OÙ ON EN EST

I) <u>Introduction</u>: définition et utilité de la thermodynamique

II) Notions de base et définitions

III) 1er principe de la thermodynamique (systèmes fermés)

IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

V) 1er principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

heures 12 ➡

- Conservation de la masse
- Bilan d'énergie
- Écoulement permanent

VI) 2ème principe de la thermodynamique

VII) Entropie

VIII) Cycles thermodynamiques communs

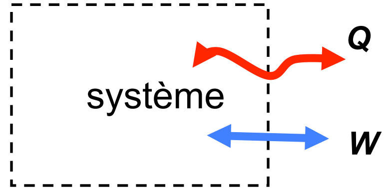
IX) Mélanges non réactifs

V) ANALYSE DES SYSTÈMES OUVERTS

Révision:

i. Système fermé :

- Quantité de matière fixe
- Frontière ***imperméable*** à la masse
- Frontière ***perméable*** à l'énergie (chaleur ou travail)
- Bilan énergétique : premier principe de la thermodynamique

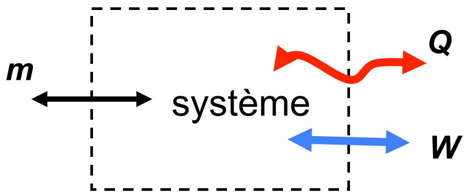


$$\Delta E_{Sys,Tot} = Q - W$$

$$\Delta U + \Delta E_C + \Delta E_P = Q - W$$

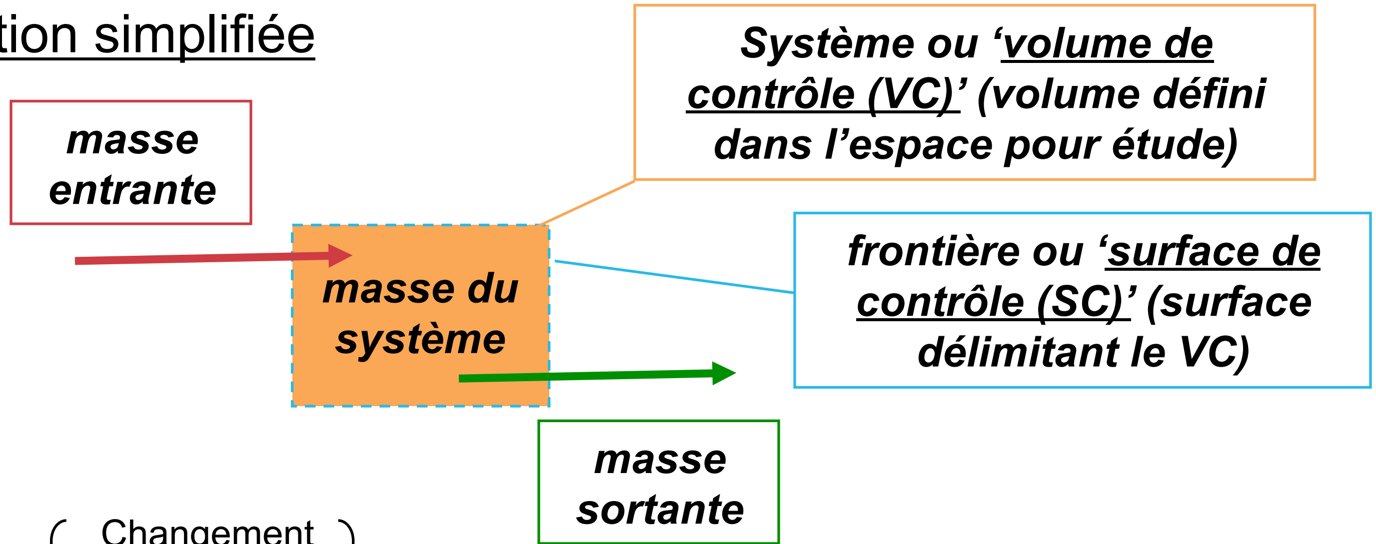
ii. Système ouvert :

- Frontière ***perméable*** à la masse
- Frontière ***perméable*** à l'énergie (chaleur ou travail)
- Le bilan énergétique (premier principe) doit maintenant inclure un bilan de masse
- Grandeurs inportantes :
  - Débit massique [kg/s] $\dot{m}$
  - Débit volumique [m^3/s] $\dot{V}$



1) CONSERVATION DE LA MASSE

a) Relation simplifiée



$$\begin{pmatrix} \text{Changement} \\ \textbf{net} \text{ de la masse} \\ \text{du système en} \\ \text{temps } \Delta t \\ (\Delta m_{sys}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Masse entrante} \\ \text{en temps } \Delta t \\ (\delta m_{in}) \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \text{Masse sortante} \\ \text{en temps } \Delta t \\ (\delta m_{out}) \end{pmatrix}$$

Analogie : compte bancaire

$$\begin{pmatrix} \textbf{Changement} \text{ net} \\ \textbf{de la balance du} \\ \textbf{compte bancaire} \\ \textbf{en temps } \Delta t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \textbf{Argent déposé} \\ \textbf{en temps } \Delta t \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \textbf{Argent retiré en} \\ \textbf{temps } \Delta t \end{pmatrix}$$

Exemples de systèmes ouverts : turbine à gaz, moteur de voiture, séchoir à cheveux, turbine hydraulique.

CONSERVATION DE LA MASSE
a) RELATION SIMPLIFIÉE

(Dans le volume)

$$\{Accumulation\} = \{Entrées\} + \{\cancel{Génération}\}^{0} - \{\cancel{Consommation}\}^{0} - \{Sorties\}$$

(Pas de réactions chimiques

$$\boxed{\Delta m_{sys} = \delta m_{in} - \delta m_{out}}$$

(Au travers des surfaces)

<u>Expression sous forme de taux et débits</u>

$$\lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta m_{sys}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\delta m_{in}}{\Delta t} - \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\delta m_{out}}{\Delta t} \longrightarrow \begin{cases} \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\delta m_{in}}{\Delta t} = \dfrac{dm_{in}}{dt} = \dot{m}_{in} = \textbf{débit massique entrant} \\ \lim\limits_{\Delta t \to 0} \dfrac{\delta m_{out}}{\Delta t} = \dfrac{dm_{out}}{dt} = \dot{m}_{out} = \textbf{débit massique sortant} \end{cases}$$

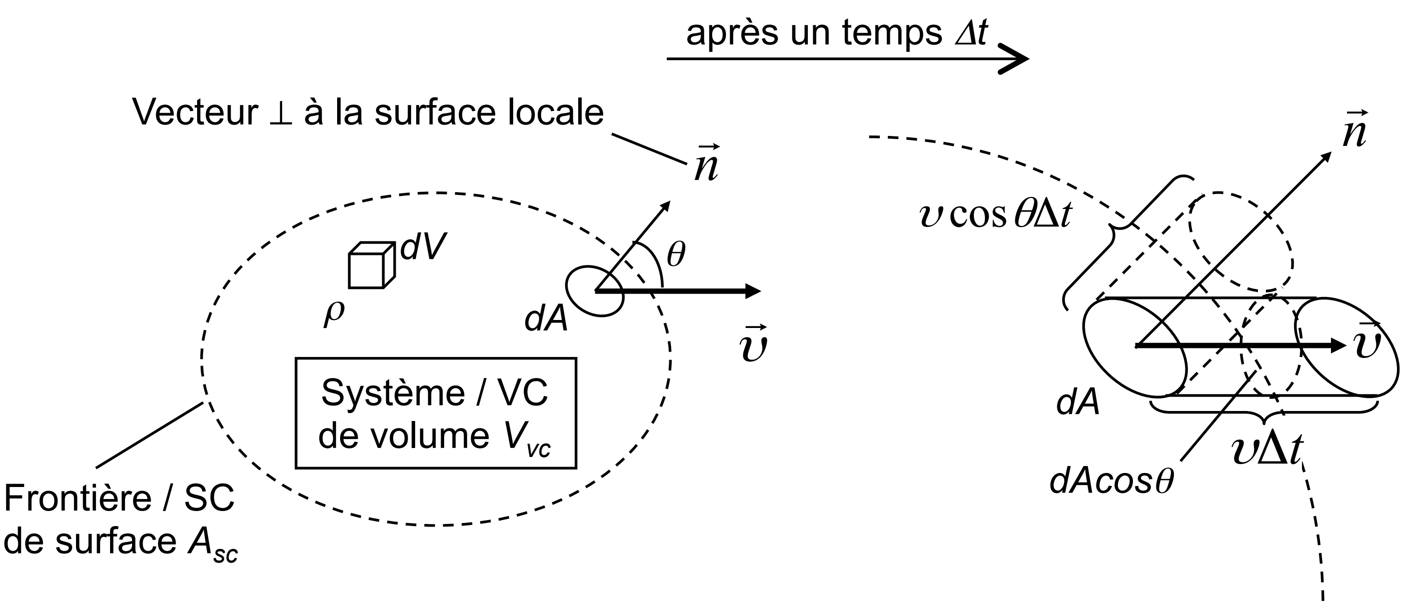
$$\boxed{\frac{dm_{sys}}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}}$$

conservation de masse (forme simplifiée) une entrée/une sortie

$$\boxed{\frac{dm_{sys}}{dt} = \sum^{\#entrées} \dot{m}_{in} - \sum^{\#sorties} \dot{m}_{out}}$$

conservation de masse (forme simplifiée) multiples entrées et sorties

CONSERVATION DE LA MASSE
b) RELATION GÉNÉRALE



Note: $\vec{n}$ **toujours pointé vers l'extérieur**

$-90^o < \theta < 90^o \; (\vec{\upsilon} \bullet \vec{n} > 0)$: **débit sortant**

