ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

MEC1210 THERMODYNAMIQUE

ENSEIGNANT: RAMDANE YOUNSI
BUREAU: C-318.1
TELEPHONE: (514)340-4711 ext. 4579
COURRIEL: ramdane.younsi@polymtl.ca

D'après les notes de cours de Pr. Huu Duc Vo

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

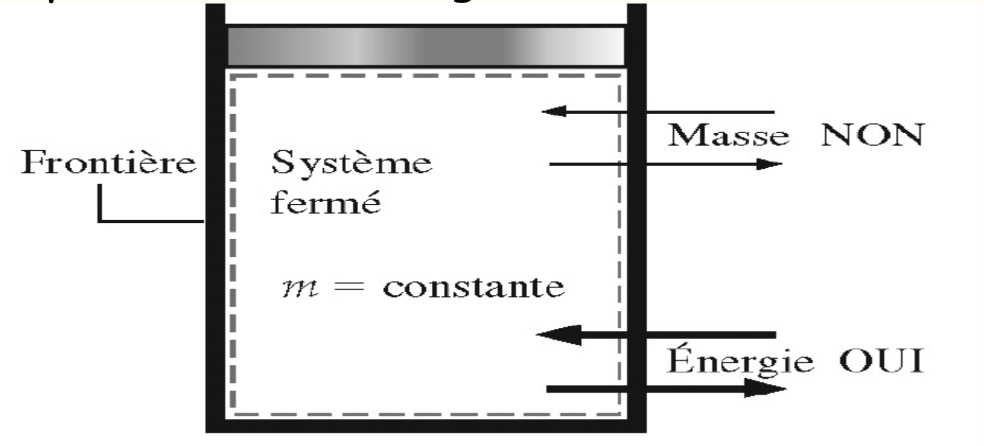
Chapitre 5:
1er principe de la thermodynamique (systèmes ouverts)

OBJECTIFS

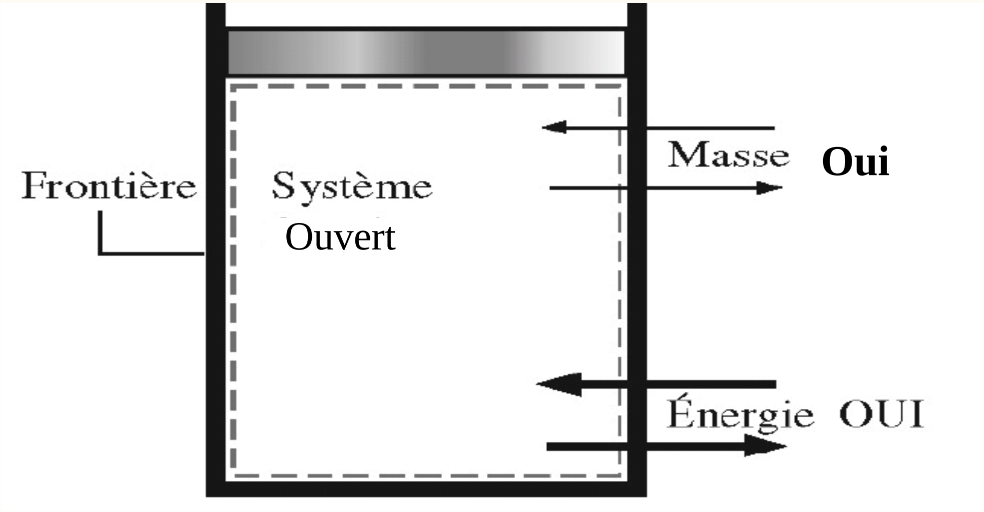
- Développer et maîtriser les principes de conservation de la masse et de l'énergie dans un volume de contrôle.

- Appliquer ces principes aux écoulements dans les systèmes suivants: les tuyères, les diffuseurs, les turbines, les compresseurs et les échangeurs de chaleur.

Rappel: i) système fermé: quantité de matière fixe, frontière ***imperméable*** à la masse, mais perméable à l'énergie (chaleur ou travail)



ii) système ouvert: frontière ***perméable*** à la masse et à l'énergie

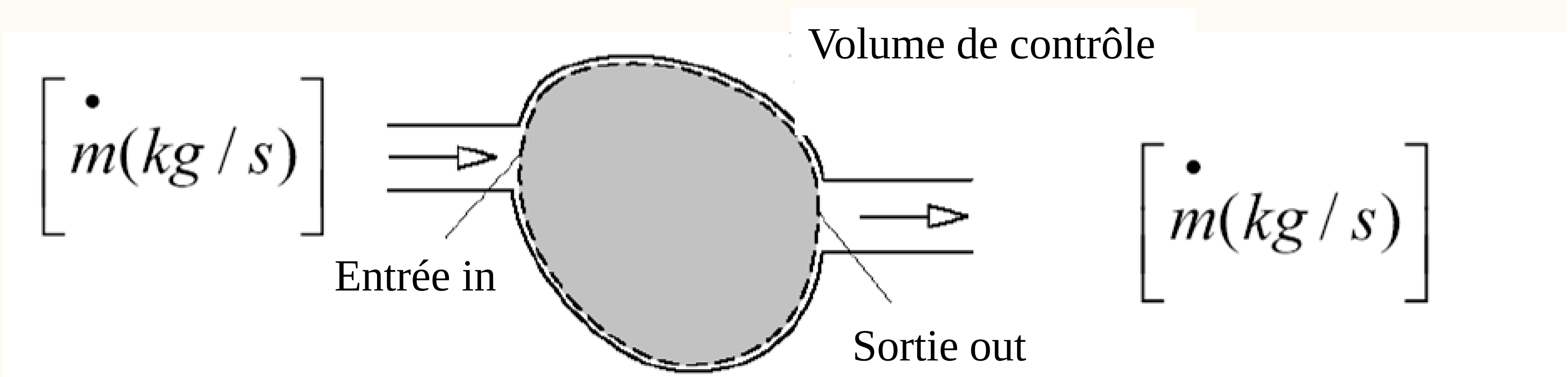


ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

1) Conservation de la masse

a) Relation simplifiée: La variation de la masse au sein d'un volume de contrôle pendant un intervalle Δt est égale à la masse entrante moins la masse sortante de ce volume de contrôle

$$\Delta m_{vc} = m_{in} - m_{out}$$



(masse accumulée)=(débit entrant)-(débit sortant)

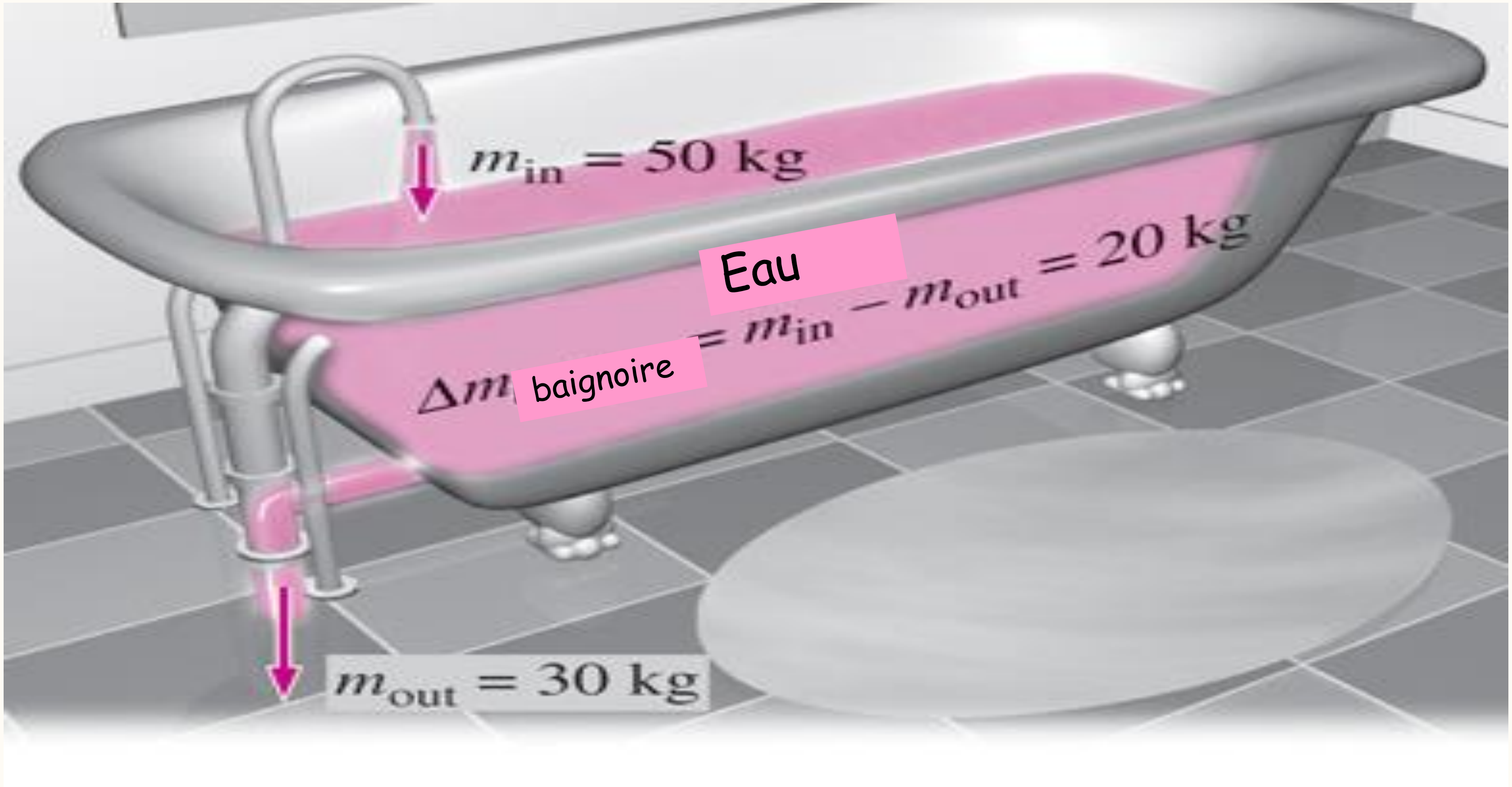
$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{VC} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out}$$

