertit sans ambages que, pour tirer un maximum de profit d'une quantité donnée de combustible investi dans un moteur, il faut (1) que le combustible communique au gaz moteur la température la plus élevée possible et (2) que ce fluide soit expulsé du moteur à la température la plus basse possible, de manière à céder un maximum d'énergie aux organes moteurs et donc valoriser au mieux l'investissement en combustible. Le rendement théorique serait égal à l'unité (100 % de transformation de la chaleur en travail) si la source froide pouvait se trouver à la température du zéro absolu (0 kelvin = 0 K). En pratique, étant donné que la température ambiante moyenne à la surface du globe terrestre est de l'ordre de 15°C (288 K), il est quasiment illusoire, dans la majorité des applications, d'espérer expulser un fluide moteur à une température inférieure à, disons, 20°C (293 K)⁷. En d'autres mots, puisque il est impossible d'abaisser la température de la source froide, une valorisation maximale de l'énergie thermique investie dans un moteur exige qu'elle lui soit fournie à une température maximale.
- 60 Ce constat de la loi de Carnot, à savoir le rôle de la différence de température ($T_1 - T_2$) dans le rendement de conversion des moteurs, met en exergue la limitation des énergies dites « douces » en ce domaine. Les rendements de moteurs thermiques alimentés par des fluides chauffés par l'énergie solaire, même concentrée, ne pourront jamais concurrencer ceux des moteurs alimentés par des combustibles dont les températures de flamme atteignent, voire dépassent, des valeurs de l'ordre de 1 500°C. C'est d'ailleurs ce type de limitation qui restreint le rendement des machines à vapeur (vapeur produite par une source de chaleur externe au

moteur) en regard des moteurs à combustion *interne*. Au contact de la vapeur d'eau, l'acier se corrode à des températures supérieures à 400°C ce qui limite, évidemment la température tolérée par la chaudière. Les rendements de ces machines en sont pénalisés d'autant et on comprend ainsi que les superbes locomotives et autres machines à vapeur ont rapidement été supplantées par le moteur Diesel ! Les turbines à vapeur gardent cependant leur intérêt quand il s'agit de valoriser, de récupérer de l'énergie thermique à température moyenne, dans les systèmes combinés de production d'électricité (turbines gaz-vapeur).

9. Les sources d'énergie

61 La vie s'est organisée sur terre en une magistrale et merveilleuse entreprise de piégeage, de transformation et d'organisation de l'énergie venue du soleil. A de très rares exceptions près, toute vie sur notre planète est entièrement tributaire de ces radiations. Pendant très longtemps, l'homme s'est intégré dans ce flux lent mais permanent d'énergie qui s'écoule⁸ à travers la biosphère. Actuellement encore, il dépend entièrement de l'énergie solaire pour son approvisionnement en nourriture, puisque les plantes (la synthèse chlorophyllienne) restent à la base de toute production alimentaire. On sait également que la vie sur terre est rendue possible par le niveau moyen de température qui y règne, grâce au subtil dosage d'énergie solaire réalisé par l'atmosphère et les océans en une série complexe de mécanismes délicats que nous sommes en train d'altérer gravement. En fin de compte, nous puisons déjà très largement *et depuis toujours*, dans l'énergie solaire, un maximum de ressources sans peut-être très bien nous en rendre compte. Cette constatation nous amène à affirmer que **l'énergie solaire n'est pas une énergie alternative** : bien au contraire, elle est **l'énergie fondamentale** sans laquelle aucune vie sur terre n'aurait

jamais pu exister. C'est peut-être là jouer sur les mots mais, en réalité, ce sont les énergies artificielles, dérivées de combustibles fossiles, qui sont des solutions alternatives ou, mieux, complémentaires au solaire car, pour construire ces machines thermiques totalement étrangères aux réalisations de la nature, nous avons besoin de sources d'énergie à haute température et, en tout premier recours, la flamme des combustibles, qu'ils soient tirés de la biomasse ou de gisements fossiles.

