L'ENERGIE

Pierre BOUTELOUP

I- Définition de l'énergie

L'énergie est la mesure unifiée des différentes formes de mouvement. La loi de la conservation de l'énergie signifie que pour un système isolé, ou l'univers tout entier, le mouvement total se conserve ; c'est-à-dire que si quelque part, quelque chose se met en mouvement ou accélère, c'est que, autre part, quelque chose a ralenti ou s'est arrêté.

L'énergie est la mesure qui permet d'associer au mouvement d'un objet un nombre et ainsi de convertir quantitativement un mouvement d'un objet en un autre mouvement d'un autre objet. L'examen de ce qui bouge quand il y a un mouvement quelque part, donc de l'énergie à cet endroit, mène aux différentes formes d'énergie.

II- Les différentes formes d'énergie

La plus simple des formes d'énergie est celle associée à un mouvement macroscopique donc d'un objet de la vie courante. On l'appelle énergie cinétique. La formule est $E = ½ m v^2$. Si la masse *m* est exprimée en kilogramme, la vitesse *v* en m/s, alors l'énergie est exprimée en Joules : *J*. Un Joule élève la température de 1 gramme d'air de 1,004 degrés.

Une autre forme d'énergie est l'énergie interne thermique lié au fait qu'un corps est chaud. Mais on sait que la température est associée à l'agitation thermique des molécules. Il s'agit donc en fait de l'énergie cinétique d'agitation thermique des molécules.

Le mouvement est moins apparent pour toutes les énergies potentielles associées à la mise à distance d'objets qui s'attirent : énergie potentielle de pesanteur E = m g h (m est la masse en kilogramme), *g* est la mesure de l'attraction terrestre (g = 9,8 N/kg) et *h* l'altitude en mètre. Il existe également une énergie potentielle électrique. Un exemple d'énergie potentielle électrique est l'énergie chimique associée à la force électrique qui lie les atomes pour faire des molécules. Un autre exemple d'énergie potentielle électrique est l'énergie potentielle élastique d'un ressort ou d'un élastique tendu, énergie associée à l'éloignement des atomes (qui interagissent entre eux par des forces électriques) de leurs positions d'équilibres. On a aussi l'énergie potentielle de l'interaction forte qui correspond à l'énergie nucléaire. Le Soleil utilise cette énergie par nature gigantesque, en transformant par fusion l'hydrogène en hélium.

Il est possible de sauter la fin de ce paragraphe très théorique et non indispensable.

Cette énergie potentielle de l'interaction forte vient du fait que le proton qui constitue le noyau de l'atome d'hydrogène est en fait constitué de trois quarks : *u*, *u*, *d*, qui s'attirent par l'interaction forte. La force entre deux quarks est de l'ordre de *10* tonnes ! Mais on a montré que cette énergie potentielle correspond en fait à l'énergie cinétique des gluons de masses nulles (pour des objets de masses nulles, la formule ½ m v^2 ne s'applique plus) qui en faisant la navette entre les quarks assurent la mise en œuvre de cette force. Donc on voit sur cet exemple que même les énergies potentielles correspondent au mouvement de particules. Mais ce mouvement ne dépend pas de la température mais uniquement de la position des particules qui s'attirent.

Qu'en est-il de la formule E = m C^2 d'Einstein (*C* est la vitesse de la lumière) ? L'énergie liée à une masse immobile correspond-elle bien à un mouvement ? Et bien oui ! Toute la masse des objets qui nous entourent correspond à la masse de protons (ou de neutrons ; le neutron est une particule très voisine du proton). La masse des trois quarks à l'intérieur correspond à environ 1% de la masse du proton qui est donc entièrement associée à l'énergie cinétique des quarks et des gluons qui s'agitent à l'intérieur. La preuve que tout ceci est vrai est qu'on a pu calculer récemment avec cette théorie (la chromodynamique quantique) la masse du proton et on trouve exactement la masse mesurée. A toute énergie quelque part correspond donc des particules qui s'agitent à cet endroit, et l'énergie est la mesure de ce mouvement.

