# L'énergie en mécanique

## 1 – Généralités

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'expliciter cette notion : c'est quelque part la mesure unifiée des différentes formes de mouvement et de leur intensité. 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 Noether[1], 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 par les humains 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.
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 du mot grec signifiant « travail ». Mais le mot « travail » est aussi utilisé en Physique pour désigner l'énergie fournie par l'action d'une force.
En Physique, force et énergie sont deux manières différentes de modéliser les phénomènes. Par exemple, on pourra traiter la chute d'un objet

- <u>soit</u> 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 ;
- <u>soit</u> avec les énergies : en formulant que la diminution de l'énergie potentielle gravité est égale à l'augmentation de l'énergie cinétique.

Le travail désigne donc 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.
Cependant, 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.

---

[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.*

**2 – Utilisation de l'énergie dans les classes terminales de lycée**

**L'énergie cinétique** est l'énergie acquise par un corps de par sa vitesse. Pour un mouvement de translation, à la vitesse v, elle s'écrit

$$E_C = \frac{1}{2} m\, v^2$$

Elle s'exprime en joules (J) si la masse m est exprimée en kg et la vitesse en $m.s^{-1}$.

**L'énergie potentielle de pesanteur** est acquise par un corps de par les effets de gravitation qu'il subit. A proximité de la Terre, elle est due à la force de gravitation exercée par la Terre (couramment appelée poids) ; elle s'écrit

$$E_{pp} = m\, g\, z + E_{pp,o}$$

où la masse m est en kg. La grandeur g désigne l'intensité de la pesanteur en $N.kg^{-1}$ ; z est l'altitude en mètres. $E_{pp,o}$ est une constante qui peut être définie comme l'énergie potentielle de pesanteur de référence : par exemple, à une altitude choisie comme référence altimétrique telle que le niveau de la mer ; le plus souvent, $E_{pp,o} = 0$.

On rencontrera également l'**énergie potentielle élastique**, associée à la force de rappel élastique d'un ressort par exemple ; en effet, écarté de sa position initiale, un ressort de raideur k exerce sur tout système qui lui est relié une force de rappel en général proportionnelle à son élongation Δx, ce qui lui communique une énergie

$$E_{pél} = \frac{1}{2} k \left(\Delta x\right)^2$$

De la même façon, on pourrait parler de l'énergie potentielle électrique pour une particule chargée soumise à une force électrostatique de Coulomb (cf. interactions fondamentales)…
De façon générale, notons que la notion d'énergie potentielle fait un intervenir la définition nécessaire d'une référence, que ce soit l'altitude « zéro », l'élongation au repos ou le point de masse…

### 2.2 – Exemple de la chute libre verticale

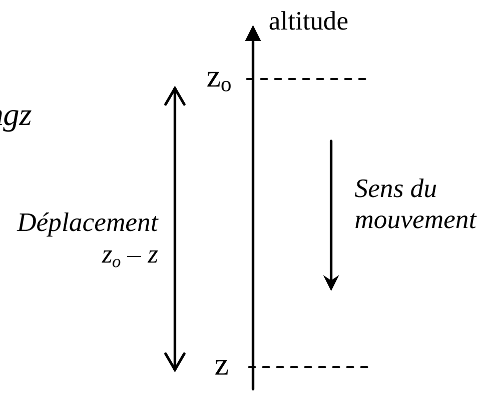
En chute libre, le système n'est soumis qu'à son poids.
Dans ce cas, on montre expérimentalement que quelle que soit sa vitesse initiale (lâcher ou lancer), l'énergie mécanique $E_m$ du système se conserve au cours du mouvement.

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

Cette constante est par exemple égale à la somme initiale $E_{m,o} = E_{c,o} + E_{p,o} = \frac{1}{2} m v_o{}^2 + mgz_o$ si $v_o$ est la vitesse initiale et $z_o$ l'altitude du point référent altimétrique.
La loi de conservation de l'énergie mécanique peut-être vue comme une traduction du **théorème de l'énergie cinétique** pris depuis l'instant initial

$$\Delta E_c\left(M_o M\right) = W_{M_o M}\left(\vec{P}\right)$$

$$\frac{1}{2} mv^2 - \frac{1}{2} mv_o{}^2 = mg\left(z_o - z\right) = mgz_o - mgz$$




ce qui laisse apparaître

$$\Delta E_c = -\Delta E_{pp}$$

ou encore

$$\Delta E_c + \Delta E_{pp} = 0$$

soit

$$\Delta\left(E_c + E_{pp}\right) = \Delta E_m = 0$$

Ceci signifie que l'énergie mécanique ne varie pas au cours du mouvement, c'est-à-dire que

