

Chapitre II

Bilan de masse, d'énergie et d'entropie pour un système ouvert



**Ce support de cours est en sa 1ère version
toute suggestion ou avis de la part des lecteurs
(en particulier des étudiants) est la bienvenue**

I- Bilan de masse, d'énergie et d'entropie pour un système ouvert

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

1- Bilan de masse

Pour faire le bilan de masse d'un système ouvert, on le délimite par une surface fermée. Cette surface est dite *surface de contrôle* et le volume qu'elle délimite est dit *volume de contrôle*. Le système étant ouvert, cette surface de contrôle permet l'échange de masse, de chaleur et de travail.

Par ailleurs, la quantité de masse dans le volume de contrôle ainsi que les propriétés de cette masse peuvent varier en fonction du temps.

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

1- Bilan de masse

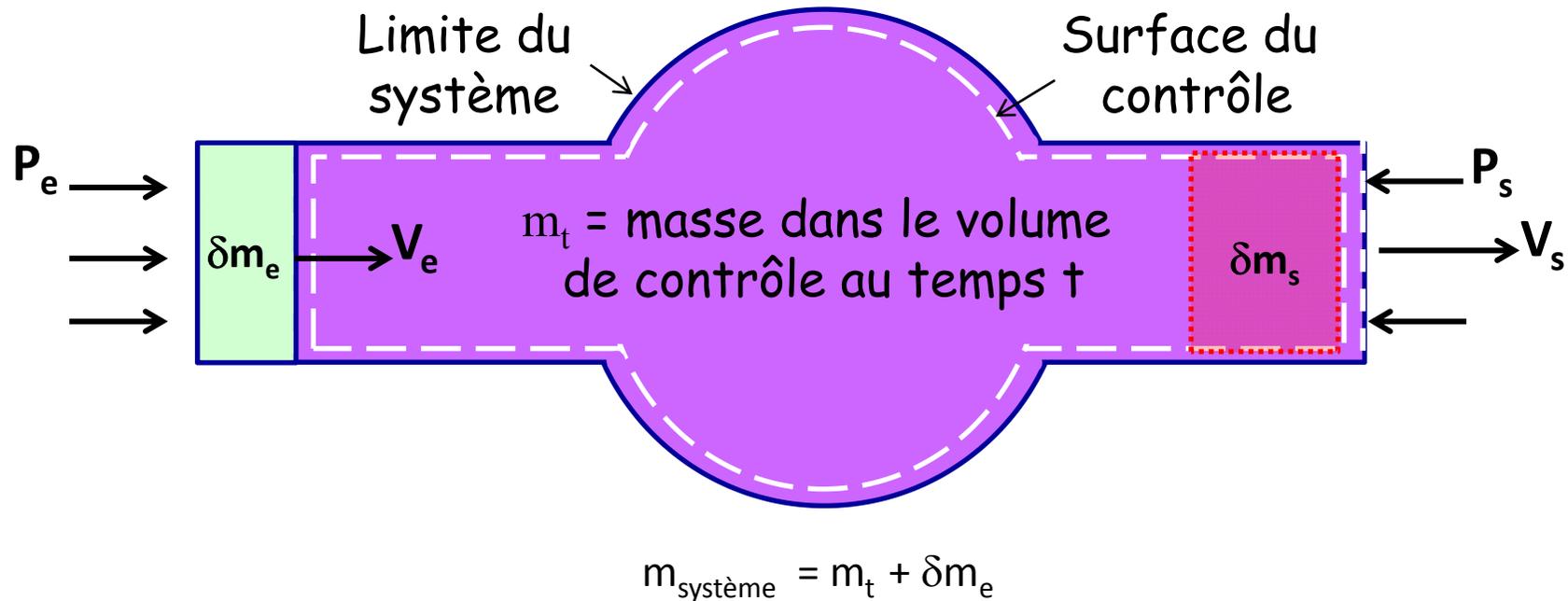
Pour établir le bilan de masse d'un système ouvert, nous considérons un système de masse m_t à l'instant t . Au bout d'un intervalle de temps δt , cette masse devient $m_{t+\delta t}$.

Au cours de cet intervalle de temps la masse δm_e entre dans le système et la masse δm_s en sort.

La figure suivante illustre le système étudié.

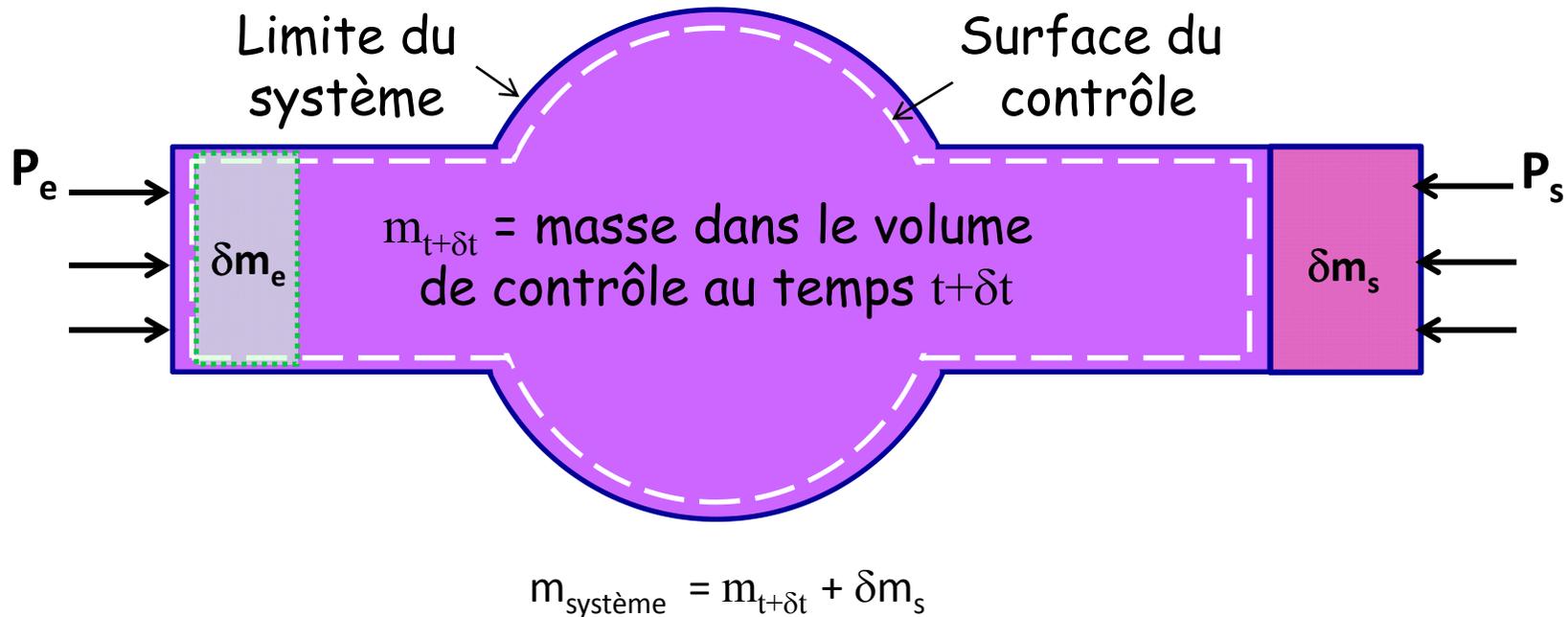
I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

