

résumé du cours: Travail et énergie

1. Travail d'une force et énergie potentielle:

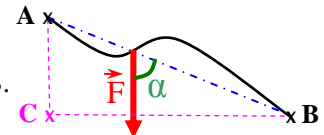
Définition:

Soit une force \vec{F} **constante** dont le point d'application se déplace d'un point A vers un point B. Son travail entre les points A et B **ne dépend pas du chemin suivi** entre ces 2 points.

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB} = F \cdot AB \cdot \cos\alpha$$

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = W_{A \rightarrow C}(\vec{F}) + W_{C \rightarrow B}(\vec{F})$$

W en J F en N AB en m



Une force qui est toujours perpendiculaire à son déplacement ne travaille pas (tension du fil pour un pendule, \vec{R}_N)

Lorsque le travail d'une force entre 2 points A et B est **indépendant du chemin** suivi par le point d'application de cette force, on dit que cette force est **conservative**.

C'est le cas pour toutes les forces constantes, mais aussi pour certaines forces non constantes comme la force de rappel d'un ressort (qui varie avec l'allongement du ressort).

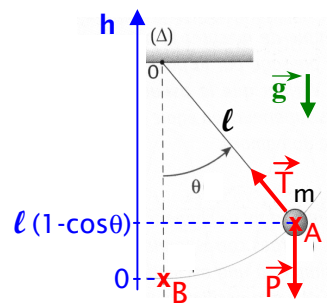
A toute force conservative \vec{F} , on peut associer une énergie potentielle E_p : $W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = E_{p(A)} - E_{p(B)}$

Energie potentielle de pesanteur:

Un solide de masse m dont le centre d'inertie G est situé à une hauteur h **par rapport à une origine choisie arbitrairement** possède une énergie en réserve du fait de sa position dans le champ de pesanteur terrestre \vec{g} .

Cette énergie, appelée énergie potentielle de pesanteur E_{pp} , peut se transformer en énergie cinétique si le poids du solide effectue un travail moteur.

Elle a pour expression: $E_{pp} = m \cdot g \cdot h$ $W_{A \rightarrow B}(\vec{P}) = E_{pp(A)} - E_{pp(B)} = m \cdot g \cdot h_A - m \cdot g \cdot h_B$



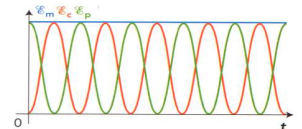
Energie mécanique d'un système:

L'énergie mécanique E_m d'un système est définie comme la somme de son énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2} m \cdot v^2$ et de son énergie potentielle E_p .

$$E_m = E_c + E_p$$

Si ce système est soumis uniquement à des forces conservatives (ou à des forces non conservatives qui ne travaillent pas) son énergie mécanique se conserve, c'est à dire reste constante au cours du temps.

Il y a alors en permanence pour le système transformation d'énergie cinétique en énergie potentielle, et inversement, sous l'effet de la force conservative qui effectue tantôt un travail résistant, tantôt un travail moteur.



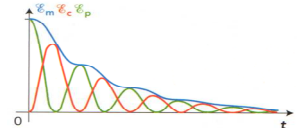
C'est le cas pour le pendule pesant, car la masse m est soumise à l'action de son poids \vec{P} et de la tension du fil \vec{T} . Or la tension du fil est en tout point perpendiculaire à la trajectoire de G donc elle ne travaille pas.

$$E_{m(A)} = E_{m(B)} \Rightarrow E_{c(A)} + E_{p(A)} = E_{c(B)} + E_{p(B)} \Rightarrow \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 + m \cdot g \cdot h_A = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 + m \cdot g \cdot h_B$$

$$\text{avec } h_A = \ell \cdot (1 - \cos\theta) \text{ et } h_B = 0 \text{ et } v_A = 0 \text{ donc } m \cdot g \cdot \ell \cdot (1 - \cos\theta) = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 \Rightarrow v_B = \sqrt{2 \cdot g \cdot \ell \cdot (1 - \cos\theta)}$$

Lorsqu'un système est soumis à une force \vec{f} non conservative (frottement, poussée, ...) son énergie mécanique ne reste pas constante.

Sa variation correspond au travail effectué par cette force dissipative: $\Delta E_m = W(\vec{f})$



Travail d'une force électrostatique:

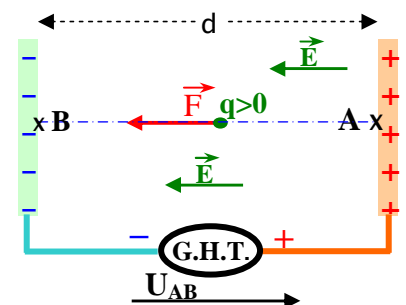
Une particule de charge q placée dans un champ électrique uniforme \vec{E} subit une force constante $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ qui peut donc être associée à une énergie potentielle.