- 62 Le soleil, lui, et c'est son rôle premier, constitue le fondement de toute vie, en ce sens qu'il fournit l'énergie permettant à tout système vivant de conserver la très haute organisation qui le caractérise et de lutter ainsi contre la tendance spontanée d'évolution vers le désordre. La vie est une lutte permanente contre cette loi naturelle. Cette lutte s'arrête avec la mort qui marque le retour vers le désordre : la décomposition des tissus. On peut d'ailleurs constater que les systèmes naturels font un usage extrêmement bien dosé des flux d'énergie dont ils tirent un rendement global excellent, puisque le gaspillage est pratiquement inexistant : à sa mort, un être végétal ou animal devient lui-même source d'aliments pour les nécrophages, les détritivores. L'homme, au même titre que les autres formes de vie, n'échappe pas à cette soumission : il s'insère dans les chaînes alimentaires et dépend physiquement de cette énergie diffuse sans laquelle rien ne serait.
- 63 Mais l'homme technologique a développé d'autres besoins : pour se chauffer et, nous l'avons dit, pour alimenter ses machines, il lui faut une énergie de plus haute qualité, fournie à haute température, et sous une densité de flux que le soleil n'est pas capable de fournir. Il s'est donc tourné vers des sources nouvelles prélevées dans des gisements limités, épuisables, qui lui garantissent une énergie dense, de haute qualité, ... épuisable peut-être, mais encore suffisante *actuellement* pour alimenter des machines de plus en plus

puissantes et gourmandes. Le soleil transmet déjà un maximum d'énergie à la vie sur terre : essayer d'en soutirer plus sera difficile parce que, à ce moment là, il faudra mettre au point des techniques supérieures à celles élaborées dans la nature au cours de centaines de millions d'années d'évolution. Bien sûr, la technologie pourrait être capable de brûler les étapes pour imaginer mieux en bien moins de temps, mais on est en droit de rester prudent quant aux perspectives de succès d'une telle entreprise. En toute rigueur donc, on ne peut dire que l'énergie solaire soit *une alternative* aux combustibles fossiles actuellement utilisés parce qu'il s'agit d'une énergie diffuse (de faible qualité) qui n'est domptée, valorisée dans les cycles naturels que par l'intervention d'un monde infiniment complexe de plantes et d'organismes marins et terrestres interdépendants (c'est d'ailleurs la complexité de ce monde que tente de comprendre la science de l'écologie). Tout au plus pouvons-nous espérer valoriser un peu mieux ce flux vital. L'homme a donc actuellement besoin, pour satisfaire ses besoins techniques, d'une énergie dense, de haute qualité (mécanique, et thermique à haute température) et l'énergie dérivée des combustibles est pratiquement irremplaçable. Il faut pratiquement trente heures d'ensoleillement sur une surface d'un mètre carré, sous l'équateur, pour recueillir, *si le rendement est de 100 %*, une énergie comparable à celle qui est fournie par la combustion de 1 kg d'essence. Et encore s'agit-il d'une énergie de piètre qualité (à basse température : 60-80°C) si on se contente de la recueillir sous forme de chaleur, sans la concentrer. Tandis que l'essence peut produire des joules à très haute température (au moins 1.500°C) capables d'alimenter, par exemple, un moteur à combustion interne avec un assez bon rendement énergétique de l'ordre de 35 %.

- 64 Dresser un bilan de l'énergie solaire qui se déverse sur nos pays est riche d'enseignement. Cette énergie n'est gratuite

