4 Travail et chaleur

On présente dans ce chapitre les concepts de travail et de chaleur, qui sont centraux pour l'analyse des problèmes thermodynamiques.

4.1 Définition du concept de travail

En mécanique rationnelle, on a défini le travail comme le produit (scalaire) d'une force par un déplacement. Si un point matériel se déplace le long d'une courbe 1-2 dans un champ de force $\vec{F}$,

$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot \mathrm{d}\vec{x} \tag{4.1}$$

Semblablement, si on exerce une force de traction pour étirer un fil métallique ou un ressort, on emploiera la même expression pour calculer le travail effectué.

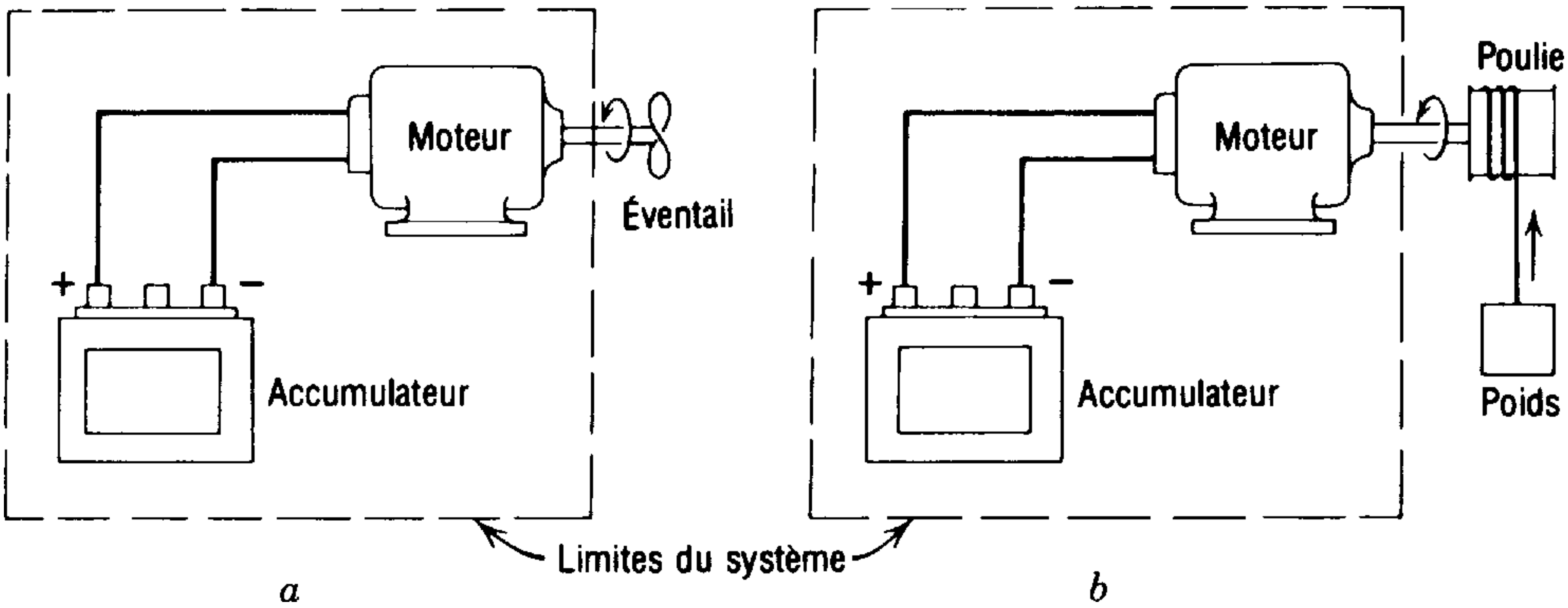
On va maintenant étendre ce concept de manière à ce qu'il puisse être utilisé pour l'étude des systèmes thermodynamiques. Il s'agit en effet de définir le travail reçu par un système.

