


# OÙ ON EN EST

- I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique
- II) Notions de base et définitions
- III) 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes fermés)
- IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles
- V) **1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)**
  - heures 12  - **Conservation de la masse**
  - *Bilan d'énergie*
  - *Écoulement permanent*
- VI) 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique
- VII) Entropie
- VIII) Cycles thermodynamiques communs
- IX) Mélanges non réactifs



# V) ANALYSE DES SYSTÈMES OUVERTS

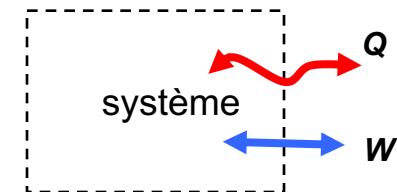
## Révision:

### 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

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

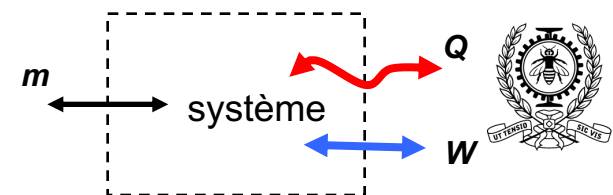
$$\Delta U + \Delta E_C + \Delta E_P = Q - W$$



### ii. Système ouvert :

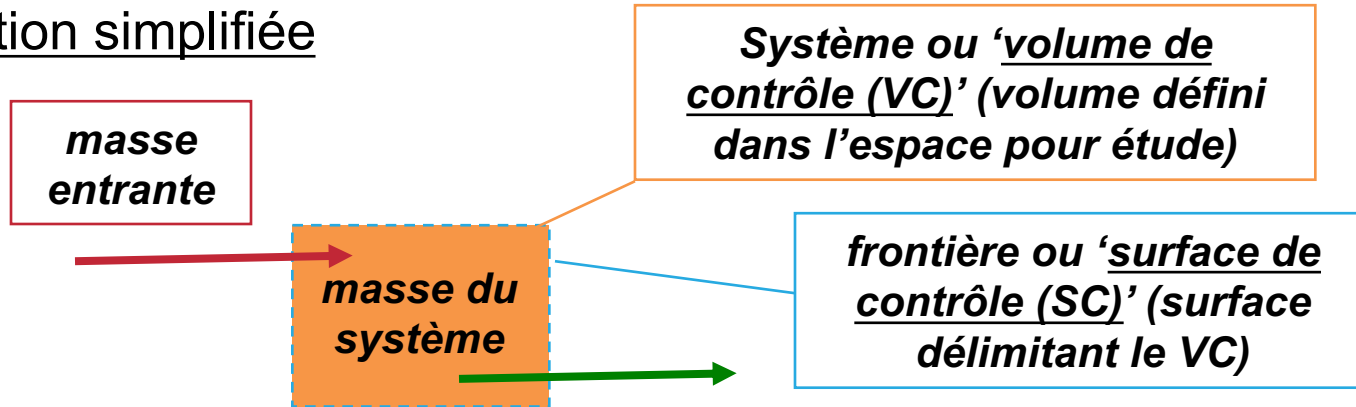
- Frontière **perméable** à la masse
- Frontière **perméable** à l'énergie (chaleur ou travail)
- Le bilan énergétique (premier principe) doit maintenant inclure un bilan de masse
- Grandeurs importantes :

- Débit massique [kg/s]  $\dot{m}$
- Débit volumique [m<sup>3</sup>/s]  $\dot{V}$



# 1) CONSERVATION DE LA MASSE

## a) Relation simplifiée



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

Analogie : compte bancaire

$$\left( \begin{array}{l} \text{Changement net} \\ \text{de la balance du} \\ \text{compte bancaire} \\ \text{en temps } \Delta t \end{array} \right) = \left( \begin{array}{l} \text{Argent déposé} \\ \text{en temps } \Delta t \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{Argent retiré en} \\ \text{temps } \Delta t \end{array} \right)$$

**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)

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

(Pas de réactions chimiques)

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

(Au travers des surfaces)

Expression sous forme de taux et débits

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m_{sys}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta m_{in}}{\Delta t} - \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta m_{out}}{\Delta t} \longrightarrow \begin{cases} \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta m_{in}}{\Delta t} = \dot{m}_{in} = \text{débit massique entrant} \\ \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta m_{out}}{\Delta t} = \dot{m}_{out} = \text{débit massique sortant} \end{cases}$$

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

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

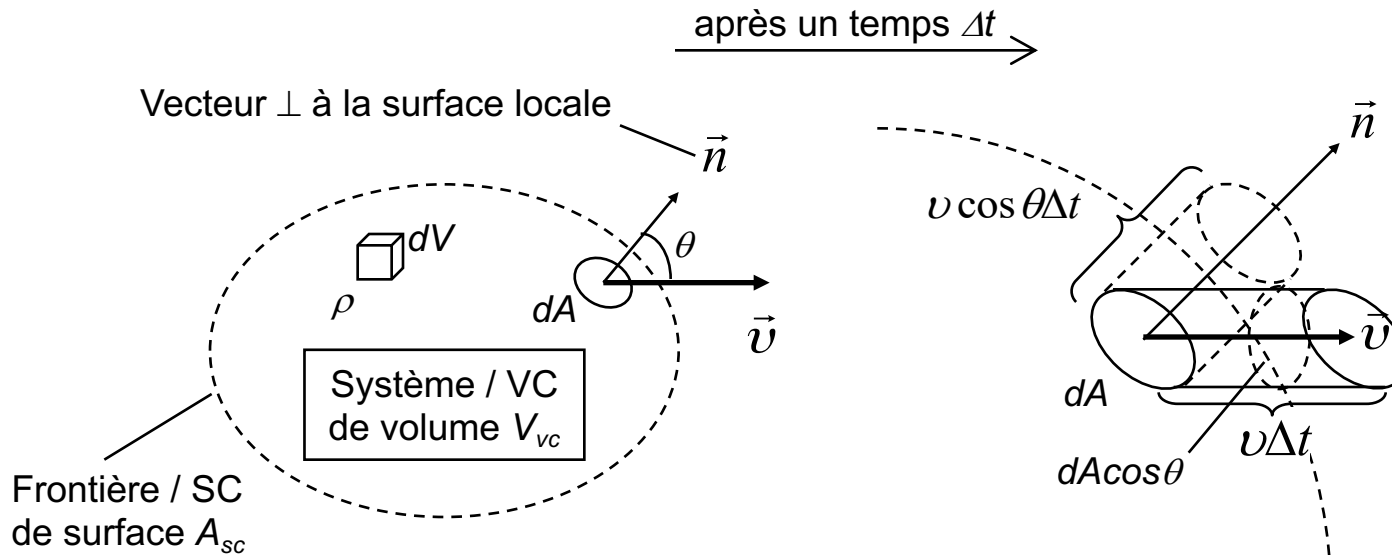
$$\frac{dm_{sys}}{dt} = \sum^{\#entrées} \dot{m}_{in} - \sum^{\#sorties} \dot{m}_{out}$$