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

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{VC} = \sum_{in}\dot{m} - \sum_{out}\dot{m}$$

conservation de masse (forme simplifiée)
multiples entrées et sorties

- Exemple



ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

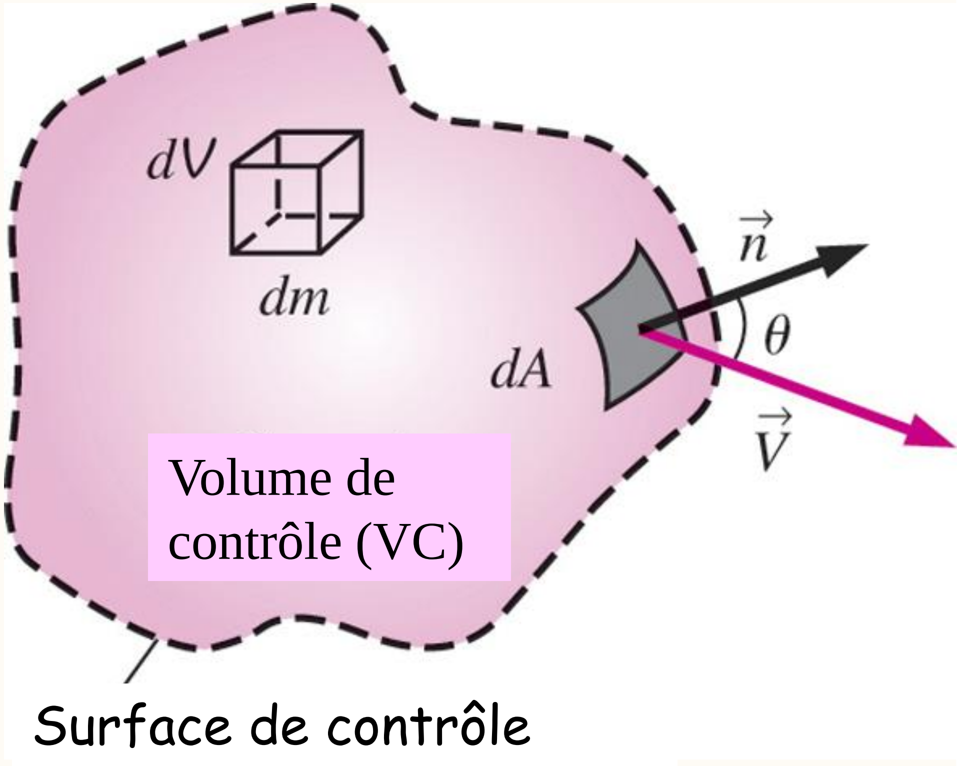
b) Relations générales

La masse d'un VC dV

$$m_{VC} = \int_{VC} \rho dV$$

La variation de la masse dans ce volume de contrôle est:

$$\frac{dm_{VC}}{dt} = \frac{d}{dt}\int_{VC} \rho dV$$



La masse entrante ou sortante du volume de contrôle à travers la surface de section dA est proportionnelle à la vitesse normale à la surface

$$\delta \dot{m} = \rho V_n dA = \rho V \cos\theta dA = \rho(\vec{V}.\vec{n})dA$$

$$\dot{m}_{net} = \int_{SC} \rho(\vec{V}.\vec{n})dA$$

Débit massique net dans le volume de contrôle

$$\vec{V}.\vec{n} = V\cos\theta \begin{cases} \succ 0 \text{ si } \theta \prec 90^\circ \,(\acute{e}coulement\ sortant) \\ \prec 0 \text{ si } \theta \succ 90^\circ \,(\acute{e}coulement\ entrant) \end{cases}$$

Le principe de conservation de la masse peut donc être généralisé à tous les volumes de contrôles

$$\underbrace{\frac{d}{dt}\int_{VC} \rho dV}_{\text{taux de changement de masse du système}} + \underbrace{\int_{SC} \rho(\vec{V}.\vec{n})dA}_{\text{débit de masse net traversant la frontière}} = 0$$

$$\frac{d}{dt}\int_{VC} \rho dV + \sum_{out}\int_{SC} \rho(\vec{V}.\vec{n})dA - \sum_{in}\int_{SC} \rho(\vec{V}.\vec{n})dA = 0$$

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{VC} = \sum_{in}\dot{m} - \sum_{out}\dot{m}$$

On définit le débit volumique par V

$$\dot{V} = \int_{VC} V_n dA = V.A$$

La relation entre le débit massique est le débit volumique est:

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

Ou v est le volume massique. Cette dernière relation provient de

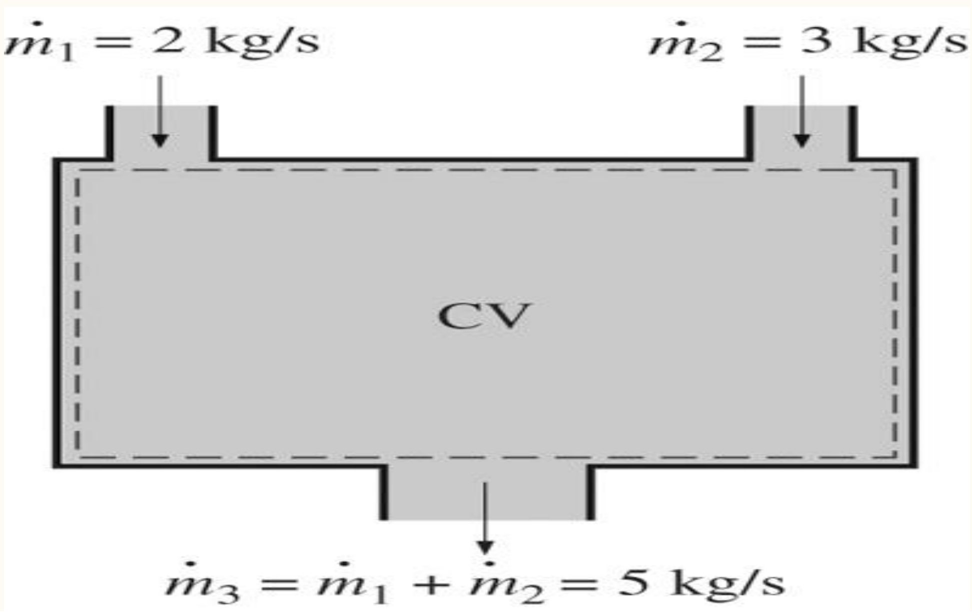
$$m = \rho V = \frac{V}{v}$$

c) Cas particuliers

Écoulement permanent: aucun changement de propriété avec le temps pour n'importe quel point dans l'espace,

$$\cancel{\left(\frac{dm}{dt}\right)_{VC}}^{\,0} = \sum_{in}\dot{m} - \sum_{out}\dot{m}$$