> Un système échange du travail avec le milieu extérieur lorsque l'action du système sur le milieu extérieur peut se réduire au déplacement d'une masse dans le champ de la pesanteur

Remarques

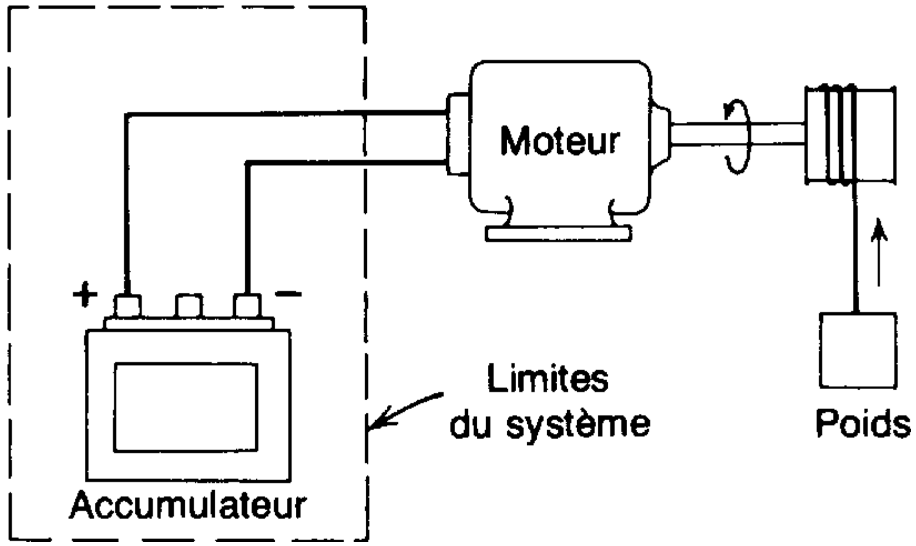
- Il n'est pas du tout nécessaire que le système déplace effectivement un poids, simplement que son action soit équivalente au déplacement d'un poids.
- Contrairement à Van Wylen et al., on adoptera la convention traditionnelle en Europe de compter comme positif le travail reçu par un système. Pour désigner le travail fourni par un système (qui est l'effet utile d'un système moteur), on utilisera la notation W^* ($W^* = -W$).

Illustrations



On remplace le ventilateur par une poulie à laquelle est suspendue un poids.

Lorsque le moteur tourne, son seul effet est de déplacer verticalement le poids, il y a donc échange de travail avec le milieu extérieur, dont la valeur est $W = -Ph \;\Rightarrow\; W^* = Ph$ où P est le poids et h le déplacement vertical compté positif vers le haut.



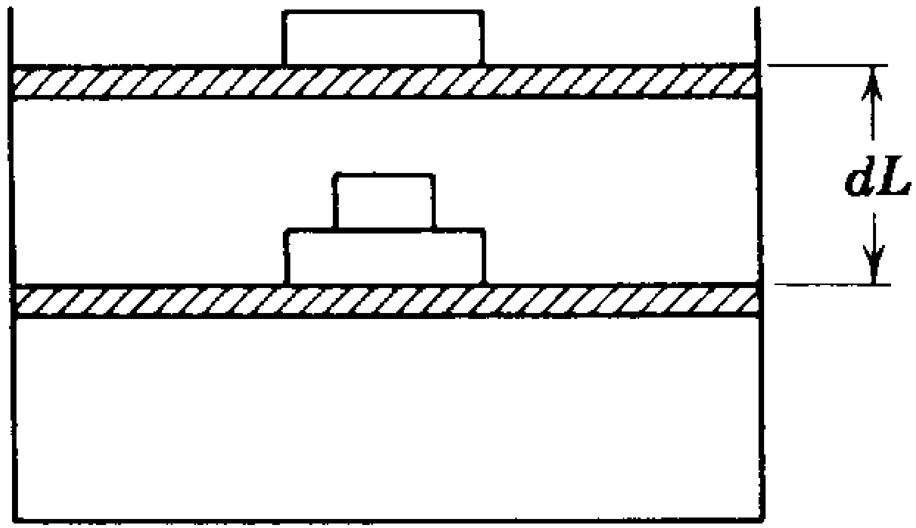
Dans ce deuxième exemple, le passage de courant électrique à travers la frontière du système constitue-t-il un échange de travail ?