**conservation de masse (forme simplifiée)  
multiples entrées et sorties**



# CONSERVATION DE LA MASSE

## b) RELATION GÉNÉRALE



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

$-90^\circ < \theta < 90^\circ$  ( $\vec{v} \cdot \vec{n} > 0$ ): débit sortant

$-90^\circ, 90^\circ$  ( $\vec{v} \cdot \vec{n} = 0$ ): débit zéro

$90^\circ < \theta < 270^\circ$  ( $\vec{v} \cdot \vec{n} < 0$ ): débit entrant

**Masse traversant  $dA$ :**

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

ou

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

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



# 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:

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

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

### Direction des échanges:

- Automatiquement pris en compte par l'intégrale de surface



# CONSERVATION DE LA MASSE

## b) RELATION GÉNÉRALE

iii) Conservation de la masse:

$$\frac{dm_{sys}}{dt} = -\dot{m}_{sc} \quad \text{car } \dot{m}_{sc} \text{ est positif pour débit sortant}$$

$$\frac{d}{dt} \int_{V_{vc}} \rho dV = - \int_{A_{sc}} \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA$$

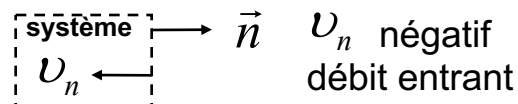
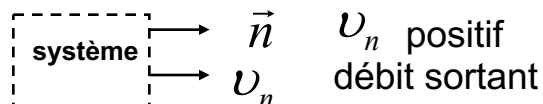
$$\frac{d}{dt} \int_{V_{vc}} \rho dV + \int_{A_{sc}} \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dA = 0$$

$$\frac{d}{dt} \int_{V_{vc}} \rho dV + \int_{A_{sc}} \rho v_n dA = 0 \rightarrow v_n \equiv \vec{v} \cdot \vec{n}$$

conservation de masse  
(forme générale)

$$\underbrace{\text{taux de changement de masse du système}} + \underbrace{\text{débit de masse net traversant la frontière}} = 0$$

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



# CONSERVATION DE LA MASSE

## c) CAS SPÉCIAUX (SIMPLIFICATIONS)

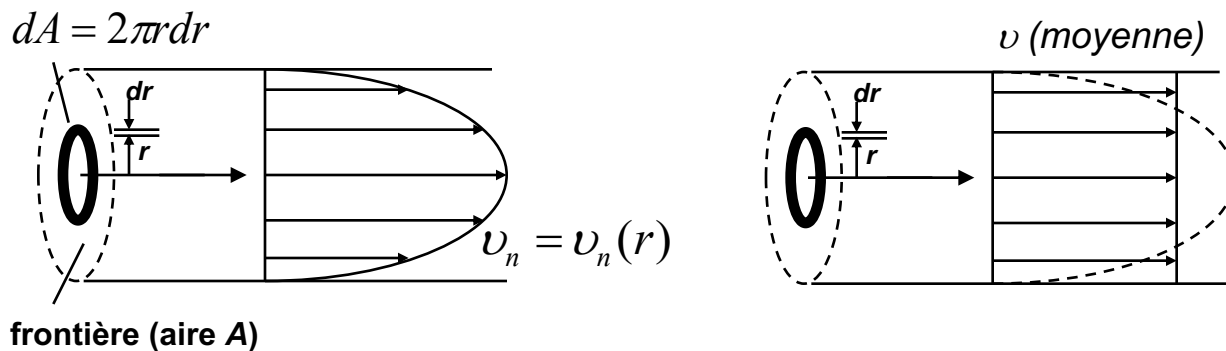
- i) **Écoulement permanent:** aucun changement de propriété avec le temps pour n'importe quel point dans l'espace, donc, la conservation de masse devient:

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

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

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

- ii) **Écoulement dans un tube:** (cas le plus commun dans ce cours)



Dans ce cas,  $\rho$  est approx. uniforme sur A mais  $v_n$  est une fonction de  $r$ . On définit alors une vitesse  $v$  moyenne (uniforme) qui donnerait le même débit





# CONSERVATION DE LA MASSE

## c) CAS SPÉCIAUX (SIMPLIFICATIONS)

ii) écoulement dans un tube (cont.)

$$\dot{m}_{sc} = \rho v A = \int_A \rho v_n dA = \rho \int_A v_n dA \longrightarrow$$

notez que:

$$v = \frac{1}{A} \int_A v_n dA$$

$$\int_A v_n dA = v A = \dot{V} = \text{débit volumétrique}$$

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

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

d) surface de contrôle en mouvement

**vitesse relative à la surface**

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

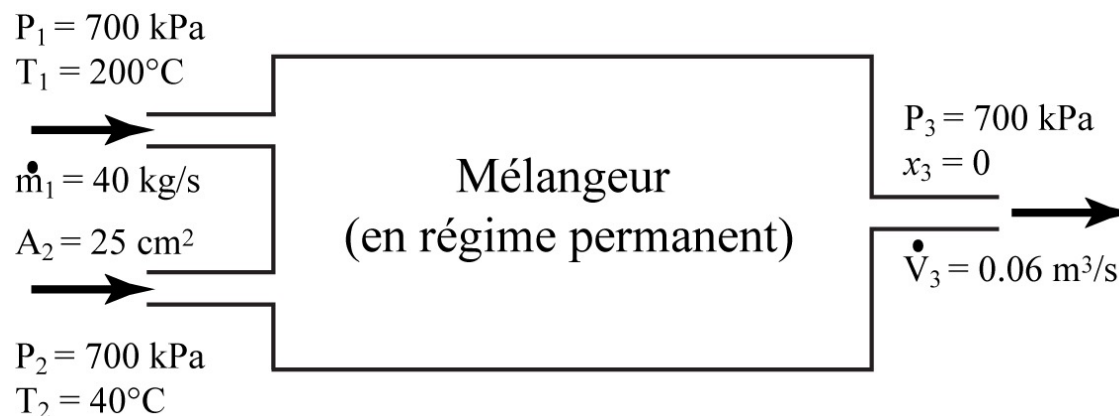
$$\frac{d}{dt} \int_{V_{vc}} \rho dV + \int_{A_{sc}} \rho v_{rm} dA = 0 \longrightarrow v_{rm} \equiv \vec{v}_r \cdot \vec{n}$$