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



ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

certaines machines (tuyères, diffuseurs, turbines..etc) n'ont qu'une seule sortie et une seule entrée:
i.e

Écoulement incompressible en régime permanent:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 \Rightarrow \rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2$$

Pour un système avec une sortie et une entrée:

$$\sum_{in} \dot{v} = \sum_{out} \dot{v}$$

$$V_1 A_1 = V_2 A_2$$

Exemple

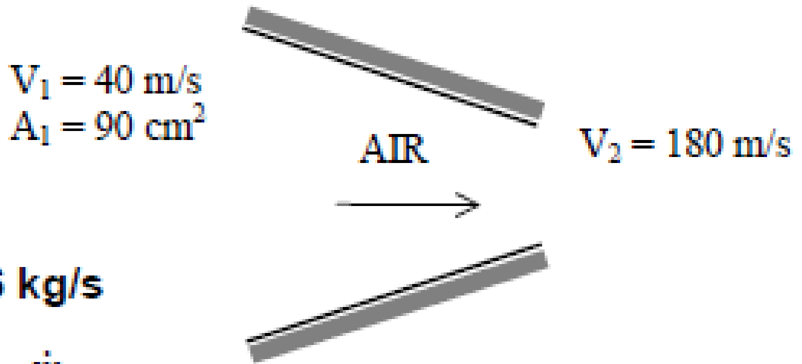
Un écoulement d'air entre dans une tuyère avec une masse volumique de **2.21kg/m³** et une vitesse de **40m/s**, et il en ressort avec une masse volumique de **0.762kg/m³** et à **180 m/s**. si l'aire d'entrée de la tuyère est de **90cm²** , déterminez le débit massique et l'aire de sortie.

Réponse: 0.796kg/s, 58cm²

Solution

Assumptions Flow through the nozzle is steady.

Properties The density of air is given to be 2.21 kg/m^3 at the inlet, and 0.762 kg/m^3 at the exit.



Analysis (a) The mass flow rate of air is determined from the inlet conditions to be

$$\dot{m} = \rho_1 A_1 V_1 = (2.21\,\text{kg/m}^3)(0.009\ \text{m}^2)(40\ \text{m/s}) = \mathbf{0.796\ kg/s}$$

(*b*) There is only one inlet and one exit, and thus $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$.

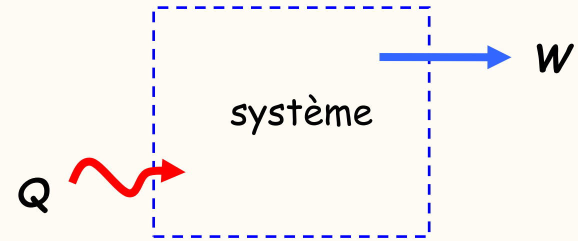
Then the exit area of the nozzle is determined to be

$$\dot{m} = \rho_2 A_2 V_2 \longrightarrow A_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 V_2} = \frac{0.796\ \text{kg/s}}{(0.762\,\text{kg/m}^3)(180\,\text{m/s})} = 0.0058\,\text{m}^2 = \mathbf{58\ cm^2}$$

2) Bilan d'énergie (1er principe de la thermo. pour systèmes ouverts)

a) Forme simplifiée

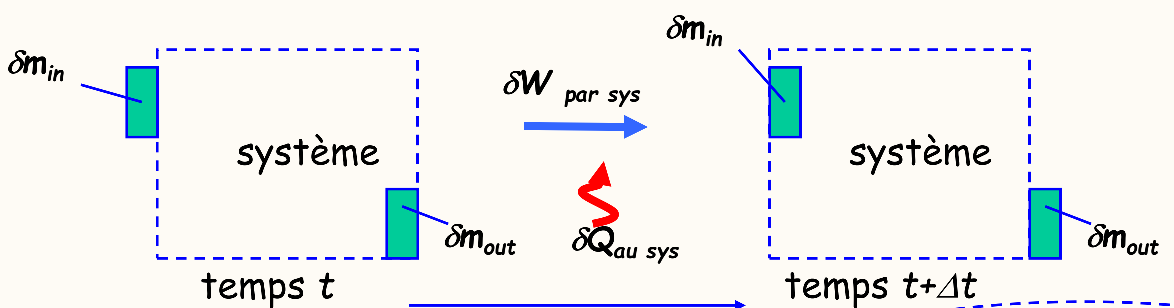
système fermé (révision)



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

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

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})]

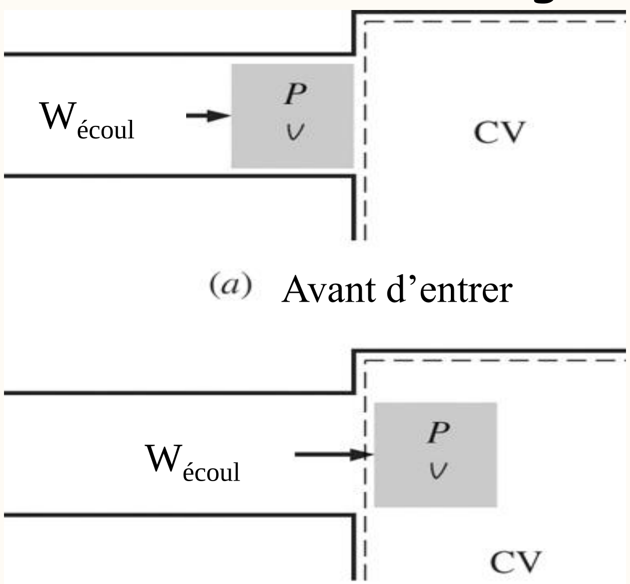
on doit maintenant quantifier ces termes

b) L'énergie totale d'un écoulement

On a déjà vu au chapitre 2 que **l'énergie totale du system** simplement compressible est égale à la somme des Ec, Ep et U

$$e = u + \frac{V^2}{2} + gz$$

Si le system admet ou évacue un écoulement , il doit être animé d'une autre forme d'énergie : **énergie de l'écoulement** P**V**



(a) Avant d'entrer

(b) Après être entré

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

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

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

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

$$\theta = P\boldsymbol{v} + e = P\boldsymbol{v} + (u + \frac{V^2}{2} + gz)$$

$$\theta = h + \frac{V^2}{2} + gz \quad (\text{kJ/kg})$$

$$m\theta = énergie\ totale\ de\ l'écoulement\ d'une\ masse\ m$$

$$\dot{m}\theta = Puissance\ totale\ d'un\ écoulement\ de\ débit\ \dot{m}$$

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

Le bilan d'énergie devient alors:

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

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

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

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

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

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

Forme simplifiée

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

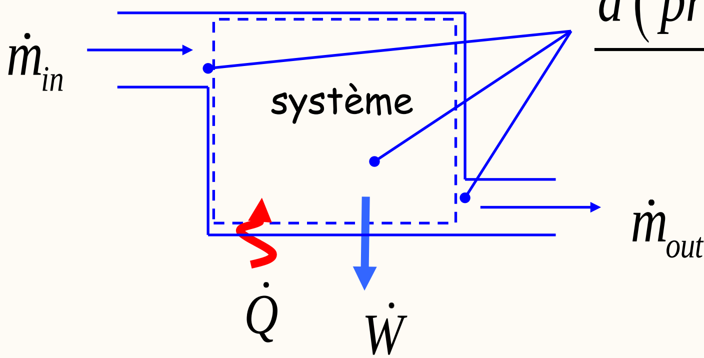
$$\dot{E}_{in} \equiv \dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \sum_{\#entrées} \dot{m}_{in}\theta_{in}$$

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

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

3) Écoulement en régime 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 fluides entrants et sortants et sont donc toutes constantes dans le temps pour une situation d'écoulement permanent, ce qui veut dire que:

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

- Cependant, $\dot{Q}, \dot{W}, \dot{m}_{in}, \dot{m}_{out} \neq 0$ car ce sont des ***interactions*** et pas des propriétés. Mais le fait que les propriétés sont constantes dans l'espace implique en général que ces interactions soient aussi constantes