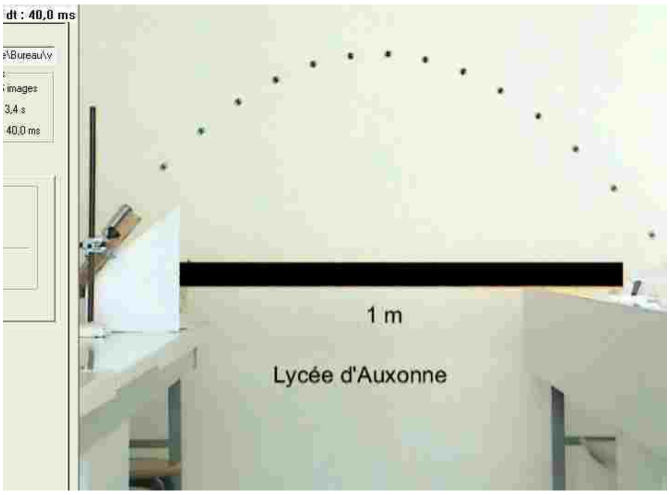
$$E_m = const.$$

Remarquons enfin que ce qu'on appelle travail du poids s'oppose exactement à la variation d'énergie potentielle de pesanteur,

$$W\left(\vec{P}\right) = -\Delta E_{PP}$$

ce qui est logique puisque pour prendre de l'altitude et gagner de l'énergie potentielle de pesanteur, il faut travailler contre le poids !

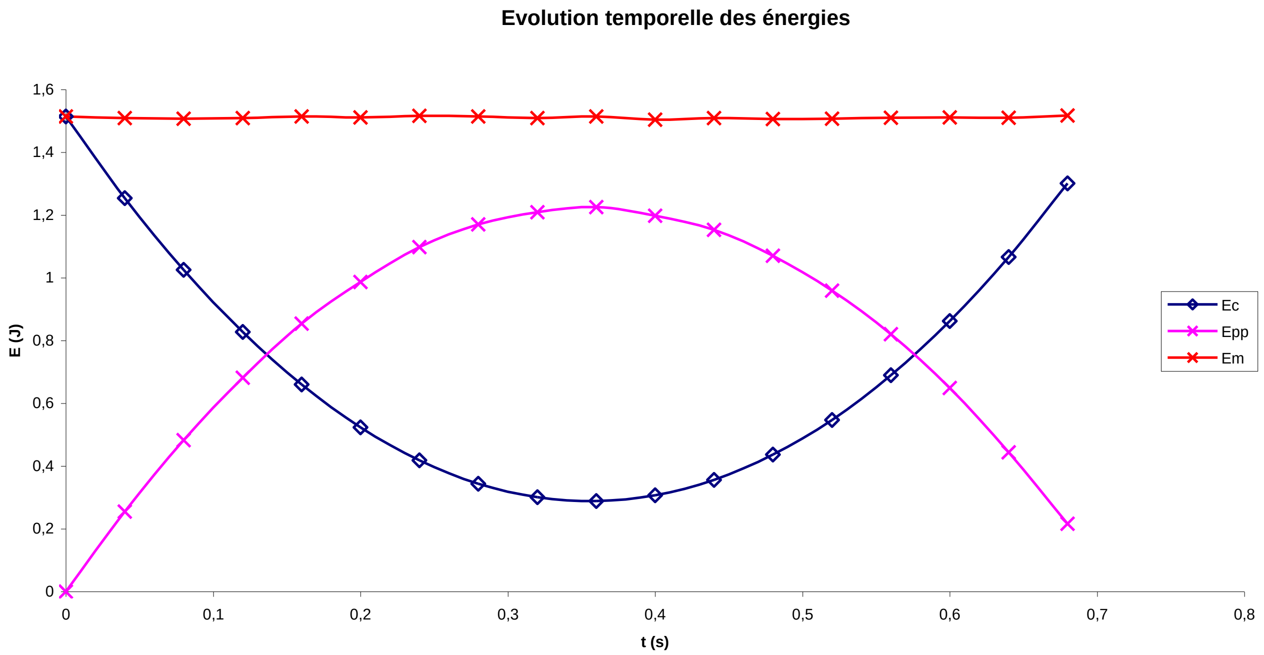
## 2.3 – Exemple de l'étude d'un mouvement balistique ou de celui d'un pendule simple




Ce mouvement peut être décomposé en deux phases.

