

## Définition et calcul de l'énergie

Document sur l'énergie en 3 parties  
1- L'énergie, définitions préliminaires  
2- Définition et calcul de l'énergie (ce document)  
3- Comparaisons et prix de l'énergie

Version 6 fichier energiedef6.odt du 09/11/12 JCM

Avant de pouvoir calculer la valeur de l'énergie, vous trouverez ici un essai de description des différentes formes que peut avoir l'énergie dans notre environnement.

L'énergie peut se transformer et se déplacer, passer d'une forme à une autre, de façon naturelle ou contrôlée par l'homme. L'énergie totale se mesure et sa valeur reste constante dans tout système fermé (c'est la première loi de la thermodynamique), mais elle se dégrade et ces transformations se font avec des pertes (le minimum des pertes est fixé par la deuxième loi de la thermodynamique). Nous donnons ici les équations tirées des lois de la physique pour le calcul de l'énergie sous toutes ses formes.

### 1 L'énergie dans l'histoire



Figure 1 : le mandala d'Empédocle (400 ans AC) ou cercle représentant les 4 éléments fondateurs, la terre, l'air, l'eau et le feu.

L'homme a essayé de comprendre son environnement en trouvant des éléments fondamentaux.

Les philosophes grecs au 5ème siècle avant J.-C. distinguent quatre éléments, la terre, l'eau, l'air et le feu. Ce dernier élément, le feu, représentant la lumière et la chaleur, c'est déjà **l'énergie** dont nous parlons aujourd'hui. La maîtrise du feu par nos ancêtres, c'est aussi la maîtrise de l'énergie.

**Question :** Y a-t-il des différences entre le feu (quatrième élément) et l'énergie dont on parle aujourd'hui dans les journaux (crise de l'énergie) ?

### 2 Définition de l'énergie

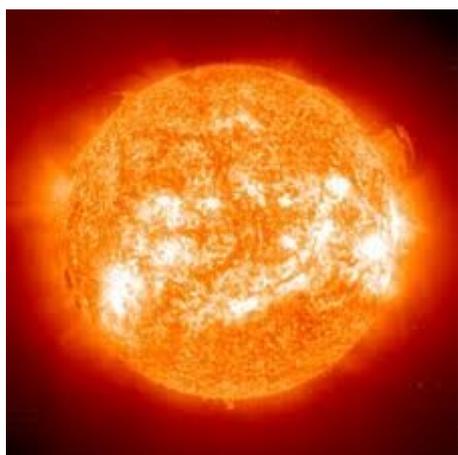


Figure 2 : photo du soleil, symbole de l'énergie depuis l'antiquité, source principale de l'énergie sur terre, qui nous apporte chaleur et lumière et assure l'existence de la vie. Le flux énergétique du soleil (la puissance) est de

$3.8 \cdot 10^{26} W$  et correspond à une constante solaire sur terre de  $1.3 kW / m^2$

Selon la réf. 1, l'énergie, c'est la **capacité de faire un travail et d'agir**.

L'énergie apparaît dans beaucoup de domaines et sous différentes formes. Nous nous limiterons ici exclusivement aux formes **d'énergies mesurables**. C'est l'énergie des physiciens, toujours mesurable (unité J ou Joule) et qui obéit à la loi de conservation de l'énergie. Dans un système isolé, l'énergie totale est invariante au cours du temps (première loi de la thermodynamique, jamais mise en défaut jusqu'à ce jour).

Il y a des formes d'énergies et des domaines où on est incapable de définir et de mesurer l'énergie. C'est le cas par exemple de l'énergie vitale et des différentes formes d'énergies dans le corps

## Définition et calcul de l'énergie

humain. Ces domaines sont exclus du présent document.

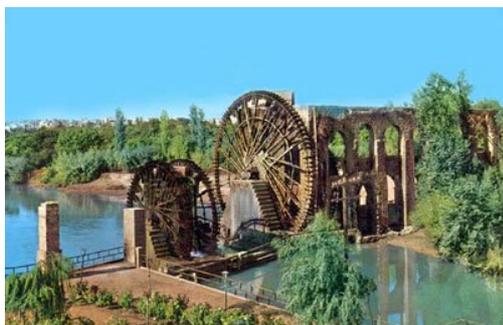
Toutes les autres formes d'énergies sont mesurables. Le travail mécanique, les corps en mouvement, la chaleur, la lumière et tous les rayonnements, l'énergie nucléaire, l'électricité, l'énergie chimique, les aliments etc.

