Chapitre θ2 – Premier principe de la thermodynamique

I) Énergie totale d'un système

1) Énergie interne

L'énergie totale d'un système est la somme de :
- l'énergie mécanique $\mathcal{E}_m = \mathcal{E}_c + \mathcal{E}_p$ où $\mathcal{E}_p$ représente l'énergie d'interaction entre le système et le milieu extérieur ;
- **énergie interne**, notée U, qui représente la somme des énergies à l'échelle microscopique d'un système (énergie cinétique de chaque particule, énergie d'interaction entre particules, etc).

Les énergies sont des **fonctions d'états** (leur valeur dépendent uniquement l'état du système, pas du chemin suivi pour arriver dans cet état) **extensives** $\boxed{U = n \times U_m}$ et **additives** $\boxed{U_{\{1+2\}} = U_{\{1\}} + U_{\{2\}}}$

2) Capacité thermique à volume constant

Lorsqu'un corps subit une variation de température dT à volume constante, son énergie interne varie de dU. On appelle **capacité thermique à volume constant** :

$$C_V = \left.\frac{\partial U}{\partial T}\right|_V$$

Remarque : $\partial \rightarrow$ dérivée partielle.

Dans le cas du GP et de la PCI, U ne dépend que T (pas de V). Ainsi,

$$C_V = \frac{dU}{dT}$$

On suppose de plus que C_V est constant.

$$\boxed{dU = C_V dT \quad \Rightarrow \quad \Delta U = C_V \Delta T}$$

Dans le cas du GP, on justifiera (cf. chap. θ3) que :

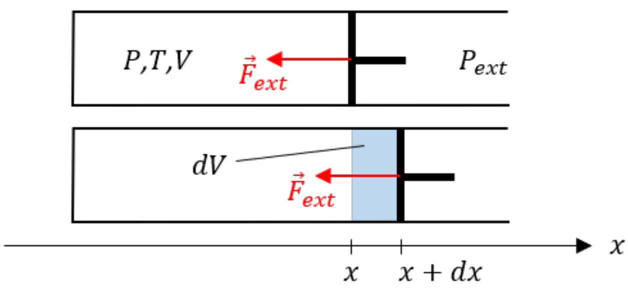
$$\boxed{C_V = \frac{nR}{\gamma - 1}}$$

où γ s'appelle le **coefficient de Laplace** du gaz.

II) Transferts d'énergie sous forme mécanique

1) Forces de pression

Soit un gaz enfermé dans un volume V avec une paroi mobile. On note $\vec{F}_{ext}$ la force de pression exercée par le gaz extérieur sur la paroi mobile.



Calculons le travail élémentaire de la force de pression extérieure.

$$\delta W_{fp} = \vec{F}_{ext} \cdot \overrightarrow{d\text{OM}} = (-P_{ext}\ S\vec{u}_x) \cdot (dx\,\vec{u}_x) = -P_{ext}\ Sdx = -P_{ext}\ dV$$

avec dV le volume élémentaire dont a varié l'enceinte.

Propriété : Soit un système soumis à une force de pression. Le travail (ie. la quantité d'énergie reçue) des forces de pression par le système entre un état initial de volume V_i et un état final de volume V_f vaut :

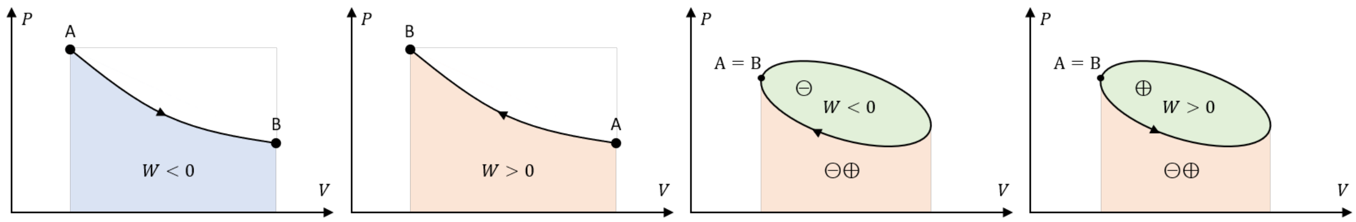
$$\boxed{\delta W_{fp} = -P_{ext}\ dV \quad \Rightarrow \quad W_{fp} = -\int_{V_i}^{V_f} P_{ext}\ dV}$$

Attention ! W_{fp} fait bien intervenir la pression extérieure, pas le pression intérieure.

