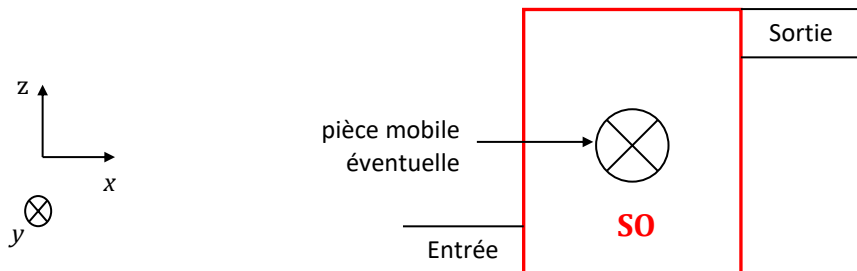


## Bilan d'énergie et de masse sur un fluide en écoulement dans un système ouvert

### 1 – Présentation générale d'un système ouvert.

**Doc 1 – Schéma général d'un système ouvert**



- Fluide en écoulement au sein d'un système ouvert (entrée et/ou de sortie de fluide).
- Système ouvert délimité par une surface fictive appelée « surface de contrôle ».
- Au cours de la traversée du système ouvert, le fluide peut échanger de l'énergie :
  - Par voie thermique :  $Q$
  - Par voie mécanique :  $W = W_{\text{pression}} + W_{\text{utile}}$  (travail utile lié à présence de pièces mobiles)

### 2 – Bilan de masse

#### 2.1. Notion de débit (ou flux) massique

- Définir un débit massique. Dans quelle unité s'exprime-t-il dans le système international ?
- Par une description locale en écoulement unidirectionnel et unidimensionnel, montrer que  $D_m = \rho Sv$ .

#### 2.2. Notion de débit (ou flux) volumique

- Définir un débit volumique. Dans quelle unité s'exprime-t-il dans le système international ?
- Par une description locale en écoulement unidirectionnel et unidimensionnel, montrer que  $D_v = Sv$ .

#### 2.3. Bilan de masse

- Réaliser un bilan de masse sur le système ouvert en tenant compte de l'entrée et sortie de fluide.

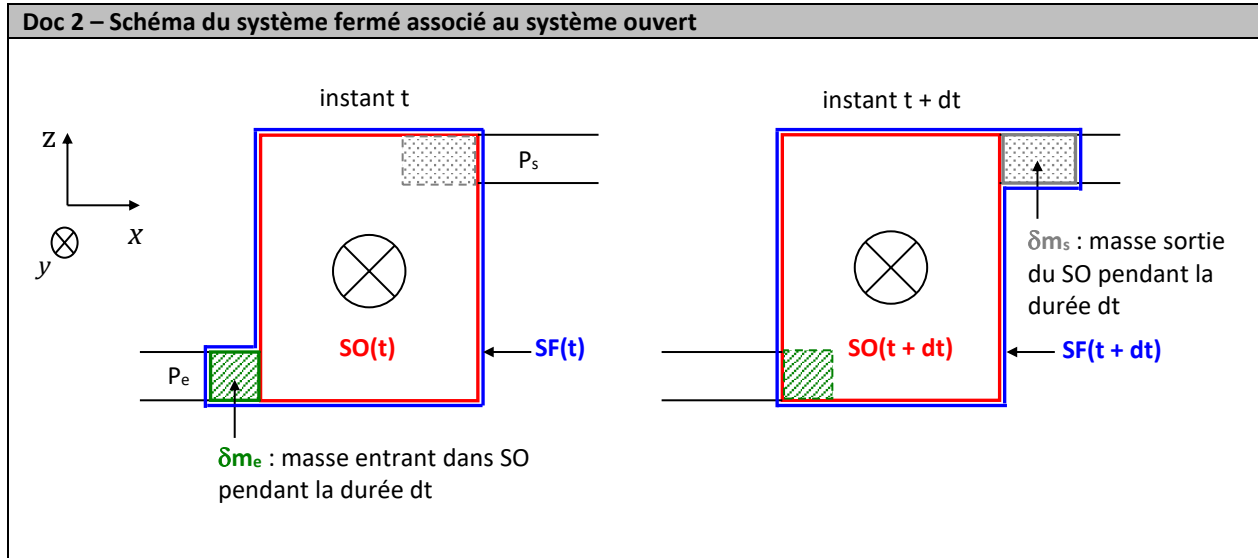
$$\frac{dm_{SO}}{dt} = D_{me} - D_{ms}$$

- Montrer qu'en régime stationnaire, le débit massique se conserve.
- A quelles conditions peut-on affirmer que le débit volumique se conserve ?

## 3 – Bilan d'énergie totale

### 3.1. Définition d'un système fermé fictif

- Pourquoi faut-il introduire un système fermé fictif pour réaliser un bilan d'énergie totale sur le système ouvert ?
- Définir le système fermé SF associé au système ouvert SO.



