

Premier principe de la thermodynamique

Doc. 13,1

Remarque. À maîtriser avant le début de ce cours : Travail, force conservative, force non conservative, énergie potentielle d'interaction, énergie cinétique, énergie mécanique.

§1 À la recherche d'une grandeur énergétique conservative

Une grandeur caractérisant l'état d'un système est dite **conservative** si elle reste constante lorsque le système est isolé.

Les grandeurs conservatives sont très importantes en physique, leur utilisation permet souvent de comprendre simplement l'évolution des systèmes.

Situation expérimentale Une masse m , en contact avec le sol, est mise en mouvement. L'expérience montre que, à cause des frottements solides, la masse finit inmanquablement par s'arrêter après avoir parcouru une distance d .

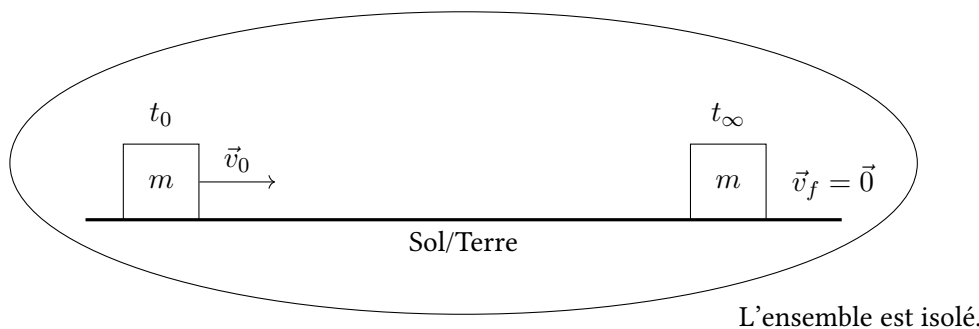


FIGURE 1 : Situation expérimentale.

Q1. Démontrer que l'énergie mécanique n'est pas une grandeur conservative.

Remarque. On considère que le système { Terre + masse } est isolé.

Dans le référentiel du laboratoire, $E_M(t=0) = \frac{1}{2}mv_0^2 + E_{PP}$, puisque l'énergie cinétique de la Terre est nulle et parce qu'on note E_{PP} l'énergie d'interaction entre la Terre et la masse m . De même, $E_M(t_\infty) = E_{PP}$ puisque les énergies cinétiques de la masse et de la Terre sont nulles. On peut conclure que $\Delta E_M = E_M(t_\infty) - E_M(t=0) = -\frac{1}{2}mv_0^2 < 0$. L'énergie mécanique n'est pas conservée bien que le système masse + Terre soit isolé, E_M n'est pas une grandeur conservative !

Q2. Donner, après application du théorème de l'énergie cinétique, l'expression de la valeur de la force de frottements solides (force non conservative constante) dans le cas de l'expérience proposée.

$$\Delta E_M = E_M(t_\infty) - E_M(t=0) = W(\vec{f}) = \vec{f} \cdot \overrightarrow{AB} \text{ donc } -\frac{1}{2}mv_0^2 = -f \cdot d \text{ où } d = \|\overrightarrow{AB}\|. \text{ Finalement,}$$

$$f = \frac{1}{2} \frac{mv_0^2}{d}$$

La force de frottement est une modélisation macroscopique des interactions au niveau microscopique.

Que devient l'énergie mécanique qui disparaît lorsque des forces non conservatives travaillent ? Lorsque l'expérience précédente est réalisée, on constate que *les températures de la masse m et de la Terre augmentent*. Il est donc nécessaire d'introduire dans le raisonnement un terme qui prend en compte les processus qui peuvent intervenir au *niveau microscopique* ; on appelle cette grandeur **l'énergie interne U du système** (unité : joule).

Q3. Reprendre le bilan d'énergie de la question 1. en n'utilisant pas uniquement l'énergie mécanique E_M du système, mais son énergie totale qui a pour expression $E_t = E_M + U$.

