II Premier principe de la thermodynamique

1 _ Expression du premier principe pour un système fermé

Soit un système de corps quelconque, limité par une surface Σ au travers de laquelle ne s'effectuent que des échanges de travail et de chaleur.

Si W et Q désignent le travail et la chaleur échangés par le système dans une transformation qui l'amène d'un état 1 à un état 2, W_{cin} étant son énergie cinétique et U son énergie interne, le premier principe s'exprime par :

$$(W+Q)_{1-2} = U_2 - U_1 + W_{cin\,2} - W_{cin\,1}$$

Il résulte que la somme des quantités de travail et de chaleur échangés par le système ne dépend que de l'état initial et de l'état final et est indépendante de la transformation qui l'amène de l'un à l'autre ; ce résultat est souvent énoncé sous le nom de principe de l'état initial et de l'état final.

S'il s'agissait d'un cycle l'état final serait confondu avec l'état initial et l'on aurait :

$$W + Q = 0$$

soit en introduisant le travail fourni au milieu extérieur $W_e = -W$: $\Rightarrow -W_e + Q = 0 \Rightarrow$

$$W_e = Q$$

C'est le principe d'équivalence de chaleur et de travail.

2 _ Cas d'un système isolé :

Un système matériel isolé ne peut échanger avec l'extérieur ni chaleur ni travail, ni aucune sorte d'énergie et par conséquent :

$$U + W_{cin} = cte$$ l'énergie totale reste constante

C'est le principe de la conservation d'énergie

3. Expression différentielle du premier principe :

Considérons, un système matériel dont l'état ne dépend que de deux variables x, y. Il pourrait s'agir par exemple de P et V. Nous supposerons négligeable la variation d'énergie cinétique. Lorsque le système passe de l'état (x, y) à l'état $(x+dx, y+dy)$ infiniment voisin, l'énergie interne du système varie de :

$$dU = \frac{\partial U}{\partial x} dx + \frac{\partial U}{\partial y} dy \quad (1)$$

En général, on peut mettre δQ et δW sous la forme :

$$\delta Q = A dx + B dy \quad \text{et} \quad \delta W = C dx + D dy$$

A, B, C, D des fonctions de x et de y.

D'après le 1er principe, la variation d'énergie interne est : $dU = \delta W + \delta Q = (A+C) dx + (B+D) dy$

soient : $A + C = M$ et $B + D = N \Rightarrow$

$$dU = M dx + N dy \quad (2)$$

$$(1) \text{ et } (2) \Rightarrow \begin{cases} M = \dfrac{\partial U}{\partial x} \\ N = \dfrac{\partial U}{\partial y} \end{cases}$$

d'où la condition nécessaire :

$$\frac{\partial M}{\partial y} = \frac{\partial N}{\partial x}$$

On pourra donc exprimer analytiquement le 1er principe en écrivant que la quantité $dU = \delta W + \delta Q$ est une différentielle totale exacte.

Rque : Ni δW, ni δQ ne sont, en général, des différentielles totales exactes. C'est la raison d'être de la notation δ. W et Q dépendent en général, non seulement de l'état initial et de l'état final, mais aussi du chemin suivi pour passer de l'un à l'autre.

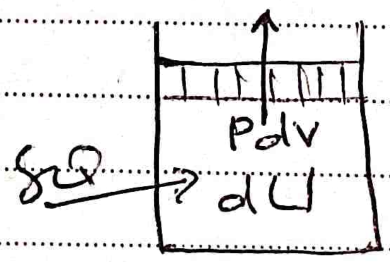
4. Expression simplifiée du premier principe

Soit une masse fluide qui ne subit que des transformations réversibles, l'expression du premier principe pour une
1 transformation élémentaire où l'énergie cinétique n'intervient pas est :

$$\delta Q = dU + PdV$$

avec $\delta W = -PdV$

cette expression exprime seulement que la quantité de chaleur δQ est utilisée, d'une part à accroître l'énergie interne de dU et à fournir, d'autre part, à l'extérieur le travail PdV (fig 1)



(fig 1.)