La tension électrique U_{AB} ou **différence de potentiel** $V_A - V_B$ entre les points A et B est définie par la relation $U_{AB} = V_A - V_B = \vec{E} \cdot \vec{AB} \Rightarrow E = \frac{U_{AB}}{d}$

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = q \cdot \vec{E} \cdot \vec{AB} = q \cdot U_{AB} = q \cdot V_A - q \cdot V_B = E_{p(A)} - E_{p(B)}$$

L'énergie potentielle électrique d'une particule de charge q placée en un point de potentiel électrique V a pour expression: $E_p = q \cdot V$ E_p en J q en C V et U_{AB} en V E en $V \cdot m^{-1}$

La force électrique est une force conservative donc $E_{m(A)} = E_{m(B)} \Rightarrow \frac{1}{2} m \cdot v_A^2 + q \cdot V_A = \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 + q \cdot V_B$
si $v_A = 0 \Rightarrow \frac{1}{2} m \cdot v_B^2 = q \cdot U_{AB}$

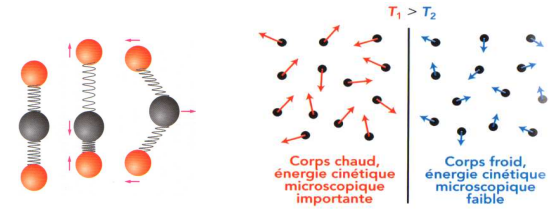


2. Energie interne:

Définition:

L'énergie interne U d'un système est la somme de toutes les énergies **microscopiques** liées aux déplacements et aux vibrations des atomes qui le constituent:

- > Energie cinétique: plus la température d'un corps est élevée, plus l'**agitation thermique** des particules qui le constituent est importante.
- > Energie potentielle: due aux **interactions** entre les particules qui constituent le système (liaisons covalentes, van der Waals, hydrogène), et que l'on peut modéliser par des ressorts.



Le comportement individuel de chaque particule est inaccessible mais leur comportement collectif peut être décrit grâce à des grandeurs macroscopiques mesurables à notre échelle (température, pression, volume, ...).

Un **système macroscopique** est une portion d'espace limitée par une surface contenant la matière étudiée.

Son énergie totale est la somme de son énergie mécanique (macroscopique) et de son énergie interne: $E_{\text{tot}} = E_m + U$

Nous n'étudierons que des systèmes **fermés** (qui n'échangent pas de matière avec l'extérieur).

Relation entre la variation d'énergie interne ΔU d'un système et sa variation de température ΔT :

L'énergie interne d'un système (qui ne subit pas de changement d'état) **ne dépend que de sa température.**

On ne peut pas calculer sa valeur U mais uniquement sa variation ΔU (en mesurant sa variation de température).

$$\Delta U = C \times \Delta T \quad \text{avec } C = \text{capacité thermique du système étudié (à l'état solide ou liquide)} \quad \text{unité: } J.K^{-1}$$

$$C = m \times c \quad c \text{ est la capacité thermique massique du matériau en } J.kg^{-1}.K^{-1}$$

La capacité thermique d'un système caractérise sa capacité à stocker de l'énergie interne.

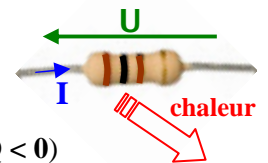
Pour un corps homogène, on peut définir $c \rightarrow$ eau liquide $c = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1} \Rightarrow$ pour 10L d'eau $C = 41,8 \text{ kJ.K}^{-1}$
 Si sa température augmente de 10°C (ou 10K, c'est pareil: $\Delta\theta(^{\circ}\text{C}) = \Delta T(\text{K})$) son énergie interne varie de $\Delta U = 4,18.10^5 \text{ J}$
 Pour un objet "bizarre" (moteur, calorimètre...) on ne peut définir que C (pour l'ensemble du système étudié).

Variation d'énergie interne d'un système:

La variation d'énergie interne ΔU d'un système est la conséquence d'échanges d'énergie avec l'extérieur par **travail W** (mécanique, électrique, chimique) ou par **transfert thermique Q** .

$$\Delta U = W + Q$$

Par convention, W et Q sont comptés **positivement** s'ils sont reçus par le système **négativement** s'ils sont cédés.



Exemple: Un conducteur ohmique reçoit un travail électrique ($W > 0$) et cède de la chaleur ($Q < 0$)

Lorsqu'il est en équilibre thermique, $\Delta\theta = 0$ donc $\Delta U = C \times \Delta\theta = 0 \Rightarrow W + Q = 0$

L'énergie électrique W reçue pendant l'intervalle de temps Δt a pour expression: $W = P \times \Delta t$ (en Joule)
 avec $P = U \times I$ = puissance électrique consommée (en Watt) et Δt en s.