Si la réaction n'est pas trop rapide, alors le système est toujours en équilibre mécanique avec le milieu extérieur : $\boxed{P = P_{ext}}$. L'expression du travail des forcesde pression devient :

$$W_{fp} = -\int_{V_i}^{V_f} P\ dV$$

Il s'agit donc, au signe « $-$ » près, de l'aire sous la courbe $P(V)$ dans le diagramme de Clapeyron.



Si $V_f > V_i$, alors $W_{fp} < 0$: le système cède de l'énergie au milieu extérieur car P_{ext} s'est opposée à se déplacement.

Si $V_f < V_i$, alors $W_{fp} > 0$: le système reçoit de l'énergie au milieu extérieur car la pression extérieur a été motrice de se déplacement.

Transformation cyclique dans le sens horaire : $W_{fp} < 0$. Le système cède à chaque cycle de l'énergie, c'est un moteur.

Transformation cyclique dans le sens trigonométrique : $W_{fp} > 0$. Le système reçoit à chaque cycle de l'énergie, c'est un récepteur.

2) Autres forces non conservatives

On rencontrera des machines où des **pièces mobiles** interagissent avec le système d'étude. Exemples : une turbine, un compresseur. Ces pièces mobiles exercent une force sur le système qui délivre une puissance $\mathcal{P}_u$ que l'on appelle **puissance utile** reçue par le système.

On rappelle le lien entre le travail et la puissance :

$$\boxed{\mathcal{P}_u = \frac{\delta W_u}{dt} \quad \Rightarrow \quad W_u = \int \mathcal{P}_u\ dt}$$

III) Transferts d'énergie sous forme thermique

1) Chaleur

Lors d'une transformation, le système peut échanger de l'**énergie thermique** ou **chaleur** avec le milieu extérieur. On note Q la quantité de chaleur reçue par le système.

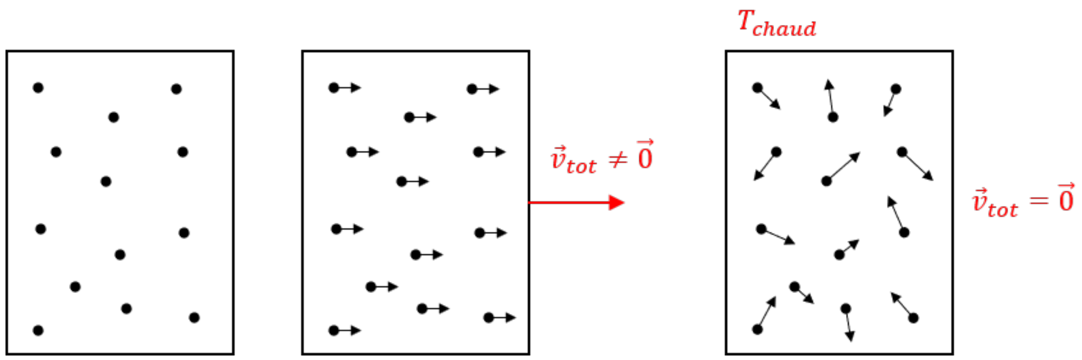
Comme le travail, la quantité de chaleur dépend du chemin suivi au cours de la transformation. Un échange infinitésimal chaleur se note donc δQ.

Propriété :

- Le travail d'une force correspond à un transfert d'énergie macroscopique et ordonnée, facilement exploitable.
- La chaleur correspond à un transfert d'énergie microscopique et désordonnée, donc difficilement exploitable.

Explication :

Soit un système immobile, loin de toute matière ($\mathcal{E}_m = 0$) et à $T = 0$ ($U = 0$).