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

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

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

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

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

ou

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

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

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

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

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:

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

$$\dot{Q}_{\substack{au\\sys}} - \dot{W}_{\substack{par\\sys}} = \dot{m}\left(h_{out} + \frac{V_{out}^2}{2} + gz_{out}\right) - \dot{m}\left(h_{in} + \frac{V_{in}^2}{2} + gz_{in}\right)$$

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

$$q_{\substack{au\\sys}} - w_{\substack{par\\sys}} = \left[\underbrace{(h_{out} - h_{in})}_{\Delta h} + \underbrace{\frac{(V_{out}^2 - V_{in}^2)}{2}}_{\Delta e_c} + \underbrace{g(z_{out} - z_{in})}_{\Delta e_p}\right]$$

notes:

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

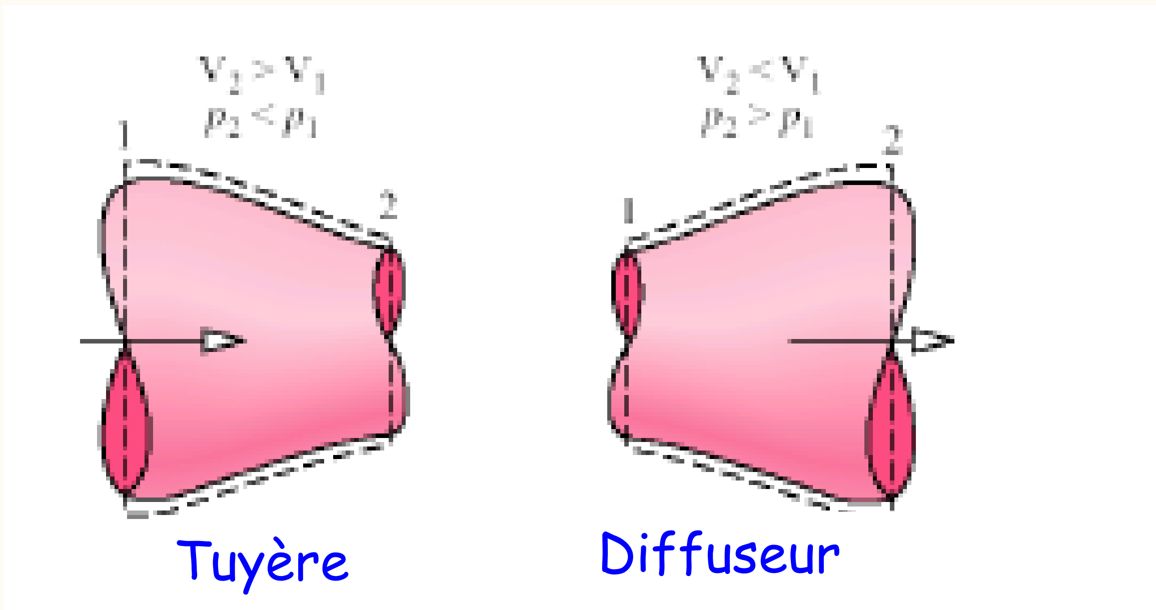
ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

c) APPLICATIONS

- TUYÈRE et DIFFUSEUR
- TURBINE, COMPRESSEUR et POMPE
- ECHANGEUR DE CHALEUR
- ÉTRANGLEUR et VALVE

APPLICATIONS (cont.)

- Tuyère et Diffuseur



TUYÈRE: conduit rétrécissant en vue d'accroître la vitesse d'écoulement d'un fluide.

DIFFUSEUR: conduit évasé en vue d'augmenter la pression d'écoulement d'un fluide.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

APPLICATIONS (cont.)

•Tuyère et Diffuseur

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

- Régime permanent: $(dE/dT)_{VC} = 0$
- Transmission de chaleur négligeable: $\dot{Q}_{VC} = 0$
- Puissance mécanique nulle: $\dot{W}_{VC} = 0$
- Variation énergie potentielle négligeable: $\Delta(gz) = 0$
- Débit massique constant: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$
- (Bilan énergie): $h_1 + \frac{V_1^2}{2} = h_2 + \frac{V_2^2}{2}$

APPLICATIONS (cont.)

- Tuyère et Diffuseur

EXEMPLE 5.5 C&B page 206

De la vapeur d'eau à **400°C** et à **1.6MPa** entre dans une tuyère dont la section est **0.02m²**. le débit massique de la vapeur est **5kg/s**. la vapeur sort de la tuyère à **1.2MPa** avec une vitesse de **275m/s**. la chaleur perdue par la tuyère au profit du milieu extérieur est de **2.7 kJ/kg**.

Déterminer

a) La vitesse de la vapeur à l'entrée

b) La température de la vapeur à la sortie

Solution (en classe)

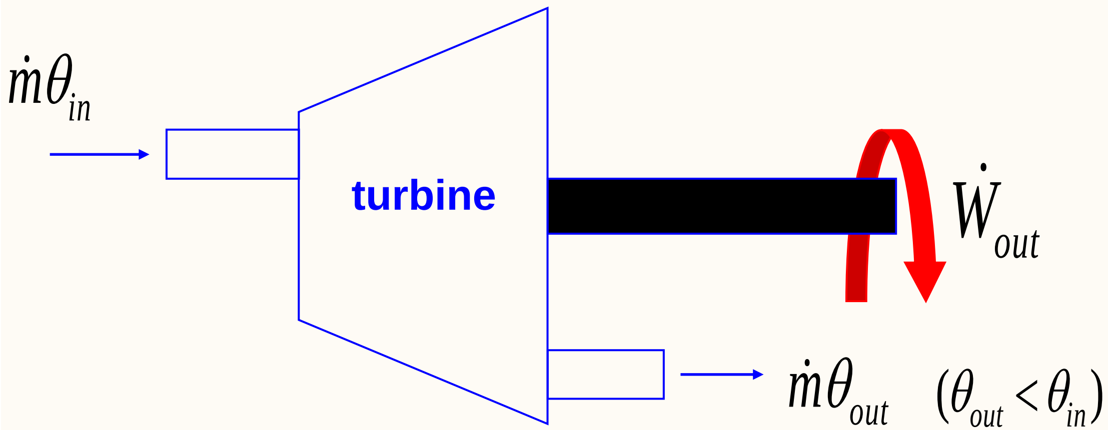
V_1=47.5m/s

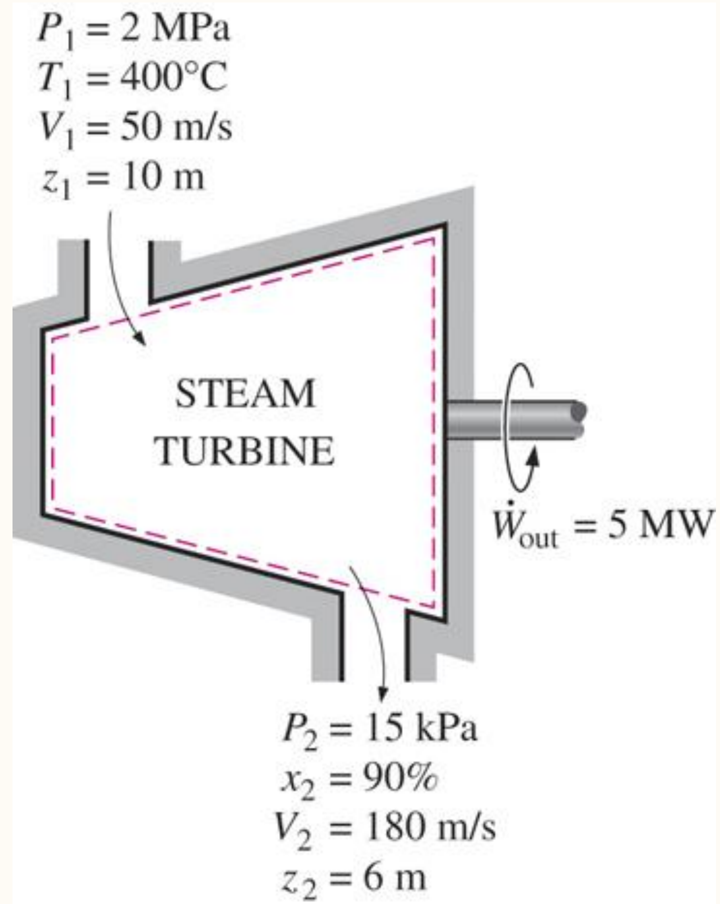
T_2=379 °C

EXEMPLE 5.5 C&B page 206 (Solution en classe)

APPLICATIONS (cont.)