- Une phase ascendante, où la bille « monte » et acquiert de l'altitude, donc de l'énergie potentielle de pesanteur ; dans le même temps, partant d'une vitesse initiale maximale (impulsion d'un pistolet), sa vitesse diminue progressivement jusqu'à un minimum, tout comme son énergie cinétique.
- Une phase descendante, où la bille « descend » et perd de l'altitude, donc de l'énergie potentielle de pesanteur ; dans le même temps, partant d'une vitesse minimale au sommet de la trajectoire, sa vitesse augmente progressivement, tout comme son énergie cinétique.

Tout se passe comme si l'augmentation d'une forme d'énergie se traduisait par la diminution d'une autre. Il y a un échange permanent entre les deux formes d'énergie, et cet échange est assuré par le travail du poids, résistant dans la première phase, moteur dans la seconde.

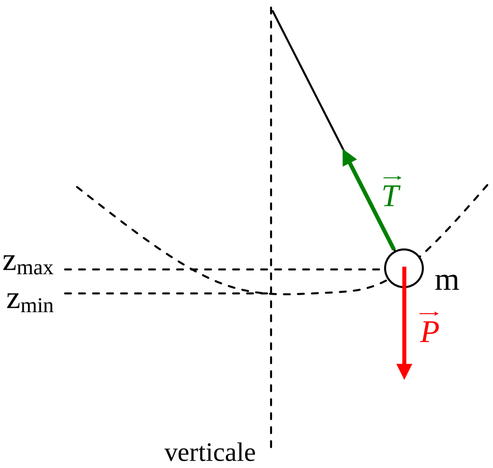


Globalement, donc, la somme de ces deux énergies est constante : cette somme est appelée énergie mécanique,

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

Son introduction permet d'illustrer la conservation de l'énergie.

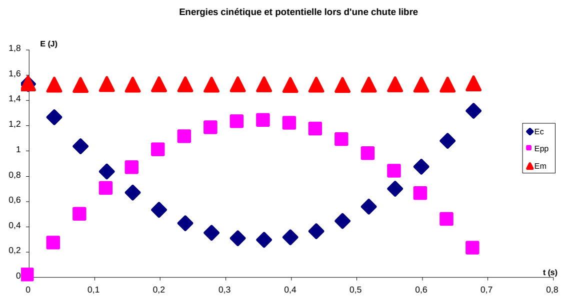
Prenons maintenant l'exemple du mouvement d'un pendule simple : les conclusions sont analogues.
A tout instant, la masse m est soumise à son poids et à la tension du fil inextensible.




Le pendule entre deux positions particulières qu'on peut repérer par leur altitude z : l'une est maximale (là où la masse s'arrête pour repartir dans l'autre sens) et l'autre est minimale (là où la vitesse du mobile est maximale).

- Lorsque la masse est au plus haut, son énergie cinétique est nulle et son énergie potentielle de pesanteur est maximale : si $z_{min} = 0$, alors $E_{pp} = mgz_{max}$ et $E_m = E_{pp} = mgz_{max}$.
- Lorsque la masse est au plus bas, son énergie potentielle de pesanteur est nulle : l'énergie mécanique s'identifie alors à l'énergie cinétique et vaut toujours $E_m = mgz_{max} = E_c$ puisqu'elle est constante.

Au cours de ce mouvement, il y a donc un échange perpétuel entre les formes cinétique et potentielle (de pesanteur) de l'énergie, si bien que l'énergie mécanique globale du système reste constante.




Le théorème de l'énergie cinétique conduit ici aux mêmes conclusions, puisque son application est identique au cas d'une chute libre : en effet, ici, la tension du fil (dirigée à chaque instant selon le rayon) est à chaque instant perpendiculaire au déplacement (propriété de la tangente à la trajectoire circulaire) et, par conséquent, ne travaille pas. Le poids est ici aussi la seule force qui travaille.

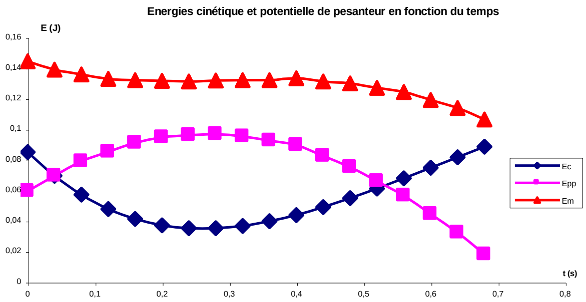
$$\Delta Ec = W(\vec{P})$$

## 3 – <u>Cas de la non-conservation de l'énergie mécanique</u>

### 3.1 – <u>Cadre d'étude</u>

Nous avons vu des cas où l'énergie mécanique du système ne se conservait pas : comment expliquer et modéliser ces phénomènes ?