Nous décrivons dans les chapitres suivants les différentes formes de l'énergie que nous connaissons et les lois et formules permettant de calculer et prévoir les énergies disponibles.

**Question:** faites une liste des énergies non solaires dont nous pourrions disposer sur terre.

*Réponses possibles:* le dégagement thermique de la terre, la marée lunaire, l'énergie atomique

### 3 Le travail ou l'énergie mécanique



*Figure 3 :* Une ancienne noria (en Syrie) permet de monter l'eau pour l'irrigation. Elle utilise l'énergie de la chute d'eau dans la rivière.

**L'énergie mécanique**, pour monter une charge ou faire avancer un objet, s'appelle aussi le travail.

Le travail, c'est l'énergie (E) fournie par une force (F) lorsque son point d'application se déplace. La force se mesure en N (Newton) et le déplacement est une distance

(d) mesurée en m (mètre).

Loi de l'énergie mécanique ou travail  $E = F \cdot d$  Attention, cette relation est **vectorielle**, il faut tenir compte des forces et déplacements dans toutes les directions pour calculer ou mesurer l'énergie mécanique correctement.

Attention aussi de distinguer la force F (N) et la masse m (kg). La loi de Newton nous enseigne que  $F = m \cdot a$  m masse en kg, accélération en  $m/s^2$ . L'attraction sur terre  $a = 9.81 m/s^2$ . Le terme de poids est ambigu, car il mélange les notions de force et de masse, source de nombreuses erreurs.

Notons ici la possibilité d'attendre avant de réaliser le déplacement (d) de la force (F). On parle alors d'énergie **potentielle**. Une masse, avant de tomber d'une certaine hauteur, a une énergie potentielle. On peut conserver le travail et avoir un stockage local de cette forme l'énergie.

**Exercice :** Calculez la hauteur (h en m) à laquelle on peut monter un poids de 1kg avec un énergie de  $E=1J$  sur terre.

*réponse :*  $h=0.1m$ .

### 4 l'énergie cinétique ou l'énergie du mouvement



*Figure 4 :* photo d'une balle de fusil à la sortie du canon. Un corps en mouvement peut avoir une énergie destructrice !

L'énergie cinétique d'un corps en mouvement est l'énergie qu'il possède du fait de son mouvement par rapport à un référentiel donné. Cette énergie E (unité J) dépend de la masse m (unité kg) du corps en mouvement et de sa vitesse au carré (v en  $m/s^2$ ). Elle est donc jamais négative.

## Définition et calcul de l'énergie

Loi physique de l'énergie cinétique

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Notez l'effet important de la vitesse, qui se trouve au carré dans le calcul de l'énergie.

Il y a aussi les corps en rotation qui ont une énergie de mouvement, comme la toupie et la terre. Elle est fonction du moment d'inertie de ce corps par rapport à l'axe de rotation  $mi$

(unité  $\text{kg m}^2$ ) et de la vitesse angulaire  $va$  (unité  $\text{rad/s}$ )

$$E = \frac{1}{2} mi \cdot va^2$$

Le mouvement de gaz ou de liquide correspond à un déplacement de matière, donc à une énergie cinétique. Pour calculer un flux d'énergie, il faut connaître la vitesse ( $v$ ) et la quantité de matière, c'est-à-dire la masse ( $m$ ) qui se déplace par unité de temps.

Les éoliennes exploitent une énergie cinétique produite par des différences de pression dans l'atmosphère sous l'influence du soleil, elles permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en travail. L'énergie des marées (déplacement de liquide) utilise le mouvement de l'eau dans des turbines.

On peut aussi classer dans cette catégorie toutes les vibrations et oscillations de corps solides, liquides et gazeux. Par exemple l'énergie d'un son dans l'air, l'énergie d'une corde vibrante.

Notons au passage le déplacement possible de l'énergie grâce à ce mode cinétique. On peut transporter l'énergie là où on en a besoin.

**Exercice** : calculez la vitesse d'un corps de 1kg s'il a une énergie cinétique de 1J

*réponse* :  $v = 1.4 \text{ m/s}$

## 5 La chaleur ou l'énergie thermique



*Figure 5 : Locomotive à vapeur (du Vivarais en France). Elle utilise l'énergie thermique du charbon pour avancer.*

Il faut de l'énergie pour réchauffer un corps. C'est aussi l'énergie cinétique qu'il faut donner à ses atomes et molécules pour le réchauffer.

