

Travail et énergie en Mécanique Introduction

Dans le sens commun, l'énergie désigne tout ce qui permet d'effectuer un travail, de fabriquer de la chaleur ou de la lumière, de produire un mouvement...

En Physique, il n'est pas toujours facile d'explicitier cette notion : c'est quelque part la mesure unifiée des différentes formes de mouvement et de leur intensité : sa quantification mène à une objectivité. On distingue de manière générale

- l'énergie **cinétique**, qui correspond à la mesure du mouvement des particules matérielles (vitesse)
- l'énergie **potentielle**, qui correspond à la mesure du mouvement des particules « virtuelles » assurant les interactions, c'est-à-dire à l'origine des forces.

L'intérêt du concept d'énergie est sa **conservation** dans les systèmes dits fermés. Cette loi empirique se trouve justifiée par le théorème de Noether¹, et découle de l'homogénéité du temps.

Le mouvement ne peut être créé ou annulé, il peut seulement passer d'une forme à l'autre.

L'énergie est un concept créé pour quantifier les interactions entre des phénomènes très différents ; c'est un peu une *monnaie d'échange commune* entre les phénomènes physiques ; ces échanges sont contrôlés par les lois et principes de la thermodynamique. L'unité officielle de l'énergie est le Joule (J).

Lorsqu'un phénomène entraîne un autre phénomène, l'intensité du second dépend de l'intensité du premier. Par exemple, les réactions chimiques dans les muscles d'un cycliste lui permettent de provoquer le déplacement du vélo. L'intensité de ce déplacement (c'est-à-dire la vitesse) dépend de l'intensité des réactions chimiques des muscles du cycliste, qui peuvent être quantifiées (la quantité de sucre « brûlée » par la respiration, le métabolisme du muscle).

Le concept d'énergie va permettre de calculer l'intensité des différents phénomènes (par exemple la vitesse de la voiture et la quantité d'électricité produite par l'alternateur) en fonction de l'intensité du phénomène initial (la quantité de gaz et la chaleur produite par la réaction chimique de combustion).

Le mot « énergie » provient d'un mot grec signifiant « force en action ».

En Physique, force et énergie sont deux manières différentes de modéliser les phénomènes. Par exemple, on pourra traiter la chute libre d'un objet

- soit avec les forces : en appliquant les lois du mouvement de Newton, en écrivant que l'accélération est proportionnelle à la force et inversement proportionnelle à la masse ;
- soit avec les énergies : en formulant que la diminution de l'énergie potentielle gravité est égale à l'augmentation de l'énergie cinétique.

Le **travail** W désigne l'énergie d'un phénomène qui peut aussi être modélisé par une force, c'est-à-dire un phénomène qui provoque une action dirigée dans une direction, d'où l'utilisation du produit scalaire

$$W_{AB}(\vec{F}) = \vec{F} \cdot \vec{AB}$$

dans sa définition : cet opérateur mathématique permet de sélectionner, par projection, la composante de \vec{F} ayant un impact sur le mouvement de A à B.

Le produit scalaire en mathématiques :

$$\vec{F} \cdot \vec{AB} = F \times AB \times \cos(\angle(\vec{F}, \vec{AB}))$$

$$= F_x \times (x_B - x_A) + F_y \times (y_B - y_A) + F_z \times (z_B - z_A)$$

C'est la projection orthogonale de \vec{F} sur \vec{AB} .

¹ Le théorème de Noether exprime l'équivalence qui existe entre les lois de conservation et l'invariance des lois physiques en ce qui concerne certaines transformations (appelées symétries) ; il a été établi en 1918 par la mathématicienne de Göttingen Emmy Noether et qualifié par Einstein de « monument de la pensée mathématique ». Aujourd'hui, il est abondamment utilisé par la physique théorique en termes de symétries d'espace, de charge et même de temps.

« A toute transformation infinitésimale qui laisse invariante l'intégrale d'action correspond une grandeur qui se conserve »... ce qui est le cas pour la plupart des théories physiques, décrites à l'aide d'un hamiltonien ou d'un lagrangien. L'invariance par translation dans le temps entraîne la conservation de l'énergie ; celle par translation dans l'espace à la conservation de l'impulsion, et celle par rotation à la conservation du moment cinétique.