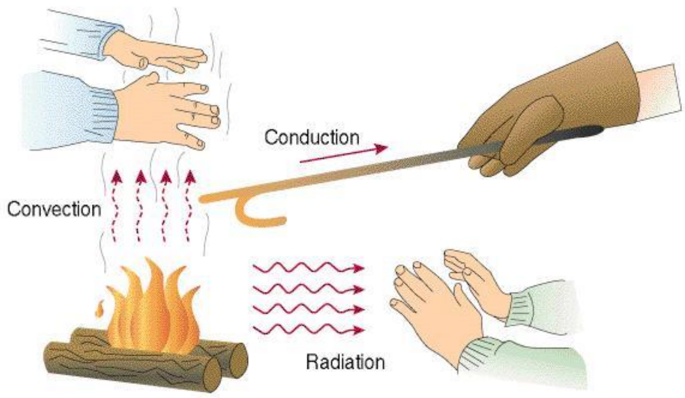


Première situation : on exerce une force pour déplacer le système vers la droite. Chaque particule acquière une vitesse $\overrightarrow{v}$ vers la droite. Le système possède une vitesse d'ensemble : $\overrightarrow{v}_{tot} = \sum \overrightarrow{v}_i \neq \overrightarrow{0}$.

Deuxième situation : on chauffe le système. Chaque particule acquière une vitesse $\overrightarrow{v}$ dans une direction aléatoire. Le système possède une vitesse d'ensemble : $\overrightarrow{v}_{tot} = \sum \overrightarrow{v}_i = \overrightarrow{0}$.

2) Modes de transferts thermiques

Un transfert thermique peut se faire de 3 manières.



Le transfert de chaleur par **conduction** est un échange d'énergie de proche en proche au sein d'un système sans déplacement macroscopique de matière.

Exemple : Dans la tige métallique, le transfert par conduction est assez rapide, donc l'autre l'extrémité va rapidement se réchauffer. Dans un gant, le transfert par conduction est très lent : cela permet de toucher la tige sans se bruler.

Le transfert de chaleur par **convection** est dû à un déplacement macroscopique de matière : de la matière chaude se déplace dans une zone où la matière est plus froide.

Exemple : l'air chaud, moins dense que l'air froid, s'élève au-dessus du feu.

Le transfert de chaleur se fait par rayonnement électromagnétique. Tout corps émet un rayonnement thermique (courbe en cloche, cf. chap. O1) où $I_{\max}$ et $\lambda_{\max}$ dépend de la température du corps. C'est le seul mode de transfert pouvant se propager dans le vide.

Exemple : rayonnement EM du feu ou du soleil.

3) Exemples de puissance thermique

De même qu'avec le travail, on peut définir une puissance thermique reçue par le système.

$$\boxed{\mathcal{P}_{th} = \frac{\delta Q}{dt} \quad \Rightarrow \quad Q = \int \mathcal{P}_{th}\ dt}$$

Exemples :

- Une résistance produit une puissance thermique :

$$\boxed{\mathcal{P}_{\text{Joule}} = Ri^2}$$

- Le métabolisme d'un être humaine produit une puissance (réactions exothermiques internes)

$$\mathcal{P}_{\text{méta}} \simeq 100 \text{ W}$$

- Puissance thermique rayonnée par un corps de surface S à la température T

$$\mathcal{P}_{\text{ray}} = \sigma S T^4 \quad \text{avec :} \quad \sigma = 5{,}67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$$

- Puissance thermique reçue par contact :

$$\boxed{\mathcal{P}_{th} = h\left(T_{ext} - T\right) \quad \text{avec :} \quad h > 0}$$

Si $T_{ext} > T$ alors $\mathcal{P}_{th} > 0$: le système reçoit de la chaleur. Si $T_{ext} < T$ alors $\mathcal{P}_{th} < 0$: le système cède de la chaleur.

IV) Premier principe de la thermodynamique

1) Énoncé du PP

Le premier principe est une généralisation du TEM/TPM, en prenant en compte :
- l'énergie totale du système $\mathcal{E}_{tot} = \mathcal{E}_m + U$
- les échanges d'énergie par travail W_{nc} et par chaleur Q.