Ceci s'observe par exemple dans le cas où la chute (qui n'est plus libre) a lieu dans un milieu visqueux (éprouvette d'huile ou de glycérol).




Au cours du déplacement, le système n'est plus uniquement soumis à son poids : des forces de frottements et une poussée d'Archimède non négligeables interviennent également ; de plus, ces forces travaillent elles aussi. Le théorème de l'énergie cinétique doit s'écrire ici

$$\Delta Ec = W(\vec{P}) + W(\vec{f}) + W(\vec{\pi})$$

Si l'on regarde cette égalité, et l'expression de ce théorème dans le cas de la chute libre, on peut supposer que la somme $W(\vec{f}) + W(\vec{\pi})$ doit être responsable de la diminution de l'énergie mécanique observée.

$$\Delta Ec - W(\vec{P}) = W(\vec{f}) + W(\vec{\pi})$$

$$\Delta E_c + \Delta E_{pp} = W(\vec{f}) + W(\vec{\pi})$$

$$\Delta E_m = W(\vec{f}) + W(\vec{\pi})$$

On peut bien vérifier que $\Delta E_m$ est négative (diminution), de même que la somme des travaux *résistants* des forces de frottements et de la poussée d'Archimède.
Une remarque peut-être intéressante : ces forces sont des actions de contact, contrairement à la pesanteur, et trouvent une interprétation à l'échelle microscopique…

### 3.2 – Exemple d'une chute en présence de frottements

Dans l'exemple du 2.2, nous avons négligé les frottements : c'est le cadre d'étude de la chute libre, où seul le poids du corps s'exerce. Que se passerait-il si on les avait inclus dans le raisonnement ?

1. Lorsque vous frottez vos mains ces jours-ci, vous les réchauffez : quelles sont les forces qui travaillent dans ce cas et permettent d'obtenir cette sensation de chaleur ?

Ce phénomène correspond à un transfert énergétique : l'énergie d'origine mécanique/musculaire est convertie en énergie thermique. C'est le travail des forces de frottements qui permet d'expliquer ce transfert.

2. Dans le cas où les frottements ne sont plus négligeables, l'énergie mécanique Em = Ec + Epp de la balle ne se conserve plus et diminue avec le temps. Aie. Comme expliquer cette perte d'énergie, $\Delta$Em < 0 ?

Dans le cas où les frottements ne sont plus négligeables, la somme des forces exercées sur la bille ne se résume plus seulement à son simple poids. Nous ne sommes plus dans le cas d'une chute libre. L'énergie mécanique fait intervenir les contributions cinétique et potentielle de pesanteur à l'énergie totale de la bille ; cependant, elle ne tient pas compte des frottements : le travail $W_{AB}(\vec{f})$ des forces de frottements, travail résistant, devrait être aussi pris en compte ! Dans ce cas, la grandeur Em + $W_{AB}(\vec{f})$ risque d'être conservée ou, de manière équivalente, la variation d'énergie mécanique $\Delta$Em, négative, doit être égale au travail des forces de frottements $W_{AB}(\vec{f})$, lui aussi négatif. Pour davantage de rigueur, il faudrait même tenir compte du travail de la poussée d'Archimède, lui aussi négatif.