que si elle est considérée dans son état brut, c'est-à-dire dispersée, diluée et, surtout, intermittente. On perçoit ici toute la difficulté qu'il y aurait à miser sur une énergie si peu contrôlable, aussi longtemps que la concurrence de l'essence se manifesterait avec autant de superbe. Les machines fonctionnant grâce aux dérivés du pétrole, voire même grâce au charbon, s'imposent sans aucune difficulté en alternative aux machines qu'on pourrait faire fonctionner à l'énergie solaire, tout simplement parce que, dans un réservoir de quelques litres d'essence, on emmagasine l'équivalent d'une énergie solaire qu'il faudrait plusieurs jours à récolter au moyen de capteurs gigantesques et coûteux. Cette concentration d'énergie sous forme liquide est tellement avantageuse que lorsque l'essence dérivée du pétrole sera devenue trop rare ou estimée trop polluante, on veillera sans doute à en produire de la synthétique, à partir du charbon (ce sera probablement du méthanol) de manière à modifier le moins possible la structure de nos voitures et préserver les réseaux de distribution actuels. Un autre avantage du réservoir d'essence est que l'énergie potentielle, chimique qu'il stocke peut être conservée presque indéfiniment, pratiquement sans altération, ce qui n'est bien sûr pas le cas de l'énergie directement recueillie par les capteurs solaires. Le bois, quant à lui, ainsi que divers autres produits de la biomasse, constituent bel et bien un stock d'énergie potentielle produite à partir de l'énergie solaire : nous aurons l'occasion d'y revenir pour en souligner les limites. Et, bien que naturel, le bois n'est pas un combustible exempt de défauts quand il s'agit de le brûler. Il faut enfin souligner l'énorme accumulation d'énergie potentielle présente dans l'uranium destiné à la fission nucléaire et dans les noyaux d'hydrogène lourd destinés à la fusion nucléaire.

65 La difficulté inhérente à ces procédés très particuliers est la haute technicité à mettre en oeuvre pour en dégager l'énergie. Les déchets radioactifs résultant de la fission sont

une autre cause légitime de soucis, bien qu'on ait délibérément tendance à en exagérer les difficultés de traitement et les risques liés au stockage.

10. La consommation d'énergie

- 66 Il est temps de dresser quelques bilans et de mettre à profit toutes les notions qui ont été développées sur l'énergie pour commenter quelque peu les statistiques et leur faire dire ce qu'elles recèlent.

Tableau I.1. Consommation d'énergie primaire dans le monde (2000)⁹

Source d'énergie	Consommation (GTEP)	%
Pétrole	3,5	40
Gaz	2,16	24,7
Charbon	2,19	25
Nucléaire	0,67	7,6
Hydraulique	0,23	2,6
TOTAL	8,75	100

- 67 Pour ce qui concerne le monde, les chiffres, quoique très variables suivant les sources, parlent d'eux-mêmes.
- 68 Au rythme actuel de consommation et sur base des réserves exploitables actuellement, le pétrole pourrait encore être extrait du sol durant 40 ans (100 ans si on en croit l'Agence de recherches géologiques américaine) ; le charbon, pendant environ 300 ans, le gaz naturel, pendant 70 ans et l'uranium, pendant 70 ans (délai porté à 200 ans, si on l'investit dans les réacteurs surrégénérateurs qui produisent du plutonium

à partir de ^{238}U).

69 En 2000, l'Europe des Quinze a consommé une énergie brute équivalant à près de 1,460 GTEP, ce qui correspond à un peu plus de 3,8 TEP par habitant¹⁰. Quel appétit ! Bien sûr, dans ces chiffres entrent en ligne de compte les consommations industrielles, celles des transports, celles de la production d'électricité, ... Mais force est de constater que la Communauté n'a pu « fonctionner » qu'à la lueur de ce gigantesque embrasement. Remarquons en passant que, si nous avons dû assurer une telle fourniture d'énergie au départ de bois, notre Communauté aurait été amenée à sacrifier à peu près 11,8 tonnes de bois par habitant durant l'année 1998 ! Nous reviendrons sur cette question lorsque nous parlerons de la domestication de l'énergie solaire. Les pays d'Europe Occidentale sont bien placés dans le peloton des « énergivores », assez loin derrière les Etats-Unis d'Amérique et le Canada qui emportent la palme avec près de 8 TEP par habitant. Le Grand Duché de Luxembourg n'a rien à leur envier de ce point de vue, parce qu'il s'agit d'un petit pays où l'industrie lourde (sidérurgie), très gourmande, y est fort développée. Par contraste, des pays en voie de développement consomment de dix à cent fois moins d'énergie par habitant. A ce propos, on note d'ailleurs une assez bonne corrélation entre la consommation d'énergie d'un pays et son produit national brut, c'est-à-dire, la « richesse » qu'il produit. Plus près de notre quotidien de vie, voyons ce qu'il en est de la consommation finale d'énergie dans les *ménages* européens : les chiffres sont éloquents.