Si on note E_t l'énergie totale du système, U_1 l'énergie interne de la masse m et U_2 l'énergie interne de la Terre, $E_t(t = 0) = E_M(t = 0) + U_1(t = 0) + U_2(t = 0)$ et $E_t(t_\infty) = E_M(t_\infty) + U_1(t_\infty) + U_2(t_\infty)$. Donc $\Delta E_t = \Delta E_M + \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0$ (puisque l'ensemble est isolé et que l'énergie se conserve). Finalement

$$\Delta U_1 + \Delta U_2 = -\Delta E_M$$

L'énergie mécanique qui a disparu est s'est transformée en énergie interne.

*L'énergie mécanique n'est pas une grandeur conservative, c'est une **forme d'énergie**, comme l'énergie cinétique, les énergies potentielles d'interaction, etc., qui peut être créée ou détruite.*

L'énergie totale d'un système, E_t , somme de son énergie mécanique, E_M , et de son énergie interne, U , est une **grandeur conservative**.

$$E_t = E_M + U$$

L'introduction de l'énergie interne U est nécessaire car *l'énergie mécanique E_M ne prend en compte ni les mouvements internes des atomes et des molécules, ni les forces d'interaction s'exerçant entre ceux-ci (ou celles-ci)*.

Les forces dissipatives (de frottements) correspondent à une **description macroscopiques**. *Au niveau microscopique, il n'existe pas de force dissipative, il n'existe que des forces conservatives.*

§2 Énergie interne

L'énergie interne d'un système thermodynamique est l'énergie qu'il renferme.

Elle est égale à la somme de *l'énergie cinétique de chaque entité élémentaire de masse non nulle* (agitation thermique) et de *toutes les énergies potentielles d'interaction des entités élémentaires* de ce système (liaisons chimiques, nucléaires, interactions électriques entre molécules (ou ions), etc.). En fait, elle correspond à l'énergie intrinsèque du système, définie à **l'échelle microscopique**, à l'exclusion de *l'énergie cinétique ou potentielle d'interaction du système avec son environnement, à l'échelle macroscopique*.

$$U = \sum E_{C,micro} + \sum E_{P,micro}$$

L'énergie interne est une **fonction d'état du système** : *sa variation ne dépend que de l'état final et de l'état initial d'équilibre et non pas de la nature de la transformation.*

Remarque. Il faut garder à l'esprit que les composants d'un système sont toujours en mouvement au niveau microscopique, même si le système est macroscopiquement au repos.

Rappel. La grandeur qui relie le monde microscopique au monde macroscopique est la **constante d'avogadro** :

$$\mathcal{N}_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Étant donnée la complexité des interactions au niveau microscopique, l'énergie interne U n'est pas calculable et ne peut être connue de façon absolue. *On peut uniquement calculer sa variation.*

§3 Énergie totale d'un système thermodynamique

L'énergie totale d'un système peut donc s'écrire :

$$E_t = \sum E_{C,macro} + \sum E_{P,macro} + \sum E_{C,micro} + \sum E_{P,micro}$$

soit

$$E_t = E_M + U$$

L'énergie totale d'un système est une **grandeur conservative**.

Remarque. Seules les variations de l'énergie totale d'un système ont un sens physique.

§4 Comment varie l'énergie totale E_t d'un système lorsqu'il n'est pas isolé ?

§4.1 Différents types de transferts d'énergie

Un gaz contenu dans un ballon *calorifugé*, figure 2, plongé dans un fluide voit son volume réduit au fur et à mesure qu'il s'enfonce car le liquide à l'extérieur exerce une force pressante de plus en plus grande.

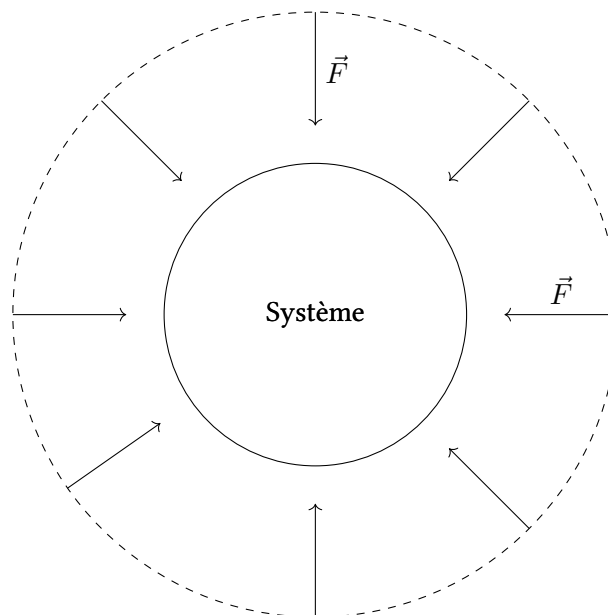


FIGURE 2 : Ballon plongé dans un fluide.

