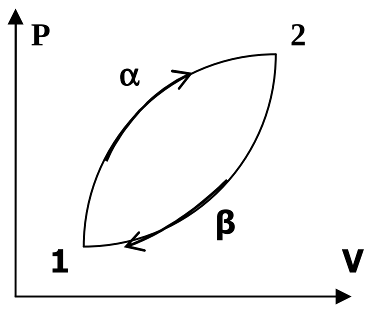
Chapitre II. Premier principe de la thermodynamique ou principe de la conservation de l'énergie

Introduction :

Le premier principe ou principe d'équivalence, permet de faire le bilan des différentes formes d'énergies relatives à un système lors d'une transformation donnée, mais sans pour autant indiquer le sens du déroulement de cette transformation. Il ne tient pas compte du caractère d'irréversibilité d'une opération

II.1 :Expression du premier principe pour un système fermé :

II.1.1 : principe de l'équivalence.



On considère un système S qui décrit une transformation thermodynamique fermée (cycle) dans le diagramme de CLAPYRON (p, v) cette transformation sera représentée par une courbe 1 α 2 β 1, dont la forme peut être quelconque.

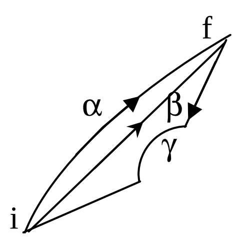
*Au cours de cette transformation, le système échange avec le milieu extérieur un travail **W** et une quantité de chaleur **Q**.*

*Le premier principe peut être exprimé en disant que quelque- soit la forme de la courbe représentant la transformation, les grandeurs **W** et **Q** sont liés par la relation :* $(W+Q)_{\text{cycle}} = 0$

$$\text{Où } W_{cycle} = - Q_{cycle}.$$

II.1.2 : Principe de l'état initial et l'état final :

Soient les transformations suivantes d'un état initial (i) à un état final (f) avec $i \neq f$.



$$\left.\begin{array}{l} Cycle\ \ i.\alpha.f.\gamma.i \Rightarrow W\alpha + Q\alpha + W\gamma + Q\gamma = 0 \\ Cycle\ \ i.\beta.f.\gamma.i \Rightarrow W\beta + Q\beta + W\gamma + Q\gamma = 0 \end{array}\right\} \ 1^{er} \text{ principe}$$

En égalisant les deux équations on aura :

$$W\alpha + Q\alpha + W\gamma + Q\gamma = W\beta + Q\beta + W\gamma + Q\gamma$$

On en déduit : $W\alpha + Q\alpha = W\beta + Q\beta = -(W\gamma + Q\gamma)$.

La quantité (W+Q) échangée au cours d'une transformation i $\rightarrow$ f est indépendante du chemin suivit et ne dépend donc, que des états d'équilibre initial et final.

Il en résulte que lorsque le système passe de l'état i à l'état f, la somme W+Q à une valeur fixe. Cette somme est donc déterminée par les états initial et final du système et ne dépend pas de l'évolution de celui ci entre les deux états.

En d'autres termes, la somme w+Q représente la variation d'une certaine fonction d'état. On appelle cette fonction, ***l'énergie interne*** *du système, notée* ***U.***

Pour une transformation de A à B par exemple, on a :

$$(W+Q)_A^B = U_B - U_A = \Delta U.$$

Où U_A et U_B sont les valeurs de U pour les états A et B
Tandis que : W et Q sont les quantités d'énergies mécanique et thermique échangées par le système entre ces deux états.

L'énergie interne est donc une grandeur caractéristique d'un état du système, et caractérise l'évolution de ce système.

A l'échelle microscopique, l'énergie interne U est la contribution d'un certain nombre d'énergies du système. $U = U_a + U_i + U_m + U_p$

Avec :

$$\begin{cases} Ua : \text{Energie inter- atomique (Energie de liaison) ;} \\ Ui : \text{Energie inter- moléculaire (Energie de liaison) ;} \\ Um : \text{Energie de cohésion ;} \\ Up : \text{Energie d'agitation thermique.} \end{cases}$$

$\Delta U > 0$ *Si le système reçoit de l'énergie.*
$\Delta U < 0$ *Si le système fournit de l'énergie*

Tout échange d'énergie entre le système S et le milieu extérieur M_E se fait sous forme de chaleur soit sous forme de travail, soit sous les deux formes.