En imaginant par la pensée que ce courant serve à alimenter un moteur électrique parfait (sans pertes) qui lui-même entraîne une poulie à laquelle est suspendue un poids, alors son seul effet est bien de déplacer un poids, et il y a donc bien échange de travail.

4.2 Travail à la frontière mobile d'un système contenant du fluide

On a vu dans les exemples précédents qu'un système peut échanger du travail avec le milieu extérieur par l'entremise d'un arbre tournant ou par le passage d'un courant électrique. On va considérer à présent l'échange de travail à la frontière mobile d'un volume de fluide compressible.

Soit le système constitué du gaz contenu dans le dispositif cylindre/piston ci-dessous.

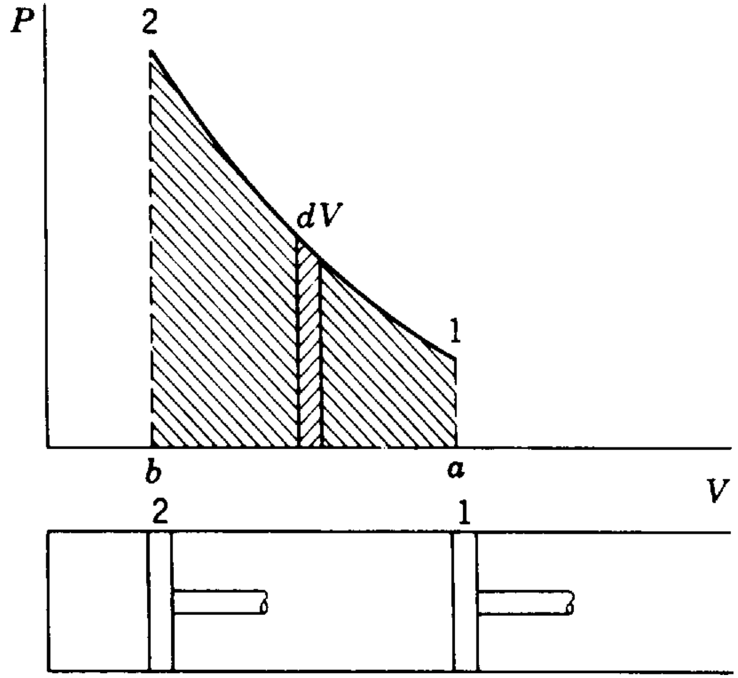


Imaginons qu'un poids infinitésimal soit retiré du piston. Il va dès lors se soulever d'une distance $\mathrm{d}L$. Comme la force exercée par le gaz sur le piston vaut $F = p\mathcal{A}$, le travail fourni par le système au cours de ce déplacement vaut

$$\delta W^* = p\mathcal{A}\mathrm{d}L = p\mathrm{d}V \tag{4.2}$$

Le travail effectué au cours d'une transformation quasi-statique sera alors obtenu en intégrant la relation précédente. Il faut, pour ce faire, connaître l'évolution de la pression en fonction du volume au cours de la transformation.

Supposons que l'on connaisse la courbe de compression, représentée dans un diagramme $p - V$, pour la compression schématisée ci-dessous.



Le travail reçu par le système sera donc donné par l'expression

$$_1W_2 = -\int_1^2 p\mathrm{d}V \qquad (4.3)$$

qui n'est rien d'autre que l'aire hachurée $a - 1 - 2 - b - a$.

Remarques

- Ce résultat n'est valable que pour autant que la transformation soit quasi-statique, c.-à-d. que tous les états intermédiaires soient des états de quasi-équilibre.
- Comme la compression de 1 à 2 peut se faire de multiples manières différentes, et puisque l'aire sous la courbe dépend de la courbe de compression suivie, on en déduit que le travail dépend non seulement des états initial et final, mais aussi du chemin parcouru entre ces états.

  Au contraire, la variation de volume entre 1 et 2 est indépendante du chemin parcouru. Mathématiquement, cela correspond au fait que $\mathrm{d}V$ est une différentielle exacte, alors que $\delta W = -p\mathrm{d}V$ ne l'est pas. Thermodynamiquement, cela correspond au fait que le volume est une variable d'état, alors que le travail ne l'est pas.