1- Bilan de masse



I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

1- Bilan de masse



I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

1- Bilan de masse

Le principe de conservation de la masse s'écrit:

$$\delta m_e + m_t = m_{t+\delta t} + \delta m_s$$

Cette équation peut s'écrire sous la forme :

$$m_{t+\delta t} - m_t = \delta m_e - \delta m_s$$

Cette dernière équation exprime clairement que la variation de la masse d'un système au cours d'un intervalle de temps donné est égale à la différence entre la masse entrant dans le système et la masse qui en sort:

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

1- Bilan de masse

En divisant cette équation par dt , on obtient:

$$(m_{t+\delta t} - m_t) / \delta t = (\delta m_e - \delta m_s) / \delta t$$

Pour un intervalle de temps infiniment petit dt temps vers 0, cette équation s'écrit:

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s$$

Cette équation représente le bilan de masse d'un système ouvert au cours d'un intervalle de temps infiniment petit dt . m_{cv} désigne la masse contenue dans le volume de contrôle à l'instant t . \dot{m}_e et \dot{m}_s sont les débits massiques à l'entrée et à la sortie.

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

1- Bilan de masse

Si le système comporte plusieurs entrées et sorties, le bilan de masse devient :

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s$$

Cette équation est la forme la plus générale de l'équation de conservation de la masse.

En mécanique des fluides, elle est aussi connue sous le nom d'équation de continuité pour un volume de contrôle.

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

1- Bilan de masse

Un fluide, de masse volumique ρ , qui s'écoule à travers une surface A avec une vitesse V a un débit massique:

$$\dot{m} = \rho AV = \frac{AV}{v}$$

v est le volume massique ($v=1/\rho$).

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

Dans un système fermé, l'énergie est échangée sous forme de travail ou de chaleur.

Dans un système ouvert, ceci reste vrai mais, en plus, la masse échangée avec le milieu extérieur s'accompagne aussi d'un échange d'énergie sous forme de travail et de chaleur.

Ainsi de la masse qui rentre dans un système ouvert et qui est à une température différente de la température de celui-ci, lui apporte ou lui enlève de la chaleur.

Cette masse, pour qu'elle entre dans le système doit fournir un travail dit *travail d'écoulement*.

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

Dans un système ouvert la masse varie en fonction du temps. Il est plus commode de définir des grandeurs rapportées à la masse. Ces grandeurs, dites massiques, sont désignées par les lettres minuscules.

On définit ainsi:

-L'énergie massique $e = \delta E / \delta m$,

-Le travail massique $w = \delta W / \delta m$.

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

Pour établir le bilan d'énergie d'un système ouvert nous considérons l'évolution de ce système au cours d'un intervalle de temps fini δt .

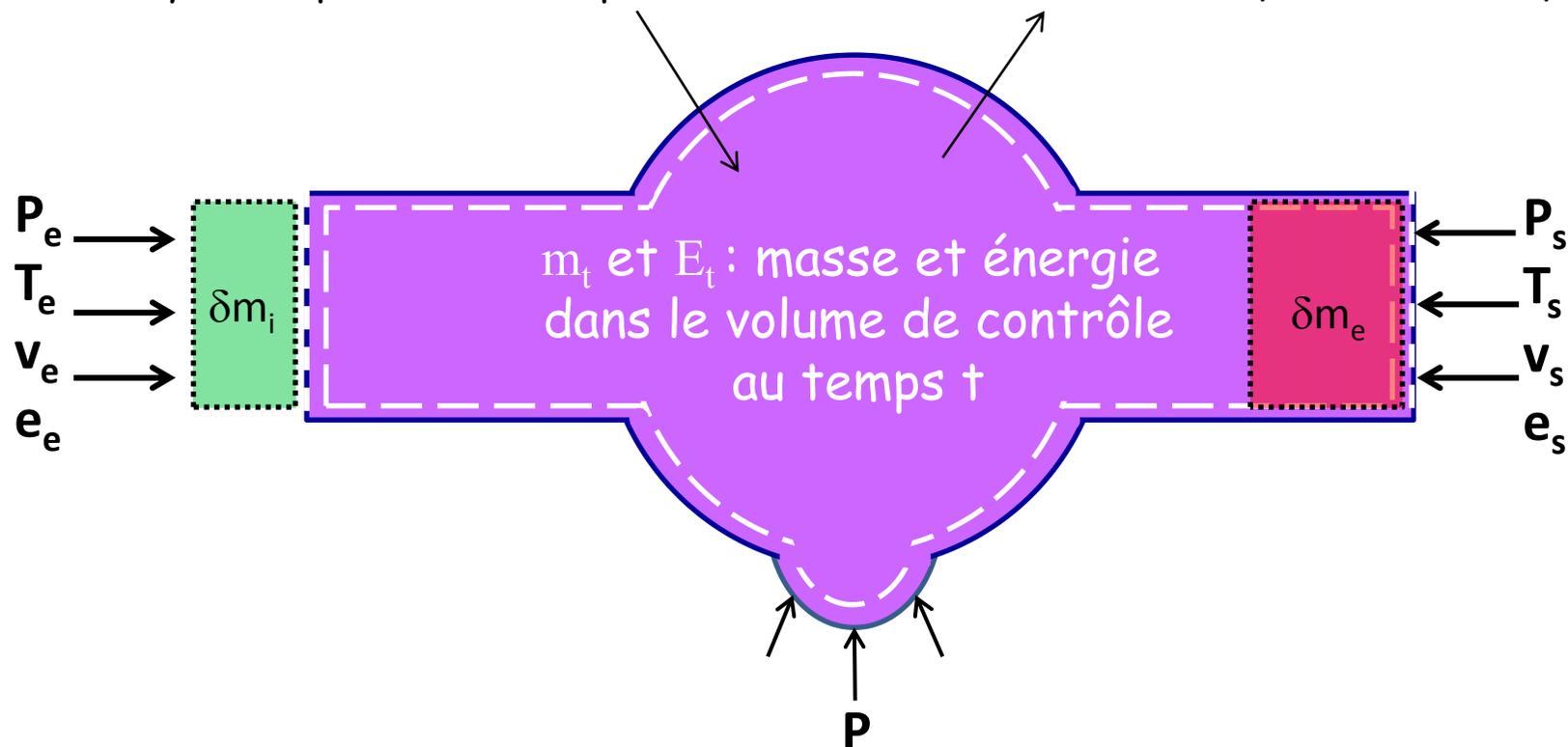
Le système étudié est défini par le volume de contrôle représenté sur la figure ci-dessous.