- Turbine





TURBINE: machine produisant du travail à partir de l'écoulement d'un fluide.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

APPLICATIONS (cont.)

- Turbine

Pour les ***turbine***, on peut supposer, ***à moins d'indication contraire***,que:

- Régime permanent: $(dE/dT)_{VC} = 0$

- Transmission de chaleur négligeable: $\dot{Q}_{VC} = 0$

- Variation énergie potentielle négligeable: $\Delta(gz) = 0$

- Débit massique constant: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$

- (Bilan énergie): $$\underbrace{\dot{W}_{VC}}_{\text{puissance produite}} = \dot{m}\left[h_1 - h_2 + \underbrace{\left(\frac{V_1^2}{2} - \frac{V_2^2}{2}\right)}_{\text{négligeable}}\right]$$

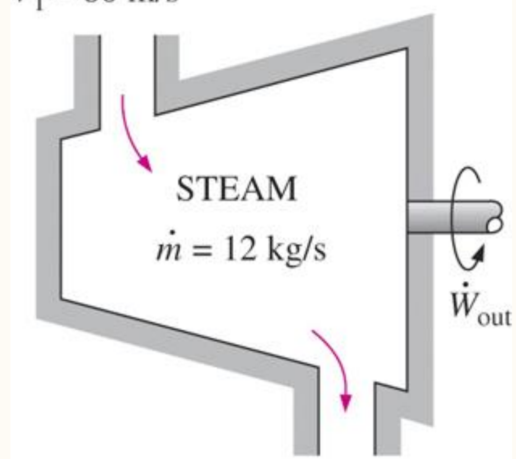
EXEMPLE (turbine à vapeur d'eau) exercise 5.42 C&B page 230

Un écoulement de vapeur d'eau s'écoule dans une turbine adiabatique. Les conditions d'entrée et de sortie sont données sur la figure.

a) Calculer la variation de l'énergie cinétique de l'écoulement par unité de masse (kJ/kg)

b) La puissance produite par la turbine

c) L'aire à l'entrée de la turbine



Solution en classe

h_1=3242.4kJ/kg, h_2=2392.5kJ/kg

a) $\Delta e_c = -1.95 kJ/kg$

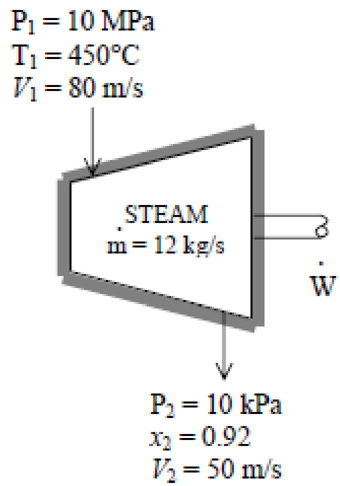
b) $$\underbrace{\dot{W}_{VC}}_{\text{puissance produite}} = \dot{m}\left[h_1 - h_2 + \underbrace{\left(\frac{V_1^2}{2} - \frac{V_2^2}{2}\right)}_{\text{négligeable}}\right] = 10.2 MW$$

c) A_1=0.00447m^2

EXEMPLE (turbine à vapeur d'eau) Solution

Assumptions **1** This is a steady-flow process since there is no change with time. **2** Potential energy changes are negligible. **3** The device is adiabatic and thus heat transfer is negligible.

Properties From the steam tables (Tables A-4 through 6)



$$\left.\begin{array}{l} P_1 = 10 \text{ MPa} \\ T_1 = 450°\text{C} \end{array}\right\} \begin{array}{l} \nu_1 = 0.029782 \text{ m}^3/\text{kg} \\ h_1 = 3242.4 \text{ kJ/kg} \end{array}$$

and

$$\left.\begin{array}{l} P_2 = 10 \text{ kPa} \\ x_2 = 0.92 \end{array}\right\} h_2 = h_f + x_2 h_{fg} = 191.81 + 0.92 \times 2392.1 = 2392.5 \text{ kJ/kg}$$

Analysis (a) The change in kinetic energy is determined from

$$\Delta ke = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} = \frac{(50 \text{ m/s})^2 - (80 \text{ m/s})^2}{2}\left(\frac{1 \text{ kJ/kg}}{1000 \text{ m}^2/\text{s}^2}\right) = -1.95 \text{ kJ/kg}$$

(*b*) There is only one inlet and one exit, and thus $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. We take the turbine as the system, which is a control volume since mass crosses the boundary. The energy balance for this steady-flow system can be expressed in the rate form as

$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\substack{\text{Rate of net energy transfer} \\ \text{by heat, work, and mass}}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{system}^{\nearrow 0 \text{ (steady)}}}_{\substack{\text{Rate of change in internal, kinetic,} \\ \text{potential, etc. energies}}} = 0$$

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

$$\dot{m}(h_1 + V_1^2/2) = \dot{W}_{out} + \dot{m}(h_2 + V_2^2/2) \quad (\text{since } \dot{Q} \cong \Delta pe \cong 0)$$

$$\dot{W}_{out} = -\dot{m}\left(h_2 - h_1 + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2}\right)$$

Then the power output of the turbine is determined by substitution to be

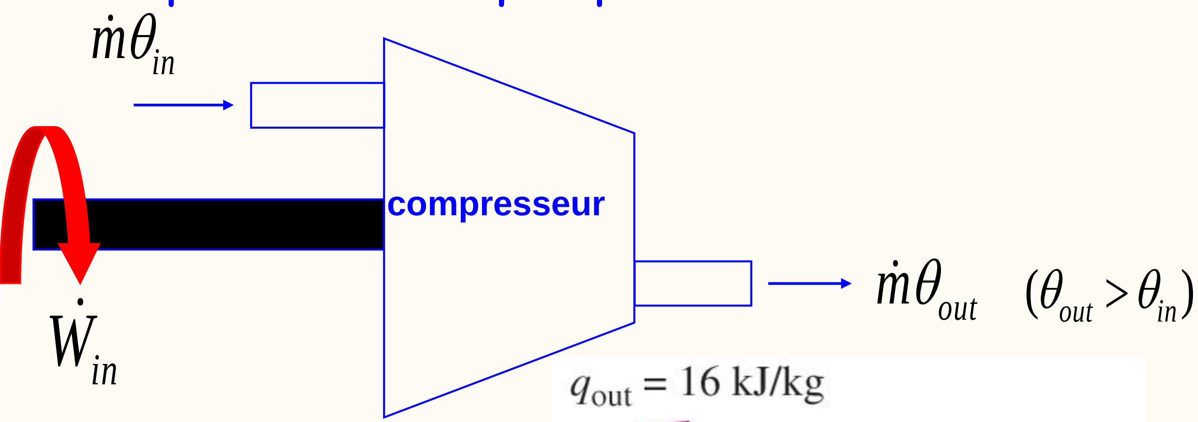
$$\dot{W}_{out} = -(12 \text{ kg/s})(2392.5 - 3242.4 - 1.95)\text{kJ/kg} = \mathbf{10.2 \text{ MW}}$$

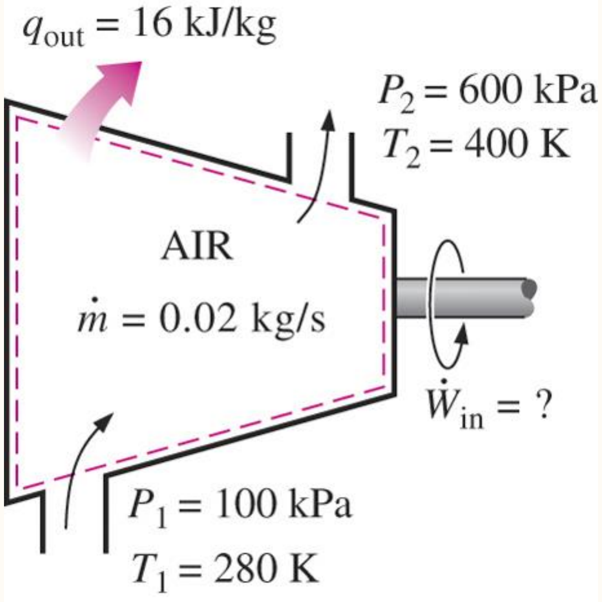
(*c*) The inlet area of the turbine is determined from the mass flow rate relation,

