Cours I : Thermodynamique

2 Thermodynamique industrielle des fluides en régime permanent d'écoulement

2.1 Définitions

2.1.1 Système ouvert

Définition :
Un système est **ouvert** s'il échange de la matière avec l'extérieur, contrairement à un système **fermé**. Cependant, il peut y avoir transfert d'énergie dans les deux cas (contrairement à un système **isolé**).

Types de systèmes ouverts utilisés au quotidien :

- pompes de circulation d'eau des installations de chauffage central
- chaudières
- moteurs

Les fluides sont admis par des accès (les entrées) et rejetés par d'autres accès (les sorties) après avoir subi un échange d'énergie ou une réaction chimique.

2.1.2 Débit massique

Définition :
On peut définir à chaque instant le **débit massique**, D_m, à travers une surface S comme le rapport de la masse dm, comptée algébriquement, qui traverse S entre les instants t et t+dt par :

$$D_m = \frac{dm}{dt} \tag{1}$$

Avec : D_m = Débit massique en $kg.s^{-1}$

Remarque :
Si l'on raisonne sur un système Σ comportant N accès. La masse est conservative. Donc, si l'on somme les débits massiques D_{mk} entrant dans Σ par les différents accès k à l'instant t, on peut considérer que la masse totale m contenue dans Σ s'accroit entre t et t + dt de dm par :

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{k=1}^{N} D_{m_k}$$

2.1.3 Régime permanent

Définition :
Le **régime permanent** est défini comme le fonctionnement au cours duquel toute grandeur intensive est constante dans le temps, en tout point donné du système.

Exemple : chaudière de chauffage central. Elle possède deux régimes de fonctionnement :

- mise en route de la chaudière : l'eau est froide et va chauffer -> régime non permanent
- stabilisation du fonctionnement : les eaux admises et rejetées ont atteint une température stable dans le temps -> régime permanent

Remarque :
Un tel régime n'est souvent qu'un modèle. On peut néanmoins souvent étudier le régime nominal de fonctionnement dans l'approximation du régime permanent.

2.1.4 Conservation de la masse

Lors du régime permanent, la masse volumique du fluide conservant en tout point du système Σ une valeur constante dans le temps, la masse m(t) du système ne varie plus. On a donc :

$$\sum_{k=1}^{N} D_{m_k} = 0$$

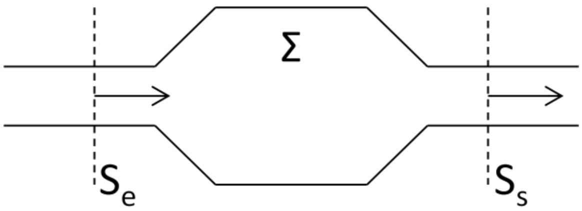
Pour un système ne comportant qu'une entrée et une sortie, la conservation de la masse se traduit par :

$$D_{m_e} = D_{m_s} = D_m \qquad (2)$$

Avec : D_{me} = Débit massique en entrée du système Σ en $kg.s^{-1}$
D_{ms} = Débit massique en sortie du système Σ en $kg.s^{-1}$

Remarque :
Soit le système ouvert Σ dans lequel circule un fluide. On peut relier le débit massique à la masse volumique du fluide, μ, sa vitesse, v, ainsi qu'à la section de la conduite, S, où circule le fluide par :

$$D_m = \mu v S$$

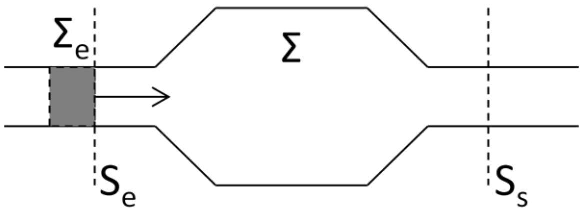


2.2 Formulation du premier principe

2.2.1 Hypothèses

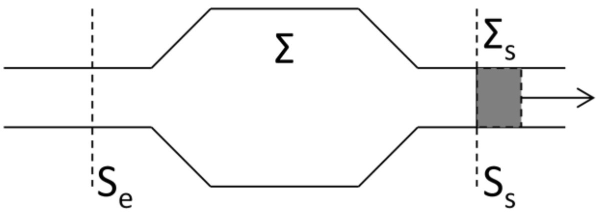
Démonstration : à connaître
Soit un système ouvert Σ fonctionnant en régime permanent, comportant une entrée et une sortie. On observe son évolution entre t et t + dt. On néglige les énergies cinétiques et potentielles macroscopiques.