# EXEMPLE #9 : DÉBITS ENTRANT 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                                  |
|-------------------------------|-------------------------|---|
| $P_1 = 700 \text{ kPa}$       | $P_2 = 700 \text{ kPa}$ | $P_3 = 700 \text{ kPa}$                 |
| $T_1 = 200 \text{ °C}$        | $T_2 = 40 \text{ °C}$   | $x_3 = 0$                               |
| $\dot{m}_1 = 40 \text{ kg/s}$ | $A_2 = 25 \text{ cm}^2$ | $\dot{V}_3 = 0.06 \text{ m}^3/\text{s}$ |

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) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique
- II) Notions de base et définitions
- III) 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes fermés)
- IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles
- V) **1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)**
  - *Conservation de la masse*
  - **Bilan d'énergie**
  - *Écoulement permanent*
- VI) 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique
- VII) Entropie
- VIII) Cycles thermodynamiques communs
- IX) Mélanges non réactifs

heure 13



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

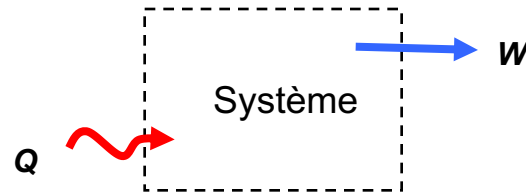


# 1<sup>ER</sup> PRINCIPE, SYSTÈMES OUVERTS

## 2) BILAN D'ÉNERGIE

### a) Forme simplifiée

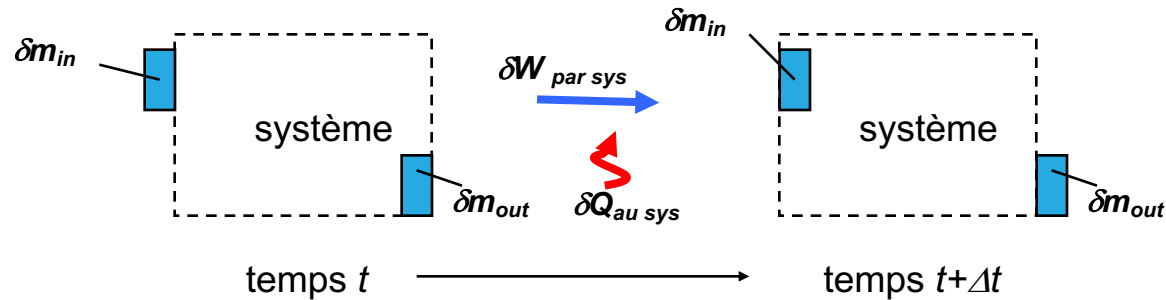
système fermé (révision)



$$\left[ \begin{array}{c} \text{changement d'énergie} \\ \text{du système} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{transfert de chaleur} \\ \text{au système} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{travail fait par} \\ \text{système} \end{array} \right]$$

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

système ouvert



$$\left[ \begin{array}{c} \text{changement d'énergie} \\ \text{du système} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{transfert de chaleur} \\ \text{au système} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{travail fait par} \\ \text{système} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{c} \text{énergie du fluide} \\ \text{entrant } (\delta m_{in}) \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{énergie du fluide} \\ \text{sortant } (\delta m_{out}) \end{array} \right]$$

On doit maintenant quantifier ces termes



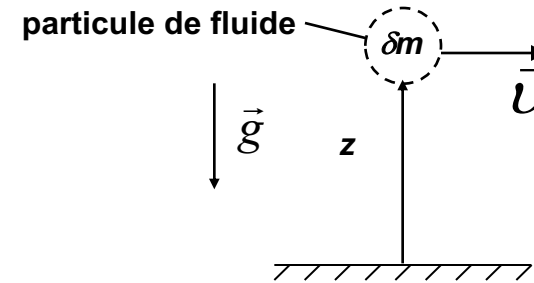
# BILAN D'ÉNERGIE, SYSTÈME OUVERT

## a) FORME SIMPLIFIÉE

Énergie spécifique d'un fluide ( $e_f$ ):

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

$$e_f = \frac{E_f}{\delta m} = u + \frac{1}{2} v^2 + g z$$

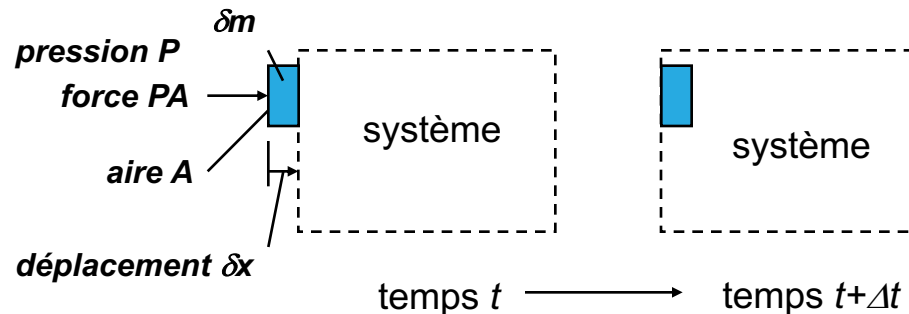


Le bilan d'énergie pour un système ouvert devient alors:

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

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

**“Le travail d'écoulement” : Travail fait sur système ( $\delta W_e$ ) pour pousser la quantité de masse  $\delta m$  de  $\delta x$  dans le système en temps  $\Delta t$  :**



# BILAN D'ÉNERGIE, SYSTÈME OUVERT

## a) FORME SIMPLIFIÉE

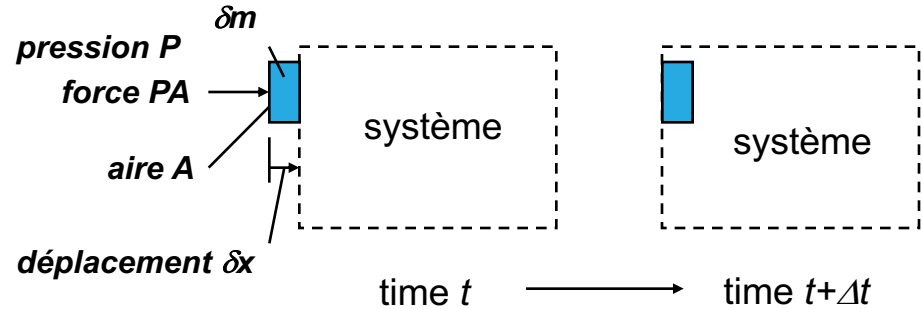
Travail d'écoulement  $W_e$

$$\delta W_e = \text{force} \cdot \text{déplacement}$$

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

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

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



- **Positif** pour  $\delta m_{in}$  ( $w_e$  sur système)
- **Négatif** pour  $\delta m_{out}$  ( $w_e$  par système)

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

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

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

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

$h$  (enthalpie)



# BILAN D'ÉNERGIE, SYSTÈME OUVERT

## a) FORME SIMPLIFIÉE

On définit l'énergie totale d'un fluide ( $\theta$ ) :

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

Ce qui donne:

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

Prenons la limite  $\Delta t \rightarrow 0$  pour mettre le bilan d'énergie en terme de taux:

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

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

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



# BILAN D'ÉNERGIE, SYSTÈME OUVERT

## a) FORME SIMPLIFIÉE

Quand on a plusieurs entrées / sorties...