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

δQ : Transfert de chaleur vers le système pendant le temps δt

$\delta W_{v.c}$: Travail qui traverse la surface de contrôle pendant le temps δt

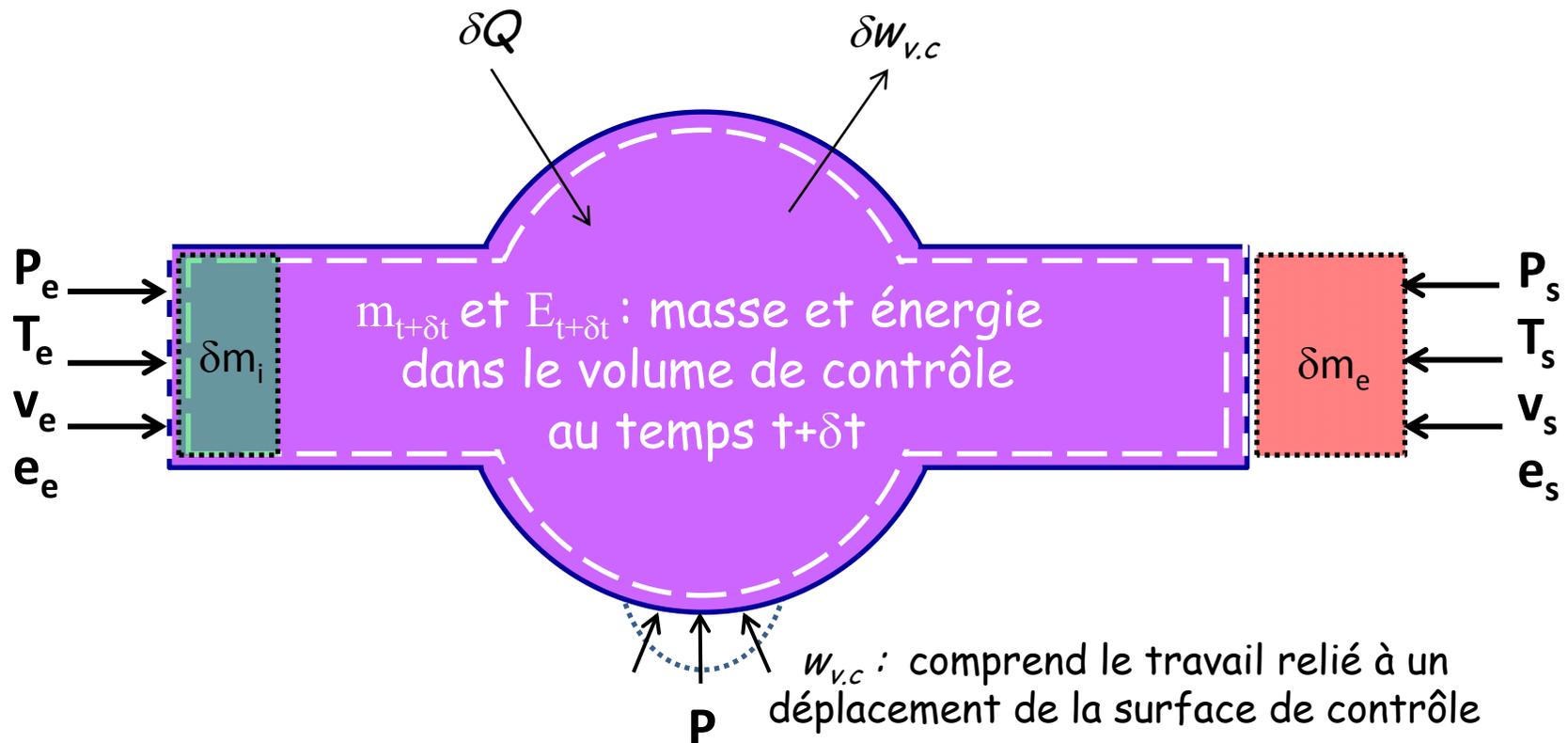


$$m_{\text{système}} = m_t + \delta m_e$$

$$E_{\text{système}} = E_t + e_e \delta m_e$$

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie



$$m_{\text{système}} = m_{t+\delta t} + \delta m_s$$

$$E_{\text{système}} = E_{t+\delta t} + e_s \delta m_s$$

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

Le bilan d'énergie de ce système s'écrit:

$$E_2 - E_1 = \delta Q + \delta W$$

E_1 et E_2 sont les énergies du système respectivement aux instants t et $t+\delta t$.

