

Mécanique

Thermodynamique

Système

Un **système** est un corps ou un ensemble de corps de masse déterminée et délimitée dans l'espace.

Un système peut être **ouvert** (partie d'une canalisation) ou **fermé** (piston).

Un système **ouvert** échange de **l'énergie** et de la **matière** avec le milieu extérieur.

Un système est **homogène** s'il contient **une seule phase**.

Un système est **hétérogène** s'il contient plus d'une phase.

Un système est **isotherme** si sa **température** est **constante**.

Un système est **adiabatique** s'il **n'échange pas de chaleur** avec l'extérieur.

Un système est **diathermique** s'il **échange de la chaleur** avec l'extérieur.

Un système est **isolé** s'il est **fermé**, **calorifugé** et qu'**aucun travail** ne se produit dans le système.

Un **système isolé** n'échange **ni matière, ni chaleur, ni travail** avec l'extérieur. ¹

État

L'état thermodynamique d'un système est la description univoque de ce système.

Cet état est fixé par un ensemble de variables d'état dont le choix est arbitraire.

Variables d'état

Les variables d'état peuvent être **extensives** ou **intensives**.

Variables d'état extensives

Une variable est **extensive** si sa valeur dépend de la taille du système.

Par exemple : m , V , E

Variables d'état intensives

Une variable est **intensive** si sa valeur ne dépend pas de la taille du système.

Par exemple : T , p ainsi que les grandeurs molaires (v , V , e , E)

Fluide

Un **fluide** est un gaz ou un liquide.

Les **phases** possibles d'un **fluide** sont la phase **gazeuse**, la phase **liquide** et la phase **solide**.

Un **cycle** consiste en une transformation qui ramène le fluide à son état initial.

¹https://fr.wikipedia.org/wiki/Système_isolé

Chaleur

La **chaleur** est une forme de **travail**, qui correspond à une augmentation ou une diminution de l'**agitation des particules** constituant la matière.

Travail

Le **travail d'une force** est l'énergie fournie par cette force lorsque son point d'application se déplace.

Le **travail** est souvent noté **W**.

Son unité est le **joules (J)**.

Joule

Le **joule** est le **travail** d'une force motrice d'un **newton** dont le point d'application se déplace d'un **mètre** dans la direction de la force.

$$1J = 1N \cdot m = \frac{1kg \cdot m \cdot m}{s} = 1 \cdot \frac{kg \cdot m^2}{s}$$

- J = joule
- N = newton $\left[\frac{kg \cdot m}{s^2} \right]$
- m = mètre

Un **joule** est aussi l'énergie fournie par une puissance de **1 Watt** pendant **1 seconde**.

$$1J = 1W \cdot s$$

Un **joule** est l'énergie requise pour élever la température d'un gramme d'air d'un degré Celsius.

Newton

Le **newton** est l'unité de mesure de la **force**.²

Un **newton** est la force capable de communiquer à une masse de **1kg** une accélération de **1m/s²**.

$$1N = 1 \cdot \frac{kg \cdot m}{s^2}$$

Intensives massiques

Volume massique

$$v = V/m \text{ [m}^3\text{/kg]}$$

- V = volume $[m^3]$
- m = masse $[kg]$

²[https://fr.wikipedia.org/wiki/Newton_\(unité\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Newton_(unité))

Le volume massique d'un objet est l'inverse de sa masse volumique.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$

Énergie massique

$$e = E/m \text{ [J/kg]}$$

- E = énergie [J]
- m = masse [kg]

Intensives molaires

Volume molaire

$$\Upsilon = V/M$$

- V = volume [m^3]
- M = masse molaire [moles]

Énergie molaire

$$\epsilon = E/M$$

- E = énergie [J]
- M = masse molaire [moles]

Quantité de chaleur (formule différentielle)

$$\delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T$$

- Q = élément infinitésimal de chaleur à un moment donné [J]
- m = masse [kg]
- c = capacité thermique massique / chaleur massique [J/kg · K]
- ΔT = différence de température subie par le fluide à un moment [K]

Puissance calorifique

$$\dot{Q} = \frac{\delta Q}{dt} = m \cdot c \cdot \frac{dT}{dt}$$

- puissance de la chaleur par unité de temps
- m = masse [kg]
- c = capacité thermique massique / chaleur massique [J/kg · K]

Transformation de compression

Une transformation est le passage d'un état à l'autre. ³

Une **transformation** est **réversible** si le chemin pour passer de l'état 1 à l'état 2 peut être pris dans l'autre sens. La transformation doit se dérouler en une succession d'états d'équilibre. Ce cas n'existe pas réellement, la réversibilité n'est jamais totale.