A l'instant t : on a une réunion de Σ et Σ_e
- fluide contenu dans Σ à t
- fluide entrant dans Σ pendant dt



La masse du fluide dans Σ_e est : $dm = D_m dt = \mu_e v_e S_e dt$

A l'instant t+dt : on a une réunion de Σ et Σ_s
- fluide contenu dans Σ à t+dt
- fluide sortant dans Σ pendant dt



On est en régime permanent : la masse de fluide dans Σ_s est égale à la masse de fluide dans Σ_e.

Prenons maintenant le système Σ', réunion de Σ et Σ_e à l'instant t et de Σ et Σ_s à l'instant t+dt. Ce système est un système fermé.

Sur le système Σ', on a :

$$dU_{\Sigma'} = U_{\Sigma'}(t+dt) - U_{\Sigma'}(t) = \delta W + \delta Q$$

L'énergie interne est extensive, la réunion de deux systèmes donne la somme des énergies internes. On a donc :

$$U_{\Sigma'}(t+dt) = U_{\Sigma}(t+dt) + dm.u_s$$
$$U_{\Sigma'}(t) = U_{\Sigma}(t) + dm.u_e$$

Avec : u_e = Energie interne massique du système Σ_e en $J.kg^{-1}$

u_s = Energie interne massique du système Σ_s en $J.kg^{-1}$

Le régime est permanent, d'où :

$$U_{\Sigma}(t+dt) = U_{\Sigma}(t) \quad \Rightarrow \quad dU_{\Sigma'} = dm(u_s - u_e) = \delta W + \delta Q$$

En utilisant l'enthalpie massique définit par :

$$h = \frac{H}{m} = \frac{U+PV}{m} = u + \frac{P}{\mu}$$

On obtient :

$$\boxed{dH_{\Sigma'} = dm(h_s - h_e) = dm(u_s - u_e) + dm\left(\frac{P_s}{\mu_s} - \frac{P_e}{\mu_e}\right) = \delta W + \delta Q + dm\left(\frac{P_s}{\mu_s} - \frac{P_e}{\mu_e}\right)}$$

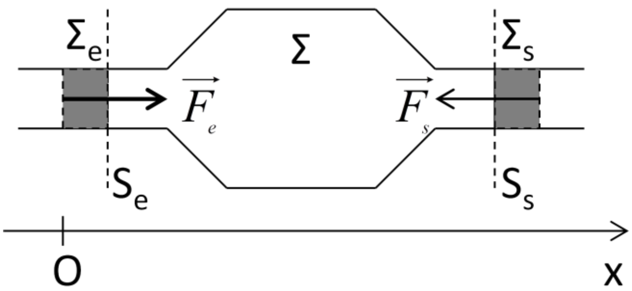
Avec : h_e = Enthalpie massique du système Σ_e en $J.kg^{-1}$

h_s = Enthalpie massique du système Σ_s en $J.kg^{-1}$

2.2.2 Expression du travail

Les forces de pression en amont et aval du système Σ' sont données par :

$$\overrightarrow{F_e} = P_e S_e \overrightarrow{e_x} \quad et \quad \overrightarrow{F_s} = -P_s S_s \overrightarrow{e_x}$$



Le travail total dû aux force de pression reçu par Σ' est donc donné par :

$$\delta W_P = \vec{F} \cdot \overrightarrow{dl} = P_e S_e v_e dt - P_s S_s v_s dt = P_e \frac{D_m}{\mu_e} dt - P_s \frac{D_m}{\mu_s} dt = \frac{P_e}{\mu_e} dm - \frac{P_s}{\mu_s} dm$$

A ce travail des forces de pression, il faut rajouter un autre travail reçu par le système. Il correspond en général à un travail reçu par des parties mobiles à l'intérieur du système. On l'appelle **travail indiqué** tel que :

$$\delta W_i = P_i dt$$

Avec : P_i = **Puissance mécanique indiquée** en W

Le travail total reçu par Σ' est donc donné par :

$$\boxed{\delta W = P_i dt + \frac{P_e}{\mu_e} dm - \frac{P_s}{\mu_s} dm}$$

2.2.3 Expression du transfert thermique

Le transfert thermique peut s'exprimer en fonction de la puissance thermique :

$$\boxed{\delta Q = \phi_e dt}$$

Avec : ϕ_e = **Puissance (ou flux) thermique** en W

2.2.4 Expression du premier principe

$$dm(h_s - h_e) = \delta W + \delta Q + dm\left(\frac{P_s}{\mu_s} - \frac{P_e}{\mu_e}\right) = P_i dt + \frac{P_e}{\mu_e}dm - \frac{P_s}{\mu_s}dm + \phi_e dt + dm\left(\frac{P_s}{\mu_s} - \frac{P_e}{\mu_e}\right) = P_i dt + \phi_e dt$$