On voit aussi ici dans de tels cas extrêmes (relativité d'Einstein), ce qui est un peu compliqué il faut le reconnaître, que la masse d'un objet composé n'est pas égale à la somme des masses des constituants. La masse ne se conserve pas d'ailleurs ! Par contre, on peut toujours sommer les énergies, et l'énergie se conserve pour un système isolé.

III- Différence entre les notions de sources d'énergie et de formes d'énergie

La notion de source d'énergie est au programme du cycle 3 de l'école primaire, tandis que la notion de forme d'énergie n'y est pas ; mais elle est au programme du CRPE. Ainsi à l'école on peut parler d'énergie solaire (on distingue le solaire photovoltaïque avec production d'électricité et le solaire thermique : chauffe-eau solaire). La source d'énergie est le soleil. Mais la forme sous laquelle l'énergie est stockée dans le réservoir d'énergie que constitue le Soleil est l'énergie nucléaire. On peut parler à l'école d'énergie éolienne (forme d'énergie = énergie cinétique de l'air) ; d'énergie hydraulique (potentielle de pesanteur) ; d'énergie géothermique (énergie thermique de la Terre). L'énergie

musculaire (cycle 3) est de l'énergie chimique (CRPE), les énergies fossiles sont également des énergies chimiques.

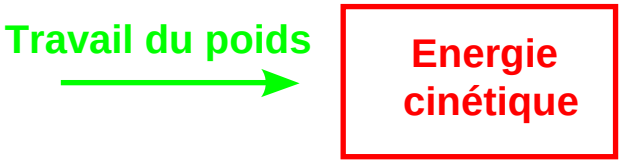
IV- Les transferts d'énergie

Il y a deux modes de transferts d'énergie, c'est-à-dire de passage de l'énergie d'un ensemble d'objets à un autre ensemble d'objets : le travail noté ***W*** et la chaleur notée ***Q***.

Il y a **travail** quand un objet est soumis à une force *F* qui se déplace sur une distance *d*. W = F d. *F* en Newtons, *d* en mètres. On distingue le travail mécanique quand c'est un objet usuel qui est soumis à une force et le travail électrique associé au transport d'énergie par le courant électrique, c'est à dire par des électrons qui circulent dans un fil en étant soumis à une force.

Montrons quelques diagrammes d'énergie associés à un travail.

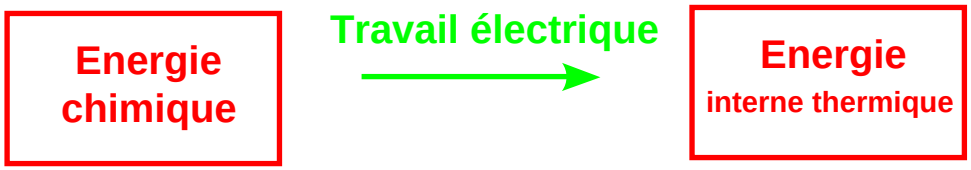
Un objet tombe :



Un objet s'arrête en frottant sur le sol :

Calculons la distance d'arrêt pour une voiture de une tonne à 100 km/h toutes roues bloquées. Le coefficient de frottement sur route mouillée est de 30%. F = 0,3 m g = 0,3 X 1000 X 9,8 = 2940. ½ m v^2 = F d. d = $\frac{\frac{1}{2} m\, v2}{F} = \frac{0{,}5\ X\ 1000\ X \left(\frac{100}{3{,}6}\right)2}{2940}$ = 131 m. Si on fait le même calcul à 140 km/h, on trouve du fait que l'énergie cinétique est proportionnelle au carré de la vitesse : 260 m !

Une pile électrique branchée sur une lampe à incandescence :