4.3 Autres formes d'échange de travail

On rencontre évidemment bien d'autres formes d'échange de travail. Voici à titre d'exemple quelques transformations quasi-statiques et l'expression du travail correspondant.

Traction d'un fil métallique $\delta W = \mathcal{T}\,\mathrm{d}L$, où $\mathcal{T}$ est la traction dans le fil ;

Étirement d'un film liquide $\delta W = \mathcal{S}\mathrm{d}\mathcal{A}$, où $\mathcal{S}$ est la tension superficielle dans le film, et $\mathcal{A}$ la surface du film ;

Charge d'un condensateur $\delta W = \mathcal{E}\mathrm{d}Z$, où $\mathcal{E}$ est la différence de potentiel aux bornes du condensateur et Z sa charge.

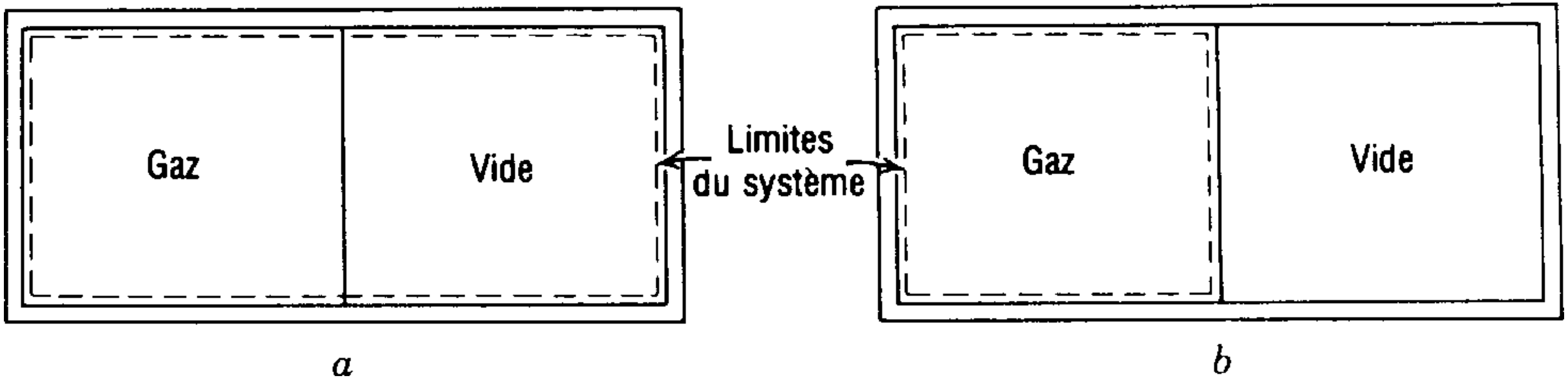
4.4 Remarques complémentaires sur le travail

Tout comme celle du travail reçu par un volume de fluide, on constate que les expressions précédentes sont chaque fois de la forme variable intensive multipliée par la variation d'une variable extensive correspondante, la variable intensive pouvant être considérée comme la « force » à l'origine de la variation de la variable extensive.

Il importe de garder à l'esprit que ce type d'expression n'est toutefois valable que pour des transformations quasi-statiques.

Le calcul du travail échangé par un système est un aspect important des problèmes thermodynamiques. D'abord, cet échange ne peut intervenir qu'aux frontières du système.

Considérons par exemple la rupture d'une membrane séparant un volume de gaz d'un volume évacué.