Soit finalement :

$$\boxed{D_m(h_s - h_e) = P_i + \phi_e}$$

Ceci nous donne par unité de masse la formulation du premier principe de la thermodynamique pour un système ouvert dont on néglige les énergies cinétiques et potentielles :

$$\Delta h = h_s - h_e = \omega_i + q_e \qquad (3)$$

Avec : ω_i = **Travail massique indiqué** en $J.kg^{-1}$
q_e = **Transfert thermique massique** reçu en $J.kg^{-1}$

2.2.5 Prise en compte du mouvement

Rappel :

L'énergie cinétique totale du système, E_c, est la somme de l'énergie cinétique d'agitation thermique E_c* et de l'énergie cinétique macroscopique (égale à $\frac{1}{2}mv^2$).

On a donc pour une masse m :

$$E_c = E_c^* + \frac{1}{2}mv^2$$

L'énergie potentielle totale d'un fluide est la somme de l'énergie potentielle d'interaction E_{pint}, forces intérieures exercées mutuellement par les particules du fluide et de l'énergie potentielle de pesanteur (égale à mgz).

Seules l'énergie cinétique d'agitation thermique et l'énergie potentielle d'interaction entre particules du fluide sont comptées dans l'énergie interne et l'énergie mécanique totale, E_m, s'écrit :

$$U = E_c^* + E_{p_{\text{int}}} \quad \Rightarrow \quad E_m = U + \frac{1}{2}mv^2 + mgz$$

Retour au premier principe :

Le premier principe traduit la conservation d'énergie, il doit donc inclure toute les formes d'énergies cinétiques et potentielles. Soit au final :

$$(h_s + \frac{1}{2}v_s^2 + gz_s) - (h_e + \frac{1}{2}v_e^2 + gz_e) = \omega_i + q_e$$

En utilisant Δ pour représenter la variation d'une fonction d'état du fluide entre l'entrée et la sortie de la machine considérée, on obtient la formulation du premier principe dans le cas d'un système ouvert simple, à une entrée et une sortie :

$$\Delta h + \Delta e_c + \Delta e_p = q_e + \omega_i \qquad (4)$$

Avec : e_c = énergie cinétique macroscopique massique en $J.kg^{-1}$
e_p = énergie potentielle de pesanteur massique en $J.kg^{-1}$

2.2.6 Ordres de grandeur

<u>Exemple</u> : L'énergie thermique nécessaire pour vaporiser un kg d'eau sous pression usuelle ≈ 2200 kJ.
Pour atteindre une valeur comparable :

- avec l'énergie cinétique, il faut une vitesse de 2.10^3 $m.s^{-1}$
- avec l'énergie potentielle de pesanteur, il faut une dénivellation de 200 km

Dans la plupart des cas usuels, les énergies cinétiques et potentielles seront négligeables.

<u>Exceptions :</u> - usine hydroélectrique, on va utiliser l'énergie potentielle de pesanteur
- tuyère de réacteur, on va utiliser l'énergie cinétique

<u>Exercice</u> : 2.5.1

2.3 Cycles industriels

Pour tous les exemples, on fera les approximations suivantes :

- le régime est permanent
- les énergies cinétiques et potentielles macroscopique des fluides sont négligées
- les enceintes sont calorifugées

2.3.1 Echangeur thermique

Il comprend une enceinte calorifugée dans laquelle circulent deux fluides. Il n'y a pas de mélange de matière entre les deux circuits, mais échange thermique.

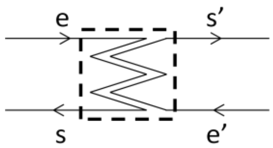
Bilan massique : - premier circuit : le débit massique entrant par l'accès (e) est égal au débit massique sortant par l'accès (s) = D_m
- second circuit : idem = D'_m

Bilan énergétique, en absence de travail fourni et du fait du caractère adiabatique :

$$D_m(h_e - h_s) + D'_m(h_{e'} - h_{s'}) = 0$$

Exemple avec de l'eau, alors en prenant c, la capacité calorifique massique de l'eau :

$$dh = cdT \quad \Rightarrow \quad D_m(T_e - T_s) + D'_m(T_{e'} - T_{s'}) = 0$$



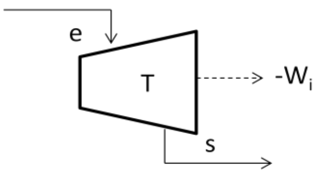
2.3.2 Turbine

Un fluide vaporisé met en mouvement les pales d'une turbine. L'axe mis en rotation peut alors entrainer une autre machine, on récupère de l'énergie mécanique. On peut aussi produire de l'électricité en couplant un alternateur à la turbine. On cherche à maximiser la récupération d'énergie utile, au détriment de l'énergie cinétique du fluide, on peut donc la négliger.