Une ancienne unité de mesure de la chaleur est la calorie (cal). La quantité de chaleur de 1 calorie correspond à l'énergie qu'il faut pour chauffer 1 gramme d'eau de 1 degré centigrade.

La correspondance énergétique est **1 calorie = 4.18 Joules**

$$1 \text{ cal} = 4.18 \text{ J}$$

Attention, la calorie n'est pas une unité SI, mais elle est très pratique pour les calculs de réchauffements.

L'énergie thermique peut être générée par combustion. Quelques valeurs indicatives de carburants : le bois c'est 15 à 20 MJ/kg, le charbon 30 MJ/kg, le pétrole 40 MJ/kg

L'énergie thermique, c'est aussi l'énergie générée par **toutes les pertes** lors des transformations de l'énergie. C'est souvent un effet non désiré, par exemple un moteur, une lampe et le canon du fusil chauffent. Il faut parfois des radiateurs et des ventilateurs

pour évacuer cette chaleur perdue.

L'énergie thermique est considérée comme **dégradée** par rapport aux autres énergies (énergie solaire de rayonnement, énergie cinétique). En effet, pour transformer cette énergie thermique en énergies non dégradées, il y a une contrainte importante due à la 2ème loi de la thermodynamique. Le rendement de conversion ne peut dépasser le **rendement de Carnot**, donné par la loi de Carnot.

Il faut deux températures pour faire circuler un flux de chaleur, la chaude  $T_c$  (K) et la froide  $T_f$  (K). Attention aux unités des températures, en degrés Kelvin (K). Le rendement de

Carnot ( $r_C$ ) est donné par la 2ème loi de la thermodynamique :  $r_C = 1 - \frac{T_f}{T_c}$

**Exercice** : calculez le rendement maximum de la locomotive si  $T_f=300K$  et  $T_c=600K$

**Solution** :  $r_C=0.5$ , donc plus de la moitié de l'énergie est toujours perdue en chaleur !

## 6 La lumière et les rayonnements

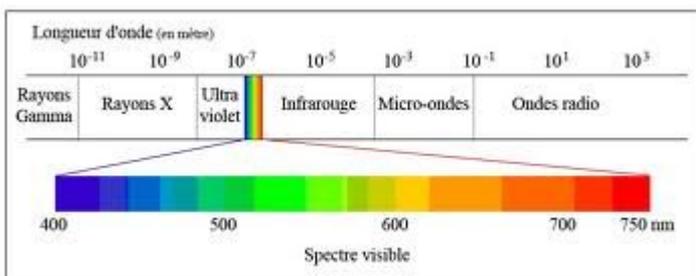


Figure 6, spectre des rayonnements électromagnétiques.

Le rayonnement est caractérisé par sa longueur d'onde. Une partie du spectre est visible par l'œil ; pour les autres fréquences, il faut des détecteurs pour les remarquer et les mesurer. Tous les rayonnements ont une **énergie**.

Par exemple, les UV ne se voient pas mais peuvent faire des brûlures sur la peau ! Certains fours dans les cuisines utilisent des micro-ondes. Ce sont donc des rayonnements d'énergie.

L'énergie du soleil nous parvient par de multiples rayonnements : ondes électromagnétiques, dont les ondes radio, la lumière, les UV, infrarouge, rayons gamma etc. Le rayonnement est composé de photons, des particules énergétiques sans masse.

La loi de l'énergie d'un photon montre que son énergie  $E$  est proportionnelle à sa fréquence  $f$  :  $E = h \cdot f$   $E$  (J) énergie du photon,  $h$  est la constante de Planck ( $h \approx 6,62 \times 10^{-34}$  J s), et  $f$  (Hz) la fréquence du rayonnement.

Notons encore la loi de toutes les ondes, reliant sa fréquence  $f$  (Hz), sa longueur d'onde  $\lambda$  (m) et sa vitesse de déplacement  $v$  (m/s) :  $v = f \cdot \lambda$ . La vitesse de déplacement des ondes dépend du milieu qu'elles traversent. Pour les ondes électromagnétiques, on peut dire que la vitesse  $v$  est celle de la lumière,  $v = c = 3 \cdot 10^8$  m/s donc une constante. La relation devient  $c = f \cdot \lambda$  et montre que  $f$  ou  $\lambda$  permet de caractériser l'onde et sa couleur si elle est visible (voir la figure 6)

L'unité de mesure de l'intensité lumineuse est le cd (Candela) qui est une unité fondamentale, celle du flux lumineux est le lm (Lumen). On obtient le flux lumineux en multipliant l'intensité lumineuse par l'angle solide (en sr ou stéradian).