Une **transformation** est **irréversible** si le chemin pour passer d'un état à l'autre ne peut être annulé.

Une **transformation** est **quasi-statique** lorsque la réversibilité n'est pas totale mais suffisamment proche de l'équilibre, par des écarts infinitésimaux.

Transformation isochore

Le **volume du système** reste constant durant la transformation.

Si le volume reste constant, on peut déduire que le travail à fournir est nul.

La pression et la température peuvent varier.

Transformation isobare

La **pression du système** reste constante durant la transformation.

Transformation isotherme

La **chaleur du système** reste constante durant la transformation.

Transformation adiabatique

Aucun transfert thermique n'est effectué avec l'extérieur durant la transformation.

La chaleur ne reste pas forcément constante dans le système.

Équilibre thermodynamique

Si le système est isolé du milieu extérieur et qu'aucune modification de ses variables d'état n'intervient, alors ce système est en équilibre thermodynamique.

Principe 0 (zéro)

« Lorsque 2 corps sont en équilibre thermique avec un 3e, ces 2 corps sont aussi en équilibre entre eux ».

Relation de la calorimétrie

La quantité de chaleur échangée est proportionnelle :

- à la masse ;
- à l'écart de température ;
- à la capacité thermique massique.

³https://fr.wikiversity.org/wiki/Transformations_thermodynamiques/Transformations

Pendant un changement de phase, la température ne varie pas. La chaleur latente est utilisée durant le changement de phase.

$$Q = m \cdot l$$

- Q = chaleur [Joules]
- m = masse [kg]
- l = chaleur latente

La **chaleur latente** change l'état physique d'une matière. Par opposition à la chaleur sensible qui modifie la température d'une matière. ⁴

Loi de Fourier

$$\delta \vec{Q} = -k \cdot S \cdot \vec{\text{grad}} T$$

- k = conduction thermique (conductivité) de l'élément
- S = surface de contact / échange
- $\vec{\text{grad}} T$ = vecteur de variation de la température

Transfert de chaleur

Conduction

La conduction est la propagation de la chaleur de proche en proche d'un corps à l'autre par contact physique direct.

$$\dot{Q} = k \cdot S \cdot \frac{\Delta T}{L}$$

- \dot{Q} = flux en mouvement [Watt]
- k = coefficient de conduction (conductivité) [W/m · K]
- S = surface d'échange [m²]
- ΔT = différence de température [°C] ou [K]
- $L = e$ = épaisseur [mètres]

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R}$$

- \dot{Q} = flux en mouvement [Watt]
- ΔT = différence de température [°C] ou [K]
- R = résistance [Ω]

⁴<http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=11244>

Densité de flux

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S}$$

- \dot{q} = densité de flux $[W/m^2]$
- \dot{Q} = flux en mouvement $[Watt]$

Convection

La convection est l'échange de chaleur entre une surface et un fluide en mouvement.

$$\dot{q} = h \cdot \Delta T$$

- \dot{q} = densité de flux $[W/m^2]$
- h = coefficient de convection $[W/m^2 \cdot K]$
- ΔT = différence de température $[^{\circ}C]$ ou $[K]$

Rayonnement

Principe d'équivalence

Lors de toute transformation cyclique d'un système thermodynamique fermé, **la somme des travaux mécaniques et des quantités de chaleur échangées** entre le système et son environnement est **nulle**.

$$\oint (\delta W + \delta Q) = 0$$

Premier principe de la thermodynamique

Au cours d'une transformation adiabatique, la **variation de l'énergie** d'un système est égale au **travail échangé** avec le milieu extérieur.

$$\Delta E = \sum \delta W + \sum \delta Q = 0$$

Rendement

Le rendement mesure le rapport de l'énergie utile sur l'énergie consommée :

$$\eta = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie consommée}} = \pm x\%$$

Ex: le rapport entre le travail utile fourni et la quantité de chaleur consommée.