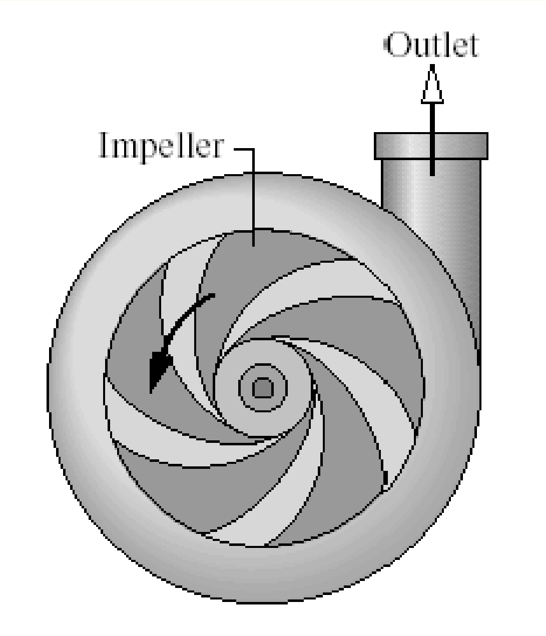
$$\dot{m} = \frac{1}{\nu_1} A_1 V_1 \longrightarrow A_1 = \frac{\dot{m}\nu_1}{V_1} = \frac{(12 \text{ kg/s})(0.029782 \text{ m}^3/\text{kg})}{80 \text{ m/s}} = \mathbf{0.00447 \text{ m}^2}$$

APPLICATIONS (cont.)

- Compresseurs et pompes







Compresseur: absorbe du travail pour augmenter de l'énergie du fluide

APPLICATIONS (cont.)

•Compresseurs et pompes

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

• Régime permanent: $(dE/dT)_{VC} = 0$

• Transmission de chaleur négligeable: $\dot{Q}_{VC} = 0$

•Variation énergie potentielle négligeable: $\Delta(gz) = 0$

• Débit massique constant: $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$

• (Bilan énergie):

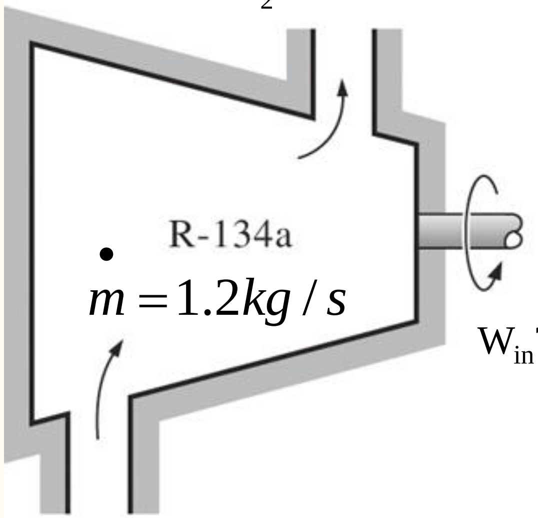
$$\underbrace{\dot{W}_{VC}}_{\text{puissance consommée}} = \dot{m}\left[h_2 - h_1 + \underbrace{\left(\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2}\right)}_{\text{négligeable}} \right]$$

EXEMPLE (compresseur de R134a)

Un réfrigérant R134a à l'état vapeur saturante et comprimé à l'aide d'un compresseur adiabatique. Les conditions d'entrée et de sortie sont données sur la figure. Calculer:

a) La puissance consommée par le compresseur

b) Le débit volumique à l'entrée



Solution en classe

h_1=235.92kJ/kg, h_2=296.81kJ/kg

a) $$\underset{\text{puissance consommée}}{\dot{W}_{VC}} = \dot{m}\left[h_2 - h_1 + \underbrace{\left(\frac{V_2^2}{2} - \frac{V_1^2}{2}\right)}_{\text{négligeable}}\right] = 73.06 kJ/s$$

b) $$\dot{V} = 0.209 m^3/s$$

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

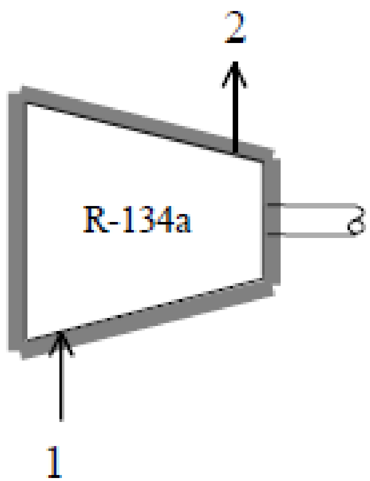
EXEMPLE (compresseur de R134a) Solution

Assumptions **1** This is a steady-flow process since there is no change with time. **2** Kinetic and potential energy changes are negligible. **3** The device is adiabatic and thus heat transfer is negligible.

Properties From the refrigerant tables (Tables A-11 through 13)

$$\left.\begin{array}{l} T_1 = -24°\text{C} \\ sat.vapor \end{array}\right\} \begin{array}{l} \upsilon_1 = 0.17395 \text{ m}^3/\text{kg} \\ h_1 = 235.92 \text{ kJ/kg} \end{array} \qquad \left.\begin{array}{l} P_2 = 0.8 \text{ MPa} \\ T_2 = 60°\text{C} \end{array}\right\} h_2 = 296.81 \text{ kJ/kg}$$

Analysis (*a*) There is only one inlet and one exit, and thus $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. We take the compressor as the system, which is a control volume since mass crosses the boundary. The energy balance for this steady-flow system can be expressed in the rate form as



$$\underbrace{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out}}_{\text{Rate of net energy transfer by heat, work, and mass}} = \underbrace{\Delta \dot{E}_{system}^{\nearrow 0 \text{ (steady)}}}_{\text{Rate of change in internal, kinetic, potential, etc. energies}} = 0$$

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

$$\dot{W}_{in} + \dot{m}h_1 = \dot{m}h_2 \qquad (\text{since } \dot{Q} \cong \Delta ke \cong \Delta pe \cong 0)$$

$$\dot{W}_{in} = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

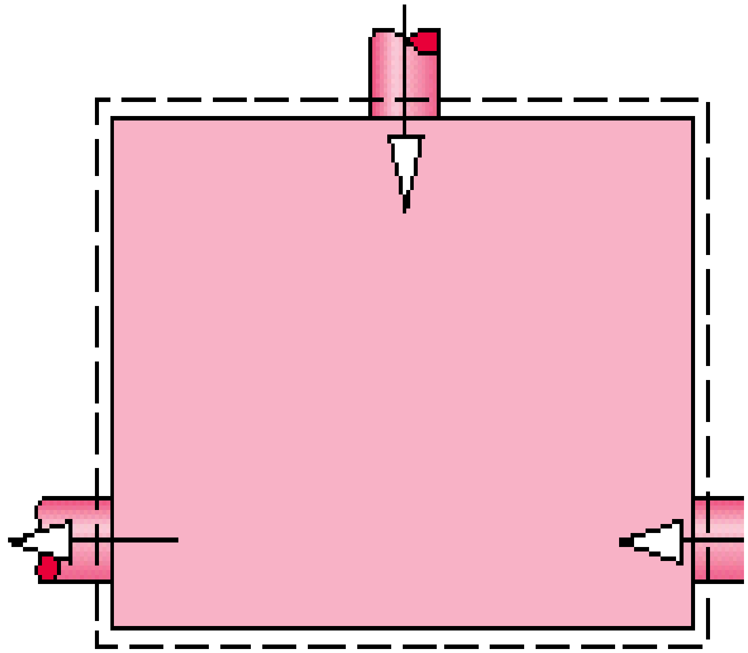
Substituting, $\dot{W}_{in} = (1.2 \text{ kg/s})(296.81 - 235.92) \text{kJ/kg} = \mathbf{73.06 \text{ kJ/s}}$