NB : *l'énergie interne d'un système isolé est constante car :*

$$W = Q = 0 \Rightarrow \Delta U = 0 \Rightarrow U = Constante.$$

II.1.3 : Premier principe -Cas général :

U énergie interne, dépend du système, c'est une fonction intrinsèque du système S considéré, il existe d'autres énergies fonction du système S et du milieu extérieur, on à :

- *Energie cinétique Ec.*
- *Energie potentielle Ep.*
-

Pour un état d'équilibre du système, on peut définir l'énergie totale E_T, tel que, $E_T = U + Ec + Ep$, *finalement le premier principe s'écrit :*

$$\boxed{(W_p + Q) = \Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep}$$

***Remarque* : Pour un système isolé :**

Un système isolé est un système pour lequel il n y a ni échange de chaleur, ni échange de travail avec le milieu extérieur (W+Q=0).

Le premier principe s'écrit

$\Delta U + \Delta Ec + \Delta Ep = 0 \Rightarrow \Delta(U + Ec + Ep) = 0 \Rightarrow U + Ec + Ep = cte.$ *Principe de la conservation de l'énergie.*

II.1.4 : Transformations thermomécaniques à pression extérieure constante et à volume constant :

Définition d'une transformation thermomécanique.

Une transformation thermomécanique est une transformation qui ne fait intervenir que la chaleur et le travail de forces de pression extérieure.

$$\begin{cases} Q \\ W = Wp = -\int_1^2 Pe.dv \end{cases}$$

1^er principe $\rightarrow W + Q = \Delta U$ *on néglige* ΔEc *et* ΔEp.

$$p \Leftrightarrow \int_1^2 Pe + Q = \Delta U \Rightarrow \boxed{Q = \Delta U + \int_1^2 Pe.dv}$$

a) Transformation isochore (à volume constant) :

$V = cte \Rightarrow dv = 0 \Rightarrow Q = \Delta U$

$\boxed{Q = \Delta U}$ *Transformation thermomécanique à volume constant.*

b) Transformation isobare (à pression constante) :

$$\int_1^2 Pe.dv = Pe.\int_2^2 dv = Pe.(V_2 - V_1)$$

Système en équilibre Pe =P

$$\Rightarrow \int_1^2 Pe.dv = P(V_2 - V_1) \Rightarrow Q = \Delta U - Wp = \Delta U + P.(V_2 - V_1) = \Delta U + P.V_2 - PV_1$$

Avec : $P_2=P_1=P$ *donc,* $Q = \Delta(U + PV)$ *avec :* $(U + PV) = H$

La grandeur (U+PV) est appelée ***Enthalpie*** *et notée* **H**. *c'est une énergie car on a :*

U : énergie ; PV : énergie.
H est une nouvelle fonction d'état vu que U : fonction d'état ; PV : fonction d'état, d'où :

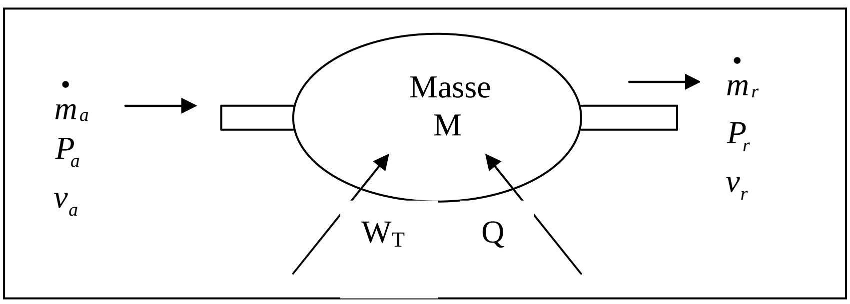
$\boxed{Q = \Delta H}$ *Transformation thermomécanique à pression constante.*

NB : *L'énergie thermique échangée lors d'une transformation à pression extérieure constante est égale à la variation d'enthalpie* $\Delta H = H_2 - H_1$ *au cours de cette transformation avec :* $H = U + P.V$

Si Q > 0 réaction endothermique $H_2 > H_1$.
Si Q < 0 réaction exothermique $H_2 < H_1$.