### 3.2. Travail des forces pressantes

- Exprimer le travail des forces pressantes exercées sur le fluide situé à l'entrée du SO. Est-il moteur ou résistant ?
- Exprimer le travail des forces pressantes exercées sur le fluide situé à la sortie du SO. Est-il moteur ou résistant ?
- Montrer que le travail résultant s'exprime en fonction des volumes massiques du fluide à l'entrée ( $v_e$ ) et à la sortie ( $v_s$ ) sous la forme :

$$\delta W_p = \delta m (P_e v_e - P_s v_s)$$

### 3.3. Bilan d'énergie totale

- Rappeler l'expression du premier principe (faisant intervenir l'énergie totale) pour un système fermé.
- L'appliquer au système fermé fictif SF.
- En déduire, que si l'axe des z est orienté vers le haut :

$$dE_{totSO} = -\Delta \left( \delta m \left( h + \frac{1}{2} c^2 + gz \right) \right) + \delta W_u + \delta Q$$

### 3.4. Premier principe industriel

- Montrer qu'avec les hypothèses suivantes (régime stationnaire et axe des z orienté vers le haut), le premier principe devient pour un système ouvert :

$$\Delta \left( \delta m \left( h + \frac{1}{2} c^2 + gz \right) \right) = \delta W_u + \delta Q$$

- En déduire la formulation massique et la formulation en puissance du premier principe industriel :

$$\Delta \left( h + \frac{1}{2} c^2 + gz \right) = w_u + q$$

$$D_m \cdot \Delta \left( h + \frac{1}{2} c^2 + gz \right) = \mathcal{P}_u + \mathcal{P}_{th}$$

## 4 – Applications sans changement d'état

### 4.1. Détente de Joule-Thomson

Montrer que si un gaz parfait conserve une température constante lors de la traversée d'un milieu poreux ou d'un étranglement situé dans une canalisation horizontale calorifugée. On supposera la variation de vitesse négligeable.

### 4.2. Turbine à air

Une turbine à air (considéré comme un GP de coefficient  $\gamma = 1,4$  et de masse molaire  $M = 29 \text{ g.mol}^{-1}$ ) est supposée entièrement calorifugée. Le gaz y subit une détente que l'on peut considérer réversible et possède un débit  $D_m = 100 \text{ kg.s}^{-1}$ . La turbine fonctionne avec, à l'entrée, une pression  $P_e = 200 \text{ bar}$  et une température  $T_e = 350 \text{ °C}$ , et à la sortie, une pression  $P_s = 19 \text{ bar}$ .

- Calculer la température de sortie  $T_s$ .
- Calculer la puissance fournie par l'arbre de la turbine (à un alternateur par exemple).

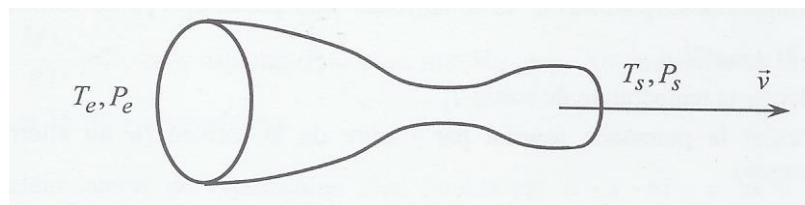


### 4.3. Chauffage d'un liquide lors du passage dans une canalisation

Un liquide de capacité thermique massique à pression constante  $c = 4 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$  supposée constante, initialement à la température  $T_e = 15 \text{ °C}$ , s'échauffe en s'écoulant en régime permanent avec un débit massique  $D_m = 2 \text{ kg.s}^{-1}$  dans un thermostat échangeur de chaleur isobare idéal, entièrement à la température  $T_s = 60 \text{ °C}$  qui est aussi la température de sortie du fluide.

- Quelle est la puissance thermique reçue par fluide ?
- Le système fonctionne pendant 1 h. Calculer la variation d'entropie massique du liquide entre l'entrée et la sortie, ainsi que l'entropie créée pendant cette durée.