Q4. Quel est le mode de transfert d'énergie reçu par le gaz dans cette situation ?

Le point d'application de la force pressante se déplace, cette dernière transfère donc de l'énergie par **travail** au système.

Lorsque le point d'application d'une force se déplace, il y a un transfert d'énergie entre le système et l'extérieur. Ce transfert d'énergie, *compté algébriquement*, est appelé **travail** et se note W .

Un gaz est contenu dans une enceinte rigide et isolée thermiquement de l'extérieur. Une résistance électrique placée à l'intérieur est alimentée, ce qui entraîne une élévation de la température du gaz.

Q5. Quel est le mode de transfert d'énergie reçu par le gaz dans cette situation ?

L'élévation de la température du système traduit une augmentation de son énergie interne. Toutefois, comme l'enceinte est rigide, aucun travail n'est effectué : aucune force ne déplace son point d'application. *L'énergie est transmise au gaz par un autre mode de transfert, appelé **chaleur** (ou **transfert thermique**).*

On appelle **chaleur** (ou **transfert thermique**) le transfert d'énergie qui s'effectue sans travail mécanique sur le système, c'est-à-dire sans déplacement macroscopique du point d'application d'une force. On note ce transfert Q . Ce transfert a une **origine microscopique**, liée aux interactions entre les constituants du système et de son environnement.^a

a. Nous y reviendrons plus tard dans ce chapitre.

Comme le travail, la chaleur n'est pas une grandeur d'état : c'est un mode de transfert d'énergie, et non une forme d'énergie contenue dans le système.

Un système **calorifugé** est un système qui ne peut pas échanger d'énergie sous forme d'énergie thermique (chaleur) avec l'environnement.

§4.2 Premier principe de la thermodynamique

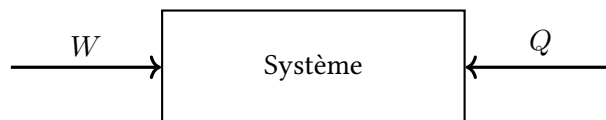


FIGURE 3 : Bilan d'énergie (algébrique) d'un système non isolé.

La **variation de l'énergie totale** d'un système est égale à la **somme du travail des forces non conservatives** qui agissent sur lui et de **l'énergie thermique** échangée avec l'environnement.

En notant $E = E_M + U$ l'énergie totale du système, on a :

$$\Delta E = W_{\text{forces non conservatives}} + Q$$

où :

- $W_{\text{forces non conservatives}}$ représente le travail des forces qui ne dérivent pas d'une énergie potentielle,
- Q est l'énergie thermique échangée avec l'extérieur.

Capacité thermique d'un système incompressible Capacité thermique d'un système incompressible

§4.3 Capacité thermique d'un système incompressible

On appelle **capacité thermique** C d'un système, la chaleur qu'il faut lui fournir pour élever sa température de 1°C ou 1 K , dans des *conditions données* et sans qu'il reçoive de travail.

Si le **système est incompressible** (ex. un solide ou un liquide incompressible) et ne reçoit aucun travail alors :

$$C = \frac{\Delta U}{\Delta T} \quad (1)$$

Unité : Joule par kelvin ou joule par degré Celsius, $\text{J} \cdot \text{K}^{-1}$.

Remarque. La capacité thermique dépend du corps considéré et de son état physique.

Remarque. Si le système ne peut pas être considéré incompressible, la chaleur qu'il reçoit lui permet de faire varier son énergie interne mais aussi de fournir du travail. La relation 1 n'est alors plus valable.

On appelle **capacité thermique massique** c la capacité thermique rapportée à l'unité de masse :

$$c = \frac{C}{m}$$

où m est la masse du système.

Si le système est **incompressible** (ex. un solide ou un liquide incompressible), la variation de son énergie interne est donnée par :

$$\Delta U = mc \Delta T = mc (T_f - T_i)$$

puisque, dans ce cas, *aucun travail n'est échangé* ($W = 0$) et l'énergie interne ne varie que par transfert thermique.