$-90^o, 90^o \; (\vec{\upsilon} \bullet \vec{n} = 0)$: **débit zéro**

$90^o < \theta < 270^o \; (\vec{\upsilon} \bullet \vec{n} < 0)$: **débit entrant**

Masse traversant *dA*:

$$\delta m_{sc} = \rho(\upsilon\cos\theta\Delta t dA)$$

ou

$$\delta m_{sc} = \rho(\upsilon\Delta t dA\cos\theta)$$

$$\delta m_{sc} = \rho\vec{\upsilon}\bullet\vec{n}dA\Delta t$$

CONSERVATION DE LA MASSE
b) RELATION GÉNÉRALE

i) masse dans le système:

$$m_{sys} = \int_{V_{vc}} \rho \, dV \rightarrow \frac{dm_{sys}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V_{vc}} \rho \, dV$$

ii) masse traversant la frontière:

$$m_{sc} = \int_{A_{sc}} \delta m_{sc} = \int_{A_{sc}} \rho \vec{v} \bullet \vec{n} \, dA \Delta t = \Delta t \int_{A_{sc}} \rho \vec{v} \bullet \vec{n} \, dA$$

$$\dot{m}_{sc} = \frac{dm_{sc}}{dt} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{m_{sc}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta t}{\Delta t} \int_{A_{sc}} \rho \vec{v} \bullet \vec{n} \, dA = \int_{A_{sc}} \rho \vec{v} \bullet \vec{n} \, dA$$

Direction des échanges:

- Automatiquement pris en compte par l'intégrale de surface

CONSERVATION DE LA MASSE
b) RELATION GÉNÉRALE

iii) Conservation de la masse:

$$\frac{dm_{sys}}{dt} = -\dot{m}_{sc}$$

car $\dot{m}_{sc}$ est positif pour débit sortant

$$\frac{d}{dt}\int_{V_{vc}} \rho \, dV = -\int_{A_{sc}} \rho \vec{\upsilon} \bullet \vec{n} \, dA$$

$$\boxed{\frac{d}{dt}\int_{V_{vc}} \rho \, dV + \int_{A_{sc}} \rho \vec{\upsilon} \bullet \vec{n} \, dA = 0}$$

$$\boxed{\frac{d}{dt}\int_{V_{vc}} \rho \, dV + \int_{A_{sc}} \rho \upsilon_n \, dA = 0} \rightarrow \boxed{\upsilon_n \equiv \vec{\upsilon} \bullet \vec{n}}$$

conservation de masse (forme générale)

taux de changement de masse du système + **débit de masse net traversant la frontière** = 0

où υ_n est la composante de $\vec{\upsilon}$ parallèle à $\vec{n}$ c'est-à-dire $\perp$ à la frontière locale

système $\rightarrow \vec{n}$, $\rightarrow \upsilon_n$: υ_n positif, débit sortant

système $\rightarrow \vec{n}$, $\upsilon_n \leftarrow$: υ_n négatif, débit entrant

CONSERVATION DE LA MASSE
c) CAS SPÉCIAUX (SIMPLIFICATIONS)

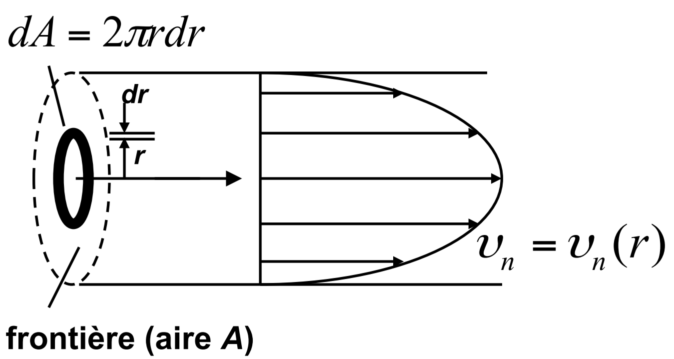
i) **<u>Écoulement permanent</u>:** aucun changement de propriété avec le temps pour n'importe quel point dans l'espace, donc, la conservation de masse devient:

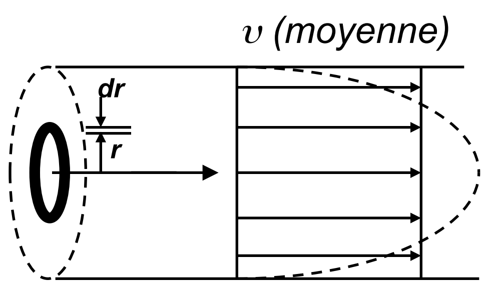
<u>note</u>: m_{sys} est une propriété, $\dot{m}_{in}, \dot{m}_{out}$ sont des interactions et non des propriétés

Forme simplifiée: $$\cancelto{0}{\frac{dm_{sys}}{dt}} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = 0 \rightarrow \dot{m}_{in} = \dot{m}_{out}$$

Forme générale: $$\cancelto{0}{\frac{d}{dt}\int_{V_{vc}} \rho dV} + \int_{A_{sc}} \rho \upsilon_n dA = 0 \rightarrow \int_{A_{sc}} \rho \upsilon_n dA = 0$$

ii) **<u>Écoulement dans un tube:</u>** (cas le plus commun dans ce cours)





Dans ce cas , ρ est aprrox. uniforme sur *A* mais υ_n est une fonction de *r*. On définit alors une vitesse υ moyenne (uniforme) qui donnerait le même débit

CONSERVATION DE LA MASSE
c) CAS SPÉCIAUX (SIMPLIFICATIONS)

ii) écoulement dans un tube (cont.)

$$\dot{m}_{sc} = \rho \upsilon A = \int_A \rho \upsilon_n \, dA = \rho \int_A \upsilon_n \, dA$$

$$\upsilon = \frac{1}{A} \int_A \upsilon_n \, dA$$

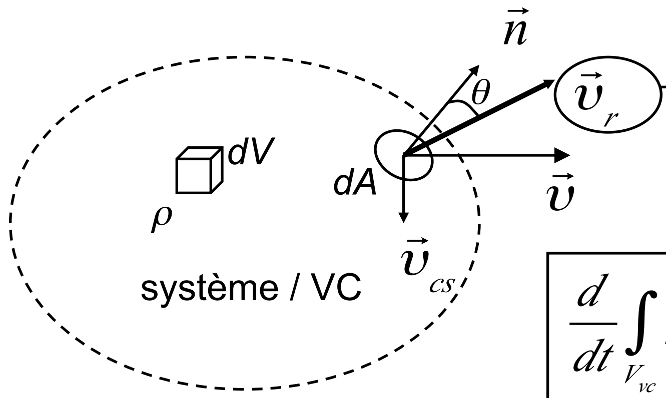
$$\boxed{\dot{m}_{sc} = \rho \upsilon A = \frac{\upsilon A}{v}}$$

<u>notez que</u>:

$$\boxed{\int_A \upsilon_n \, dA = \upsilon A = \dot{V} = \text{débit volumétrique}}$$

$$\boxed{\dot{m}_{sc} = \rho \dot{V} = \frac{\dot{V}}{v}}$$

d) <u>surface de contrôle en mouvement</u>



vitesse *<u>relative</u>* à la surface

$$\vec{\upsilon}_r = \vec{\upsilon} - \vec{\upsilon}_{cs}$$

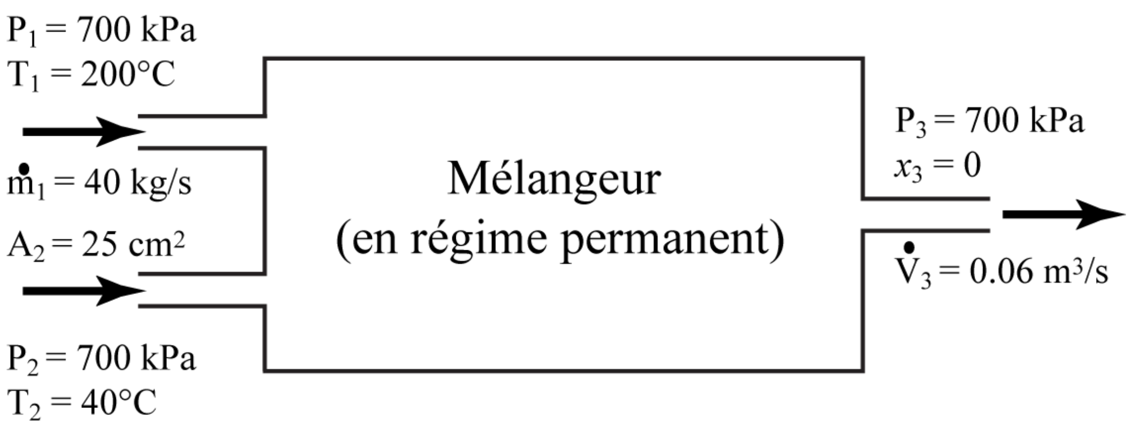
$$\boxed{\frac{d}{dt} \int_{V_{vc}} \rho \, dV + \int_{A_{sc}} \rho \upsilon_{rn} \, dA = 0} \rightarrow \boxed{\upsilon_{rn} \equiv \vec{\upsilon}_r \bullet \vec{n}}$$

