

PT PHYSIQUE

THERMO 6

**Thermodynamique
industrielle**



courtesy of Diego Delso, delso.photo, License CC-BY-SA

OBJECTIFS DU CHAPITRE

- À la fin de ce chapitre, vous devez être capable de :
 - établir les *premier et second principes de la thermodynamique en systèmes ouverts* ;
 - *simplifier et exploiter le premier principe de la thermodynamique en systèmes ouverts pour les dispositifs élémentaires suivants* :
 - *compresseurs et turbines* ;
 - *mélangeurs et séparateurs* ;
 - *échangeurs thermiques* ;
 - *détendeur* ;
 - *tuyère calorifugée*.
 - *étudier des cycles industriels complets à partir de données tabulées ou de diagrammes fournis, notamment dans le but de déterminer un COP*.

$$n]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \quad \text{Cu}^{+2} + \text{Zn}^{+2} \rightleftharpoons \text{Cu}^{+2} + \text{Zn}^{+2} \quad \text{rot } E =$$

$$p \in \mathbb{R} \quad H(j\omega) = d \frac{\sum_k b_k z^{-k}}{\sum_j a_j z^{-j}} \quad \exp\left(\frac{1}{\epsilon_0} \int \vec{E} \cdot d\vec{S}\right) = \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}}}$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} \quad H_{\text{ALI}} = \frac{d}{dt} \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}}}$$

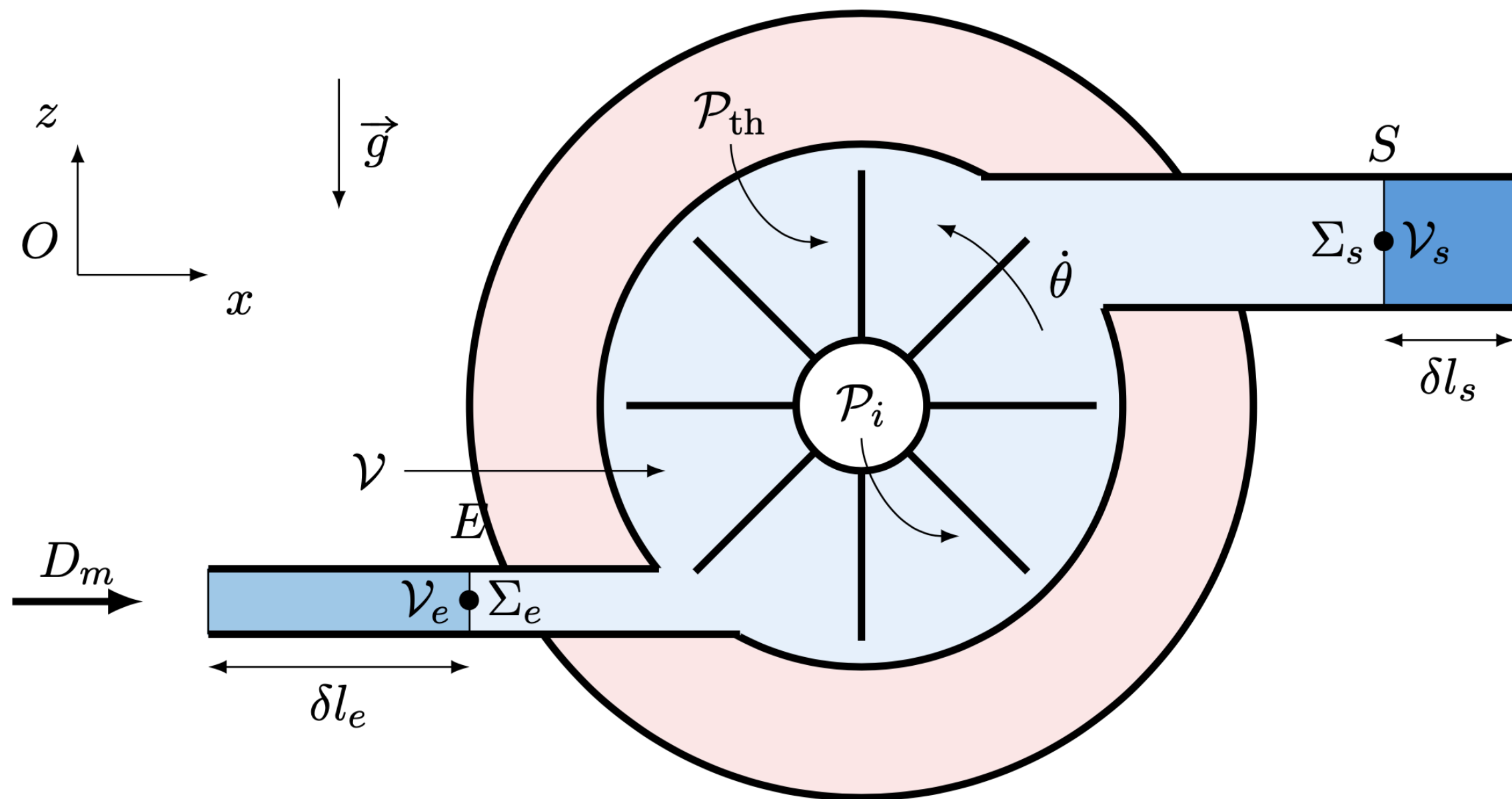
$$\text{div } \vec{A} = 0 \quad \nabla \cdot \vec{E} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \right) = 0 \quad 430.7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \quad \Delta_r H^\circ = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^\circ$$