70 Avant de pouvoir être consommée, cette énergie doit être transformée puisqu'elle est souvent inutilisable à l'état brut : par exemple, le pétrole qu'il est impossible de brûler comme tel : il s'agit en effet d'un mélange beaucoup trop complexe d'hydrocarbures, aux propriétés physiques et chimiques trop larges. Il faut le passer en raffinerie d'où sortiront des produits aux caractéristiques bien définies. On parle ainsi de

rendement de production : pour ce qui concerne l'essence de la voiture automobile, décompte fait de l'énergie dépensée pour l'exploitation, le transport et les opérations de raffinerie, 85 % du contenu énergétique extrait du gisement de pétrole aboutit dans le réservoir du véhicule, ce qui, en définitive, n'est pas trop mal¹¹.

Tableau I.2 Consommation brute d'énergie des ménages, par habitant et par an (1998)¹²

PAYS	Consommation (TEP / habitant x an)
UE (15)	0,67
Luxembourg	0,99
Belgique	0,97
Angleterre	0,72
France	0,66
Portugal	0,26

71 L'énergie thermique destinée à la production d'électricité est un autre exemple : les unités de production de courant électrique sont alimentées par de la vapeur que l'on convertit en électricité dans les turbines, moyennant un rendement de transformation de 40 à 45 % dans les centrales classiques et de 34 % dans les centrales nucléaires. Ensuite viennent les pertes dues à la distribution et là encore l'électricité est lourdement pénalisée puisque 6,75 % de la production en est dissipée en chaleur dans les transformateurs et les câbles (haute et, surtout, basse tension) avant d'arriver chez le consommateur. Il faut donc se rendre compte que, lorsque l'on consomme 100 joules d'énergie électrique, il a fallu, dans la centrale qui l'a produite, dépenser de 300 joules (centrale classique) à 370 joules (centrale nucléaire)

d'énergie thermique. L'énergie électrique est une véritable fée, disponible dans les moindres recoins de la maison, prête à rendre une infinie variété de précieux services ... mais ce sont des services qu'elle fait payer très cher en énergie gaspillée. Le bilan de toutes ces transformations est tel que, des 1.435 MTEP d'énergie entrées en 1998 dans la Communauté, on n'a retiré que 945 MTEP utiles, soit donc sous un rendement global de 65,8 %.

72 Les réserves consommées avec un tel appétit sont relativement diversifiées, car la crise du pétrole a initié la prudence qui consiste à puiser à différents râteliers. Une fois de plus, les statistiques de la Communauté Européenne constatent que le pétrole (en fait, ses dérivés) reste l'enfant chéri des consommateurs de joules, et on sait pourquoi : il est liquide, facile à manipuler, dense en contenu énergétique et, pour le moteur automobile, il reste incontournable. Mais, à notre grand dam, nous n'en contrôlons pas les sources et le malaise est grand de dépendre à ce point de l'étranger pour nos fournitures. La même constatation doit d'ailleurs être faite pour les autres sources d'énergie. Et la facture est lourde à digérer ... mais on la règle volontiers puisqu'elle assure, pour une bonne part, l'élan économique, un confort dont on ne peut plus se défaire et la liberté que garantit la voiture personnelle. On constate aussi que, en Europe, le secteur domestique et tertiaire a absorbé 40,7 % de l'énergie consommée ; l'industrie est intervenue pour 27,7 % et le secteur des transports pour 31,6 % (surtout le transport routier : 26,5 %). La production de substances à base de dérivés du pétrole (plastiques, fibres, ...) a détourné une fraction de celui-ci vers des usages non énergétiques, ce qui correspond à environ 6,8 % de l'énergie disponible après les transformations. On comprend ainsi qu'envoyer au rebut ou incinérer des matières plastiques sans en récupérer les calories, équivaut à gaspiller une fraction appréciable de l'énergie importée à grands frais. Il convient aussi de relever

l'énorme gâchis que représentent les pertes d'énergie à l'utilisation. Bien sûr, on ne peut imaginer à ce stade un rendement unitaire mais on se rend compte que, avec 34 % de pertes, des progrès énormes devraient pouvoir être réalisés qui auraient une incidence très sensible sur la consommation.