EXEMPLE #9 : DÉBITS ENTRANTS ET SORTANT D'UN MÉLANGEUR

Un mélangeur comportant deux entrées (eau) et une sortie fonctionne en régime permanent aux conditions suivantes:

Entrée #1	Entrée #2	Sortie
P_1 = 700 kPa	P_2 = 700 kPa	P_3 = 700 kPa
T_1 = 200 °C	T_2 = 40 °C	x_3 = 0
$\dot{m}_1$ = 40 kg/s	A_2 = 25 cm²	$\dot{V}_3$ = 0.06 m³/s

Trouvez a) le débit massique de l'entrée #2 ($\dot{m}_2$) et b) la vitesse moyenne de la substance passant par l'entrée #2 (v_2).



OÙ ON EN EST

I) <u>Introduction</u>: définition et utilité de la thermodynamique

II) Notions de base et définitions

III) 1er principe de la thermodynamique (systèmes fermés)

IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

V) 1er principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

- *Conservation de la masse*
- ***Bilan d'énergie*** ← ***heures 13-14***
- *Écoulement permanent*

VI) 2ème principe de la thermodynamique

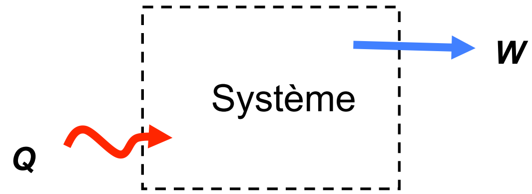
VII) Entropie

VIII) Cycles thermodynamiques communs

IX) Mélanges non réactifs

a) Forme simplifiée

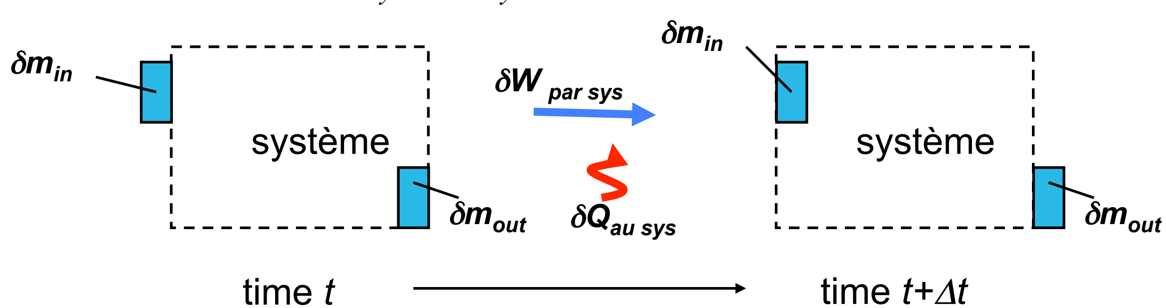
système fermé (révision)



[changement d'énergie du système] = [transfert de chaleur *au* système] - [travail fait *par* système]

$$\Delta E_{sys} = Q_{\substack{au\\sys}} - W_{\substack{par\\sys}}$$

système ouvert



[changement d'énergie du système] = [transfert de chaleur *au* système] - [travail fait *par* système] + [énergie du fluide entrant (δm_{in})] - [énergie du fluide sortant (δm_{out})]

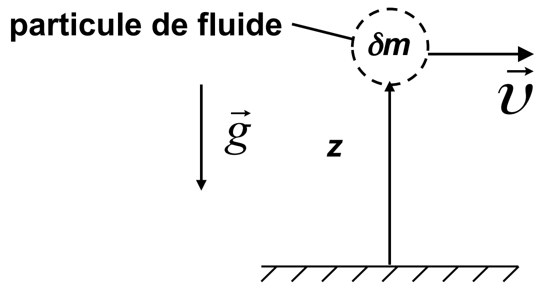
On doit maintenant quantifier ces termes

BILAN D'ÉNERGIE, SYSTÈME OUVERT
a) FORME SIMPLIFIÉE

Énergie spécifique d'un fluide (e_f):

$$E_f = U + E_c + E_p = \delta m u + \frac{1}{2}\delta m \upsilon^2 + \delta m g z$$

$$e_f = \frac{E_f}{\delta m} = u + \frac{1}{2}\upsilon^2 + gz$$

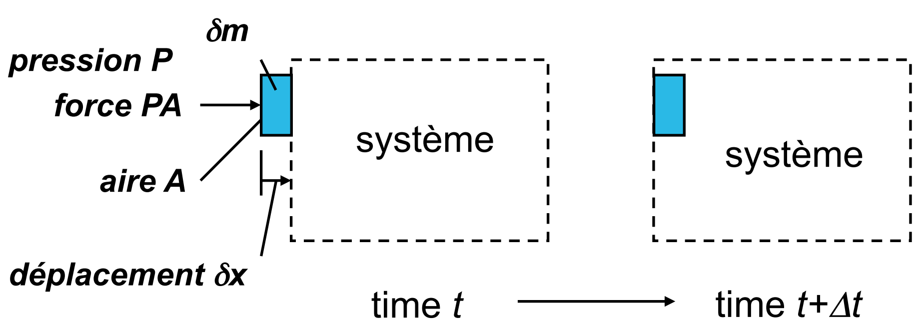


Le bilan d'énergie pour un système ouvert devient alors:

$$\Delta E_{sys} = \delta Q_{\substack{au\\sys}} - \delta W_{\substack{par\\sys}} + \delta m_{in} e_{fin} - \delta m_{out} e_{fout}$$

Mais il faut tenir compte d'un travail particulier associé à l'écoulement entrant/sortant:

"Le travail d'écoulement" : Travail fait sur système (δW_e) pour pousser la quantité de masse δm de δx dans le système en temps Δt :



BILAN D'ÉNERGIE, SYSTÈME OUVERT
a) FORME SIMPLIFIÉE

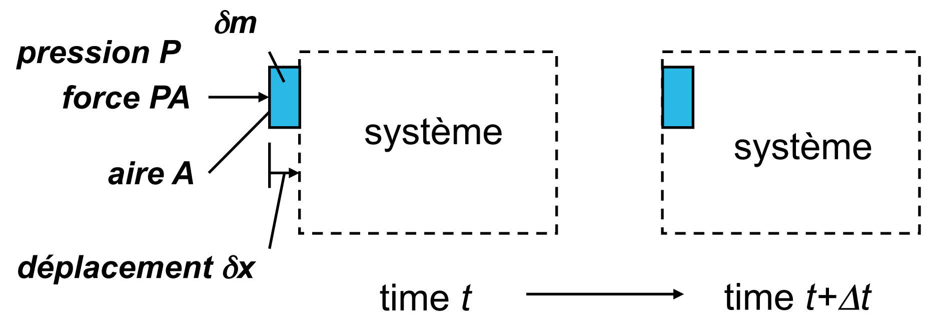
<u>Travail d'écoulement W_e</u>

$$\delta W_e = force \cdot déplacement$$

$$\delta W_e = PA \cdot \delta x = P(A\delta x)$$

$$\delta W_e = P\delta V = Pv\delta m$$

$$w_e = \frac{\delta W_e}{\delta m} = Pv$$



- ***Positif* pour δm_{in} (w_e <u>sur</u> système)**
- ***Négatif* pour δm_{out} (w_e <u>par</u> système)**

En séparant le travail « traditionnel » et d'écoulement, le bilan d'énergie devient:

$$\Delta E_{sys} = \delta Q_{\substack{au\\sys}} - \left[\underbrace{\delta W_{\substack{par\\sys}}}_{\text{travail traditionnel}} + \underbrace{\delta m_{out}(Pv)_{out} - \delta m_{in}(Pv)_{in}}_{\text{travail d'écoulement}} \right] + \delta m_{in} e_{fin} - \delta m_{out} e_{fout}$$

travail traditionnel (PdV, électrique,…) comme pour système fermé

travail d'écoulement

$$e_f = u + \frac{1}{2}\upsilon^2 + gz$$

$$\Delta E_{sys} = \delta Q_{\substack{au\\sys}} - \delta W_{\substack{par\\sys}} + \delta m_{in}(Pv + u + \frac{1}{2}\upsilon^2 + gz)_{in} - \delta m_{out}(Pv + u + \frac{1}{2}\upsilon^2 + gz)_{out}$$