Cette équation exprime le premier principe de la thermodynamique: la variation de l'énergie d'un système est égale à la somme du travail et de la chaleur échangés avec le milieu extérieur. En se reportant aux notations de la figure précédente:

$$E_1 = E_t + e_e \cdot \delta m_e$$

$$E_2 = E_{t+\delta t} + e_s \cdot \delta m_s$$

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

Le bilan d'énergie du système peut s'écrire:

$$E_{t+\delta t} - E_t + e_s \cdot \delta m_s - e_e \cdot \delta m_e = \delta Q + \delta W$$

Le travail échangé dW est la somme des 2 travaux :

le travail $dW_{v.c}$ qui traverse la surface de contrôle et le travail d'écoulement $dW_{écoul}$. Soit donc:

$$\delta W = \delta W_{v.c} + \delta W_{écoul}$$

$\delta W_{v.c}$ comporte tous les travaux non liés à un échange de masse (celui dû à la contraction ou à la dilatation du volume de contrôle, celui dû aux forces de cisaillement, celui relié à des effets électriques magnétiques ou de surface).

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

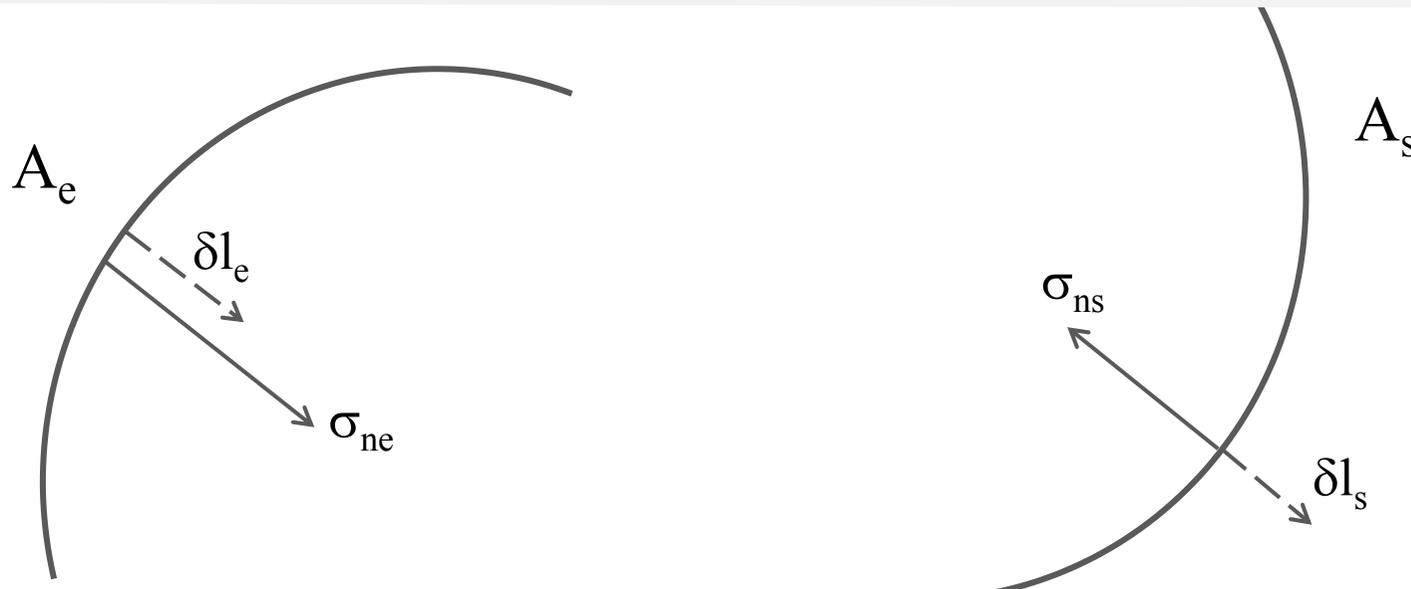
Considérons maintenant le travail d'écoulement spécifique aux systèmes ouverts. Rappelons que ce sont les masses δm_e et δm_s qui sont à l'origine de ce travail. Il est produit par l'action des forces de tensions normales aux surfaces traversées par ces masses. L'expression de ce travail est :

$$\delta W_{\text{écoul}} = \vec{\sigma}_{ne} A_e \vec{\delta l}_e + \vec{\sigma}_{ns} A_s \vec{\delta l}_s$$

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

$\vec{\sigma}_{ne}$ et $\vec{\sigma}_{ns}$ sont les forces de tensions normales agissant respectivement sur les surfaces d'entrée A_e et de sortie A_s . $\vec{\delta l}_e$ et $\vec{\delta l}_s$ sont les déplacements de fluide résultant de l'action de ces forces au cours de l'intervalle de temps δt .



I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

En se référant à la figure ci-dessus, on aura :

$$\delta W_{\text{écoul}} = \sigma_{ne} A_e \delta l_e - \sigma_{ns} A_s \delta l_s$$

σ_n est la contrainte normale.

Cette contrainte comprend la pression statique P et aussi des termes dus aux effets de la viscosité du fluide en écoulement.

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

En thermodynamique, ces termes de viscosité peuvent être négligés. On peut donc écrire :

$$\sigma_n \approx P$$

Le travail δW échangé par un système ouvert se met donc sous la forme suivante:

$$\delta W = \delta W_{v.c} + P_e \cdot v_e \cdot \delta m_e - P_s \cdot v_s \cdot \delta m_s$$

Le bilan d'énergie s'écrit alors, après division par δt :

$$\frac{E_{t+\delta t} - E_t}{\delta t} = (e_e + P_e v_e) \frac{\delta m_e}{\delta t} - (e_s + P_s v_s) \frac{\delta m_s}{\delta t} + \frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta W_{c.v}}{\delta t}$$

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

En thermodynamique, il est intéressant de distinguer 3 formes d'énergie:

-L'énergie interne u , l'énergie cinétique $V^2/2$ et l'énergie potentielle gz .

-L'énergie massique e d'un système s'écrit:

$$e = u + V^2/2 + gz$$

V et z sont la vitesse et la cote du fluide en écoulement.