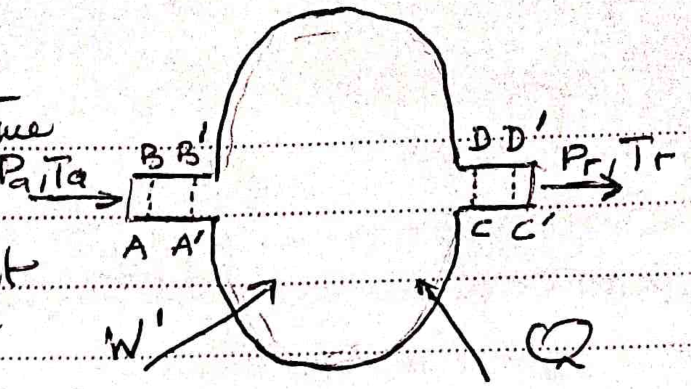
5. Expression du premier principe dans le cas d'une machine thermique en régime permanent

Les formules qui ont été établies précédemment sont valables pour des systèmes fermés n'échangeant pas de matière avec l'extérieur. Or, dans la réalité, on a le plus souvent à considérer des systèmes qui échangent avec l'extérieur non seulement du travail et de la chaleur, mais aussi de la matière, c.a.d des systèmes ouverts.

Nous nous limiterons au cas de machines échangeant continuellement du fluide avec l'extérieur, comme c'est le cas pour les moteurs alternatifs à combustion interne, les turbo-compresseurs et les turbines à vapeur ou à gaz et nous supposerons le régime permanent ou stationnaire (indépendant du temps).

Les échanges de matière s'effectuent grâces à des tubulures d'admission (a) et d'échappement ou de refoulement (r) (fig 2).

W', le travail reçu par le système du milieu extérieur entre deux instant t et t', indépendamment de celui des forces de pression à l'admission et à l'échappement. Dans le cas d'un turbo-compresseur, ce travail serait transmis au fluide par l'intermédiaire de l'arbre du compresseur entraîné par un moteur électrique par exemple, grâce aux ailettes dont sont équipées les roues successives.



(fig 2)

A l'instant t elle (masse) est comprise entre les sections AB et CD, à l'instant t', entre les sections A'B' et C'D' et le travail reçu par le fluide des forces de pression P_a et P_r est:

$$P_a S_a AA' - P_r S_r CC' = P_a \cdot \text{Volume}(ABA'B') - P_r \cdot \text{Volum}(CDC'D')$$

Donc, le travail reçu par la masse pendant son passage dans la machine ou travail de transvasement est :

$$P_a V_a - P_r V_r$$

l'expression du premier principe pour le système Σ s'écrit :

$$W' + P_a V_a - P_r V_r + Q = U_r - U_a + W_{cin\,r} - W_{cin\,a}$$

En introduisant la fonction enthalpie $H = U + PV$, on obtient :

$$W' + Q = H_r - H_a + W_{cin\,r} - W_{cin\,a}$$

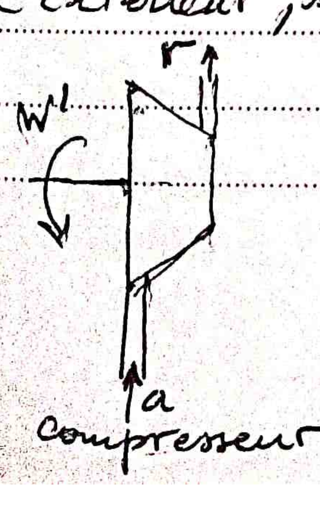
Souvent on néglige le terme energie cinétique, il restera :

$$W' + Q = H_r - H_a$$

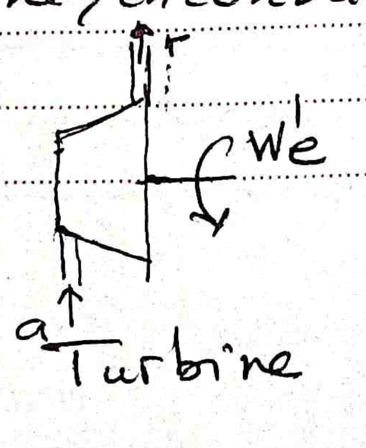
Dans le cas d'une turbine ou d'un compresseur non refroidi, les échanges de chaleur restent très faibles :