L'équivalent énergétique du flux lumineux s'obtient avec la formule  $683 \text{ lm} \approx 1 \text{ W}$  qui

## Définition et calcul de l'énergie

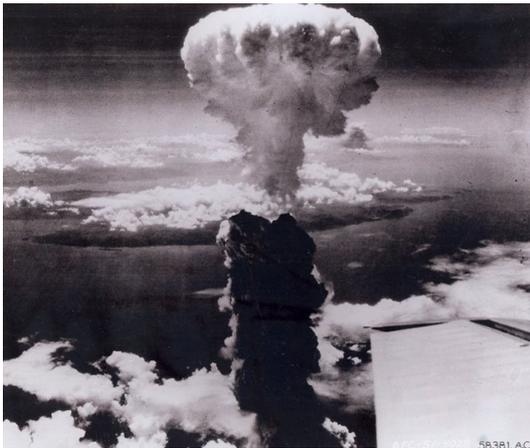
indique la puissance (W) correspondant au flux lumineux. On dit ainsi que le rendement maximum (100 % de la puissance convertie en lumière) d'une lampe électrique est de 683 lm/W.

Notez que cette forme d'énergie, le rayonnement, comme l'énergie cinétique, est une énergie qui se déplace et qu'on peut difficilement la conserver sans la transformer.

**Exercice** : calculez l'énergie d'un photon vert ( $\lambda=550\text{nm}$ )

*Solution* :  $E=h f = h c / \lambda = 0.36 \cdot 10^{-18} \text{ J}$

## 7 L'énergie nucléaire



*Figure 7 : Champignon atomique de la bombe A au plutonium de Nagasaki en 1945 au Japon, symbole de la puissance nucléaire.*

C'est Einstein qui a, le premier, affirmé que la matière (la masse) et l'énergie sont équivalentes.

La formule célèbre indique que  $E = m \cdot c^2$ , l'énergie E (en J) est proportionnelle à la masse m (en kg), c étant une constante, la vitesse de la lumière.

C'est une affirmation qui réduit la matière (la terre selon les anciens) en énergie. Remarquez

qu'Einstein n'a pas dit qu'on pouvait créer de la matière avec de l'énergie.

Notez encore que l'énergie solaire, c'est aussi de l'énergie nucléaire !

**Exercice** : quelle énergie dans 1g de matière ?

*Solution* :  $E = 0.001 \times (3 \cdot 10^8)^2 = 90 \cdot 10^{12} \text{ J} = 90 \text{ TJ}$

## 8 L'énergie électrique et magnétique



*Figure 8 : Photo d'un éclair. La foudre est une manifestation naturelle de l'énergie électrique.*

Les énergies électriques et magnétiques utilisent les charges positives et négatives (ions, électrons).

L'énergie électrique est celle dont on dispose aujourd'hui dans tous nos locaux, habitation et travail. On peut la générer avec l'eau de nos barrages (le travail, comme pour la noria) ou avec des moteurs. Elle est aussi dans la nature.

L'énergie magnétique est celle des aimants et des bobines. C'est aussi l'énergie électromagnétique des rayonnements du chapitre 6.

On calcule l'énergie électrique à partir du courant I (en Ampère ou A), de la tension U (en Volt ou V) et de la

## Définition et calcul de l'énergie

durée  $t$  (en seconde ou s). L'énergie  $E$  (en Joule ou J)  $E = U \cdot I \cdot t$

L'énergie électrique est généralement facturée en kWh

**Exercice** : calculer (en J) l'énergie de 1 kWh

*Solution* :  $E = 1000 \times 3600 = 3.6 \text{ MJ}$

Cette énergie est distribuée par des fils et câbles dans toutes les maisons civilisées.

Les électriciens utilisent les composants R, C et L. Leur comportement du point de vue énergétique est décrit ci-dessous.  $U$  et  $I$  sont les valeurs rms de la tension et du courant dans le composant.