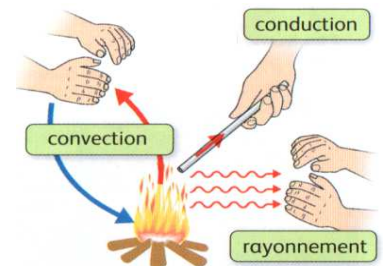
A.N. $I = 100 \text{ mA}$ $U = 10 \text{ V}$ énergie perdue sous forme de chaleur en $\Delta t = 10 \text{ s} \rightarrow Q = -10 \text{ J}$

Comment s'effectuent les transferts thermiques ?

L'existence d'une différence de température entre 2 systèmes provoque un transfert **spontané** d'énergie du plus chaud vers le plus froid.

Si les 2 systèmes se retrouvent à la même température, le transfert thermique cesse: on a alors atteint l'équilibre thermique.

Les transferts thermiques sont **irréversibles**: ils ne peuvent se faire spontanément en sens inverse.



Flux thermique Φ = énergie ΔE transférée par unité de temps à travers une paroi.

$$\Phi = \frac{\Delta E}{\Delta t} \quad \text{avec } \Delta E \text{ en J } \Delta t \text{ en s } \text{ et } \Phi \text{ en Watt (W)} \quad (\text{Attention! } t = \text{temps})$$

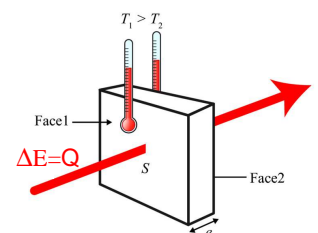
Pour une paroi donnée, le flux thermique Φ est proportionnel à l'écart de température ΔT (en K) ou $\Delta\theta$ (en $^\circ\text{C}$) entre les deux côtés de la paroi.

Le coefficient de proportionnalité s'appelle conductance thermique G_{th} de la paroi: $\Phi = G_{\text{th}} \times \Delta T$

On préfère cependant caractériser une paroi par sa **résistance thermique R_{th}** , qui est l'inverse de sa conductance G_{th} : $R_{\text{th}} = 1/G_{\text{th}}$ ce qui conduit à la relation:

$$\Phi = \frac{\Delta T}{R_{\text{th}}} \quad R_{\text{th}} \text{ en } K.W^{-1}$$

Lorsque plusieurs parois sont accolées, la résistance thermique totale est égale à la somme des résistances thermiques individuelles.

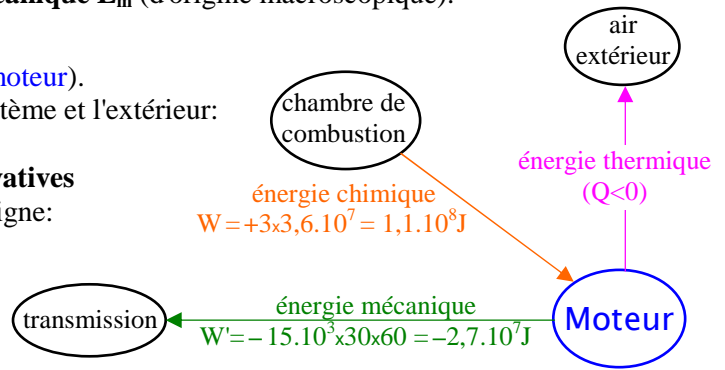


Bilan énergétique:

L'énergie totale d'un système fermé (qui n'échange pas de matière avec l'extérieur) est la somme de son énergie interne U (d'origine microscopique) et de son énergie mécanique E_m (d'origine macroscopique).

Pour établir un bilan énergétique, il faut:

- définir le système macroscopique étudié (ci-contre: le **moteur**).
- relever la nature des transferts énergétiques entre ce système et l'extérieur:
 - * transferts thermiques notés Q
 - * transferts dus aux travaux W des forces non conservatives
- considérer le sens de ces transferts et leur attribuer un signe:
 - * positif si le système reçoit de l'énergie
 - * négatif si le système perd de l'énergie



$$\text{Rendement d'une machine} = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie reçue}} < 1$$

Remarque: l'énergie échangée est positive mais le transfert associé (W, Q) est positif ou négatif pour le système choisi.

Un moteur de voiture développe une puissance motrice de 15kW pendant 30min en consommant $3,0\text{L}$ d'essence. Compléter le schéma ci-dessus en indiquant la nature et le sens des transferts d'énergie pour le moteur.

La combustion de $1,0\text{L}$ d'essence libère $3,6 \cdot 10^4 \text{kJ}$. Calculer ces transferts d'énergie en supposant que la température du moteur reste constante durant ce régime. Définir puis calculer le rendement de ce moteur dans ces conditions.