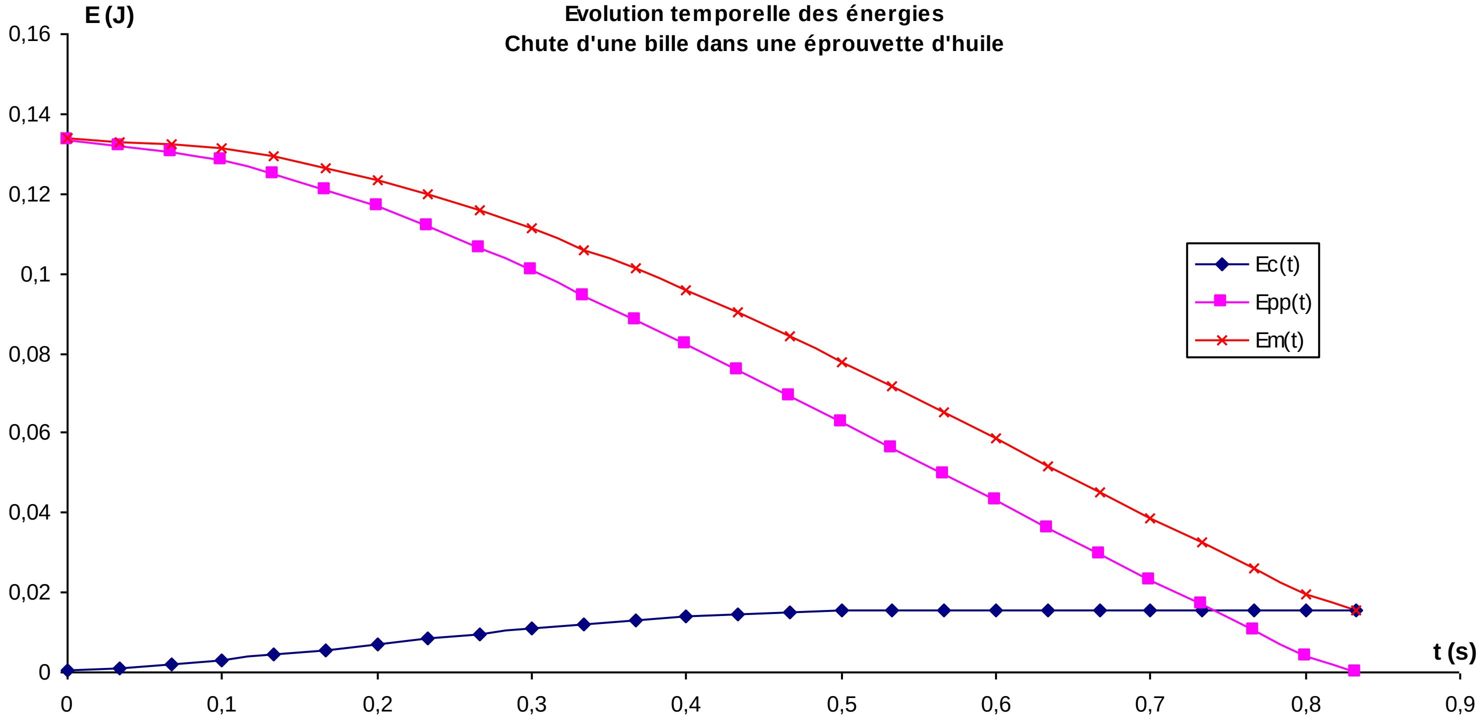
3. Essayez de traduire mathématiquement la conservation de l'énergie totale de la balle, en incluant le travail des forces de frottement.

Comme nous venons de le dire,

$$W_{AB}\left(\vec{f}\right)=\Delta Em_{AB}$$

Pour mettre en évidence les précédentes affirmations, on pourrait étudier le mouvement d'une bille en chute dans une éprouvette remplie d'un liquide visqueux. Dans ce cas, les frottements du fluide et la poussée d'Archimède ne peuvent pas a priori être négligés.

L'étude conduit à l'évolution temporelle des énergies suivante.




Dans ce cas précis, l'énergie mécanique ne se conserve plus, elle diminue au cours du mouvement : l'échange entre l'énergie potentielle de pesanteur et l'énergie cinétique n'est plus réciproque, on voit nettement que l'énergie potentielle de pesanteur diminue beaucoup plus vite que l'énergie cinétique n'augmente.
« Quelque chose » empêche l'énergie cinétique (donc la vitesse) de croître aussi vite que dans le cas de la chute libre : ce sont les frottements ainsi que la poussée d'Archimède, nouvelles forces qui s'appliquent ici sur la balle.
L'énergie mécanique ne se conserve plus, mais l'énergie elle-même est une grandeur fondamentalement conservative. C'est pourquoi on peut écrire que la quantité d'énergie mécanique perdue est égale au travail des forces « résistantes », c'est-à-dire des forces de frottements et de la poussée d'Archimède.

### 3.2 – Notion d'énergie interne

En Physique, on aime bien disposer de lois de conservation : vous vous souvenez de la phrase de 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)

### 3.3 – 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 $\rightarrow$ 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 $\theta_i$ à la température $\theta_f$, ce qui se note

$$Q = m\,c\left(\theta_f - \theta_i\right)$$

où la grandeur de proportionnalité c et appelée capacité thermique massique du système ; cette grandeur s'exprime en $J.kg^{-1}.°C^{-1}$ 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°C.
Exemple : c(eau) = 4 180 $J.kg^{-1}.°C^{-1}$ » c(fer) = 450 $J.kg^{-1}.°C^{-1}$
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.

S'il 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 : $L_{fus}$(eau) = 335 $kJ.kg^{-1}$ et $L_{vap}$(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.

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