<u>*h* (enthalpie)</u>

BILAN D'ÉNERGIE, SYSTÈME OUVERT
a) FORME SIMPLIFIÉE

On définit ***l'énergie totale d'un fluide*** ***(θ)*** :

$$\boxed{\theta \equiv h + \frac{1}{2}v^2 + gz}$$

Ce qui donne:

$$\Delta E_{sys} = \delta Q_{\substack{au\\sys}} - \delta W_{\substack{par\\sys}} + \delta m_{in}\theta_{in} - \delta m_{out}\theta_{out}$$

Prenons la limite *Δt→0* pour mettre le bilan d'énergie en terme de taux:

$$\lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta E_{sys}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \to 0}\frac{\delta Q_{\substack{au\\sys}}}{\Delta t} - \lim_{\Delta t \to 0}\frac{\delta W_{\substack{par\\sys}}}{\Delta t} + \lim_{\Delta t \to 0}\frac{\delta m_{in}}{\Delta t}\theta_{in} - \lim_{\Delta t \to 0}\frac{\delta m_{out}}{\Delta t}\theta_{out}$$

$$\boxed{\dot{E}_{sys} = \dot{Q}_{\substack{au\\sys}} - \dot{W}_{\substack{par\\sys}} + \dot{m}_{in}\theta_{in} - \dot{m}_{out}\theta_{out}}$$

bilan d'énergie (forme simplifiée)
(une entrée/une sortie)

BILAN D'ÉNERGIE, SYSTÈME OUVERT
a) FORME SIMPLIFIÉE

Quand on a plusieurs entrées / sorties…

$$\dot{E}_{sys} = \dot{Q}_{\substack{au\\sys}} - \dot{W}_{\substack{par\\sys}} + \sum^{\#entrées} \dot{m}_{in}\theta_{in} - \sum^{\#sorties} \dot{m}_{out}\theta_{out}$$

bilan d'énergie (forme simplifiée) (multiples entrées et sorties)

Notes:

- En mettant le travail d'écoulement (***Pv***) dans le terme θ pour l'énergie du fluide entrant/sortant pour ainsi utiliser ***h*** au lieu de ***u***, dans le bilan d'énergie d'un système ouvert, on inclut implicitement ce travail.
- Donc, le terme $\dot{W}_{par\ sys}$ ne représente que les mêmes types de travail (PdV, électrique, …) qu'on a vu pour un système fermé.

Forme simplifiée alternative:
(autre convention de signe)

$$\dot{E}_{sys} = \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}$$

où

$$\dot{E}_{in} \equiv \dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum^{\#entrées} \dot{m}_{in}\theta_{in}$$

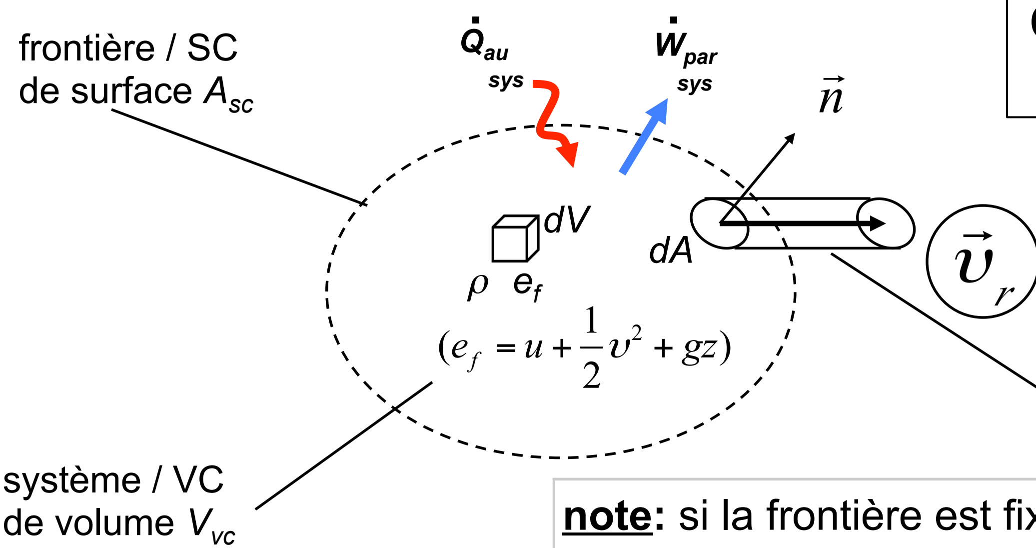
$$\dot{E}_{out} \equiv \dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum^{\#sorties} \dot{m}_{out}\theta_{out}$$

1^ER PRINCIPE, SYSTÈME OUVERT
b) FORME GÉNÉRALE DU BILAN D'ÉNERGIE

Pour la forme simplifiée, on est arrivé à:

$$\dot{E}_{sys} = \dot{Q}_{\substack{au\\sys}} - \dot{W}_{\substack{par\\sys}} + \dot{m}_{in}\theta_{in} - \dot{m}_{out}\theta_{out}$$

Il faut trouver la forme intégrale de ces termes



<u>note</u>: si la frontière est fixe

$$\vec{v}_r = \vec{v}$$

Ce qui traverse un élément dA de la surface de contrôle:

Énergie totale spécifique

$$(\theta = h + \frac{1}{2}v^2 + gz)$$

Vitesse relative par rapport à la surface

Masse traversant *dA* en temps *Δt)*

$$\delta m_{sc} = \rho \vec{v}_r \bullet \vec{n} dA \Delta t$$

1ER PRINCIPE, SYSTÈME OUVERT
b) FORME GÉNÉRALE DU BILAN D'ÉNERGIE

i) Taux de changement d'énergie du système:

$$E_{sys} = \int_{V_{vc}} e_f \rho \, dV$$

$$\dot{E}_{sys} = \frac{dE_{sys}}{dt} = \frac{d}{dt}\int_{V_{vc}} \rho e_f \, dV = \frac{d}{dt}\int_{V_{vc}} \rho\left(u + \frac{1}{2}\upsilon^2 + gz\right) dV$$

ii) Énergie associée au fluide qui entre et sort du système

$$\delta m_{out}\theta_{out} - \delta m_{in}\theta_{in} = \int_{A_{sc}} \delta m_{sc}\theta = \int_{A_{sc}} \rho \vec{\upsilon}_r \bullet \vec{n}\, dA \Delta t \theta = \Delta t \int_{A_{sc}} \rho \theta \vec{\upsilon}_r \bullet \vec{n}\, dA$$

$$\dot{m}_{out}\theta_{out} - \dot{m}_{in}\theta_{in} = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{\Delta t}{\Delta t} \int_{A_{sc}} \rho \theta \vec{\upsilon}_r \bullet \vec{n}\, dA = \int_{A_{sc}} \rho \theta \vec{\upsilon}_r \bullet \vec{n}\, dA$$

$$\dot{m}_{in}\theta_{in} - \dot{m}_{out}\theta_{out} = -\int_{A_{sc}} \rho\left(h + \frac{1}{2}\upsilon^2 + gz\right) \vec{\upsilon}_r \bullet \vec{n}\, dA$$

1ER PRINCIPE, SYSTÈME OUVERT
b) FORME GÉNÉRALE DU BILAN D'ÉNERGIE

Le bilan d'énergie devient alors, sous sa forme générale pour un système ouvert:

$$\frac{d}{dt}\int_{V_{vc}} \rho\left(u+\frac{1}{2}\upsilon^2+gz\right)dV = \dot{Q}_{\substack{au\\sys}} - \dot{W}_{\substack{par\\sys}} - \int_{A_{sc}} \rho\left(h+\frac{1}{2}\upsilon^2+gz\right)\vec{\upsilon}_r \bullet \vec{n}\, dA$$

$$\boxed{\frac{d}{dt}\int_{V_{vc}} \rho\left(u+\frac{1}{2}\upsilon^2+gz\right)dV + \int_{A_{sc}} \rho\left(h+\frac{1}{2}\upsilon^2+gz\right)\vec{\upsilon}_r \bullet \vec{n}\, dA = \dot{Q}_{\substack{au\\sys}} - \dot{W}_{\substack{par\\sys}}}$$

bilan d'énergie (forme générale)

note:

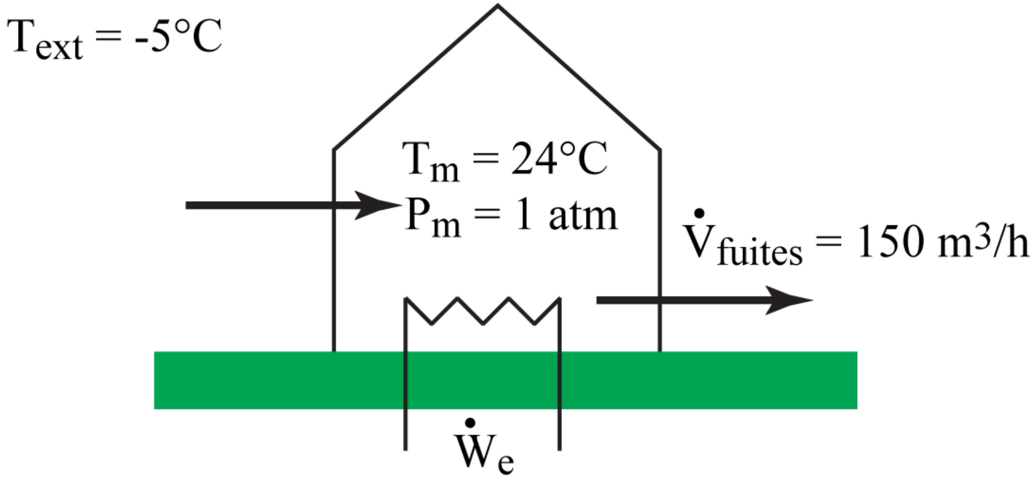
- Si la frontière est fixe, la vitesse relative du fluide par rapport à la frontière est égale à la vitesse absolue du fluide.

$$\vec{\upsilon}_r = \vec{\upsilon}$$

- Simplifications possibles: régime permanent, écoulement unidirectionnel et normal à la surface de contrôle.

EXEMPLE #10, MAISON CHAUFFÉE

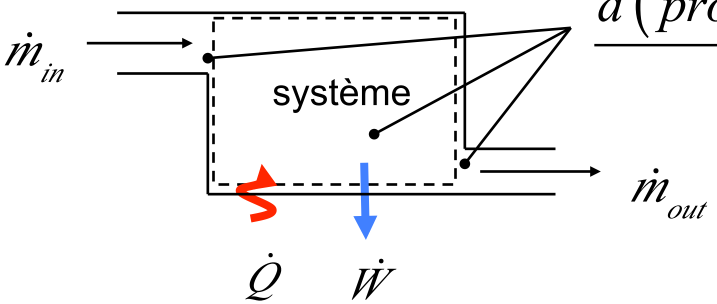
Effectuez un bilan énergétique afin de déterminer la puissance de chauffage ($\dot{W}_e$) nécessaire pour maintenir la température intérieure d'une maison à 24°C. La maison est parfaitement isolée, la température extérieure est de -5°C et le volume de fuite est de 150 m^3/h.



ANALYSE DES SYSTÈMES OUVERTS
3) ÉCOULEMENT PERMANENT

a) Définition:

Situation où il n'y a aucun changement de propriétés avec le temps à n'importe quel point dans l'espace.



$$\frac{d\left(propriétés\right)}{dt} = 0$$

à n'importe quel point dans l'espace

Notes:

- $\boldsymbol{E_{sys}}$, $\boldsymbol{V_{sys}}$, $\boldsymbol{m_{sys}}$ sont toutes des propriétés, ainsi que les propriétés des à fluides entrants et sortant et sont donc toutes constantes dans le temps pour une situation d'écoulement permanent, ce qui veut dire que:

$$\dot{E}_{sys} \equiv \frac{dE_{sys}}{dt} = 0 \text{ , } \dot{m}_{sys} \equiv \frac{dm_{sys}}{dt} = 0 \text{ et } \frac{dV_{sys}}{dt} = 0 \text{ (travail PdV=0)}$$

- Les ***interactions*** ne sont pas des propriétés. Mais, le fait que les propriétés sont constantes dans l'espace implique en général que ces interactions sont aussi constantes

$$\dot{Q}, \dot{W}, \dot{m}_{in}, \dot{m}_{out} \neq 0$$

b) Conservation de masse et bilan d'énergie pour écoulement permanent

conservation de la masse:

$$\overbrace{\cancel{\frac{dm_{sys}}{dt}}}^{0} = \sum^{\#entrées} \dot{m}_{in} - \sum^{\#sorties} \dot{m}_{out}$$

$$\boxed{\sum^{\#entrées} \dot{m}_{in} = \sum^{\#sorties} \dot{m}_{out}}$$

bilan d'énergie:

$$\overbrace{\cancel{\dot{E}_{sys}}}^{0} = \dot{Q}_{\substack{au\\sys}} - \dot{W}_{\substack{par\\sys}} + \sum^{\#entrées} \dot{m}_{in}\theta_{in} - \sum^{\#sorties} \dot{m}_{out}\theta_{out}$$

$$\boxed{\dot{Q}_{\substack{au\\sys}} - \dot{W}_{\substack{par\\sys}} = \sum^{\#sorties} \dot{m}_{out}\theta_{out} - \sum^{\#entrées} \dot{m}_{in}\theta_{in}}$$

ou

$$\boxed{\underbrace{\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum^{\#entrées} \dot{m}_{in}\theta_{in}}_{\dot{E}_{in}} = \underbrace{\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \sum^{\#sorties} \dot{m}_{out}\theta_{out}}_{\dot{E}_{out}}}$$

ÉCOULEMENT PERMANENT
b) CONSERVATION DE LA MASSE ET BILAN D'ÉNERGIE

Pour un système avec une entrée et une sortie

Conservation de la masse	Bilan d'énergie
$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = \dot{m}$ $\rho_{in}\upsilon_{in}A_{in} = \rho_{out}\upsilon_{out}A_{out} = \dot{m}$	$\dot{Q}_{\substack{au\\sys}} - \dot{W}_{\substack{par\\sys}} = \dot{m}_{out}\theta_{out} - \dot{m}_{in}\theta_{in}$ $\dot{Q}_{\substack{au\\sys}} - \dot{W}_{\substack{par\\sys}} = \dot{m}(h_{out} + \frac{\upsilon_{out}^2}{2} + gz_{out}) - \dot{m}(h_{in} + \frac{\upsilon_{in}^2}{2} + gz_{in})$ $\dot{Q}_{\substack{au\\sys}} - \dot{W}_{\substack{par\\sys}} = \dot{m}\left[\underbrace{(h_{out} - h_{in})}_{\Delta h} + \underbrace{\frac{(\upsilon_{out}^2 - \upsilon_{in}^2)}{2}}_{\Delta e_c} + \underbrace{g(z_{out} - z_{in})}_{\Delta e_p}\right]$

Notes:

- ***Δh*** : tables ou $c_{p\ moyenne}(T_{out}-T_{in})$ pour gaz parfait
- ***Δe*** $_c$: **si** $\upsilon_{out} \approx \upsilon_{in}$, ***Δe*** $_c$ peut être négligeable lorsque υ_{out} et υ_{in} sont petites, mais non négligeable lorsque υ_{out} et υ_{in} sont grandes
- ***Δe*** $_p$: seulement important s'il y a un changement d'hauteur (Δz) important

OÙ ON EN EST

I) <u>Introduction</u>: définition et utilité de la thermodynamique

II) Notions de base et définitions

III) 1er principe de la thermodynamique (systèmes fermés)

IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles

V) 1er principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

- *Conservation de la masse*
- *Bilan d'énergie*
- ***Dispositifs à écoulement permanent***

heures 15-16-17

VI) 2ème principe de la thermodynamique

VII) Entropie

VIII) Cycles thermodynamiques communs

IX) Mélanges non réactifs

c) DISPOSITIFS COMMUNS À ÉCOULEMENT PERMANENT

- Le fluide de travail change d'état dans les systèmes thermodynamiques, échange du travail W et de la chaleur Q avec l'environnement.

- Ces opérations sont réalisées dans des équipements, souvent assemblées pour construire des cycles.