$$\frac{1}{T} \left(\frac{\partial S}{\partial M} \right)_{T, P} = \frac{1}{T} \left(\frac{\partial S}{\partial P} \right)_{T, M} \quad \Delta_r G = \Delta_r G^\circ + RT \ln Q$$

$$\frac{\partial}{\partial \xi} \sqrt{\frac{\mu_0 \gamma \omega}{P, T}} \left| \frac{1}{2} v^2 + gz + \right.$$

$$+ (|\eta_{\text{Ox}}(i)| + |\eta_{\text{Red}}(i)|) \mathcal{F} V_i$$

DU SYSTÈME OUVERT AU SYSTÈME FERMÉ



Représentation schématique d'un système ouvert

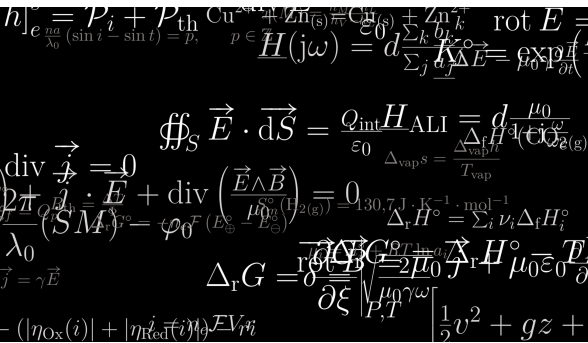
PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE DES SYSTÈMES OUVERTS

Premier principe de la thermodynamique en système ouvert

En régime permanent, un système thermodynamique ouvert obéit au premier principe de la thermodynamique en système ouvert :

$$\begin{aligned} D_m [e_c + e_p + h]_E^S &= \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{th} \\ [e_c + e_p + h]_E^S &= w_i + q_{th} \end{aligned}$$

où D_m est le débit massique en $[\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}]$; $e_c = \frac{1}{2}v^2$ est l'énergie cinétique massique, $e_p = gz$ l'énergie potentielle massique, h l'enthalpie massique, exprimées en $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$; et \mathcal{P}_i (resp. w_i) est la puissance indiquée (resp. le travail indiqué massique), \mathcal{P}_{th} (resp. q_{th}) la puissance thermique (resp. l'énergie thermique massique) exprimées en $[\text{W}]$ (resp. en $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$).



SECOND PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE DES SYSTEMES OUVERTS

Second principe de la thermodynamique en système ouvert

En régime permanent, un système thermodynamique ouvert obéit au second principe de la thermodynamique en système ouvert :

$$[s]_E^S = \delta s_e + \delta s_c$$

où s est l'entropie massique, $\delta s_e = \frac{q_{th}}{T_{th}}$ l'entropie échangée massique avec le thermostat à température T_{th} , et $\delta s_c > 0$ est l'entropie créée massique en $[J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}]$.