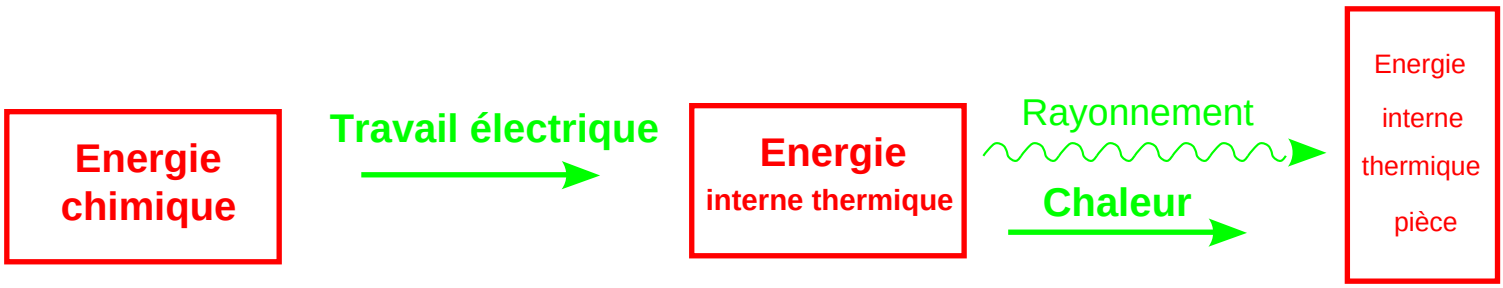
L'autre mode de transfert d'énergie est la **chaleur** qui a lieu quand le transfert d'énergie est associé aux degrés de libertés microscopiques (agitation thermique par exemple), sans variation de degrés de libertés macroscopiques (position par exemple). Il y a trois modes de transfert d'énergie par chaleur. On a tout d'abord le **rayonnement**. C'est ainsi que le Soleil donne de l'énergie à la Terre.

Un exemple d'application de cela est l'effet de serre. L'énergie du Soleil arrive sur la Terre par rayonnement visible (lumière) et l'atmosphère étant transparente à ce rayonnement, elle arrive jusqu'au sol qui est chauffé. Le sol évacue alors en partie cette énergie par rayonnement infrarouge. Mais les gaz à effet de serre (CO_2, H_2O, CH_4) absorbent cet infrarouge, chauffent et en renvoient alors, en rayonnant par eux-mêmes, une partie vers le sol, diminuant l'efficacité du refroidissement du sol. Sans l'effet de serre, la température sur la Terre serait de -18°C, et la vie ne pourrait pas exister sur la Terre.

Notons que dans une serre de jardinier, le principal effet qui garde l'énergie n'est pas l'effet de serre, mais le blocage de la convection (l'air chaud est empêché de s'élever comme il aurait tendance à le faire du fait qu'il est moins dense). En effet, les serres de jardiniers sont souvent en polyéthylène qui laisse passer l'infrarouge !

Il y a ensuite la **conduction thermique** où l'agitation thermique se propage lentement de proche en proche. On distingue à ce sujet les isolants et les conducteurs thermiques. Quand on touche un métal, on a une sensation de froid, car sa température ne varie presque pas et il reste frais quand on le touche, l'énergie de la main étant évacuée à distance. Quand on touche du polystyrène, on a une sensation de chaud car l'énergie donnée par la main reste sur place et élève beaucoup la température du polystyrène. Un glaçon fond beaucoup plus vite sur une plaque de métal que sur une plaque de polystyrène. Le polystyrène est un isolant car il contient de l'air (comme le bois et la neige). En effet, tous les gaz sont des isolants (principe du double vitrage), par le fait qu'ils sont peu denses (peu de chocs de molécules). Les métaux sont de très bons conducteurs thermiques grâce à leurs électrons libres qui circulent. Le meilleur isolant est le vide, mais dans une bouteille thermos, en plus d'avoir deux parois de verre séparées par du vide, il faut transformer les parois en miroirs pour empêcher le transfert d'énergie par rayonnement.

On peut maintenant compléter la chaîne d'énergie de la lampe.



On a enfin le transfert d'énergie par **convection**, lorsqu'il est associé au déplacement d'un fluide. On distingue la convection libre, lorsque la circulation du fluide est spontanée. Un exemple est le transport d'énergie par le Gulf Stream qui réchauffe l'hémisphère nord. On a aussi la convection forcée quand le fluide est mis en mouvement par une pompe. C'est le cas pour la pompe à eau pour le refroidissement d'un moteur de voiture.

Pour le réchauffement d'un corps par apport d'énergie, on peut écrire :

Q = m c (t2 – t1) avec la masse *m* en *kg*, *c*, la capacité thermique massique en J kg^{-1} °C^{-1}.