Bilan massique : $D_{m_e} = D_{m_s} = D_m$

Bilan énergétique : on a un signe négatif pour ω_i car le travail sort de la machine

$$h_e - h_s = -\omega_i$$

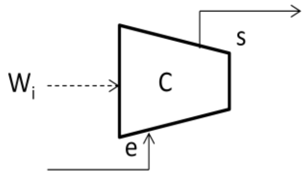


<u>Exercice</u> : 2.5.2

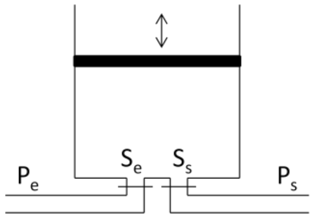
2.3.3 Compresseur

Il fonctionne à l'inverse d'une turbine. L'extérieur fournit un travail mécanique pour mettre en mouvement les pièces mobiles. Donc :

$$h_s - h_e = \omega_i$$



La manière la plus simple de réaliser une compression est d'utiliser un compresseur à piston. Le volume au cours d'un cycle passe de la valeur maximale V_1 à la valeur nulle, puis revient à V_1.



On peut décomposer le cycle de fonctionnement en plusieurs étapes :

- (1) à (2) : La soupape S_e vient de se fermer. Le piston amorce sa descente, la pression dans le cylindre augmente de P_e à P_s jusqu'à atteindre un volume V_2. Le système est fermé.
- (2) à (3) : La soupape S_s s'ouvre. La phase de refoulement dure jusqu'à ce que le piston atteigne le fond du cylindre. La pression est constante, le système est ouvert.
- (3) à (1) : La soupape de sortie se ferme. Le piston remonte et la soupape d'entrée s'ouvre. La phase d'admission se fait sous pression constante égale à P_e. Le système est ouvert.

Il est possible de représenter l'évolution du système par l'intermédiaire de deux diagrammes (à ne pas confondre) :

- le **diagramme de Clapeyron** : pression P dans l'enceinte en fonction du volume massique du fluide
- le **diagramme de Watt** : pression P dans l'enceinte en fonction du volume V de l'enceinte.

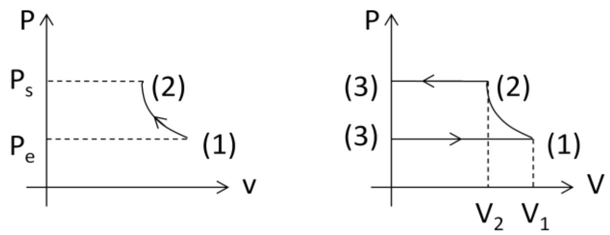


Diagramme de Clapeyron Diagramme de Watt

2.3.4 Tuyère

Le gaz subit une détente spontanée dans une conduite de forme bien choisie. Au cours de cette évolution, l'énergie cinétique du fluide s'accroit. Il est donc raisonnable de négliger l'énergie cinétique massique d'entrée, mais pas celle de sortie. On peut par contre toujours négliger les énergies potentielles de pesanteur.

Bilan énergétique : aucun travail n'est fourni, l'évolution est adiabatique

$$h_s + \frac{1}{2}v_s^2 - h_e = 0$$

La vitesse de sortie est donc donnée par : $v_s = \sqrt{2(h_e - h_s)}$

<u>Exercice</u> : 2.5.3

2.3.5 Exemple d'un cycle avec et sans changement d'état

Exercice : 2.4.1 et 2.4.2

Que l'on parle d'un système ouvert ou d'un système fermé, la définition du rendement ou de l'efficacité reste la même.

Définition :
De façon générale, l'efficacité d'un cycle (ou rendement dans le cas d'un moteur) se définit comme le rapport de la « puissance utile » sur la « puissance coûteuse » (associée à une dépense).

A retenir et savoir faire :

- Connaître l'expression du débit massique
- Connaître le premier principe pour un système en écoulement permanent et savoir les redémontrer
- Savoir que les énergies cinétiques et potentielles sont généralement négligées
- Savoir faire la distinction entre le diagramme de Clapeyron et de Watt
- Savoir étudier un cycle thermique avec ou sans changement d'état