-Par ailleurs, l'enthalpie massique d'un système s'écrit:

$$h = u + Pv$$

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

En reportant ces définitions dans l'expression du bilan d'énergie, en faisant tendre δt vers 0, on retrouve le bilan d'énergie pour un système ouvert évoluant dans le temps:

$$\frac{dE}{dt} = (h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e)\dot{m}_e - (h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s)\dot{m}_s + \dot{Q} + \dot{W}_{C.V}$$

Si le système comporte plusieurs entrées et sorties, le bilan d'énergie s'écrit:

$$\frac{dE}{dt} = \sum (h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e)\dot{m}_e - \sum (h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s)\dot{m}_s + \dot{Q} + \dot{W}_{C.V}$$

\dot{Q} et $\dot{W}_{C.V}$ sont les puissances échangées au cours du temps δt .

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

La plus part des analyses de systèmes thermodynamiques et énergétiques sont faites pour un fonctionnement en régime permanent.

Un système ouvert évolue en régime permanent si:

1. Le volume de contrôle est fixe dans le référentiel considéré.
2. L'état de la masse de fluide en tout point du système est indépendant du temps.
3. Le flux et l'état du fluide à travers la surface de contrôle sont indépendants du temps.

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

Noter que l'hypothèse 1 implique que la vitesse du fluide par rapport au référentiel d'étude est aussi sa vitesse par rapport à la surface de contrôle.

Les hypothèses 2 et 3 exigent que les dérivées par rapport au temps de la masse et de l'énergie sont nulles

$$\delta m_{cv}/\delta t = dE/dt = 0$$

Dans beaucoup de situations un système thermodynamique comporte une seule entrée et une seule sortie.

Dans ce cas les équations de bilans de masse et d'énergie s'écrivent, en régime permanent:

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

$$\dot{m}_e = \dot{m}_s$$

$$0 = (h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e)\dot{m}_e - (h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s)\dot{m}_s + \dot{Q} + \dot{W}_{C.V}$$

La première équation, exprimant le bilan de masse, indique que pour un système à une seule entrée et une seule sortie et évoluant en régime permanent, le débit massique est constant.

Soit ce débit \dot{m} .

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

2- Bilan d'énergie

En divisant la deuxième équation (bilan d'énergie) par \dot{m} .

On obtient :

$$(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s) - (h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e) = q + w$$

Dans cette équation q et w représentent la chaleur et le travail par unité de masse échangés par le système avec le milieu extérieur. Ces quantités sont définies comme suit :

$$q = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} \text{ et } w = \frac{\dot{W}_{C.V.}}{\dot{m}}$$

Notons que q et w ont la même unités soit J/Kg .

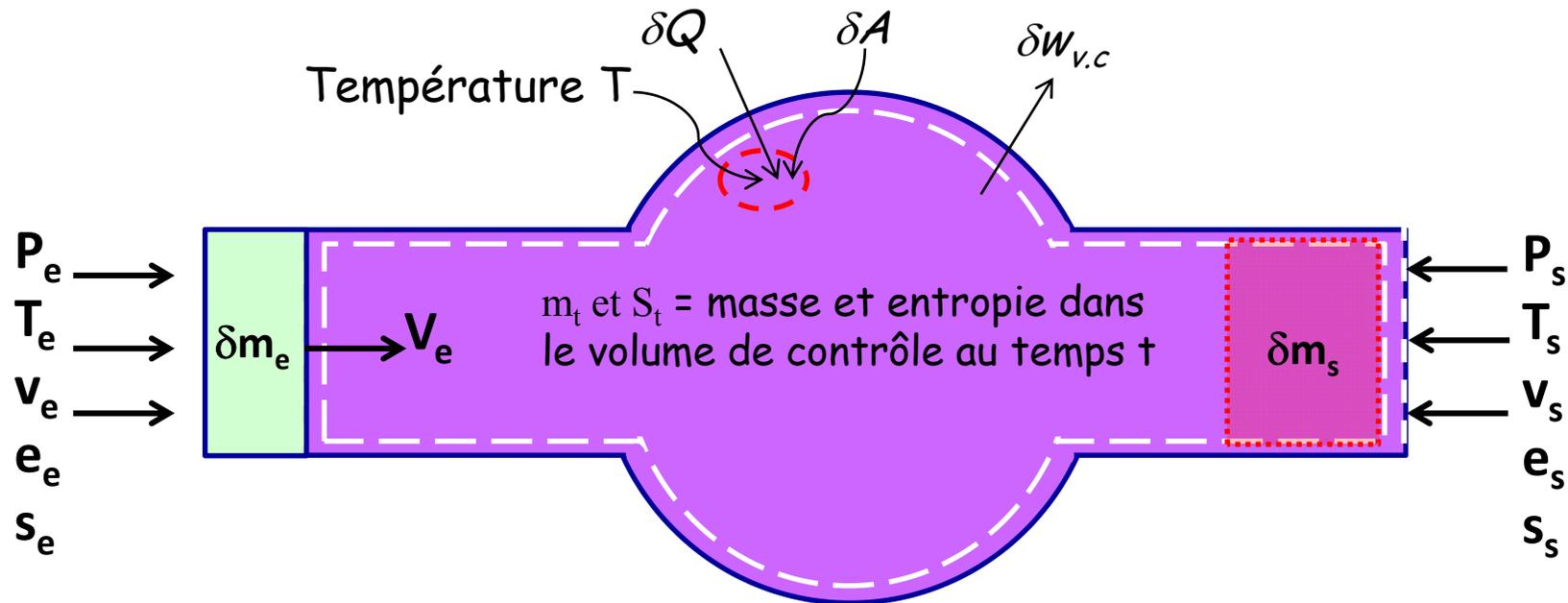
I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

3- Bilan d'entropie

Nous allons établir le bilan d'entropie dans un système ouvert. Pour cela nous considérons l'évolution de ce système au cours d'un intervalle de temps fini δt . Le système étudié est défini par le volume de contrôle représenté sur la figure suivante:

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

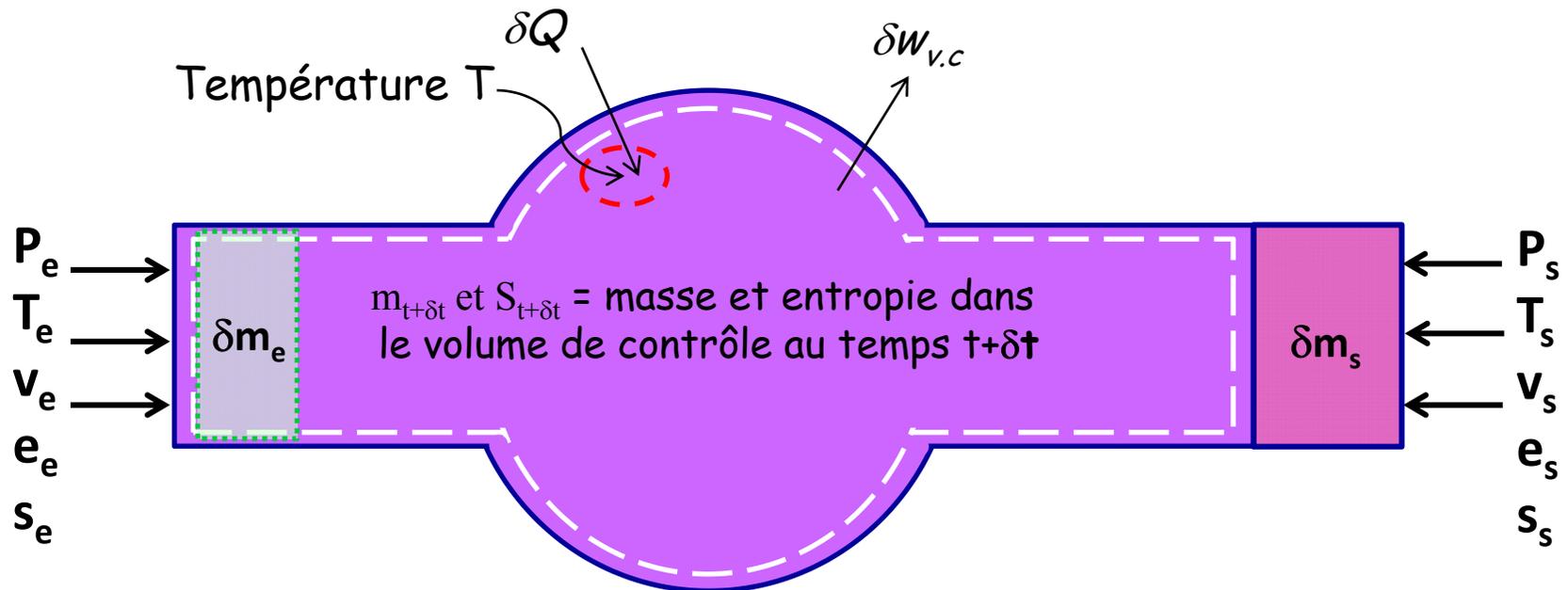
3- Bilan d'entropie



$$m_{\text{système}} = m_t + \delta m_e$$
$$S_{\text{système}} = S_t + \delta m_e s_e$$

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

3- Bilan d'entropie



$$m_{\text{système}} = m_{t+\delta t} + \delta m_s$$
$$S_{\text{système}} = S_{t+\delta t} + \delta m_s s_s$$

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

3- Bilan d'entropie

Le bilan d'entropie de ce système s'écrit:

$$S_2 - S_1 = \delta Q/T + \delta S_{\text{créée}}$$

S_1 et S_2 sont les entropies du système respectivement aux instants t et $t+\delta t$.

Cette équation exprime le second principe de la thermodynamique : tout système thermodynamique est caractérisé par une fonction d'état S appelée entropie.

Si le système est isolé et subit une transformation irréversible, son entropie augmente.

Cet énoncé exprime que : $\delta S_{\text{créée}} \geq 0$

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

3- Bilan d'entropie

Ce terme $\delta S_{crée}$ correspond à l'entropie créée dans le système par les irréversibilités.

En se reportant aux notations de la figure précédente:

$$S_1 = S_t + s_e \cdot \delta m_e$$

$$S_2 = S_{t+\delta t} + s_s \cdot \delta m_s$$

s est l'entropie par unité de masse.

Le bilan d'entropie peut s'écrire après division par δt :

$$\frac{S_{t+\delta t} - S_t}{\delta t} + s_s \cdot \frac{\delta m_s}{\delta t} - s_e \cdot \frac{\delta m_e}{\delta t} = \frac{1}{T} \frac{\delta Q}{\delta t} + \frac{\delta S_{crée}}{\delta t}$$

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

3- Bilan d'entropie

En faisant tendre δt vers 0, on retrouve le bilan d'entropie pour un système ouvert évoluant dans le temps:

$$\frac{dS}{dt} + s_s \cdot \dot{m}_s - s_e \cdot \dot{m}_e = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{crée}$$

Si le système comporte plusieurs entrées et sorties, le bilan d'entropie s'écrit:

$$\frac{dS}{dt} + \sum s_s \cdot \dot{m}_s - \sum s_e \cdot \dot{m}_e = \sum_j \frac{\dot{Q}_j}{T_j} + \dot{S}_{crée}$$

Rappelons que :

$$\dot{S}_{crée} \geq 0$$

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

3- Bilan d'entropie

Le signe égal correspond à une transformation ou processus réversible. Ainsi pour un tel processus au cours duquel le flux de chaleur est échangé d'une manière réversible

(soit $\dot{Q}_{réversible}$) le bilan d'entropie s'écrit:

$$\frac{dS}{dt} + \sum s_s \cdot \dot{m}_s - \sum s_e \cdot \dot{m}_e = \sum_j \frac{\dot{Q}_{j\text{réversible}}}{T_j}$$

Dans le cas d'un système évoluant au cours d'un processus réversible en régime permanent, le bilan d'entropie s'écrit:

$$\sum s_s \cdot \dot{m}_s - \sum s_e \cdot \dot{m}_e = \sum_j \frac{\dot{Q}_{j\text{réversible}}}{T_j}$$

I- Bilan de masse d'énergie et d'entropie

3- Bilan d'entropie

Pour un système qui évolue d'une manière réversible en régime permanent et qui ne comporte qu'une seule entrée et une seule sortie, le bilan d'entropie s'écrit:

$$s_s - s_e = \sum_j \frac{q_{j \text{ réversible}}}{T_j}$$

II- Principe fondamental de la thermodynamique

II- Principe fondamental de la thermodynamique

On appelle principe fondamental de la thermodynamique l'équation qui combine les deux principes de la thermodynamiques.