EXERCICE D'APPLICATION I

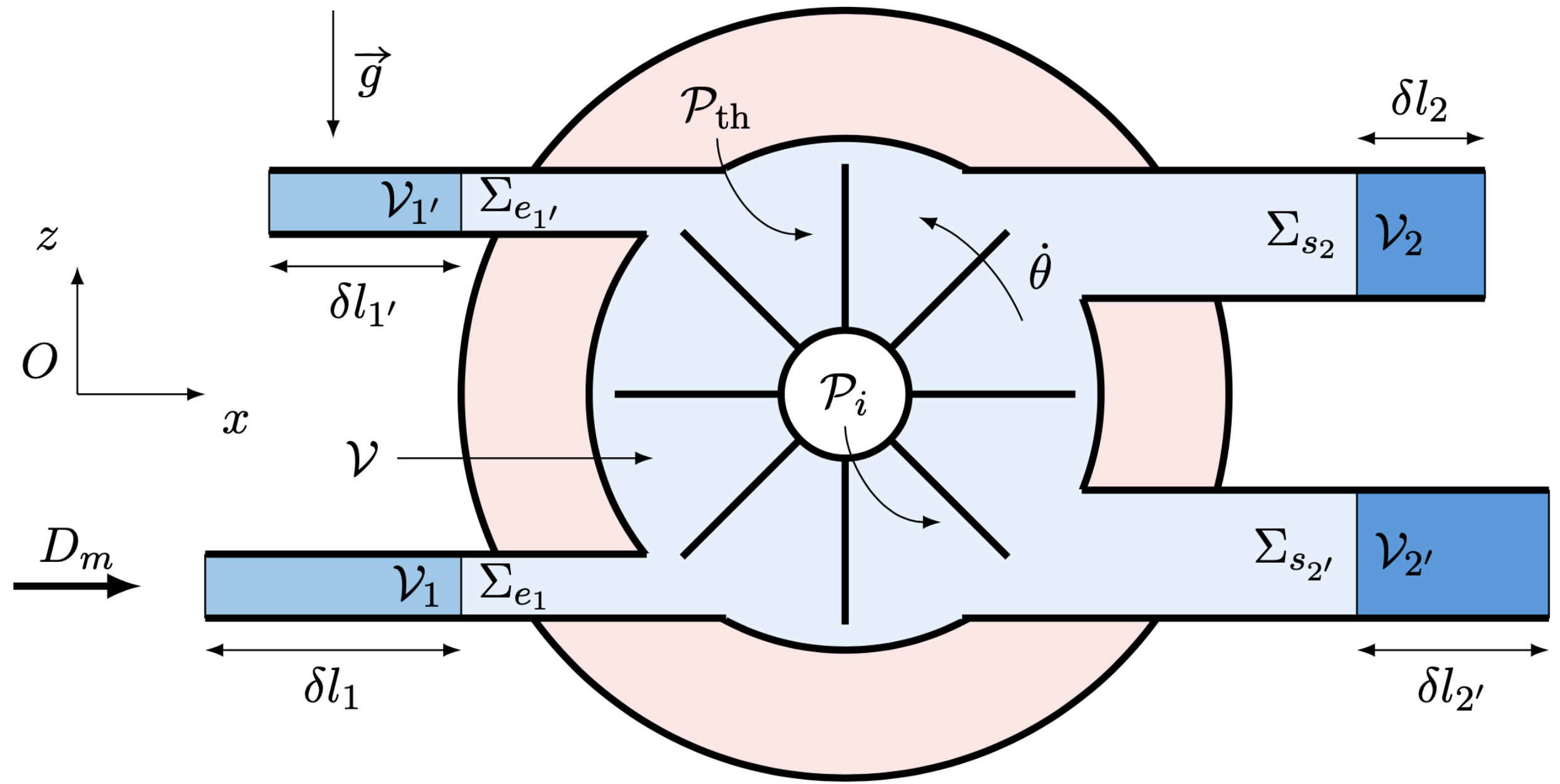
On considère un tuyau cylindrique de rayon R , horizontal, de longueur $L \gg R$ parcouru par un fluide caloporteur entrant à la température T_e . Ce tuyau n'étant pas calorifugé, il échange une puissance thermique avec le milieu extérieur et on considère que sa température $T = T(x)$ (les échanges conductifs radiaux sont négligés). La puissance échangée avec le milieu extérieur vérifie la loi de Newton $\delta\mathcal{P} = h dS (T_{\text{ext}} - T)$ où dS est la surface latérale d'un élément mésoscopique.

Le système est étudié en régime permanent, la conduction axiale est négligée.

1. Quelle(s) puissance(s) thermique(s) doit-on prendre en compte dans ce problème ?
2. Quelle est le système le plus adapté à l'étude de ce problème ?
3. En déduire l'équation différentielle vérifiée par la température $T(x)$, puis la température de sortie T_s .

$$\begin{aligned}
 n]_e^{\text{na}} &= \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \quad \text{Cu}^{\text{a}+\text{a}} + \text{Zn}^{\text{a}+\text{a}} \rightleftharpoons \text{Cu}^{\text{a}+\text{a}} + \text{Zn}^{\text{a}+\text{a}} \quad \text{rot } E = \\
 H(\text{j}\omega) &= d_{\Sigma_j}^{\text{a}+\text{a}} \exp\left(\frac{\text{a}+\text{a}}{\text{a}+\text{a}}\right) \\
 \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} \quad H_{\text{ALI}} = \frac{d_{\text{ALI}}}{\Delta_{\text{ALI}}} \quad \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{ALI}}} \quad \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{ALI}}} \\
 \text{div } \vec{A} &= 0 \quad \text{div } \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \right) = 0 \quad \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{ALI}}} \quad \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{ALI}}} \\
 \Delta_r G &= \Delta_r G^{\circ} + RT \ln Q \quad \Delta_r G^{\circ} = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ} \quad \Delta_r G^{\circ} = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ} \\
 \Delta_r G &= \Delta_r G^{\circ} + RT \ln Q \quad \Delta_r G^{\circ} = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ} \quad \Delta_r G^{\circ} = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ}
 \end{aligned}$$