1. La **résistance**  $R$  est caractérisée par sa valeur  $R$  (en Ohm ou  $\Omega$ ). Elle génère des pertes qui se traduisent par un dégagement de chaleur. L'énergie électrique perdue en chaleur est donnée par l'équation  $E = R \cdot I^2 \cdot t$ . Il n'y a pas d'autre énergie dans une résistance.
2. Le **condensateur**  $C$  a une capacité  $C$  (en Farad ou F) et contient une énergie électrique  $E$  (J)  $E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$
3. La **bobine** ou self a une inductance  $L$  (en Henry H) et contient une énergie magnétique  $E$  (J)  $E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$

Dans la nature, on peut voir les effets de l'énergie électrique lors des orages, où de grosses charges électriques dans les nuages créent les éclairs. Il y a aussi des tentatives de récupérer cette énergie.

## 9 L'énergie chimique



*Figure 9 : batterie, pile et accumulateurs permettent de stocker de l'énergie chimique.*

Ces éléments permettent de stocker et de récupérer de l'énergie électrique et de faire fonctionner tous nos appareils lorsqu'il ne sont pas reliés au réseau.

La capacité d'une pile est généralement donnée en Ah pour une tension  $U$  (en V) qui est plus ou moins constante.

Quelques valeurs indicatives de l'énergie disponible, batterie au plomb 0.1 MJ/kg, batterie Li 0.6 MJ/kg

**Exercice** : comment calculer l'énergie disponible dans une pile (en J) à partir de sa tension  $U$  et de sa capacité en Ah ?

*Solution* :  $E = (\text{capacité en Ah}) \times U \times 3600$

## 10 Énergie alimentaire



*Figure 11* : le pain, symbole de la nourriture attendue chaque jour par l'homme.

Le corps humain a besoin d'énergie, principalement pour maintenir sa température à 36.5 degrés C. La majorité de cette énergie provient des aliments consommés quotidiennement.

La valeur énergétique du pain est de 10 à 12 MJ/kg, les glucides 17MJ/kg, les lipides 38 MJ/kg, enfin le Coca 1.8 MJ/kg

## 11 Autres énergies

Le classement des formes d'énergies ci-dessus est incomplet. En particulier, il y a parfois plusieurs formes d'énergie simultanément ou alternativement.

1. Il y a des énergies statiques, par exemple l'eau dans un barrage ou la charge d'un accumulateur. On parle aussi d'énergie **potentielle**. Il n'y a alors qu'une forme d'énergie et elle est constante dans le temps.
2. Et il y a les énergies dynamiques ou **oscillatoires**. Il y a oscillation entre deux formes d'énergie. C'est le cas des ondes électromagnétiques, où l'énergie change périodiquement entre énergie électrique et magnétique, à la fréquence  $f$ . C'est le cas du pendule dont l'énergie balance entre énergie mécanique et cinétique. C'est le cas de toutes les ondes, comme les vagues et la marée des océans.

Il y a aussi des énergies localisées (énergies potentielles) et des énergies mobiles, qui se déplacent, celles qui sont liées à un déplacement, une vitesse ou un courant :

1. Les énergies potentielles permettent de conserver l'énergie, de faire des réserves. Par exemple l'eau des barrages, les accumulateurs, les réserves de pétrole.
2. Les énergies mobiles permettent des déplacements, comme la distribution dans les ménages de l'électricité grâce au courant électrique. Les ondes (mécaniques, électromagnétiques) se déplacent (elles sont caractérisées par une vitesse) mais peuvent aussi être confinées dans un espace fermé dans un système oscillant, comme le balancier, la toupille.
3. Relevons ici que l'énergie thermique n'est pas facile à conserver et qu'elle a tendance à se disperser. Il n'y a pas de déplacement de la chaleur comme les ondes mais évolution vers une température uniforme (seconde loi de la thermodynamique).

Notons enfin qu'il y a probablement, dans l'espace, beaucoup d'énergie encore inconnue. On parle d'énergie noire ou d'énergie sombre (*dark energy* en anglais). Des modèles de notre univers en expansion démontrent qu'il doit exister beaucoup plus d'énergie dans l'univers que celle qu'on voit, masses et rayonnements. On chiffre même aujourd'hui cette quantité d'énergie noire et inconnue au  $\frac{3}{4}$  de l'énergie totale de l'univers. Les théories de

## Définition et calcul de l'énergie

l'énergie devront être révisées ou complétées.

*Question* : Trouvez les énergies qui n'entrent pas dans le classement ci-dessus et qui ont été oubliées.

## 12 Références

- <http://fr.wikipedia.org>
- **Exposition** à Lausanne (Espace des inventions) « Indestructible énergie » du 9.10.2012 au 31.12.2013.