II.2 : Expression du premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert :

II.2.1 : Système ouvert en régime permanant :



On considère une machine thermique fonctionnant en régime permanant (stationnaire ou établi) c-à-d pour lequel les paramètres caractéristiques du système sont indépendants du temps.

A l'instant T, le système a une énergie interne U_1 Avec $U_1 = U_{1M} + \dot{m}aU_a$

$$\begin{cases} U_1 : \text{Energie interne /temps.} \\ U_{1M} : \text{Energie interne de la masse fluide à l'instant T (Energie /temps).} \\ \dot{m}_a U_a : \text{Energie interne de la couche fluide sur le point d'entrée } (U_a : \text{énergie/masse}). \end{cases}$$

A l'instant T+dt, le système a une énergie interne U_2 Avec : $U_2 = U_{2M} + \dot{m}rUr$

$$\begin{cases} U_2 : \text{Energie interne /temps.} \\ U_{2M} : \text{Energie interne de la masse fluide à l'instant T+dt (Energie /temps).} \\ \dot{m}_r U_r : \text{Energie interne de la couche fluide sur le point de sortir.} \end{cases}$$

On régime établi, on a : $U_{1M} = U_{2M} \Rightarrow \dot{W} + \dot{Q} = U_2 - U_1$

Le système échange un travail $\dot{W}$ avec le milieu extérieur. Ici le milieu extérieur se compose :

- *Des couches fluide qui précédent le système M et qui fournissent le travail $P_a \dot{m}_a V_a$ nécessaire à faire rentrer la masse $\dot{m}_a$ par unité de temps (V_a volume massique du fluide dans les conditions a).*

- *Des couches fluide qui suivent le système et qui lui fournissent le travail $-P_r \dot{m}_r V_r$ qui tendent à empêcher la masse $\dot{m}_r$ de sortir (égal au travail fourni par le système).*

- *De la machine qui échange le travail $\dot{W}_T$ (travail technique par unité de temps) fourni par la machine.*

Finalement le travail échangé entre le système S et le milieu extérieur est :

$$\dot{W} = \dot{W}_t + p_a.\dot{m}_a.v_a - p_r.\dot{m}_r.v_r.$$

Le premier principe s'écrit : $\dot{W} + \dot{Q} = U_2 - U_1$ *en remplacent $\dot{W}$ par sa valeur, on obtient :*

$$\dot{W}_T + p_a.\dot{m}_a.v_a - p_r.\dot{m}_r.v_r + \dot{Q} = U_2 - U_1 = \dot{m}_r.U_r - \dot{m}_a.U_a$$

$$\dot{W}_T + \dot{Q} = \dot{m}_r \underbrace{\left(U_r + p_r.v_r\right)}_{Hr} - \dot{m}_a \underbrace{\left(U_a + p_a.v_a\right)}_{Ha}$$

*Avec **Hr**, **Ha** enthalpies massiques respectivement au refoulement et à l'admission.*

Et si on néglige pas les énergies cinétique et potentielle, on obtient :

$$\dot{W} + \dot{Q} = \dot{m}(H_r + Ec_r + Ep_r) - \dot{m}_a(H_a + Ec_a + Ep_a).$$