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

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

### Notes:

- En mettant le travail d'écoulement ( $Pv$ ) dans le terme  $\theta$  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)

où

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

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

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





# 1<sup>ER</sup> PRINCIPE, SYSTÈME OUVERT

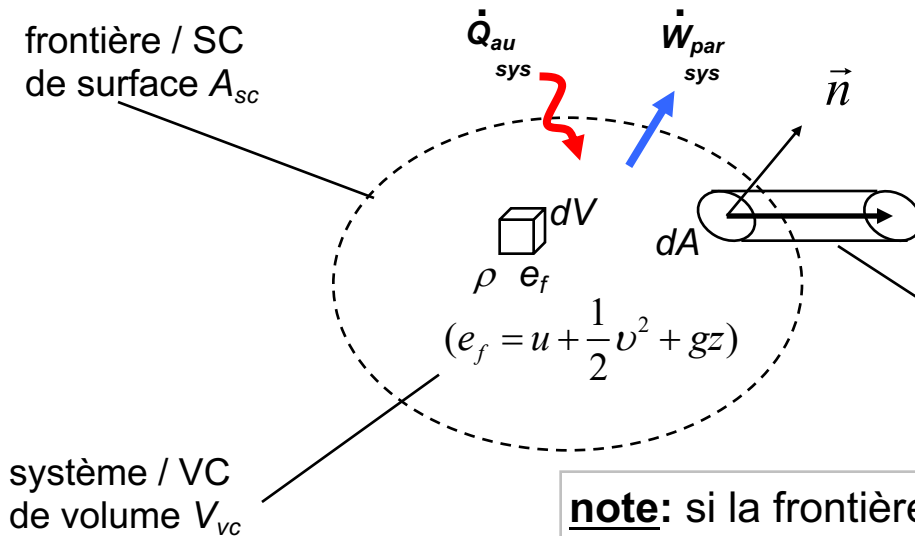
## b) FORME GÉNÉRALE DU BILAN D'ÉNERGIE

Pour la forme simplifiée, on est arrivé à:

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

Il faut trouver la forme intégrale de ces termes

frontière / SC  
de surface  $A_{sc}$



système / VC  
de volume  $V_{vc}$

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  $\Delta t$

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

**note:** si la frontière est fixe  
 $\vec{v}_r = \vec{v}$



# 1<sup>ER</sup> PRINCIPE, SYSTÈME OUVERT

## b) FORME GÉNÉRALE DU BILAN D'ÉNERGIE

i) Taux de changement d'énergie du système:

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

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

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

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

$$\dot{m}_{out} \theta_{out} - \dot{m}_{in} \theta_{in} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta t}{\Delta t} \int_{A_{sc}} \rho \theta \vec{v}_r \cdot \vec{n} dA = \int_{A_{sc}} \rho \theta \vec{v}_r \cdot \vec{n} dA$$

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



# 1<sup>ER</sup> PRINCIPE, SYSTÈME OUVERT

## b) FORME GÉNÉRALE DU BILAN D'ÉNERGIE

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

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

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

**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.

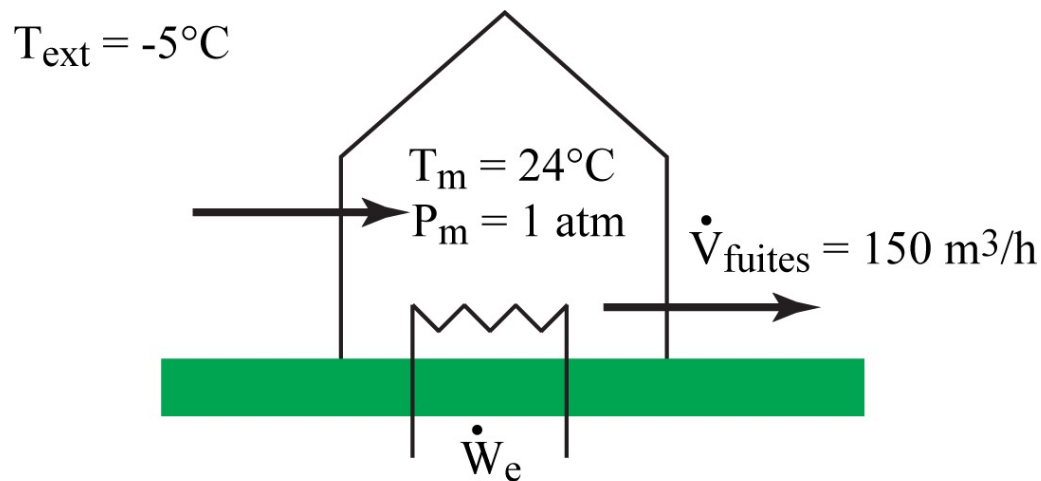
$$\vec{v}_r = \vec{v}$$

- 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  $24^\circ\text{C}$ . La maison est parfaitement isolée, la température extérieure est de  $-5^\circ\text{C}$  et le volume de fuite est de  $150\text{ m}^3/\text{h}$ .

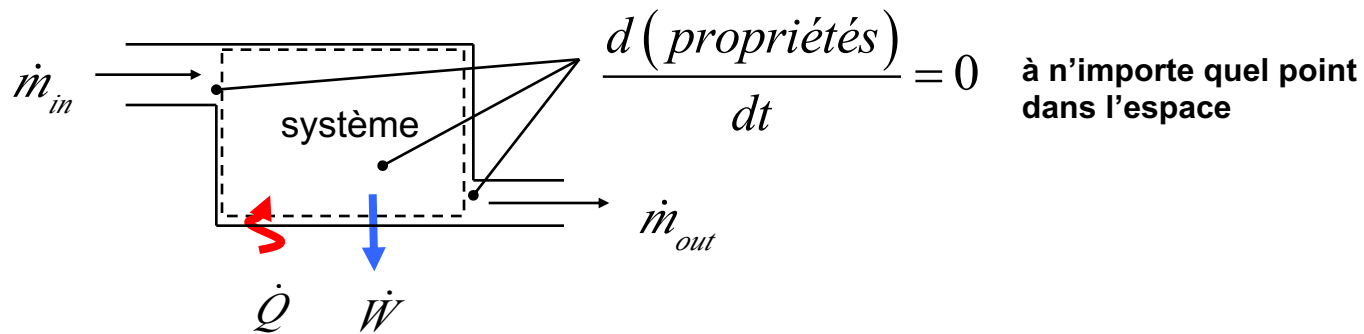


# ANALYSE DES SYSTÈMES OUVERTS

## 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.



### Notes:

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

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

- 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

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



# ANALYSE DES SYSTÈMES OUVERTS

## 3) ÉCOULEMENT PERMANENT

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

conservation de la masse:  $\frac{dm_{sys}}{dt} \overset{0}{=} \sum^{\#entrées} \dot{m}_{in} - \sum^{\#sorties} \dot{m}_{out}$