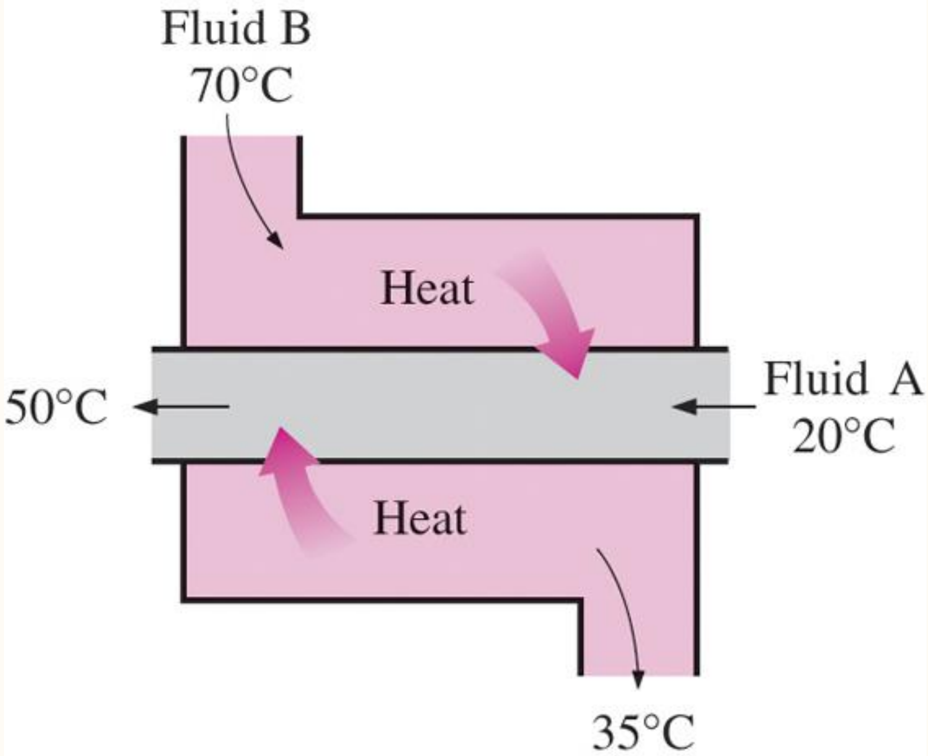
(*b*) The volume flow rate of the refrigerant at the compressor inlet is

$$\dot{V}_1 = \dot{m}\upsilon_1 = (1.2 \text{ kg/s})(0.17395 \text{ m}^3/\text{kg}) = \mathbf{0.209 \text{ m}^3/\text{s}}$$

APPLICATIONS (cont.)

•Échangeur de chaleur (Chambres de mélanges)





dispositif pour transmettre de la chaleur entre deux fluides. Donc, en régime permanent, le débit massique est constant pour chaque écoulement.

APPLICATIONS (cont.)

•Échangeur de chaleur (Chambres de mélanges)

Pour les ***chambres de mélanges***, on peut supposer, ***à moins d'indication contraire, que***:

• Régime permanent: $(dE/dT)_{VC} = 0$

•Puissance mécanique nulle: $\dot{W}_{VC} = 0$

•Variation énergie potentielle et cinétique négligeable devant énergie thermique: $\Delta(V^2/2) = \Delta(gz) = 0$

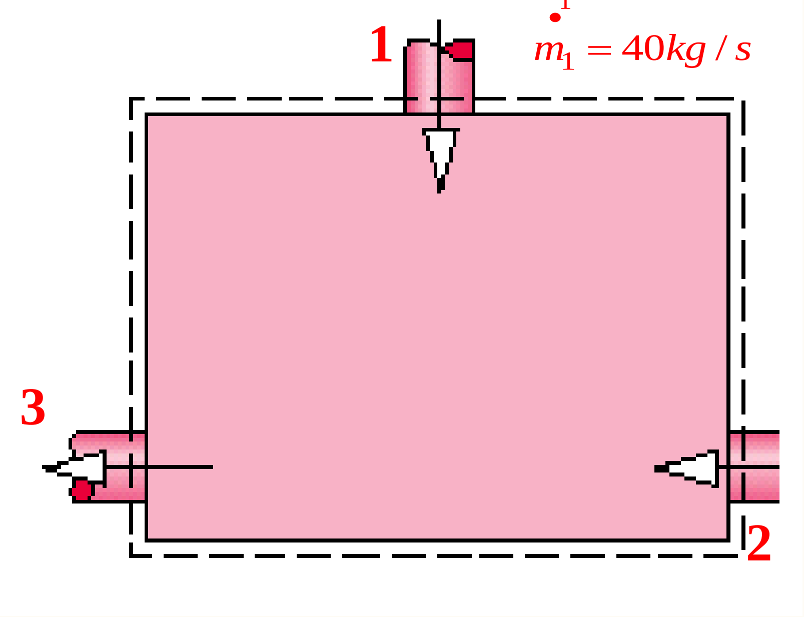
•(Bilan de masse): $\sum_{in} \dot{m} - \sum_{out} \dot{m} = 0$

• (Bilan énergie): $\dot{Q}_{VC} + \sum_{in} \dot{m}\, h - \sum_{out} \dot{m}\, h = 0$

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

Exemple (débits entrants et sortant d'un mélangeur)

H_2o Vapeur
P_1=700kPa
T_1=200°C
$\dot{m}_1 = 40kg/s$



H_2o Liquide saturé
P_3=700kPa
x_3=0
$\dot{V}_3 = 0.06m^3/s$

H_2o Liquide
P_2=700kPa
T_1=40°C
A_2=25cm²

Calculer le débit massique en 2 $\dot{m}_2 = ?$

a) Calculer la vitesse en 2 V_2=?m/s

Solution en classe

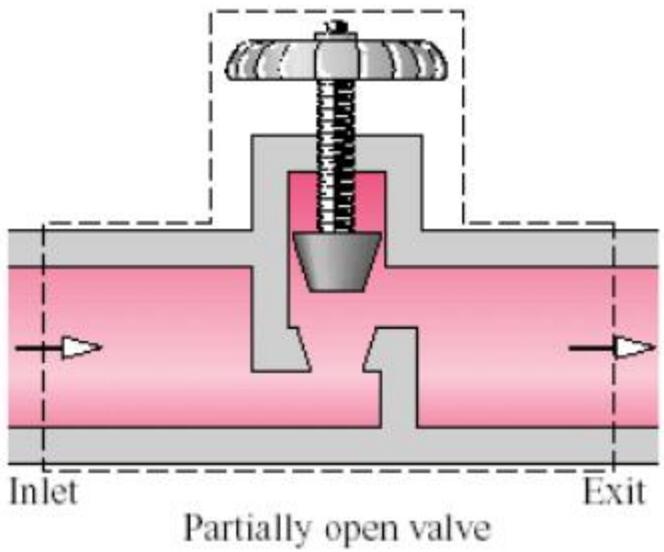
$\dot{m}_2 = 14.15kg/s$

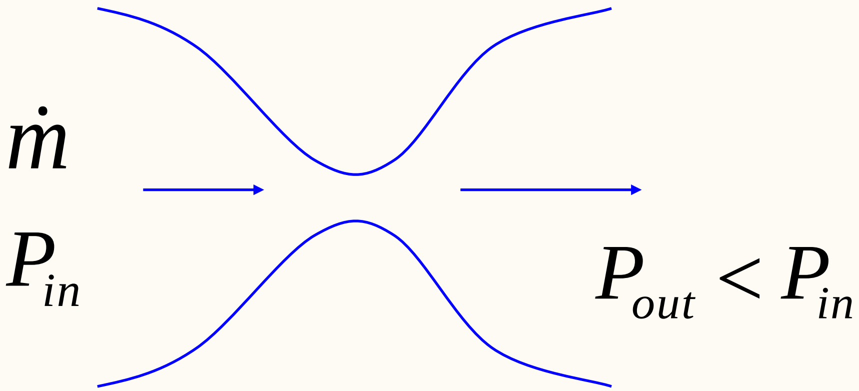
V_2=5.71m/s

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

APPLICATIONS (cont.)

•Étrangleurs et valves





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

•La température du fluide peut toutefois chuter de façon significative (utilisation en réfrigération et climatisation)

APPLICATIONS (cont.)