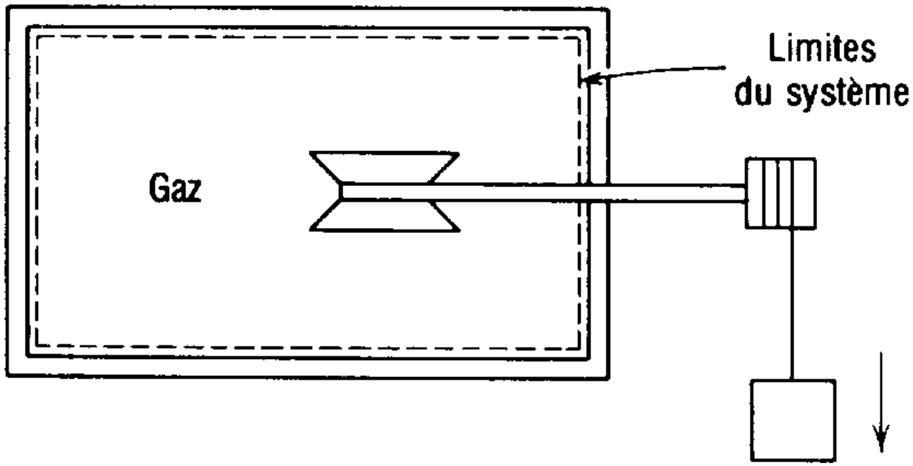
Lorsque la membrane se rompt, le gaz se répand dans la totalité du réservoir.

Considérons d'abord le système formé du gaz et de l'espace vide. Puisque la frontière du système ne se déplace pas lors de la transformation, on en déduit qu'aucun travail n'a été échangé.

Par contre, si l'on considère le système formé par le gaz, une variation de volume se produit, et l'on serait tenté de calculer le travail par l'expression $W = -\int_1^2 p\mathrm{d}V$.

Mais il ne s'agit pas d'une transformation quasi-statique, et donc l'expression ne s'applique pas. En réalité, la variation de volume s'effectue sans résistance, et donc aucun travail n'est échangé.

Prenons un autre exemple, à savoir le système représenté ci-dessous.



Le système considéré est constitué du contenu de l'enceinte. Lors du déplacement du poids, l'arbre tourne et du travail est reçu par le système, bien qu'il n'y ait aucune variation de volume. Le travail reçu est le produit du couple de torsion par l'angle de rotation à l'endroit où l'arbre est coupé par la frontière.

4.5 Définition du concept de chaleur

Considérons deux systèmes de température différentes. Comme on l'a déjà fait remarquer, si on met ces deux systèmes en contact, ils vont subir une transformation jusqu'à atteindre l'équilibre thermique.

Pour atteindre cet équilibre thermique, il y a dû manifestement y avoir un transfert d'énergie du système dont la température initiale était la plus élevée vers l'autre.

On appelle chaleur ou plus précisément quantité de chaleur la forme d'énergie transférée au cours d'un tel processus, c.-à-d. l'énergie transférée à la frontière d'un système sous l'effet d'une différence de température.

Il résulte de cette définition que, bien qu'un système contienne de l'énergie, on ne peut, dans celle-ci identifier une quantité de chaleur. L'existence d'une quantité de chaleur exige qu'il y ait transfert d'énergie à travers la frontière d'un système.

La chaleur étant comme le travail une forme d'énergie, on l'exprimera dans la même unité [J], et l'on considérera comme positive la chaleur reçue. On la désigne par le symbole Q.

Une transformation au cours de laquelle $Q = 0$ est appelée adiabatique.

Tout comme pour le travail, la chaleur échangée par un système avec le milieu extérieur au cours d'une transformation dépend non seulement des états initial et final, mais aussi du chemin parcouru. Mathématiquement, cela équivaut à dire que la quantité de chaleur infinitésimale échangée au cours d'une transformation infinitésimale n'est pas une différentielle exacte, de sorte qu'on la note par le symbole δQ. La quantité de chaleur totale échangée s'exprime alors par

$$_1Q_2 = \int_1^2 \delta Q$$

4.6 Comparaison entre chaleur et travail

Comme on l'aura remarqué, chaleur et travail présentent de nombreuses similitudes :

1. Chaleur et travail ne sont mis en évidence qu'à l'occasion d'une transformation d'un système. Un système ne contient ni travail ni chaleur, mais il peut échanger de l'énergie avec le milieu extérieur sous forme de travail et de chaleur.
2. Chaleur et travail ne peuvent être observés qu'aux frontières des systèmes, et représentent tous deux un transfert d'énergie à travers une frontière.
3. Travail et quantité de chaleur échangées au cours d'une transformation dépendent de la totalité du chemin parcouru au cours de celle-ci. Leurs variations ne sont donc pas des différentielles exactes et ce ne sont pas des variables d'état.