- Pour un compresseur $\longrightarrow$ $W' = H_r - H_a$
  ce qui signifie que le travail absorbé se retrouvera dans l'augmentation d'enthalpie du fluide
- Pour une turbine on mettra en évidence le travail fourni à l'extérieur, sur l'arbre de la turbine, en écrivant :

$$W'_e = H_a - H_r$$



compresseur



Turbine

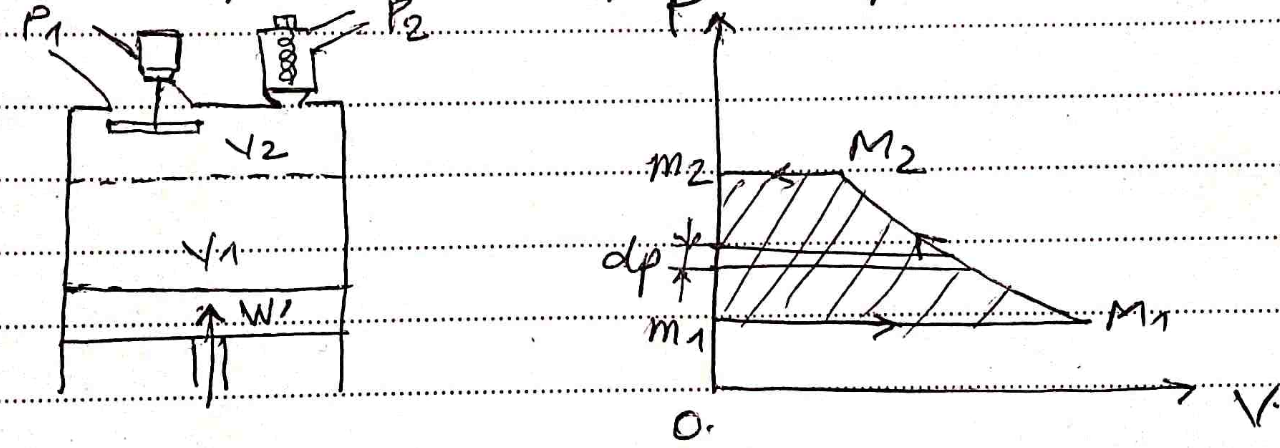
Le travail utile W' dépensé dans une machine à échange continuel de fluide avec l'extérieur se calculera, en supposant la réversibilité mécanique par :

$$W' = -\int_{V_1}^{V_2} P\,dV + P_2V_2 - P_1V_1 = \int_{P_1}^{P_2} V\,dp$$

Formule évidente dans le cas d'un compresseur alternatif, si l'on suppose l'espace mort négligeable puisque :

$$W' = -P_1V_1 - \int_{V_1}^{V_2} P\,dV + P_2V_2 = -\int_{P_1}^{P_2} V\,dp$$

Sur le diagramme de Clapeyron, le travail dépensé pour la compression est représenté par l'aire $m_1M_1M_2m_2$



Rques :

1) $\delta Q = dU + PdV = d(U+PV) - Vdp = dH - Vdp$.

2) Dans le cas de l'écoulement d'un fluide dans une canalisation, Dans ce cas $W' = 0 \Rightarrow W_{cin2} - W_{cin1} = H_1 - H_2 + Q$ l'augmentation d'énergie cinétique ne peut provenir que d'une diminution d'enthalpie du fluide ou d'un apport de chaleur

3) Si l'évolution est adiabatique $Q = 0$

$$W_{cin2} - W_{cin1} = H_1 - H_2$$

C'est l'écoulement d'un gaz dans une tuyère