On absence de mouvement global du système thermodynamique, le 1^{er} principe s'écrit pour une unité de masse :

$$du = dq + dw$$

u est une fonction d'état on peut calculer sa variation en suivant un chemin réversible, soit:

$$du = dq_{\text{réversible}} + dw_{\text{réversible}}$$

II- Principe fondamental de la thermodynamique

Le 1^{er} principe s'écrit pour une telle substance :

$$du = dq_{réversible} - pdv$$

Le 2^{ème} principe s'écrit pour l'unité de masse:

$$dq_{réversible} = Tds$$

On combinant ces 2 équations, on obtient le principe fondamental de la thermodynamique :

$$Tds = du + pdv$$

II- Principe fondamental de la thermodynamique

Cette équation peut aussi s'écrire en terme d'enthalpie, fonction utilisée pour les systèmes ouverts. L'enthalpie par unité de masse est définie par:

$$h = u + pv$$

En différenciant cette équation et en reportant dans l'équation exprimant le principe fondamental de la thermodynamique, on retrouve l'expression de ce principe en terme d'enthalpie:

$$Tds = dh - vdp$$

III- Travail réversible en régime permanent

III- Travail réversible en régime permanent

Introduction

Soit un système ouvert à une seule entrée et une seule sortie qui subit un processus réversible en régime permanent, les bilans d'énergie et d'entropie s'écrivent :

$$(h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s) - (h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e) = q + w$$

$$s_s - s_e = q_{\text{réversible}}/T$$

Nous allons considérer deux cas limites de ce processus; adiabatique et isotherme :

III- Travail réversible en régime permanent

1- Processus adiabatique

Pour un tel processus, on a :

$$s_s - s_e = 0$$

Or d'après le principe fondamental de la thermodynamique :

$$0 = dh - vdp$$

D'où, on intégrant entre l'entrée et la sortie du système :

$$hs - he = \int_e^s vdp$$

En reportant dans le bilan d'énergie, on obtient l'expression du travail réversible au cours d'un processus adiabatique en régime permanent :

$$w_{rév} = \int_e^s vdp + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} + g(z_s - z_e)$$

III- Travail réversible en régime permanent

2- Processus isotherme

Pour un tel processus, le principe fondamental de la thermodynamique intégré entre l'entrée et la sortie du système s'écrit :

$$T(s_s - s_e) = h_s - h_e - \int_e^s v dp$$

En reportant cette expression dans le bilan d'énergie on obtient l'expression du travail réversible pour un processus isotherme en régime permanent.

III- Travail réversible en régime permanent

2- Processus isotherme

Cette expression est la même que celle du processus adiabatique. Puisque un processus réversible quelconque peut être obtenu à partir d'une alternance de transformations isotherme et adiabatique, on peut conclure que l'expression du travail réversible obtenu est tout à fait générale. Ainsi pour tout processus en régime permanent :

$$w_{rév} = \int_e^s v dp + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} + g(z_s - z_e)$$

III- Travail réversible en régime permanent

2- Processus isotherme

- Cette expression est très importante. Ses applications sont multiples. Elle sert par exemple de calculer le travail de pompage des fluides incompressibles.

- Une autre application de cette expression est celle d'un écoulement réversible d'un fluide parfait et incompressible ($v=cte$) en régime permanent et sans travail. Pour un tel écoulement, l'expression ci-dessus se met sous la forme :

$$0 = v(p_s - p_e) + \frac{V_s^2 - V_e^2}{2} + g(z_s - z_e)$$

III- Travail réversible en régime permanent

2- Processus isotherme

En écrivant que $v=1/\rho$, cette expression implique :

$$p + \rho \frac{V^2}{2} + \rho g z = cte$$

Equation de Bernoulli qui exprime la conservation de l'énergie pour un écoulement parfait.

IV- Analyse des systèmes thermodynamiques

IV- Analyse des systèmes thermodynamiques

Introduction

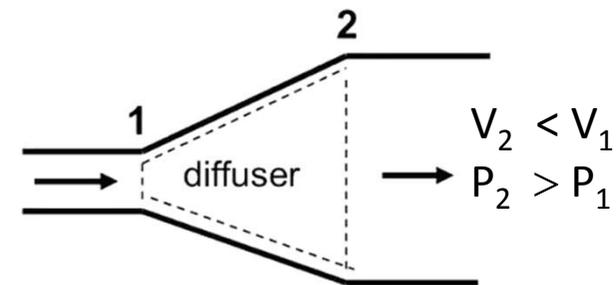
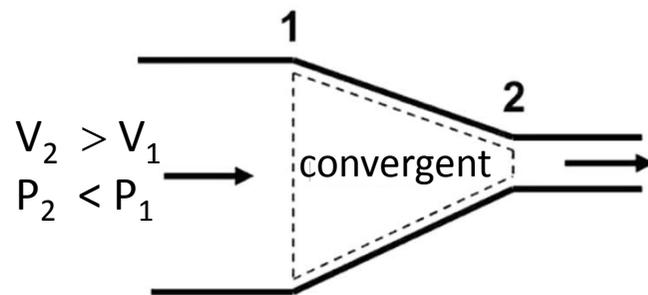
Dans cette section nous allons considérer quelques systèmes et machines thermodynamiques utilisées dans la pratique. Nous allons décrire le fonctionnement et l'utilité de ces systèmes et leur appliquer l'analyse thermodynamique basée sur les bilans établis dans la section précédente.

IV- Analyse des systèmes thermodynamiques

1- Convergent et diffuseur

-Un convergent est un passage dont la section de sortie est plus petite que la section d'entrée. Il accélère ainsi un écoulement incompressible.