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

bilan d'énergie:  $\dot{E}_{sys} \overset{0}{=} \dot{Q}_{au} - \dot{W}_{par} + \sum^{\#entrées} \dot{m}_{in} \theta_{in} - \sum^{\#sorties} \dot{m}_{out} \theta_{out}$

ou

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

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



# ÉCOULEMENT PERMANENT

## b) ÉCOULEMENT PERMANENT

Pour un système avec une entrée et une sortie

Conservation de la masse

$$\dot{m}_{in} = \dot{m}_{out} = \dot{m}$$

$$\rho_{in} v_{in} A_{in} = \rho_{out} v_{out} A_{out} = \dot{m}$$

Bilan d'énergie

$$\dot{Q}_{au_{sys}} - \dot{W}_{par_{sys}} = \dot{m}_{out} \theta_{out} - \dot{m}_{in} \theta_{in}$$

$$\dot{Q}_{au_{sys}} - \dot{W}_{par_{sys}} = \dot{m} \left( h_{out} + \frac{v_{out}^2}{2} + gz_{out} \right) - \dot{m} \left( h_{in} + \frac{v_{in}^2}{2} + gz_{in} \right)$$

$$\dot{Q}_{au_{sys}} - \dot{W}_{par_{sys}} = \dot{m} \left[ \underbrace{(h_{out} - h_{in})}_{\Delta h} + \underbrace{\frac{(v_{out}^2 - v_{in}^2)}{2}}_{\Delta e_c} + \underbrace{g(z_{out} - z_{in})}_{\Delta e_p} \right]$$

Notes:

- $\Delta h$  : tables ou  $c_p$  moyenne  $(T_{out} - T_{in})$  pour gaz parfait
- $\Delta e_c$ : si  $v_{out} \approx v_{in}$ ,  $\Delta e_c$  peut être négligeable lorsque  $v_{out}$  et  $v_{in}$  sont petites, mais non négligeable lorsque  $v_{out}$  et  $v_{in}$  sont grandes
- $\Delta e_p$ : seulement important s'il y a un changement d'hauteur ( $\Delta z$ ) important



# OÙ ON EN EST

- I) Introduction: définition et utilité de la thermodynamique
- II) Notions de base et définitions
- III) 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes fermés)
- IV) Propriétés des corps purs, simples et compressibles
- V) **1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)**
  - *Conservation de la masse*
  - *Bilan d'énergie*
  - **Dispositifs à écoulement permanent**
- VI) 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique
- VII) Entropie
- VIII) Cycles thermodynamiques communs
- IX) Mélanges non réactifs

heures 14-15-16-17 →





# 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

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



# c) DISPOSITIFS COMMUNS À ÉCOULEMENT PERMANENT

| Catégorie | Échanges    | Exemples   |
|-----------|-------------|--|
| 1         | Chaleur $Q$ | Chaudière<br>Évaporateur<br>Condenseur<br>Échangeur de chaleur |
| 2         | Travail $W$ | Moteur<br>Turbine<br>Compresseur<br>Pompe                      |
| 3         | -           | Diffuseur<br>Tuyère<br>Étrangleur<br>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.

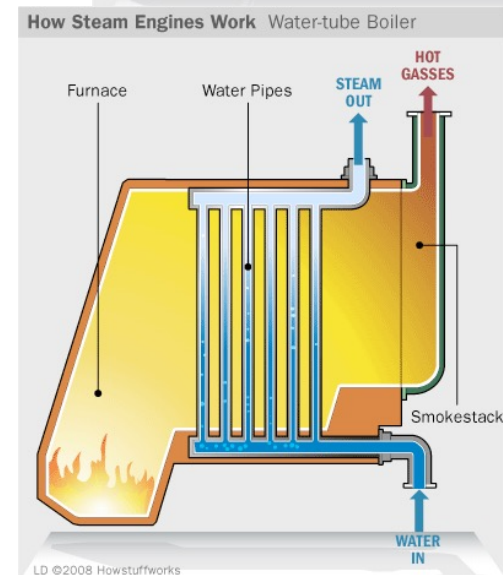
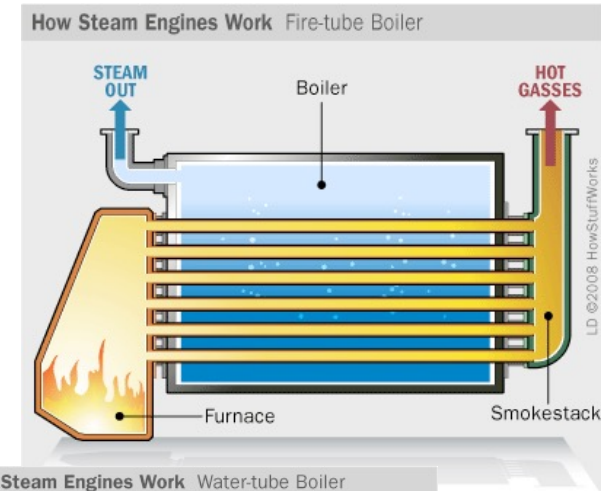


# DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT

## CHAUDIÈRES

### Types de chaudières

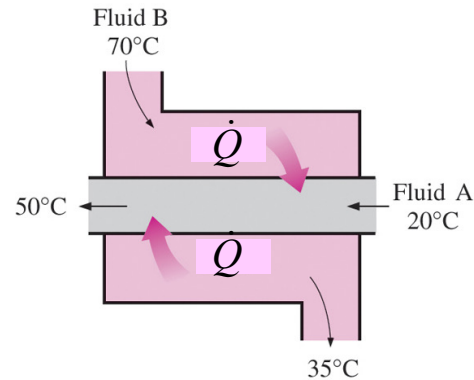
- « Pot boiler »
  - Réservoir partiellement rempli d'eau
  - Efficacité très faible, maximum 65%
- Fire-tubes
  - Les gaz de combustion circulent dans des tubes immergés
- Water-tubes
  - L'eau et la vapeur sont dans des tubes
  - Applications à haute pression
  - Rendement jusqu'à 85-90%
- Surchauffe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



# DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT

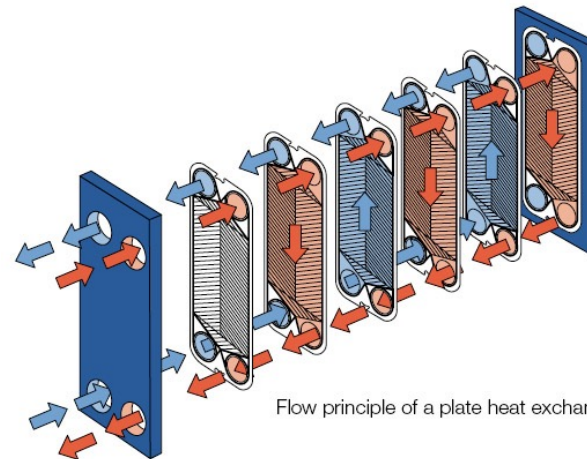
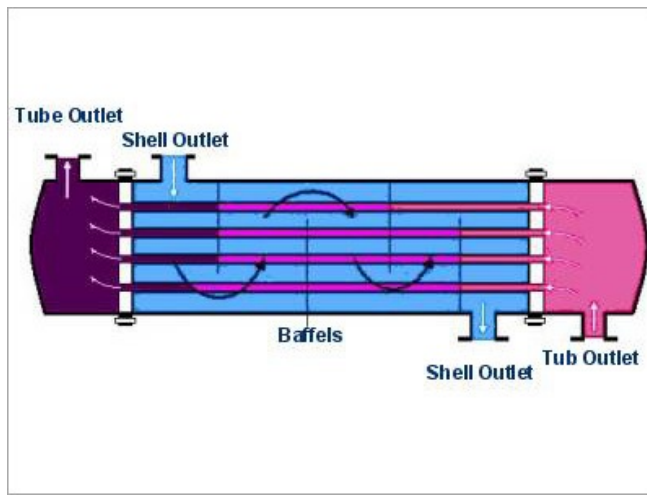
## ÉCHANGEURS DE CHALEURS

« 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, à moins d'indication contraire, que:

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

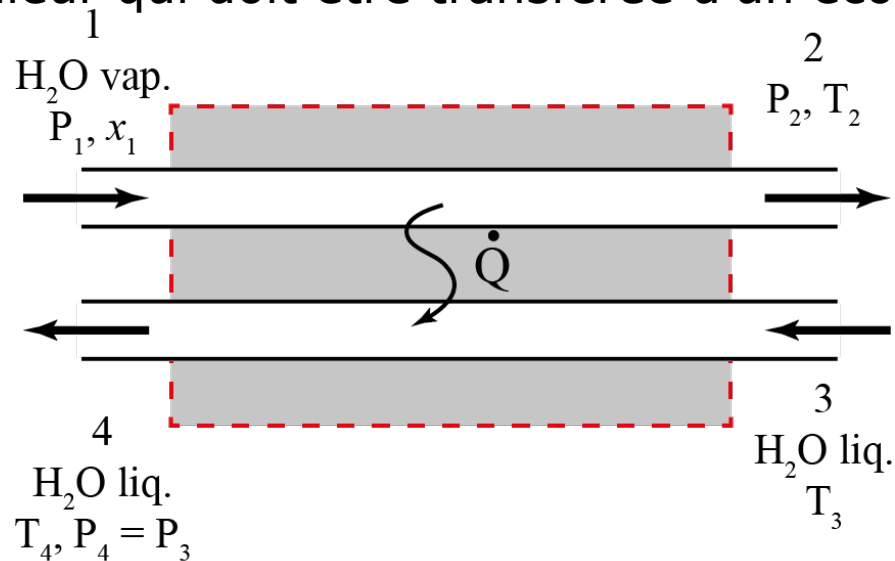


# EXEMPLE #11, CONDENSEUR

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  $\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1}$

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



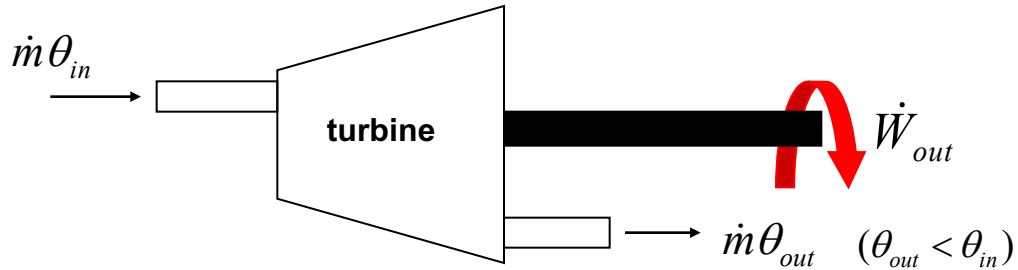
| État 1                                  | État 2                                  | État 3                               | État 4                               |
|---|---|--------------------------------------|--------------------------------------|
| $P_1 = 0.1 \text{ bar}$<br>$x_1 = 0.95$ | $P_2 = P_1$<br>$T_2 = 45^\circ\text{C}$ | Eau liq.<br>$T_3 = 20^\circ\text{C}$ | Eau liq.<br>$T_4 = 35^\circ\text{C}$ |