Unité : Joule par kelvin et par kilogramme ($\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$).

§5 Transferts thermiques

§5.1 Différents transferts thermiques

Un transfert thermique peut s'effectuer selon plusieurs modes :

Conduction. Le transfert thermique s'effectue **sans transport de matière** : *l'énergie se propage par agitation des particules, sans déplacement macroscopique du matériau*. Il repose sur les interactions microscopiques entre particules (chocs entre molécules, déplacement des électrons libres dans les métaux, etc.).

Convection. Le transfert thermique s'effectue par **déplacement global du fluide**. *L'énergie est transportée par un mouvement d'ensemble du fluide*, formant parfois des courants de convection. Ce mode concerne principalement les liquides et les gaz.

Rayonnement. L'absorption ou l'émission d'un rayonnement électromagnétique modifie l'agitation thermique. *Ce mode de transfert ne nécessite pas la présence d'un milieu et peut s'effectuer dans le vide.*

Les transferts d'énergie thermique s'effectuent toujours **spontanément** du corps de température la plus élevée (corps « chaud ») vers le corps de température la plus basse (corps « froid »), jamais dans l'autre sens. Cet échange d'énergie est donc **irréversible**.

Fondamentalement, cette irréversibilité trouve son origine dans le comportement microscopique de la matière : l'**entropie**¹ d'un système isolé tend naturellement à augmenter. Autrement dit, les configurations microscopiques correspondant à un état plus désordonné sont bien plus nombreuses que celles correspondant à un état ordonné. Cette tendance à l'accroissement du désordre rend spontanément impossible un retour à l'état initial sans intervention extérieure.

§5.2 Flux et résistance thermique

On appelle **flux thermique** l'énergie thermique transférée à travers une paroi par unité de temps. Ce transfert s'effectue toujours du côté de la paroi où la température est la plus élevée vers celui où elle est la plus basse.

$$\varphi = \frac{Q}{\Delta t}$$

Unité : joule par seconde ($\text{J} \cdot \text{s}^{-1}$), soit watt (W).

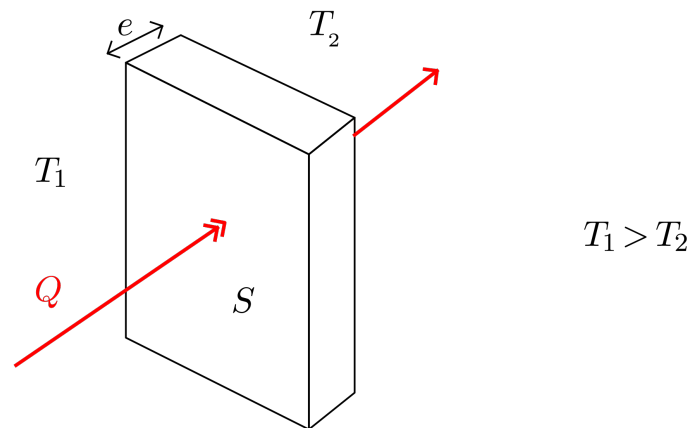


FIGURE 4 : Illustration du flux thermique.

Si les températures T_1 et T_2 sont **constantes**, on peut considérer (doc. 14,3) que le flux thermique est proportionnel à la différence de ces températures $\Delta T = T_1 - T_2$:

$$\varphi = \frac{\Delta T}{R_{\text{th}}}$$

Par analogie avec l'électrocinétique, R_{th} est appelée **résistance thermique du matériau** constituant la paroi. Elle s'exprime par :

$$R_{\text{th}} = \frac{e}{S\lambda}$$

où e est l'épaisseur de la paroi, S sa surface, et λ une constante, *caractéristique du matériau*, appelée **conductivité thermique du matériau**.

Unité de R_{th} : kelvin-seconde par joule ($\text{K} \cdot \text{s} \cdot \text{J}^{-1}$), soit kelvin par watt ($\text{K} \cdot \text{W}^{-1}$).

Pour une différence de températures donnée, plus la résistance thermique est grande, plus le flux thermique qui traverse la paroi est petit ; plus le matériau est *bon isolant thermique*.

1. L'entropie n'est pas au programme.