La variation totale d'énergie d'un **système fermé** au cours d'une transformation est égale à la somme des travaux des forces extérieures non conservatives et des transferts thermiques algébriquement reçus par le système.

$$\boxed{d\mathcal{E}_m + dU = \delta W_{nc} + \delta Q \quad \Rightarrow \quad \Delta\mathcal{E}_m + \Delta U = W_{nc} + Q}$$

Avec tout ce qui précède :
- $\Delta\mathcal{E}_m = \Delta\mathcal{E}_c + \Delta\mathcal{E}_p$ souvent négligé dans les exercices de thermodynamique
- $\Delta U = C_V \Delta T$ pour GP et PCI
- $W_{nc} = -\displaystyle\int P_{ext} dV + \int \mathcal{P}_u dt$
- $Q = \displaystyle\int \mathcal{P}_{th} dt$

2) Transformations usuelles

Au cours d'une transformation, le milieu extérieur peut imposer certaines contraintes sur la nature de la transformation.

Soit un système de pression P, de volume V et de température T. Il est en contact avec un milieu extérieur de pression P_{ext} et de température T_{ext}.

<u>Définitions</u> : Une transformation est dite :
- **isochore** lorsque $V = cte$
- **monotherme** lorsque $T_{ext} = cte$
- **isotherme** lorsque $T = cte$
- **monobare** lorsque $P_{ext} = cte$
- **isobare** lorsque $P = cte$
- **adiabatique** lorsque $Q = 0$ (pas d'échange de chaleur), cela se produit lorsque les parois sont calorifugées ou lorsque la transformation est rapide (les échanges de chaleur sont lents)

3) Quelques transformations usuelles d'un GP à connaître

On considère un GP, système fermé macroscopiquement au repos ($\Delta\mathcal{E}_m = 0$), qui ne reçoit pas de travail utile. Le PP s'écrit :

$$\Delta U = W_{fp} + Q$$

Transformation isochore

On considère une transformation isochore de T_0 à T_1. On note : $\Delta T = T_1 - T_0$.

$$\boxed{W_{fp} = 0} \quad \Rightarrow \quad \Delta U = Q \quad \Rightarrow \quad \boxed{Q = C_V \Delta T}$$

Transformation isotherme

On considère une transformation isotherme de V_0 à V_1.

Pour réaliser une transformation isotherme ($T = cte$), il faut nécessairement réaliser une transformation suffisamment lentement pour que le système soit toujours en équilibre thermique (long à atteindre) avec un thermostat ($T_{ext} = cte$). L'équilibre mécanique, plus rapide, est donc lui aussi toujours atteint. Donc $P = P_{ext}$.

$$W_{fp} = -\int_{V_0}^{V_1} P_{ext} dV = -\int_{V_0}^{V_1} P dV = -\int_{V_0}^{V_1} nRT\ \frac{dV}{V} = -nRT \int_{V_0}^{V_1} \frac{dV}{V} \quad \Rightarrow \quad \boxed{W_{fp} = -nRT\ \ln\left(\frac{V_1}{V_0}\right)}$$

Le PP donne :

$$\Delta U = C_V \Delta T = 0 = W_{fp} + Q \quad \Rightarrow \quad \boxed{Q = nRT\ \ln\left(\frac{V_1}{V_0}\right)}$$

Transformation monobare

On considère une transformation monobare de V_0 à V_1, avec équilibre mécanique aux instants initial et final ($P_0 = P_1 = P_{ext}$)

$$W_{fp} = -\int_{V_0}^{V_1} P_{ext} dV = -P_{ext}\left(V_1 - V_0\right) = -\left(P_1 V_1 - P_0 V_0\right) = -nR\left(T_1 - T_0\right) \quad \Rightarrow \quad \boxed{W_{fp} = -nR\Delta T}$$

Le PP donne :

$$\Delta U = C_V \Delta T = W_{fp} + Q \quad \Rightarrow \quad \boxed{Q = \left(C_V + nR\right)\Delta T}$$