•Étrangleurs et valves

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

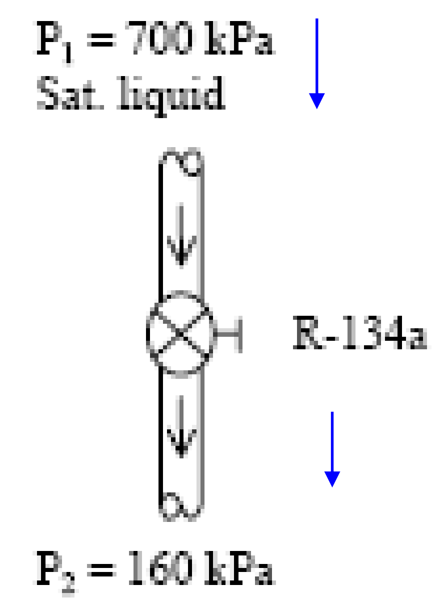
- Régime permanent: $(dE/dT)_{VC} = 0$
- Transmission de chaleur néligeable $\dot{Q}_{VC} = 0$
- Puissance mécanique nulle: $\dot{W}_{VC} = 0$
- Variation énergie potentielle et cinétique négligeable: $\Delta(V^2/2) = \Delta(gz) = 0$
- (Bilan de masse): $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$
- (Bilan énergie): $h_1 = h_2$ (détente isenthalpique)

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

EXEMPLE

Un écoulement de réfrigérant R-134a sous forme liquide saturé pénètre dans une soupape d'étranglement adiabatique à **P_1=700kPa**, et il en ressort à **P_2=160ka**.

a)Calculer la chute de température et le volume spécifique après l'étranglement.



Solution en classe

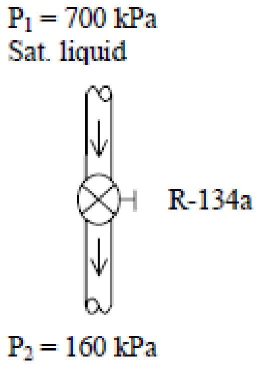
a)h_2=88.82kJ/kg, ΔT=-15.6-26.69=-42.3°C, v_2=0.0344m^3/kg

EXEMPLE C&B 5.66 (Solution)

Assumptions **1** This is a steady-flow process since there is no change with time. **2** Kinetic and potential energy changes are negligible. **3** Heat transfer to or from the fluid is negligible. **4** There are no work interactions involved.

Properties The inlet enthalpy of R-134a is, from the refrigerant tables (Tables A-11 through 13),

$$\left.\begin{array}{l} P_1 = 0.7 \text{ MPa} \\ \text{sat. liquid} \end{array}\right\} \begin{array}{l} T_1 = T_{sat} = 26.69^\circ\text{C} \\ h_1 = h_f = 88.82 \text{ kJ/kg} \end{array}$$



Analysis There is only one inlet and one exit, and thus $\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}$. We take the throttling valve as the system, which is a control volume since mass crosses the boundary. The energy balance for this steady-flow system can be expressed in the rate form as

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \Delta\dot{E}_{system}^{\nearrow 0 \text{ (steady)}} = 0 \;\rightarrow\; \dot{E}_{in} = \dot{E}_{out} \;\rightarrow\; \dot{m}h_1 = \dot{m}h_2 \rightarrow\; h_1 = h_2$$

since $\dot{Q} \cong \dot{W} = \Delta ke \cong \Delta pe \cong 0$. Then,

$$\left.\begin{array}{l} P_2 = 160 \text{ kPa} \\ (h_2 = h_1) \end{array}\right\} \begin{array}{l} h_f = 31.21 \text{ kJ/kg}, \quad T_{sat} = -15.60^\circ\text{C} \\ h_g = 241.11 \text{ kJ/kg} \end{array}$$

Obviously $h_f < h_2 < h_g$, thus the refrigerant exists as a saturated mixture at the exit state and thus $T_2 = T_{sat} = -15.60^\circ\text{C}$. Then the temperature drop becomes

$$\Delta T = T_2 - T_1 = -15.60 - 26.69 = \mathbf{-42.3^\circ C}$$

The quality at this state is determined from

$$x_2 = \frac{h_2 - h_f}{h_{fg}} = \frac{88.82 - 31.21}{209.90} = 0.2745$$

Thus,

$$v_2 = v_f + x_2 v_{fg} = 0.0007437 + 0.2745 \times (0.12348 - 0.0007437) = \mathbf{0.0344\ m^3/kg}$$

EXEMPLE: C&B 5.86 page 235

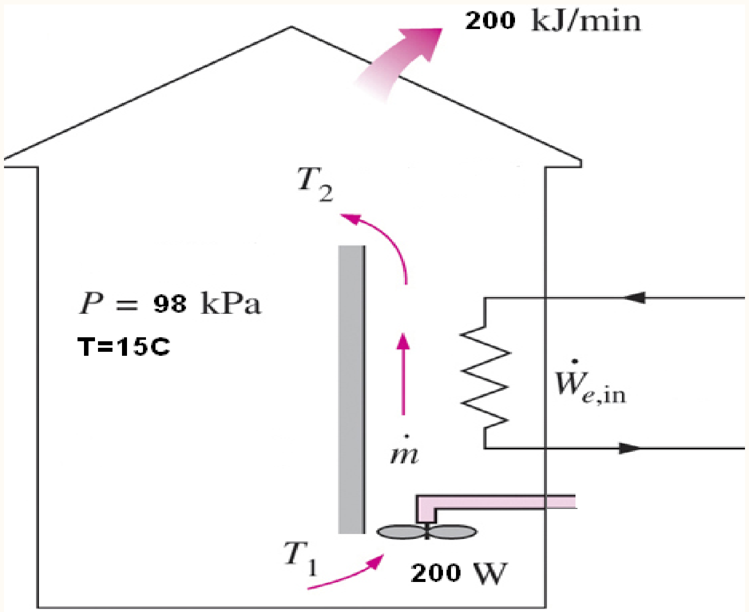
ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

Une chambre de **5mX6mX8** est chauffée par un élément électrique placé dans un conduit qui se trouve dans la pièce. Au départ, la pièce se trouve à **15 °C** et pression atmosphérique à **P=98kPa**. La pièce elle perd de la chaleur au profit du milieux extérieur au taux de **200kJ/min**. un ventilateur de **200W** fait circuler l'aire dans le conduit adiabatique avec un débit de **50kg/min**. Si la température de la pièce atteint **25 °C** après **15 min** , déterminer

a)La puissance de l'élément électrique

b)L'augmentation de la température de l'air chaque fois qu'il passe dans le conduit.

Prendre pour l'air **R=0.287kJ/kg.K** et **Cv=0.718kJ/kg.K**

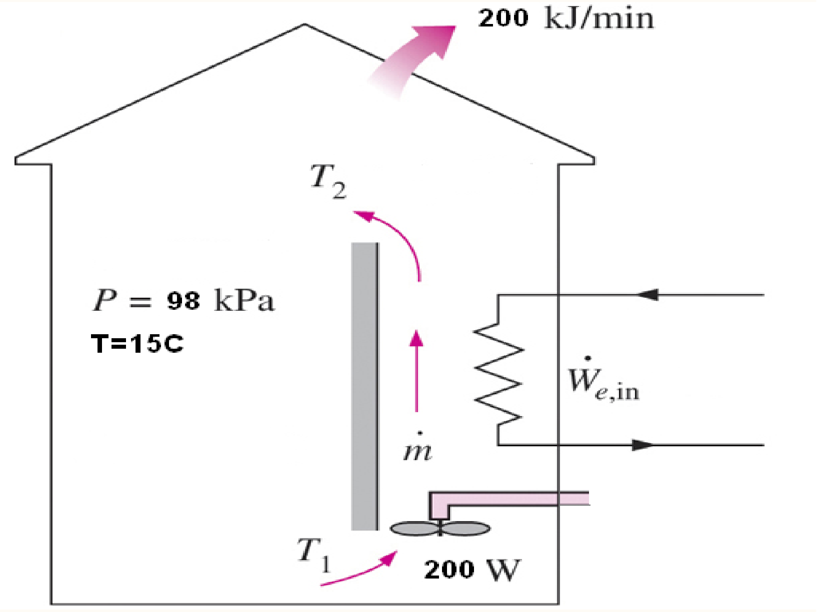


Solution en classe

a) $W_{el,in}$=5.4kW

b) $\Delta T=(T_2-T_1)= 6.7\ ^\circ C$

ÉCOLE POLYTECHNIQUE MONTRÉAL



LECTURE SECTION DU LIVRE

Sections 5.1 à 5.4 du livre, «THERMODYNAMIQUE, une approche pragmatique», Y.A. Çengel, M.A. Boles et M. Lacroix, Chenelière-McGraw-Hill, 2ed 2014.