- 73 L'énergie, symbole de richesse et de bonheur ? Peut-être ... du moins jusqu'à un certain point, car cette fraction de l'énergie qui contribue le plus à l'élaboration de notre richesse (les combustibles fossiles) est extraite d'un coffrefort qui se vide progressivement : nous dévorons le capital au lieu de nous contenter des intérêts. D'autre part, la combustion de cette manne libère dans l'atmosphère des tonnages énormes de CO₂ dont l'accumulation, avec d'autres « gaz à effet de serre », est responsable d'un accroissement significatif de la température moyenne de la terre depuis 1900. L'euphorie risque d'être de courte durée si on ne découvre pas, dans les meilleurs délais, d'autres coffres bien remplis d'énergies qui soient neutres pour la qualité de l'environnement.

11. Les savants et l'énergie

- 74 1773. Antoine Laurent de LAVOISIER (1743-1794), par une série d'expériences péremptoires sur la décomposition d'oxydes métalliques, balaye la théorie du phlogistique qu'avait mise en vogue le chimiste Georg-Ernest Stahl et met définitivement en pièces la théorie des quatre éléments d'Empédocle sur lesquels Aristote fonda sa conception de la matière¹³. En 1777, Lavoisier met en évidence le rôle de l'oxygène dans la respiration. En collaboration avec Laplace, il fonde la calorimétrie (1781) et explique la formation de l'eau comme résultant de la combustion de l'hydrogène dans l'oxygène (1783-1785).
- 75 Benjamin THOMPSON – Comte de Rumford (1753-1814), deuxième époux de la veuve de Lavoisier, constate que, lors

du forage de l'âme des canons, l'énorme quantité de chaleur dégagée par l'opération ne se traduit par aucun changement de poids de l'ensemble des matériaux avant et après l'opération. Il infirme déjà l'image développée plus tard par Carnot selon laquelle la chaleur est un « fluide » matériel (le « calorique »), comparable, par exemple, à l'eau alimentant un moulin. Dans la même perspective, des pesées effectuées sur de la glace et sur l'eau résultant de sa fusion ne manifestent aucune différence de poids.

- 76 1824. Nicolas Sadi CARNOT (1796-1832) publie « Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance ». Cette œuvre fait de lui le fondateur de la thermodynamique. Il y constate qu'une machine thermique doit puiser de l'énergie thermique à une source à haute température (une flamme, par exemple) et, après l'avoir convertie en travail, s'en débarrasser en la transférant vers un « puits » à basse température. Il affirme que le rendement de la transformation de la chaleur en travail est déterminé par la différence entre la température de la source chaude et la température du puits froid.
- 77 1845. James Prescott JOULE (1818-1889) mesure l'équivalence du travail et de la chaleur qui ne sont, en définitive, que deux formes possibles de l'énergie. En 1841, il avait déjà mesuré l'équivalent thermique de l'énergie électrique.
- 78 1851. William THOMSON – Lord KELVIN (1824-1907) publie « On the dynamical theory of heat », article dans lequel il réconcilie les idées de Carnot et de Joule et fonde ainsi la théorie des effets mécaniques de la chaleur. On lui doit l'introduction du concept de température absolue.
- 79 1850. Rudolf CLAUSIUS (1822-1888). Dans son article intitulé « Sur la puissance motrice de la chaleur », Clausius analyse avec soin les principes de la thermodynamique. Il propose d'expliquer la chaleur sur base du mouvement des atomes et introduit la notion d'entropie.