- 3 grandes classes d'équipement
  1. Échangeurs de chaleurs et appareils de chauffage
  2. Équipements avec pièces mobiles pour extraire ou fournir du travail au fluide
  3. Dispositifs qui n'échangent ni travail ni chaleur entre l'environnement et le fluide, mais transforment son état

$$\dot{Q}_{\substack{au\\sys}} - \dot{W}_{\substack{par\\sys}} = \dot{m}\left[(h_{out} - h_{in}) + \frac{(v_{out}^2 - v_{in}^2)}{2} + g(z_{out} - z_{in})\right]$$

c) DISPOSITIFS COMMUNS À ÉCOULEMENT PERMANENT

Catégorie	Échanges	Exemples
1	Chaleur Q	Chaudière Évaporateur Condenseur Échangeur de chaleur
2	Travail W	Moteur Turbine Compresseur Pompe
3	-	Diffuseur Tuyère Étrangleur Valve

DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT
ÉCHANGEURS DE CHALEURS

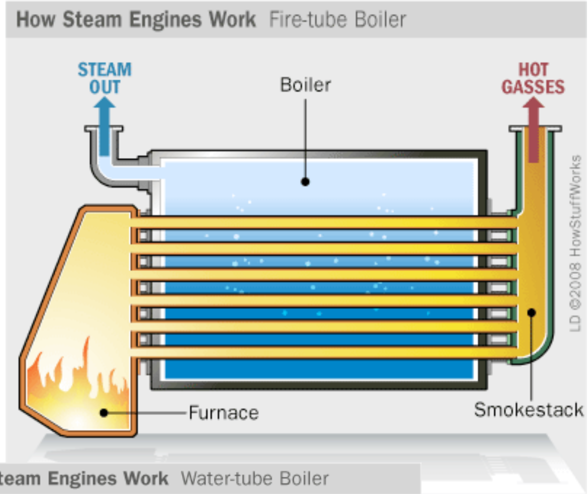
Définitions

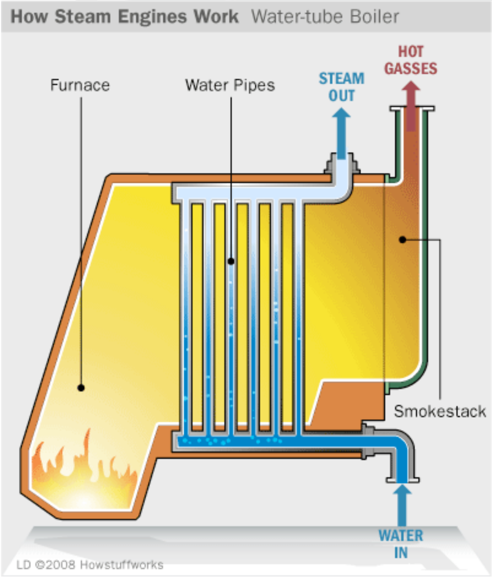
- Chaudière: système permettant d'augmenter la température d'un fluide caloporteur
- Évaporateur: dispositif pour faire passer un fluide de la phase liquide à la phase gazeuse en apportant de la chaleur
- Condenseur: Dispositif pour faire passer un fluide de la phase gazeuse à la phase liquide en retirant de la chaleur
- Échangeur de chaleur: permettent le transfert de chaleur entre deux fluides séparées par une paroi.

DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT
CHAUDIÈRES

Types de chaudières

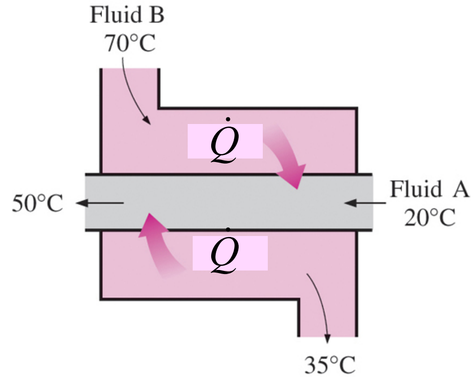
- « Pot boiler »
  - Réservoir partiellement rempli d'eau
  - Efficacité très faible, maximum 65%
- Fire-tubes
  - Les gaz de combustion circulent dans des tubes immergés
- Water-tubes
  - L'eau et la vapeur sont dans des tubes
  - Applications à haute pression
  - Rendement jusqu'à 85-90%
- Surchauffe de la vapeur
  - Pour s'éloigner du point de saturation





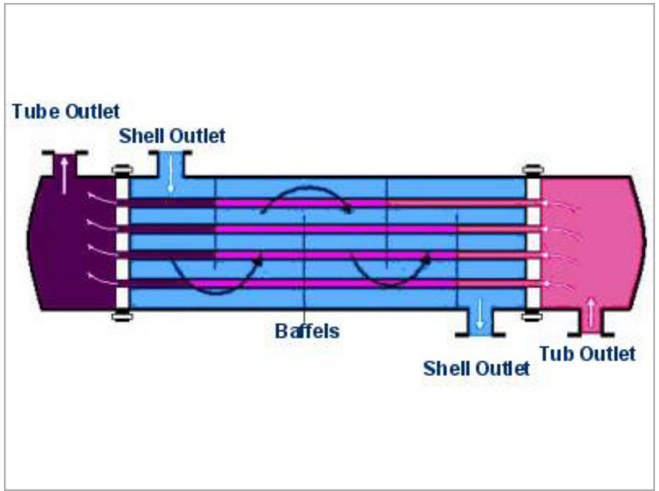
DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT
ÉCHANGEURS DE CHALEURS

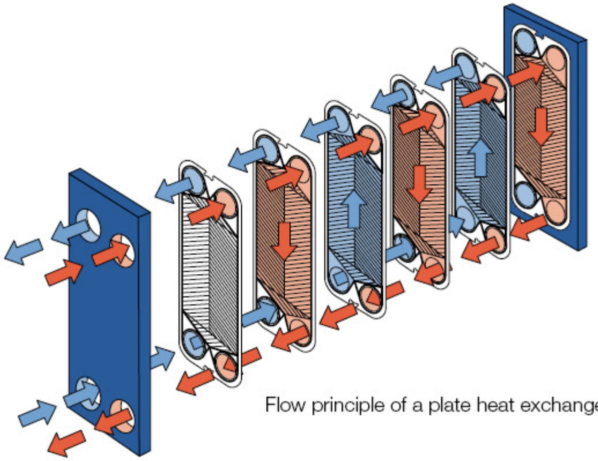
« Dispositifs où deux écoulements de fluide s’échangent de la chaleur sans se mélanger. Donc, en régime permanent, le débit massique est constant pour chaque écoulement. »



Pour ces dispositifs, on peut supposer, ***<u>à moins d’indication au contraire</u>***, que:

$$\Delta e_c \approx 0,\ \ \Delta e_p \approx 0,\ \ \dot{W} \approx 0\ \text{ et }\ \dot{Q}_{avec\,l'extérieur} \approx 0$$





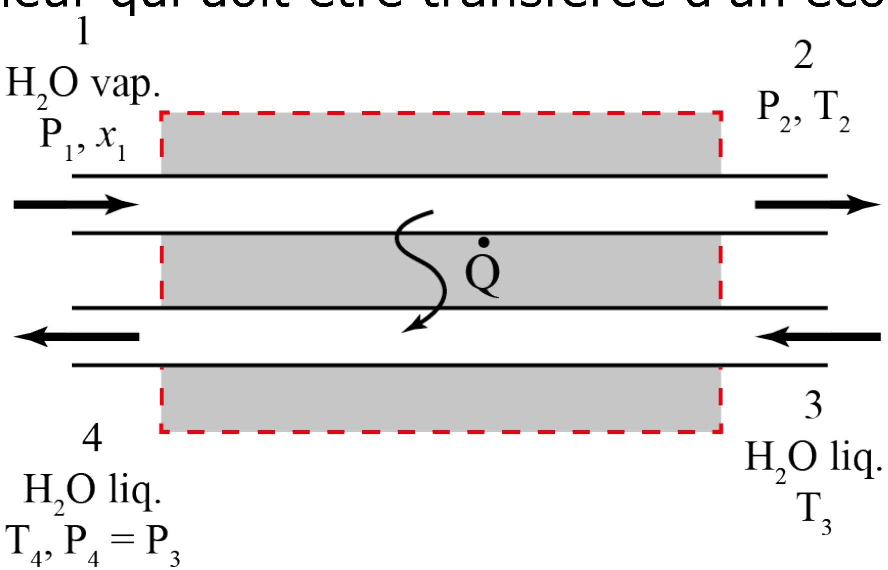
Flow principle of a plate heat exchanger ·

EXEMPLE #11, CONDENSEUR

Un échangeur de chaleur est utilisé en régime permanent pour condenser de la vapeur d'eau en utilisant de l'eau liquide froide. Trouvez:

a) Le ratio des débits massiques entre les deux écoulements $\dfrac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}$

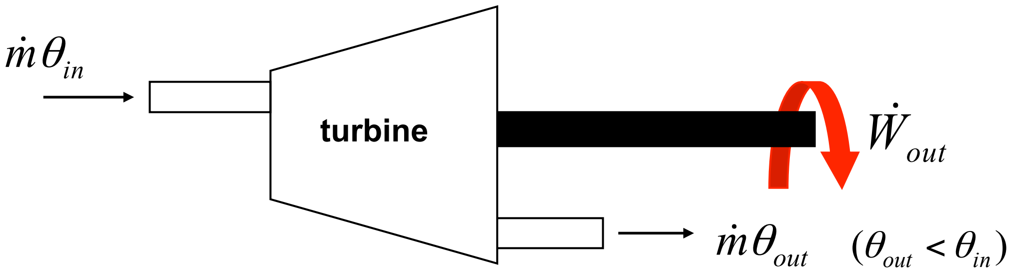
b) La quantité de chaleur qui doit être transférée d'un écoulement à l'autre $\dfrac{\dot{Q}}{\dot{m}_1}$



État 1	État 2	État 3	État 4
P_1 = 0.1 bar x_1 = 0.95	$P_2 = P_1$ T_2 = 45°C	Eau liq. T_3 = 20°C	Eau liq. T_4 = 35°C

DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT
TURBINES, POMPES ET COMPRESSEURS

Turbines: Extrait de l'énergie du fluide pour produire du travail



Analyse thermodynamique: En entrée on a typiquement un fluide à haute pression (et haute température). Il peut y avoir plusieurs entrées et sorties. Une turbine idéale est adiabatique (Q=0).