La température du moteur reste constante donc $\Delta U = C \times \Delta T = 0$ avec $\Delta U = +1,1 \cdot 10^8 + (-2,7 \cdot 10^7) + Q \Rightarrow Q = -8,1 \cdot 10^7 \text{J}$
 $E_{\text{utile}} = 2,7 \cdot 10^7 \text{J}$ $E_{\text{perdue}} = 8,1 \cdot 10^7 \text{J}$ $E_{\text{reçue}} = 1,1 \cdot 10^8 \text{J}$ donc rendement = $2,7 \cdot 10^7 / 1,1 \cdot 10^8 = 0,25$ soit 25%

3. Dualité onde-particule:

La lumière est une onde car elle subit les phénomènes de diffraction et d'interférence.

$$E = h \cdot \nu \text{ avec } \nu = \frac{c}{\lambda}$$

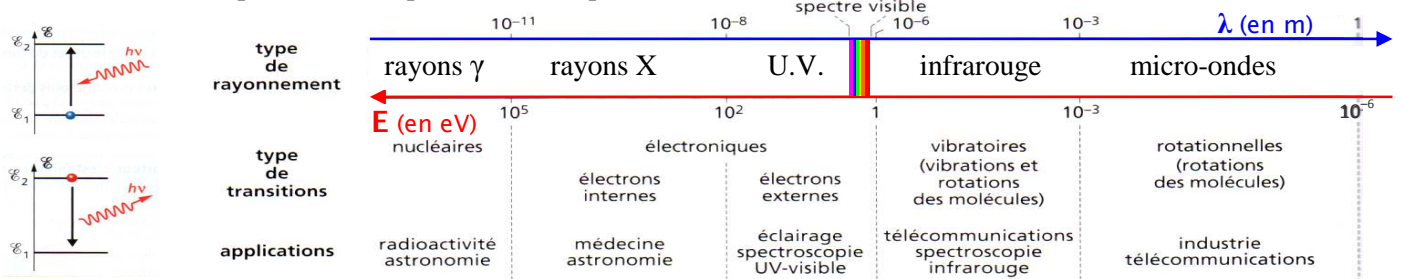
Mais l'énergie qu'elle transporte est véhiculée par des corpuscules appelés **photons**:

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

➤ leur énergie est proportionnelle à la fréquence de l'onde associée

➤ leur probabilité de présence en un point de l'espace est proportionnelle au carré de l'amplitude de l'onde en ce point.

Les phénomènes quantiques présentent un aspect **probabiliste**: on ne peut pas connaître la position d'une particule mais seulement sa probabilité de présence en un point.

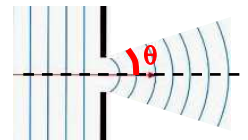


(A toute particule de masse m , animée d'une vitesse de valeur V (très inférieure à la célérité de la lumière dans le vide) et de quantité de mouvement de valeur $p = m \cdot V$, on peut associer une onde de longueur d'onde λ telle que

$$\lambda = \frac{h}{p} \text{ avec } h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} \quad \lambda \text{ en m} \quad p \text{ en kg.m.s}^{-1}$$

Remarque: Le caractère ondulatoire d'une particule matérielle est d'autant plus marqué que λ associée est grande donc que sa masse m et sa vitesse V sont petites.

En effet le phénomène de diffraction d'une onde par une ouverture de largeur a conduit à $\theta = \frac{\lambda}{a}$ et devient négligeable si λ est très inférieur à a , ce qui est le cas pour les objets macroscopiques.

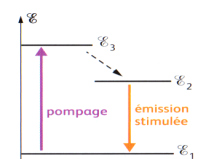


Applications: Le pouvoir de résolution d'un microscope (sa capacité à séparer 2 points voisins de l'objet observé) est de l'ordre de $\lambda \Rightarrow$ avantage du microscope électronique sur le microscope optique (activité p 380) + lecteur blue-ray.

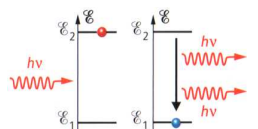
Laser: Pour obtenir un effet d'émission stimulée sur un grand nombre d'atomes, il faut les amener initialement dans l'état excité E_2 et non pas dans l'état fondamental $E_1 \Rightarrow$ **inversion de population**.

Pompage: un apport d'énergie (flash, étincelle) amène les atomes dans un état excité E_3 .

Une désexcitation très rapide se produit alors vers un état intermédiaire E_2 où les électrons restent un certain temps avant de retourner à l'état fondamental E_1 .



Emission stimulée (ou induite): un photon d'énergie $h\nu = E_2 - E_1$ arrivant sur un atome excité provoque la désexcitation de cet atome et induit ainsi 2 photons jumeaux de même énergie et de même direction (\neq émission spontanée).



Le faisceau laser est **monochromatique** et **directif** \Rightarrow **concentration spatiale** de l'énergie émise \Rightarrow danger!