Le travail d'une force peut être *moteur* (positif) si la force agit dans le sens du déplacement, *résistant* (négatif) si elle agit en sens contraire.

Le travail W peut être vu comme un transfert d'énergie ; la **puissance** $P = \frac{W}{\Delta t}$ mesure d'ailleurs (en watts, de symbole W , gare aux confusions) la *rapidité* de ce transfert : $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$.

Il existe d'autres formes d'énergie encore. Certains phénomènes ont une action désordonnée, chaotique ; par exemple, l'agitation des molécules d'un gaz au repos (sans vent), ou bien l'agitation des atomes d'un solide. Cette agitation désordonnée provoque la sensation de « chaud », et elle est mesurée par un paramètre appelé température. L'énergie liée à cette agitation désordonnée est appelée énergie thermique. On associe également de l'énergie aux ondes telles que les radiations électromagnétiques ; le vide lui-même a son énergie (bien que cette énergie du vide soit à prendre avec précaution)...

Deux formes d'énergie macroscopique

Energie cinétique de translation

L'énergie cinétique d'un système est liée à sa vitesse et à son inertie (via la masse m).

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2$$

Energie potentielle de pesanteur

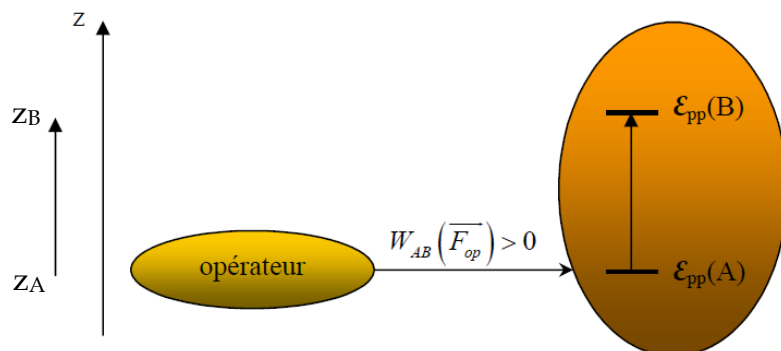
A la surface de la Terre, pour augmenter l'altitude d'un objet d'un point A à un point B (avec $z_B > z_A$), un opérateur doit lutter contre la pesanteur et fournir un travail opposé à celui du poids de l'objet,

$$W_{AB}(\vec{F}_{op}) = -W_{AB}(\vec{P}) = -\vec{P} \cdot \vec{AB} = mg(z_B - z_A)$$

Ce travail est un transfert d'énergie de l'opérateur vers l'objet ; ce dernier voit son énergie potentielle augmenter par contribution gravitationnelle. La relation précédente permet de définir plus généralement l'énergie potentielle de pesanteur E_{pp} d'un système à l'altitude z ,

$$E_{pp}(z) = mgz + E_{ppo}$$

où E_{ppo} est la référence d'énergie potentielle, le plus souvent nulle (à $z = 0$).



On rassemble souvent les termes cinétique et potentiels de l'énergie macroscopique en un total appelé énergie mécanique E_m ,

$$E_m = E_c + E_{pp}$$

Certains systèmes dits soumis à des forces conservatives (ou systèmes conservatifs) voient cette énergie mécanique constante au cours de leur mouvement ; d'autres la voient décroître (présence de frottements, par exemple).

Notion d'énergie interne

En Physique, on aime bien disposer de lois de conservation : vous vous souvenez de la phrase attribuée à Lavoisier sur la conservation de l'élément chimique. Aussi a-t-on introduit une grandeur appelée **énergie interne**, notée U , rassemblant l'ensemble des facteurs énergétiques intrinsèques au système, dits aussi microscopiques, de sorte que la grandeur énergie totale du système $E_m + U$ se conserve !

$$E_m + U = cte$$

Cette énergie interne U est la propriété intime du système ; c'est un capital d'énergie microscopique qui résulte de sa composition interne. Elle peut être vue comme la somme de deux contributions,

- une énergie potentielle d'interaction entre les particules constitutives, liées à leur position les unes par rapport aux autres
- une énergie cinétique d'agitation thermique, liée à la température du système (qui n'en est que la mesure)

L'énergie transférée à un corps sous forme de travail peut modifier son énergie interne. Prenons quelques exemples.