Types de turbines

- Hydrauliques (puissance jusqu'à 700 MW+)
- À vapeur
- À gaz
    - Stationnaires
    - Propulsion

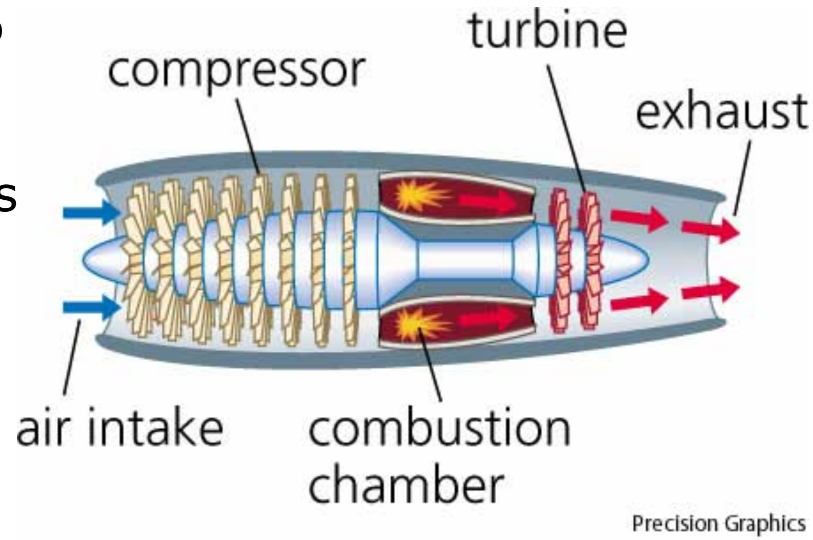
DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT
TURBINES, POMPES ET COMPRESSEURS

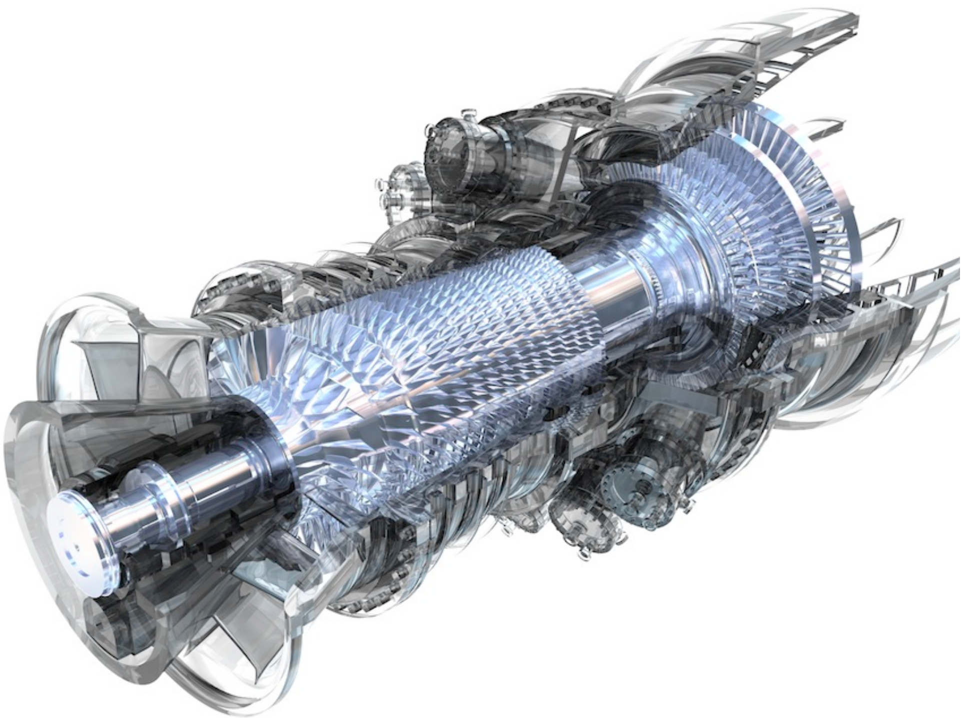
<u>Turbines à vapeur</u>

- Produisent 80% de l'énergie électrique dans le monde (charbon, nucléaire)
- Puissances jusqu'à 1 GW par machine
- Rendement (électrique) jusqu'à 37%

DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT
TURBINES, POMPES ET COMPRESSEURS

Turbines à gaz
- Puissances jusqu'à 500 MW par machine
- Rendement (puissance à l'axe) 30-40%
- Cycles combinés, rendements jusqu'à 60%
  - Fréquemment avec plusieurs sorties





DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT
TURBINES, POMPES ET COMPRESSEURS

Compresseurs: L’inverse d’une turbine, absorbent du travail pour augmenter de l’énergie (pression, température) du fluide.

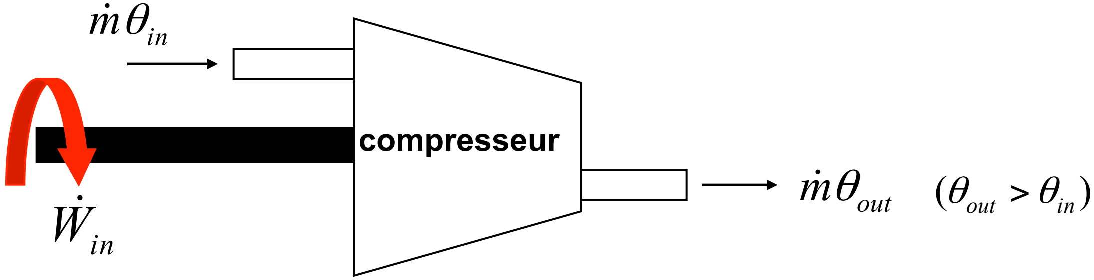
Deux grandes familles:

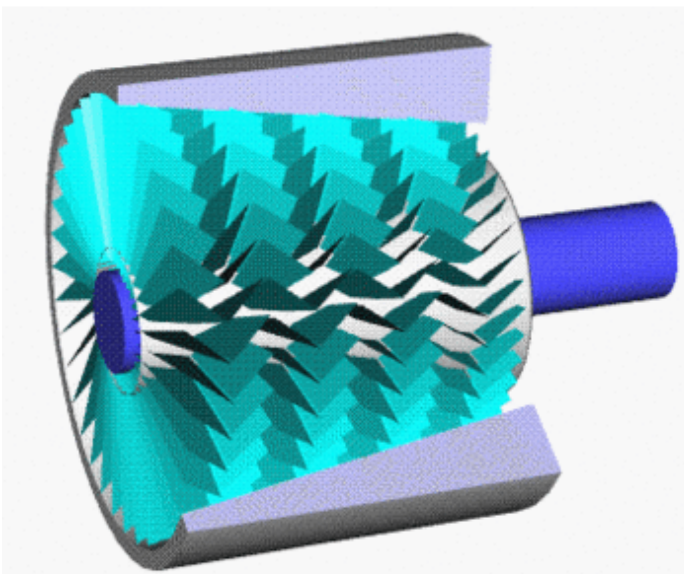
- Déplacement positif: une pièce mécanique déplace le fluide (piston).
- Dynamique: de l’énergie cinétique est transférée au fluide, puis transformée en énergie potentielle

Cas particuliers

- “Pompe”: compresseur pour liquide (~incompressible), W va à ΔP
- “Ventilateur”: ΔP petit, W va à $\Delta \upsilon$ (fait bouger l’air)

DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT
TURBINES, POMPES ET COMPRESSEURS



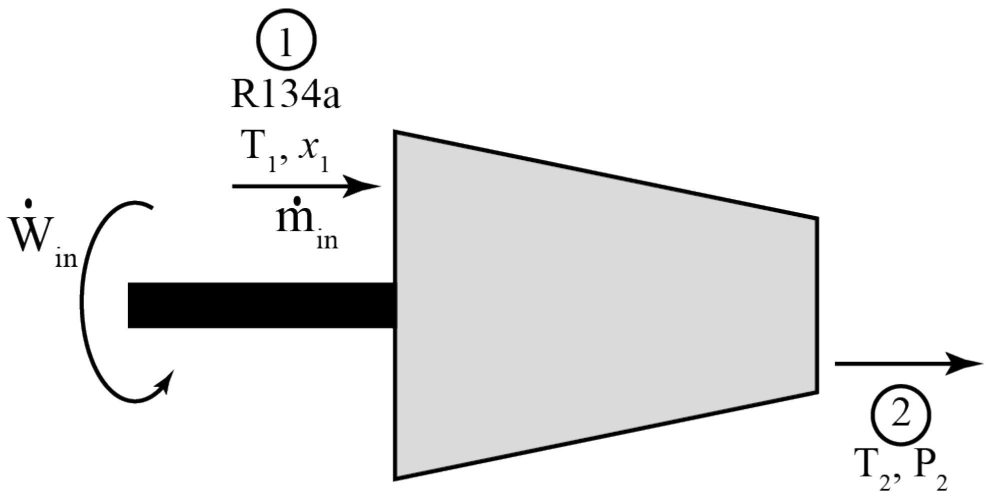


Pour les ***turbines*** et ***compresseurs***, on peut supposer, ***<u>à moins d'indication au contraire</u>***, que:

$$\dot{Q} \approx 0\,,\ \Delta e_c \approx 0,\ \Delta e_p \approx 0$$

EXEMPLE #12, COMPRESSEUR DE R134a

Un compresseur (supposé adiabatique et en régime permanent) est utilisé avec du réfrigérant R134a. En appliquant un bilan d'énergie, on cherche à obtenir a) la puissance mécanique devant être apportée au système et b) le débit volumique passant au travers du compresseur.