# 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

### Turbines à vapeur

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



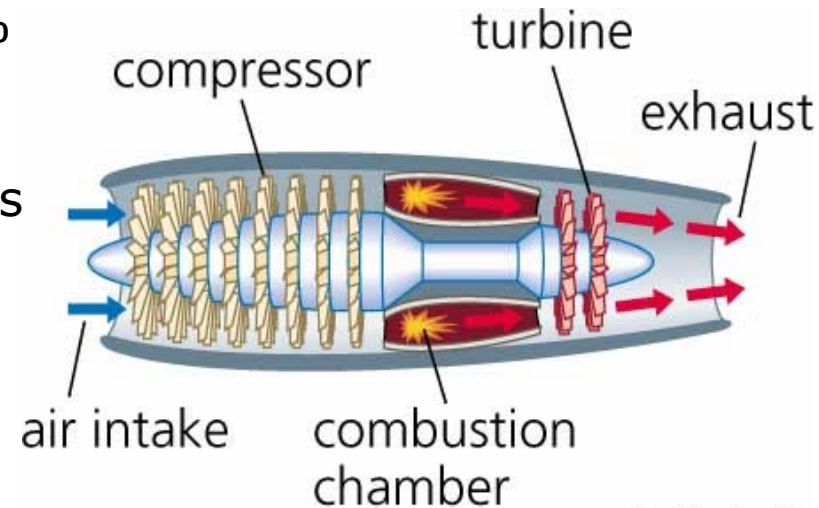
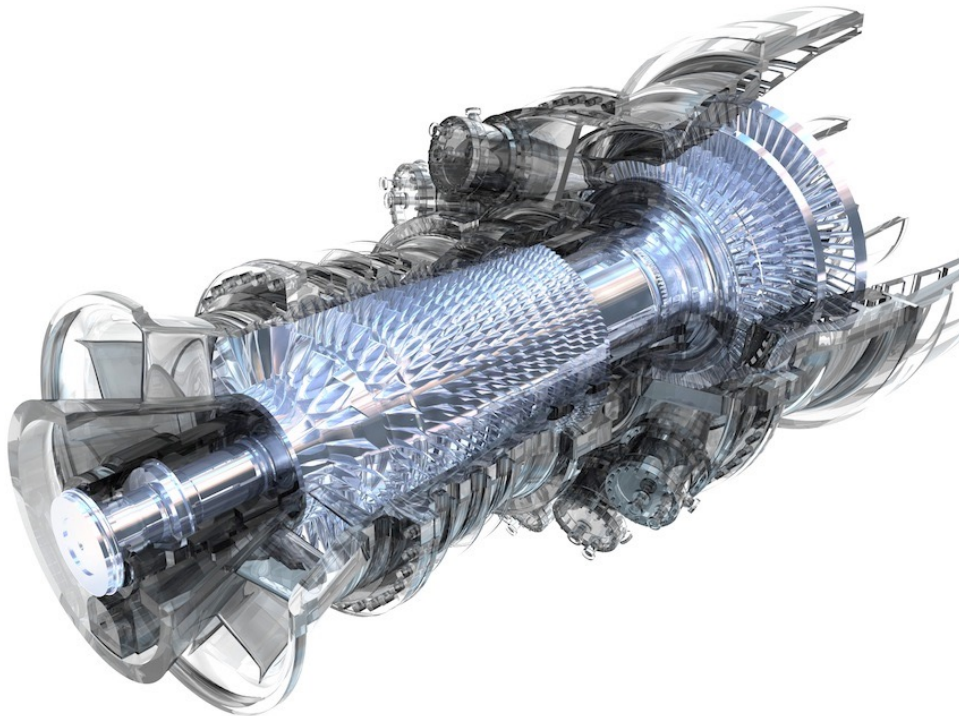


# DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT

## 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



Precision Graphics



# 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

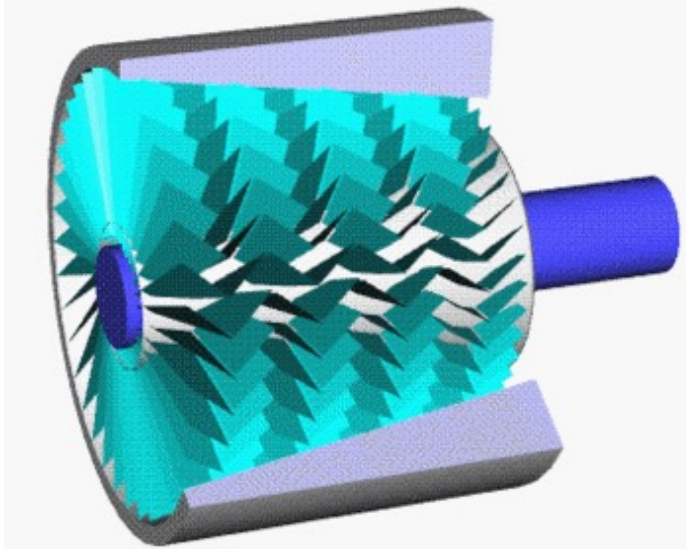
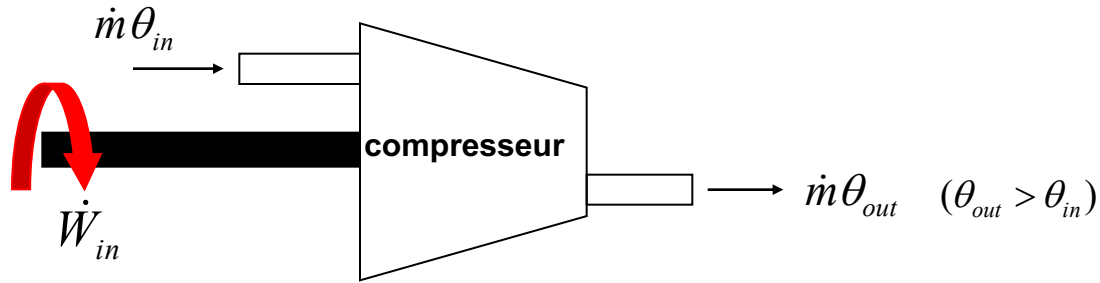
Cas particuliers

- "Pompe": compresseur pour liquide ( $\sim$ incompressible),  $W_{va}$  à  $\Delta P$
- "Ventilateur":  $\Delta P$  petit,  $W_{va}$  à  $\Delta v$  (fait bouger l'air)



# DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT

## TURBINES, POMPES ET COMPRESSEURS

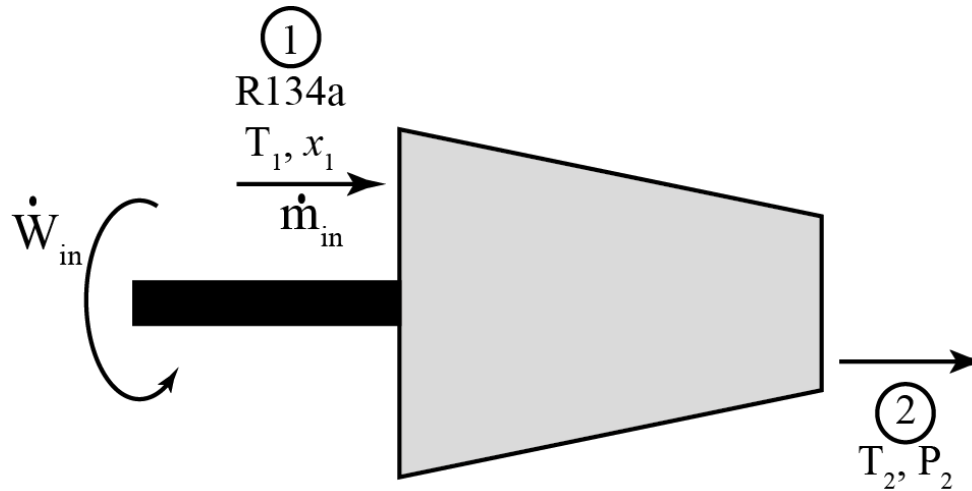


Pour les *turbines* et *compresseurs*, on peut supposer, à moins d'indication contraire, que:

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

# 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                   |
|-----------------------------------|--------------------------|
| $T_1 = -24^\circ\text{C}$         | $T_2 = 60^\circ\text{C}$ |
| $x_1 = 1.0$                       | $P_2 = 0.8 \text{ MPa}$  |
| $\dot{m}_{in} = 1.2 \text{ kg/s}$ |                          |



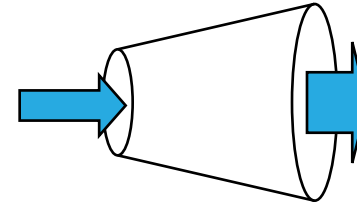
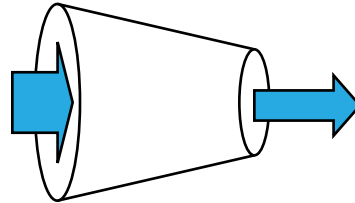
# DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT

## TUYÈRES ET DIFFUSEURS

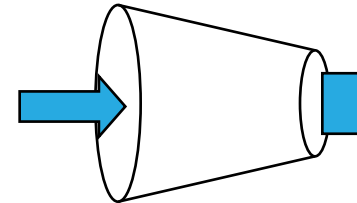
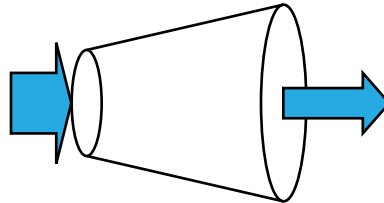
**Tuyères:  $v \uparrow, P \downarrow$**

**Diffuseurs:  $v \downarrow, P \uparrow$**

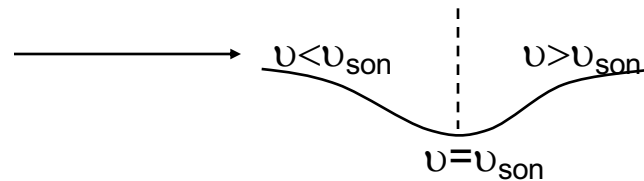
subsonique  
( $v < v_{son}$ )



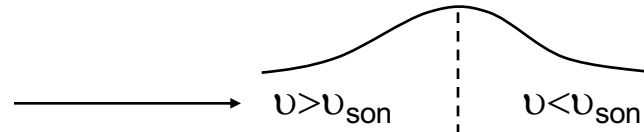
supersonique  
( $v > v_{son}$ )



tuyère subsonique et supersonique



diffuseur supersonique et subsonique



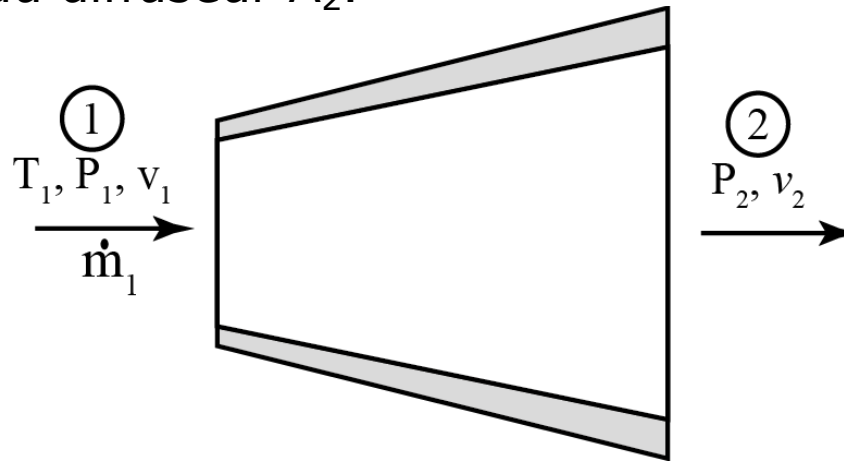
Pour les **tuyères** et **diffuseurs**, on peut supposer, **à moins d'indication contraire**, que:

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



# 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  $A_2$ .

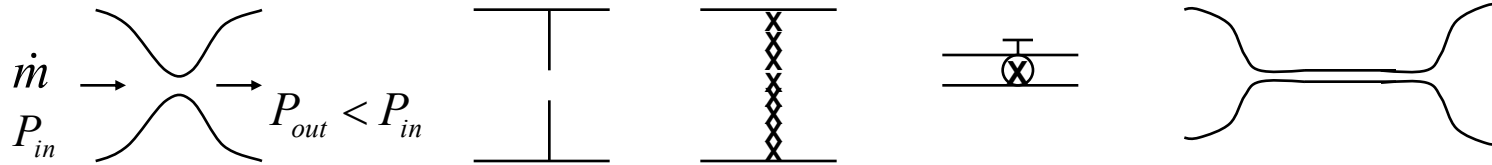


| État 1                          | État 2                  |
|---------------------------------|-------------------------|
| $T_1 = 127^\circ\text{C}$       | $P_2 = 100 \text{ kPa}$ |
| $P_1 = 80 \text{ kPa}$          | $v_2 = 30 \text{ m/s}$  |
| $\dot{m}_1 = 6000 \text{ kg/h}$ |                         |
| $v_1 = 230 \text{ m/s}$         |                         |



# 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, à moins d'indication contraire, que:

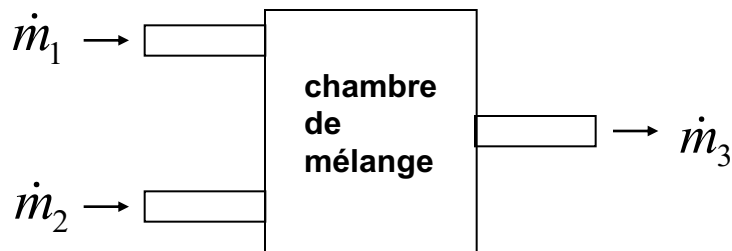
$$\dot{W} \approx 0, \quad \dot{Q} \approx 0, \quad \Delta e_c \approx 0, \quad \Delta e_p \approx 0 \quad \rightarrow \quad h_{in} \approx h_{out}$$



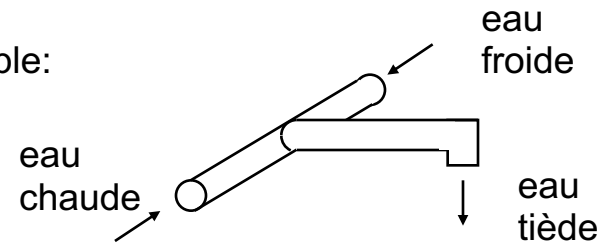
# DISPOSITIFS À ÉCOULEMENT PERMANENT

## CHAMBRES DE MÉLANGES

- Dispositifs pour mélanger deux écoulements de fluides.



Exemple:



- Pour ces dispositifs, on peut supposer, **à moins d'indication contraire**, que

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

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