- Dans le cas du ressort, la compression entraîne un travail de la force de rappel élastique du ressort augmentant son énergie interne (ses particules constitutives étant plus resserrées).
- Dans le cas d'une météorite en chute dans l'atmosphère (la grande vitesse rendant non négligeables les forces de frottement), le travail des forces de frottement augmente son énergie interne : la météorite s'embrase, sa température s'élève. C'est également ce qui se passe quand vous frottez vos mains l'une contre l'autre pour les réchauffer.

On peut également envisager de modifier l'énergie interne d'un système sans travail,

- par transfert thermique, c'est-à-dire en le chauffant
- par rayonnement, c'est-à-dire en le bombardant d'ondes électromagnétiques (lumière) comme le Soleil réchauffe la Terre alors que les deux astres sont séparés par du vide (donc pas de conduction thermique possible)

A propos des transferts thermiques

En général, l'évaluation de l'énergie interne d'un corps est assez délicate. Nous allons par exemple nous poser la question suivante : peut-on quantifier les transferts thermiques ?

Vous savez que les transferts thermiques entre deux corps se font toujours **du plus chaud vers le plus froid** (c'est une façon d'énoncer le 2^{ème} principe de la thermodynamique). Tout transfert thermique a besoin d'un support matériel pour se produire ; il existe deux modes de transferts thermiques,

- La **conduction** thermique, qui se produit sans transport de matière : c'est ce qui se passe dans les métaux (qui ne s'est pas brûlé avec une gamelle ?)
- La **convection** thermique, qui s'effectue avec transport de matière : c'est ce qui se passe dans l'eau d'une casserole d'eau bouillante ou encore dans l'air au-dessus d'une flamme (volutes)

Un transfert thermique va provoquer une **variation de température** du système et modifier son énergie interne ; dans certains cas, comme pour préparer l'eau de cuisson des nouilles, il peut même engendrer un **changement d'état physique** (ex : liquide → gaz).

En l'absence de changement d'état, le transfert thermique Q (aussi appelé **chaleur**), exprimé en joules (J) provoque le passage pour le corps de masse m de la température θ_i à la température θ_f , ce qui se note

$$Q = m c (\theta_f - \theta_i)$$

où la grandeur de proportionnalité c et appelée *capacité thermique massique* du système ; cette grandeur s'exprime en $J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$ et caractérise l'inertie thermique du corps : elle donne la quantité de chaleur à lui fournir pour en élever la température de 1 kg de $1^{\circ}C$.

Exemple : $c(\text{eau}) = 4\,180 J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1} \gg c(\text{fer}) = 450 J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$

Remarquons que si $\theta_f > \theta_i$, la température du corps a augmenté, et $Q > 0$. Inversement, si $\theta_f < \theta_i$, la température du corps a diminué, et $Q < 0$.

Si l'on se produit un changement d'état, il faut faire intervenir une grandeur appelée *chaleur latente massique* et notée L , exprimée en $J.kg^{-1}$, dans la relation

$$Q = m L$$

Cette grandeur L caractérise la chaleur à apporter pour faire passer 1 kg de corps d'un état à l'autre.

Exemple : $L_{\text{fus}}(\text{eau}) = 335 kJ.kg^{-1}$ et $L_{\text{vap}}(\text{eau}) = 2\,261 kJ.kg^{-1}$.

Remarquons que la température n'intervient pas ici, puisque les changements d'état des corps purs se produisent par paliers de température, c'est-à-dire à température constante.

$$L_{\text{sol}} = -L_{\text{fus}} \quad L_{\text{liq}} = -L_{\text{vap}} \quad L_{\text{con}} = -L_{\text{sub}}$$