- 80 1876. Ludwig BOLTZMANN (1844-1906) adopte le concept mécaniste de probabilité des états d'un gaz en développant une statistique des états microscopiques des molécules. Il élabore une formule qui lie, à une constante près, l'entropie d'un gaz au logarithme de la probabilité de son état ($S = k \ln P$).
- 81 1895. Svante ARRHENIUS, un chimiste suédois, suggère que le brûlage de combustibles fossiles doit accroître les concentrations de CO₂ dans l'air et donc altérer l'équilibre thermique de la terre.
- 82 1905. Albert EINSTEIN (1879-1955) pose le principe de l'équivalence de l'énergie et de la matière
- 83 1958. Charles D. KEELING entreprend de mesurer systématiquement la concentration de CO₂ dans l'air grâce à un laboratoire situé sur le volcan Mauna Loa à Hawaï.

12. Ouvrages consultés

- 84 Cassedy, E.S. and P.Z. Grossman : "Introduction to energy : resources, technology and society", Cambridge University Press, 1990.
- 85 Duby, G. : « Miroir du Moyen Age, Institutions, Figures, Savoir », Chap. IV, le Servage : Encyclopaedia Universalis, Paris (1999).
- 86 EUROSTAT : Statistiques de base de la Communauté, Office des Publications Officielles de la Communauté Européenne, CECA-CEE-CEEA ; Luxembourg (2001).
- 87 Fenn, J.B. : "Engines, energy and entropy" ; Freeman, 1982, 293 p.
- 88 Kalhammer, F.R. : "Energy-storage systems" ; Scientific American, vol. 241, n° 6, December 1979, pp.42-51.
- 89 Martin, J.-M. : « L'économie mondiale de l'énergie », Ed. La Découverte, 1990.
- 90 Ngo, Chr. « L'énergie : ressources, technologies et environnement » Dunod, UniverScience (2002).

Notes

1. Autres préfixes : Téra = 10^{12} , Péta = 10^{15} et Exa = 10^{18} .
2. Et non pas « kW/h » (kW par heure) comme on le lit trop souvent !
3. Le servage diffère de l'esclavage en ce qu'il autorisa une certaine liberté économique et sociale permettant de procréer et d'assurer ainsi un certain essor démographique de la classe asservie : Georges DUBY in « Miroir du Moyen Age, Institutions, Figures, Savoir », Chap. IV, le Servage : Encyclopaedia Universalis, Paris (1999).
4. Ou bien encore des molécules d'air (vent) heurtant la surface des pales d'une éolienne.
5. A l'exception des fusées, des canons, ... qui sont des « moteurs » non cycliques.
6. Newcomen s'était lui-même inspiré de la machine inventée par Savery en 1698 et qui fut la toute première à fonctionner effectivement.
7. Dans l'exemple du moulin à eau, il est impossible d'avoir un bief inférieur situé à une altitude inférieure à celle du niveau de la mer.
8. Et si l'énergie s'écoule, c'est en un mouvement spontané qui s'effectue donc au prix d'une dégradation progressive !
9. Tiré de Ngo ; 2002.
10. A raison d'environ 450 € par TEP, on perçoit le gouffre que représente la facture énergétique européenne.
11. En anglais, pour exprimer ce bilan, on utilise l'expression « well to tank -WTT» (du puits au réservoir).
12. Source : Eurostat.
13. ... pour le plus grand malheur de la science occidentale du Moyen Age qui s'y référa obstinément plus, sans doute, pour des raisons de respect d'une tradition séculaire que de réflexion scrupuleuse.

© Presses universitaires de Louvain, 2004

Conditions d'utilisation : <http://www.openedition.org/6540>

Référence électronique du chapitre

RONNEAU, Claude. *Chapitre 1. Qu'est-ce que l'énergie ?* In : *Énergie, pollution de l'air et développement durable* [en ligne]. Louvain-la-Neuve : Presses universitaires de Louvain, 2004 (généré le 24 septembre 2019). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/pucl/622>>. ISBN : 9782875581716.

Référence électronique du livre

RONNEAU, Claude. *Énergie, pollution de l'air et développement durable*. Nouvelle édition [en ligne]. Louvain-la-Neuve : Presses universitaires de Louvain, 2004 (généré le 24 septembre 2019). Disponible sur Internet : <<http://books.openedition.org/pucl/607>>. ISBN : 9782875581716.

Compatible avec Zotero