-Un diffuseur ou divergent est un passage dont la section de sortie est plus grande que la section d'entrée. Il décélère ainsi un écoulement incompressible.



IV- Analyse des systèmes thermodynamiques

1- Convergent et diffuseur

Ces 2 systèmes ne font pas intervenir de travail ($W_{CV}=0$).

En utilisant les notations de la figure précédente, les bilans de masse et d'énergie de ces 2 systèmes s'écrivent en régime permanent:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2)\dot{m}_2 - (h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1)\dot{m}_1 = \dot{Q}$$

Très souvent la variation d'énergie potentielle dans ces systèmes est négligeable. En désignant par \dot{m} le débit massique, le bilan d'énergie dans ce cas s'écrit:

$$(h_2 + \frac{V_2^2}{2}) - (h_1 + \frac{V_1^2}{2}) = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}}$$

IV- Analyse des systèmes thermodynamiques

1- Convergent et diffuseur

-La quantité $\frac{\dot{Q}}{\dot{m}}$ représente la chaleur perdue par le système. Cette chaleur est souvent négligeable. Dans ce cas le système peut être considéré adiabatique et le bilan d'énergie s'écrit alors :

$$h_2 + \frac{V_2^2}{2} = h_1 + \frac{V_1^2}{2}$$

-Dans la pratique, un convergent est souvent suivi d'un divergent dans ce cas on parle de tuyère.

-L'évolution idéale dans une tuyère est isentropique (adiabatique réversible).

IV- Analyse des systèmes thermodynamiques

1- Convergent et diffuseur

L'énergie cinétique à la sortie de la tuyère obtenue à partir du bilan d'énergie en considérant un processus adiabatique est donc une valeur idéale qui ne correspond pas à la réalité. Pour déterminer la valeur réelle de l'énergie cinétique à la sortie de la tuyère, on définit un rendement

isentropique:

$$\eta_{tuyère} = \frac{V_{sR}^2 / 2}{V_{sS}^2 / 2}$$

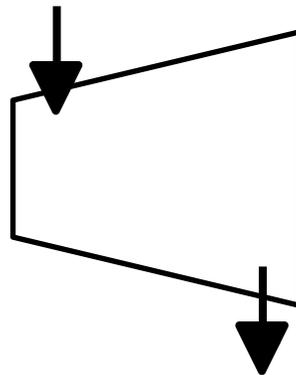
V_{sR} et V_{sS} sont respectivement les vitesses de sortie en évolution réelle et isentropique. Ce rendement est donnée par le constructeur de la tuyère.

IV- Analyse des systèmes thermodynamiques

2- Turbine

-Une turbine est un système thermodynamique qui produit du travail suite à la détente d'un fluide.

-La représentation schématique d'une turbine est donnée ci-dessous:



IV- Analyse des systèmes thermodynamiques

2- Turbine

Le bilan d'énergie d'une turbine en régime permanent s'écrit:

$$(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2) - (h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1) = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} + \frac{\dot{W}_{CV}}{\dot{m}}$$

En général les variations des énergies cinétique et potentielle dans une turbine sont négligeables devant les variations de l'enthalpie.

En principe une turbine est une machine adiabatique. Le bilan d'énergie s'écrit ainsi:

$$h_2 - h_1 = w$$

IV- Analyse des systèmes thermodynamiques

2- Turbine

Dans cette expression h_1 est à priori connu, donc la valeur du travail produit dépend de la valeur de h_2 . Plus cette valeur est faible plus le travail de la turbine est important (en valeur absolue). La valeur de h_2 est déterminée par le bilan d'entropie qui s'écrit:

$$s_2 - s_1 = s_{crée}$$

IV- Analyse des systèmes thermodynamiques

2- Turbine

Du fait $s_{crée} \geq 0$, $s_2 \geq s_1$. L'égalité correspond à une détente isentropique. Pour cette détente *isentropique* le bilan d'énergie s'écrit:

$$h_{2s} - h_{1s} = w_s$$

w_s est dit travail isentropique.

Lors de la détente réelle w , le travail produit est moins important que le travail isentropique w_s .

Le travail réel peut être obtenu ainsi:

$$w = \eta_{S \text{ turbine}} \cdot w_s$$

avec $\eta_{S \text{ turbine}}$ est le rendement isentropique de la turbine.

IV- Analyse des systèmes thermodynamiques

3- Compresseurs et pompes

Un compresseur est une machine où un gaz reçoit du travail pour augmenter sa pression. L'équivalent pour les liquides est une pompe. Les représentations schématiques d'un compresseur et d'une pompe sont données sur la figure ci-dessous:



IV- Analyse des systèmes thermodynamiques

3- Compresseurs et pompes

Le bilan d'énergie d'une pompe ou un compresseur en régime permanent s'écrit:

$$(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2) - (h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1) = \frac{\dot{Q}}{\dot{m}} + \frac{W_{VC}}{\dot{m}}$$

Comme les turbines, les compresseurs et les pompes sont, en principe, des machines adiabatiques.

$$h_2 - h_1 = w$$

Et ayant un rendement :

$$\eta_{S \text{ compresseur, pompe}} = w_s / w.$$

IV- Analyse des systèmes thermodynamiques

4- Echangeur de chaleur

Les échangeurs de chaleur sont des systèmes thermiques qui permettent le transfert de chaleur entre 2 fluides chaud et froid. Ces systèmes sont très utilisés dans les machines thermiques.

Un échangeur de chaleur est un système thermodynamique ouvert qui ne fait intervenir aucun travail ($\dot{W}_{cv}=0$) et, généralement, la chaleur échangée avec le milieu extérieur est négligeable ($\dot{Q}=0$). En plus les variations des énergies cinétique et potentielle sont négligeable.

IV- Analyse des systèmes thermodynamiques

4- Echangeur de chaleur

Les bilans de masse et d'énergie pour un échangeur de chaleur s'écrivent:

$$\sum \dot{m}_s = \sum \dot{m}_e$$

$$\sum (\dot{m}_s h_s) = \sum (\dot{m}_e h_e)$$

Si l'échangeur est idéal, le bilan d'entropie s'écrit:

$$\sum (\dot{m}_s s_s) = \sum (\dot{m}_e s_e)$$