En régime permanant $\dot{m}_a = \dot{m}_r = \dot{m}$ *(conservation de la masse) d'où*

$$\dot{W}_T + \dot{Q} = \dot{m}\left(\underbrace{H_r - H_a}_{\Delta H} + \underbrace{Ec_r - Ec_a}_{\Delta Ec} + \underbrace{Ep_r - Ep_a}_{\Delta Ep}\right) \Leftrightarrow \boxed{\dot{W}_T + \dot{Q} = \dot{m}(\Delta H + \Delta Ec + \Delta Ep)}$$

Avec : $\begin{cases} \dot{W}_T \text{ et } \dot{Q} & \text{en J/s.} \\ \Delta H, \Delta Ec, \Delta Ep & \text{en J/kg.} \end{cases}$

On peut écrire également : $W_T + Q = m(\Delta H + \Delta Ec + \Delta Ep)$
avec :

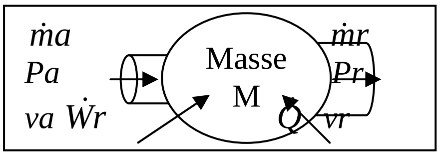
$$\begin{cases} W_T \text{ et } Q & \text{en joule} \\ \Delta H, \Delta Ec, \Delta Ep & \text{en J/kg.} \end{cases}$$

Ou pour m = 1 On a : $\boxed{W + Q = (\Delta H + \Delta Ec + \Delta Ep)}$ *en joule/kg.*

II.2.2 : Cas général système ouvert en régime variable :

Régime variable $m_a \neq m_i$

U_{1m} *: énergie interne contenue à l'intérieur de la machine.*
E_{cm} *: énergie cinétique contenue à l'intérieur de la machine.*
E_{pm} *: énergie potentielle contenue à l'intérieur de la machine.*



Bilan énergétique au niveau de la machine par unité de temps

* ***Energie rentrante.***
  - $\dot{W}_T, \dot{Q}$
  - $\dot{m}_a, p_a, v_a.$ *travail fourni par les couches fluide à l'entrée de la machine.*
  - $\dot{m}_a(U_a + Ec_a + Ep_a).$ *l'énergie totale du fluide entrant.*

* ***Energie sortante.***
  - $\dot{m}_r.p_r.v_r.$ *travail qui tend à empêcher le fluide de sortir.*
  - $\dot{m}_r(U_r + Ec_r + Ep_r).$ *l'énergie totale du fluide sortant.*

Bilan :

La variation d'énergie contenue dans la machine est égale à ce qui rentre moins ce qui sort pendant l'unité de temps.

$$\Delta E_t = \Delta(U_M + Ec_M + Ep_M) = \dot{W}_T + \dot{Q} + \dot{m}_a.p_a.v_a + \dot{m}_a(U_a + Ec_a + Ep_a) - \dot{m}_r.p_r.v_r - \dot{m}_r(U_r + Ec_r + Ep_r)$$

$$\Delta(U_M + Ec_M + Ep_M) = \dot{W}_T + \dot{Q} + \dot{m}_a\left(\underbrace{p_a.v_a + U_a}_{Ha} + Ec_a + Ep_a\right) - \dot{m}_r\left(\underbrace{p_r.v_r + U_r}_{Hr} + Ec_r + Ep_r\right)$$

$$\boxed{\Delta(U_M + Ec_M + Ep_M) = \dot{W}_T + \dot{Q} + \dot{m}_a(H_a + Ec_a + Ep_a) - \dot{m}_r(H_r + Ec_r + Ep_r)}$$

Expression du premier principe pour une machine thermique fonctionnant en régime variable (non permanant).

***NB* :** *En régime permanant* $\Delta E_T = 0$*, l'énergie totale à l'intérieur de la machine n'a pas Changée.*

$$\left.\begin{array}{l} \Rightarrow \Delta U_M = \Delta E_{CM} = \Delta E_{PM} = 0 \\ \dot{m}_a = \dot{m}_r = \dot{m} \quad (\text{ régime permanant }) \\ \dot{W}_T + \dot{Q} = \dot{m}(\Delta H + \Delta Ec + \Delta Ep) \end{array}\right\} \text{On retrouve le résultat précédant.}$$

Fin du chapitre