### 4.4 Etude d'une tuyère



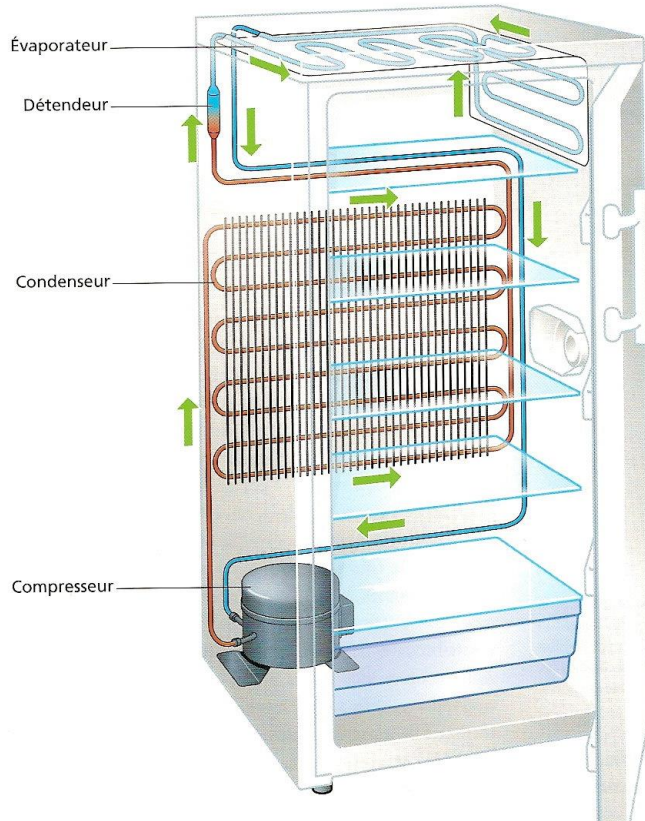
Une tuyère horizontale calorifugée éjecte, en régime stationnaire d'écoulement, des gaz à vitesse élevée  $c$ , ceux-ci entrant à une vitesse négligeable. Les notations sont précisées sur le schéma.

Données :

$$\begin{aligned} T_e &= 1600 \text{ K} ; P_e = 52 \text{ bar}, \\ T_s &= 550 \text{ K}, P_s = 1 \text{ bar}, \\ c_p &= 1,0 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1} \\ r &= R/M = 290 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}. \end{aligned}$$

- En précisant les hypothèses, calculer la vitesse  $v$  d'éjection des gaz.
- La détente est-elle réversible ?

## 5 – Application avec changement d'état : le réfrigérateur



L'agent de la transformation est le Fréon, il subit :

- ✓ Une détente de Joule-Thomson  $A \rightarrow B$  dans le détendeur ;
- ✓ Une vaporisation partielle à température et pression constantes  $B \rightarrow C$  dans l'évaporateur. Il reçoit alors un transfert thermique massique de la source froide  $q_2$  dont la température est  $T_2 = 268 \text{ K}$  ;
- ✓ Une compression adiabatique  $C \rightarrow D$  dans le compresseur ;
- ✓ Une liquéfaction totale  $D \rightarrow A$  dans le condenseur. Il fournit alors un transfert thermique massique à la source chaude  $q_1$  dont la température est  $T_1 = 298 \text{ K}$ .

Les données relatives aux états  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  du fluide sont regroupées dans le tableau suivant,  $x$  désignant le titre massique en vapeur :

	$A$	$B$	$C$	$D$
$p \text{ (bar)}$	7,5	2,2	2,2	7,5
$T \text{ (K)}$	303	263	263	303
$x$	0	0,24	0,98	1

On donne de plus les enthalpies massiques de vaporisation :  $\ell_v(263 \text{ K}) = 159 \text{ kJ.kg}^{-1}$  et  $\ell_v(303 \text{ K}) = 139 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .

- a) Représenter le cycle dans le diagramme de Clapeyron, on y fera figurer la courbe de saturation du Fréon.
- b) Etude de  $A \rightarrow B$  : Calculer la variation d'enthalpie massique  $h_B - h_A$  et la variation d'entropie massique  $s_B - s_A$ . On introduira le point  $B'$  ( $P_{B'} = 2,2 \text{ bar}$ ,  $T_{B'} = 263 \text{ K}$ ,  $x_{B'} = 0$ ) et la capacité thermique massique du Fréon liquide  $c$ , supposée indépendante de la température. Montrer que les données permettent de calculer  $c$ .  
A.N : calculer  $c$  et  $s_B - s_A$  ainsi que l'entropie produite.
- c) Etude de  $B \rightarrow C$  : Calculer le transfert thermique massique  $q_2$  avec la source froide, la variation d'entropie massique  $s_C - s_B$ , l'entropie échangée et l'entropie produite.

- d) Etude de  $C \rightarrow D$  : Calculer le travail utile massique  $w'$  reçu par le Fréon. Calculer la variation d'entropie massique  $s_D - s_C$  et l'entropie produite.
- e) Etude de  $D \rightarrow A$  : Calculer le transfert thermique massique  $q_1$  avec la source chaude, la variation d'entropie massique  $s_A - s_D$  et l'entropie produite.
- f) Effectuer le bilan entropique sur le cycle : vérifier que  $\Delta s = 0$  et calculer l'entropie produite sur le cycle.
- g) Effectuer le bilan enthalpique sur le cycle : vérifier que  $\Delta h = 0$ .
- h) Calculer l'efficacité du réfrigérateur  $\eta$  et la comparer à la valeur du cycle de Carnot réversible. Conclure.