Utilisons cela pour calculer la température finale quand on mélange un verre d'eau à 80°C avec deux verres d'eau à 5° de même contenance : la conservation de l'énergie donne, puisque l'énergie donnée par l'eau chaude est égale à l'énergie reçue par l'eau froide.

$$m\ c\ (t_{finale} - t_{chaud}) + 2\ m\ c\ (t_{finale} - t_{froid}) = 0$$

$$3\ t_{finale} = t_{chaud} + 2\ t_{froid} \qquad t_{finale} = \frac{80+2\ X\ 5}{3} = 30\ °C$$

Quand on transforme de l'eau liquide en vapeur, le volume est multiplié par 1000. Les molécules qui s'attirent par des forces électriques s'éloignent les unes des autres, ce qui demande beaucoup d'énergie potentielle électrique. Pour vaporiser 1 kg d'eau, il faut 2256000 Joules. On dit que la chaleur latente de vaporisation de l'eau est de L = 2256 kJ/kg ; Q = L m.

On peut ainsi transporter de l'énergie d'une manière très efficace avec convection associée à un changement d'état. Dans le cycle de l'eau, l'eau des océans s'évapore ce qui consomme beaucoup d'énergie. Ensuite, la vapeur monte par convection libre, puis en altitude cette vapeur se liquéfie en nuages et il pleut. Cette liquéfaction dégage beaucoup d'énergie. L'atmosphère évacue

ainsi beaucoup d'énergie vers le haut. Sans eau sur la Terre, la température moyenne au niveau du sol serait de 70°C. Un réfrigérateur fonctionne sur ce principe mais dans l'autre sens : on force la vaporisation d'un liquide dans le réfrigérateur en faisant le vide (la température d'ébullition diminue avec la pression) ce qui provoque du froid. La vapeur est amenée derrière le réfrigérateur où elle est comprimée et liquéfiée ce qui libère l'énergie amenée là par la convection forcée.

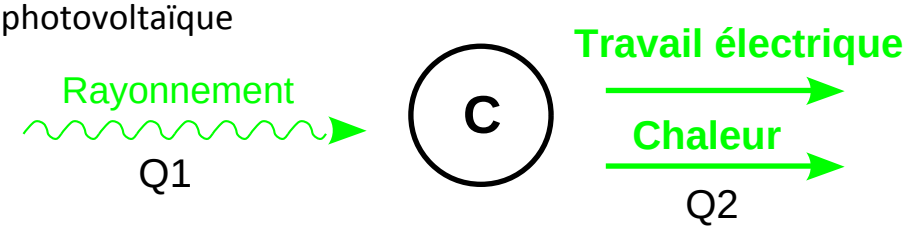
Dans un transfert d'énergie, le débit d'énergie s'appelle la **puissance** et P = W/t ou P = Q/t avec *W* ou *Q* en Joules, et *t* en secondes, la puissance se mesure en watt (*w*). Pour EDF, on mesure le temps en heures, la puissance en kilowatt (*kw*) et le travail *W* se mesure alors en kilowatt heures notés *kwh*. Rappelons la formule d'électricité P = U I.

Calculons par exemple le temps qu'il faut pour faire disparaître toute l'eau d'une casserole contenant un litre d'eau (donc 1 kg), par ébullition sur une plaque électrique de 1500 w. W = P t t = W/P = 2256000/1500 = 1504 s t = 1504/60 = 25 mn (minutes).

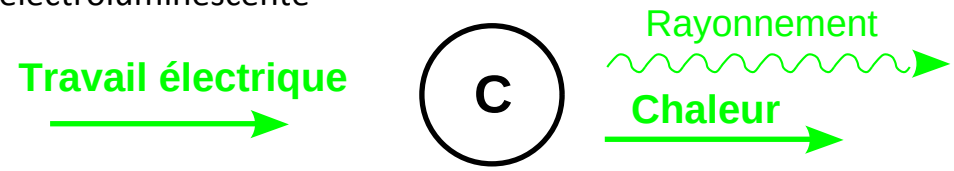
V- Convertisseurs d'énergie

Un convertisseur d'énergie transforme un transfert d'énergie en un transfert d'un type différent. Donnons quelques exemples :