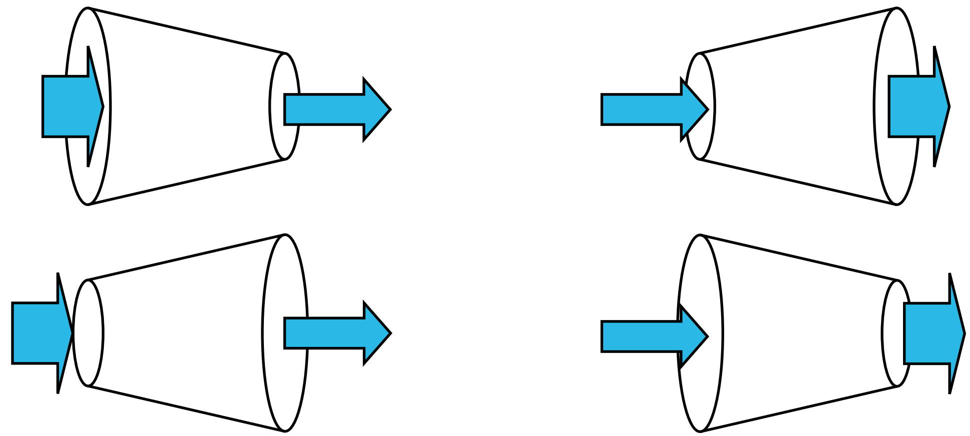
État 1	État 2
$T_1 = -24°C$	$T_2 = 60°C$
$x_1 = 1.0$	$P_2 = 0.8$ MPa
$\dot{m}_{in} = 1.2$ kg/s	

DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT
TUYÈRES ET DIFFUSEURS

Tuyères: $\upsilon\uparrow$, P$\downarrow$ | **Diffuseurs: $\upsilon\downarrow$, P$\uparrow$**

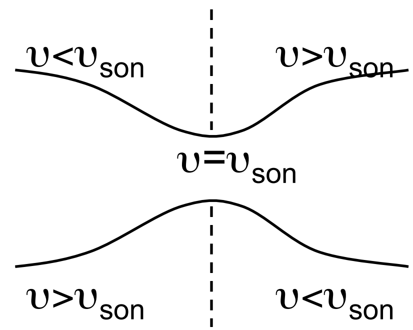
subsonique
($\upsilon<\upsilon_{son}$)

supersonique
($\upsilon>\upsilon_{son}$)



tuyère subsonique et supersonique

diffuseur supersonique et subsonique

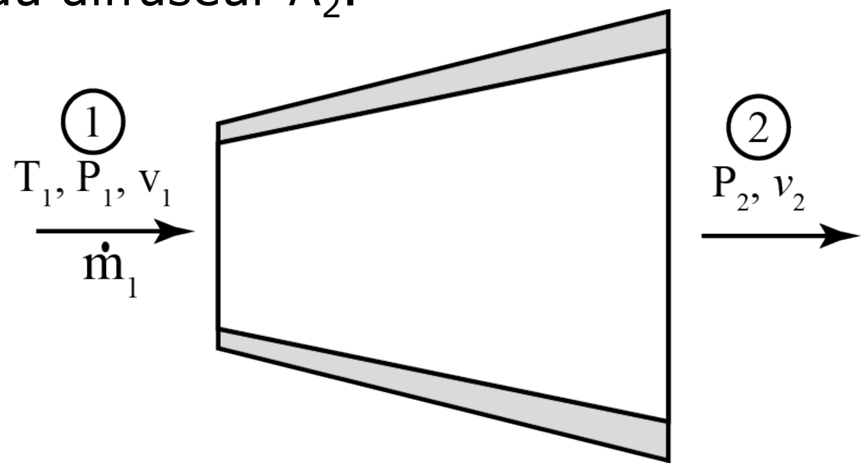


Pour les ***tuyères*** et ***diffuseurs***, on peut supposer, ***à moins d'indication au contraire***,que:

$$\dot{W} \approx 0,\ \dot{Q} \approx 0\ ,\ \Delta e_p \approx 0$$

EXEMPLE #13, DIFFUSEUR

De l'air passe au travers d'un diffuseur adiabatique. On cherche à savoir a) la température finale de l'air T_2 et b) la surface de la section de sortie du diffuseur A_2.

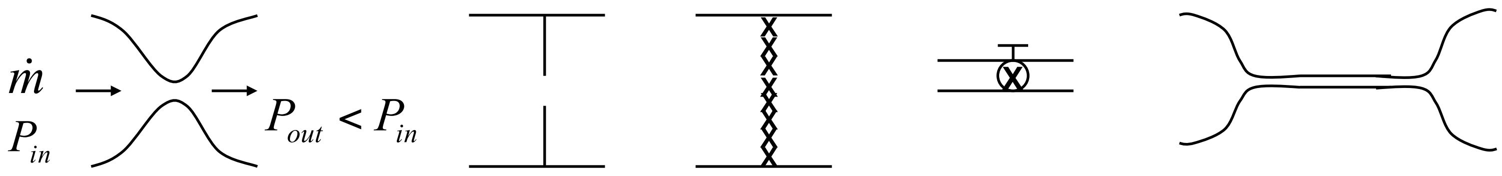


État 1	État 2
$T_1 = 127°C$	$P_2 = 100$ kPa
$P_1 = 80$ kPa	$v_2 = 30$ m/s
$m_1 = 6000$ kg/h	
$v_1 = 230$ m/s	

Source: CB&L problème 5.32 (5-37 dans C&B, 6ème ed.)

DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT
ÉTRANGLEURS ET VALVES

- Dispositifs pour principalement faire tomber la pression sans transfert de chaleur, ni travail.

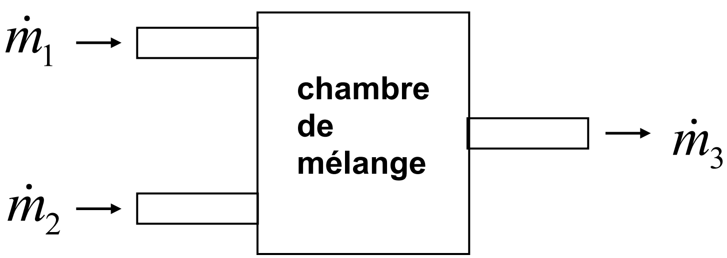


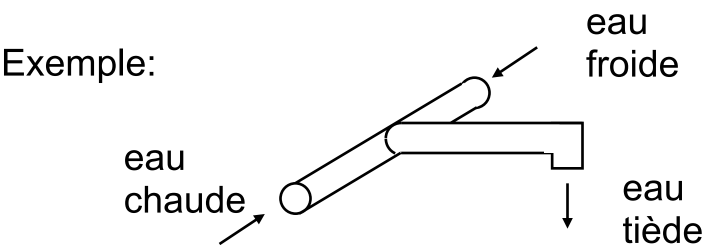
- Pour les ***étrangleurs*** et ***valves***, on peut supposer, ***<u>à moins d'indication au contraire</u>***, que:

$$\dot{W} \approx 0,\ \dot{Q} \approx 0,\ \Delta e_c \approx 0,\ \Delta e_p \approx 0 \qquad \rightarrow h_{in} \approx h_{out}$$

DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT
CHAMBRES DE MÉLANGES

- Dispositifs pour mélanger deux écoulements de fluides.





- Pour ces dispositifs, on peut supposer, ***<u>à moins d'indication au contraire</u>***, que

$$\dot{W} \approx 0 \ , \ \dot{Q} \approx 0 \ , \ \Delta e_c \approx 0, \ \Delta e_p \approx 0 \qquad \rightarrow \sum^{\#\,entrées} \dot{m}_{in} h_{in} \approx \Big(\sum^{\#\,entrées} \dot{m}_{in} \Big) h_{out}$$

> <u>Note</u>: Il ne s'agit ***<u>pas</u>*** d'apprendre *<u>par cœur</u>* la procédure pour chaque dispositif, mais il faut *<u>plutôt bien comprendre les concepts de conservation de masse et bilan d'énergie</u>* et de les appliquer pour n'importe quel système.

40