Efficacité

Rapport de ce qui a été produit sur l'idéal.

Aussi appelé coefficient de performance ⁵.

$$\varepsilon = \frac{\text{produit}}{\text{idéal}}$$

Sur base de la proposition de Thomson/Joule, qui s'applique pour toute machine effectuant une transformation réversible (par exemple une machine de Carnot) :

$$\left| \frac{\dot{Q}_{TH}}{\dot{Q}_{TB}} \right| \equiv \frac{T_H}{T_B}$$

avec

- \dot{Q}_{TH} le débit de chaleur absorbé ou rejeté à haute température ;
- \dot{Q}_{TB} le débit de chaleur absorbé ou rejeté à basse température ;
- T_H et T_B les températures en *Kelvin* ;

on peut en déduire :

$$\varepsilon = \frac{Q_{fr}}{W} = \frac{1}{\frac{T_{ch}}{T_{fr}} - 1}$$

Démonstration :

$$\varepsilon = \frac{Q_{fr}}{W} = \frac{Q_{fr}}{Q_{ch} - Q_{fr}} = \frac{Q_{fr} \cdot \frac{1}{Q_{fr}}}{(Q_{ch} - Q_{fr}) \cdot \frac{1}{Q_{fr}}} = \frac{\frac{Q_{fr}}{Q_{fr}}}{\frac{Q_{ch}}{Q_{fr}} - \frac{Q_{fr}}{Q_{fr}}} = \frac{1}{\frac{Q_{ch}}{Q_{fr}} - 1} = \frac{1}{\frac{T_{ch}}{T_{fr}} - 1}$$

⁵https://fr.wikipedia.org/wiki/Coefficient_de_performance

Moteur de Carnot

Le rendement du moteur de Carnot produit du travail en utilisant la chaleur injectée.

Un **rendement de 1** est **impossible** (monotherme).

$$\eta = \left| \frac{W}{Q_{ch}} \right| = \frac{|W|}{Q_{ch}} = \frac{|Q_{ch}|}{Q_{ch}} - \frac{|Q_{fr}|}{Q_{ch}} = 1 - \frac{|Q_{fr}|}{Q_{ch}}$$

car d'après le principe d'équivalence ⁶, $\delta W = -\delta Q$ donc $\delta W = -(Q_{ch} + Q_{fr})$, ce qui donne $\delta W = Q_{ch} - Q_{fr}$.

Frigo de Carnot

Le rendement du frigo de Carnot produit de la chaleur froide en utilisant le travail.

Un **rendement supérieur à 1** est **possible** (efficacité frigo).

$$\eta = \frac{Q_{fr}}{W} = \frac{1}{\frac{|Q_{ch}|}{Q_{fr}} - 1}$$

Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur consomme du travail pour produire de la chaleur de chauffe.

Le **rendement** est **supérieur à 1** (coefficient de performance).

$$\eta = \frac{|Q_{ch}|}{W} = \frac{1}{1 - \frac{Q_{fr}}{|Q_{ch}|}}$$

Corollaires

Premier corollaire

Un cycle moteur **irréversible** a nécessairement un **rendement inférieur** au cycle moteur **réversible**.

Cela s'applique seulement si les 2 cycles fonctionnent à partir de réservoirs de chaleur identiques, aux mêmes températures.

Deuxième corollaire

À condition d'utiliser des réservoirs de chaleur identiques, aux mêmes températures, tous les **moteurs réversibles** ont le **même rendement**.

⁶Voir page 6

Troisième corollaire

Le rendement d'un cycle moteur réversible ne dépend que de la température des réservoirs de chaleur.

$$\eta = 1 - \frac{|Q_{fr}|}{Q_{ch}}$$