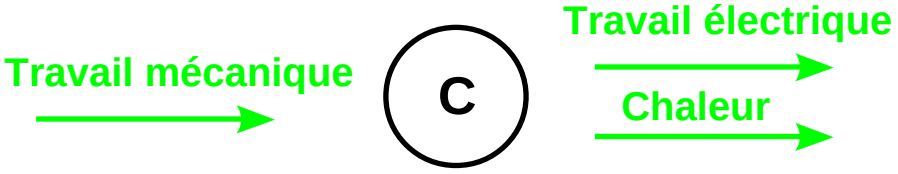
Cellule photovoltaïque



Diode électroluminescente

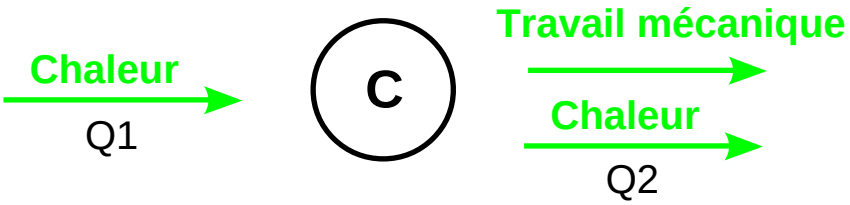


Alternateur (génératrice de courant électrique)



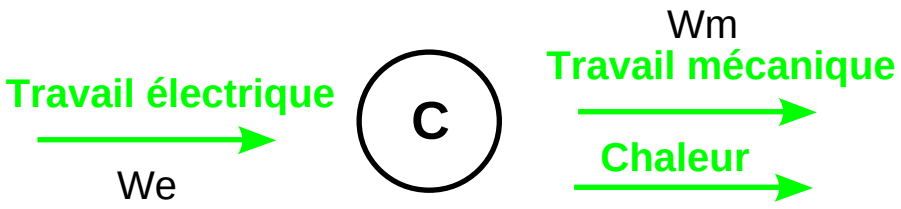
Le fait qu'on obtienne toujours de la chaleur correspond à la dégradation de l'énergie (augmentation d'entropie).

Moteur thermique



Cela nécessite que le milieu ambiant soit plus froid que la source chaude qui donne de la chaleur !

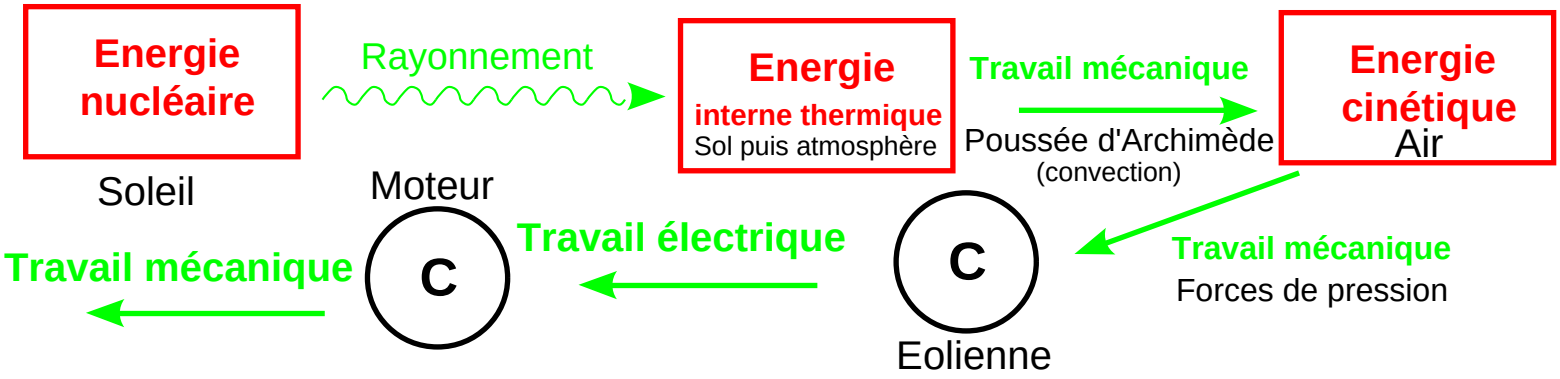
Moteur électrique



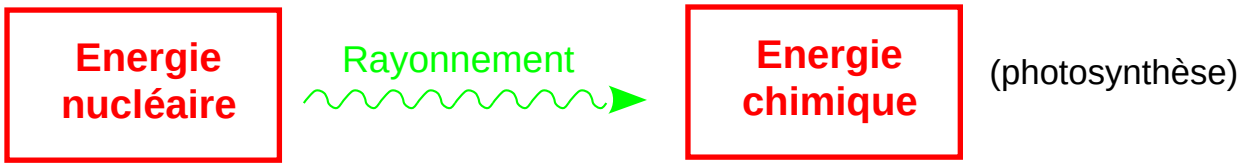
On voit qu'on a toujours à l'arrivée un transfert d'énergie par chaleur qui ne sert à rien. Prenons comme exemple la cellule photovoltaïque ou le moteur thermique. On définit le rendement par $\rho = W/Q1$. Pour le moteur électrique, on a $\rho = W_m/W_e$.

VI- Chaînes d'énergies

On peut avoir une suite de transformations et de transfert d'énergie très longue. Prenons un moteur électrique qui fonctionne grâce à une éolienne :



De même, l'énergie du pétrole vient en fait du Soleil :



VII- Energies renouvelables et développent durable

Une énergie est renouvelable si elle ne s'épuise pas à l'échelle de temps d'un grand nombre de générations humaines. Tel est le cas des énergies éoliennes, hydrauliques géothermiques etc. En fait les seules énergies non renouvelables

sont les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) et l'énergie nucléaire actuelle (par fission).

Un concept un peu différent est le concept de développent durable. Les énergies fossiles ne sont pas compatibles avec un développent durable parce qu'elles s'épuisent, mais aussi à cause du CO_2 dégagé dans l'atmosphère qui provoque le réchauffement climatique en augmentant l'effet de serre (à moins que l'on arrive à séquestrer en profondeur le CO_2). Mais détruire des forêts pour planter des palmiers pour faire des biocarburants correspond bien à une énergie renouvelable, mais peu compatible avec le développent durable. De même l'utilisation d'engrais puissants et de pesticides pour faire pousser le plus vite possible du colza par exemple pour faire des biocarburants, fabrique une énergie renouvelable, mais au prix d'une grande dégradation de l'environnement.

Quelques définitions :

Source d'énergie : ensemble des matières premières ou des phénomènes naturels utilisés pour produire de l'énergie.

Énergies fossiles : pétrole, gaz naturel et charbon ; énergies qui proviennent de la fossilisation des êtres vivants.

Énergie renouvelable : énergie qui ne s'épuise pas à l'échelle de temps d'un grand nombre de générations humaines.

Développement durable : le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs (rapport Brundtland 1987).

ÉNERGIES

- **POTENTIELLE**
  - Pesanteur ⟶ Énergie Hydraulique ; Marémotrice ; Vagues
  - Électrique ⟶
    - Condensateur de Flash d'appareil photo
    - Chimique (Musculaire ; Biomasse ; Pétrole etc)
    - Élastique (ressort ; élastique ; objet élastique déformé)
    - Magnétique
  - Nucléaire ⟶ Soleil ; Centrales nucléaires
- **CINÉTIQUE**
  - Objet en mouvement ⟶ Éolienne ; Marémotrice ; Vagues
  - Thermique (Agitation molécules) ⟶ Géothermie

TRANSFERTS DÉNERGIE

- **TRAVAIL**
  - Travail mécanique : Force qui se déplace
  - Travail électrique : Circuit électrique
- **CHALEUR**
  - Conduction thermique : contact d'un corps chaud avec un corps froid
  - Convection forcée ou non
  - Rayonnement thermique

Le rayonnement peut être non thermique. Ainsi dans le cas du four à micro-onde on a un rayonnement non thermique qui transfert de l'énergie qui est thermique à l'arrivée. Mais une antenne de télévision transfert de l'énergie par rayonnement qui devient un travail électrique au récepteur.