PPTSO : SYSTÈMES À MULTIPLES E/S



$$h_i^* = p_i + p_{th} \quad \text{Cu}^{2+} + \text{Zn}^{2+} \rightleftharpoons \text{Cu}^{+} + \text{Zn}^{+} \quad \text{rot } E =$$

$$e^{\frac{na}{\lambda_0} (\sin i - \sin t)} = p, \quad p \in \frac{H(j\omega)}{H(j\omega)} = d_{\sum_j \frac{b_j}{a_j}} \exp\left(\frac{K}{\sum_j \frac{b_j}{a_j}}\right)$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \quad \Delta_{vap} S = \frac{\Delta_{vap} H}{T_{vap}} = \frac{\mu_0}{T_{vap}}$$

$$\text{div } \vec{A} = 0 \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \right) = 0 \quad \Delta_r H^\circ = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^\circ$$

$$2\pi \frac{d}{dt} \left(\frac{SM}{\gamma} \right) = \varphi_0^2 \left(\frac{E_\phi}{P_\phi} \right)^2 \quad \Delta_r G = \Delta_r G^\circ + RT \ln Q = \Delta_r G^\circ + RT \ln \left(\frac{P}{P^\circ} \right)$$

$$\lambda_0 \quad \Delta_r G = \Delta_r G^\circ + RT \ln Q = \Delta_r G^\circ + RT \ln \left(\frac{P}{P^\circ} \right)$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \quad \Delta_r G = \Delta_r G^\circ + RT \ln Q = \Delta_r G^\circ + RT \ln \left(\frac{P}{P^\circ} \right)$$

$$-(|\eta_{Ox}(i)| + |\eta_{Red}(i)|) F V_i$$

$$\frac{1}{2} v^2 + gz +$$

PPTSO : SYSTÈMES À MULTIPLES E/S

Conservation du débit pour un système ouvert à plusieurs entrées ou sorties

Dans un système thermodynamique à plusieurs entrées et/ou sorties, la conservation du débit massique s'écrit :

$$\sum_i \varepsilon_i D_{m_i} = 0 \text{ où } \varepsilon_i = \begin{cases} +1 & \text{si } i \text{ est une entrée} \\ -1 & \text{si } i \text{ est une sortie} \end{cases}$$

Premier principe de la thermodynamique en système ouvert à plusieurs entrées ou sorties

Dans un système thermodynamique à plusieurs entrées et/ou sorties, le premier principe de la thermodynamique s'écrit :

$$\sum_i \varepsilon_i D_{m_i} (e_{c_i} + e_{p_i} + h_i) = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{th} \text{ où } \varepsilon_i = \begin{cases} +1 & \text{si } i \text{ est une entrée} \\ -1 & \text{si } i \text{ est une sortie} \end{cases}$$

$$h]_e^{\frac{na}{\lambda_0}(\sin i - \sin t) = p, \quad p \in \frac{H(j\omega)}{d_{\sum_j \frac{b_j}{\lambda_j}}}, \quad \text{rot } E = \frac{1}{\epsilon_0} \sum_k b_k \frac{d}{dt} \vec{e}_k$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} \quad H_{\text{ALI}} = \frac{d}{dt} \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}} s} = \frac{d}{dt} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\text{div } \vec{A} = 0 \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = 0 \quad \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \right) = 0 \quad 430,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \quad \Delta_r H^\circ = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^\circ$$

$$\frac{2\pi}{L} \left(\frac{SM}{\gamma} \right) = \frac{2\pi}{L} \left(\frac{E}{\mu_0} \right) \quad \Delta_r G = \Delta_r G^\circ + RT \ln Q$$

$$\lambda_0 \quad \vec{r} = \gamma \vec{E} \quad \Delta_r G = \Delta_r G^\circ + RT \ln Q$$

$$+ (|\eta_{\text{Ox}}(i)| + |\eta_{\text{Red}}(i)|) F V_i$$

UN EXEMPLE DE CYCLE INDUSTRIEL : SYSTÈME RÉFRIGÉRANT

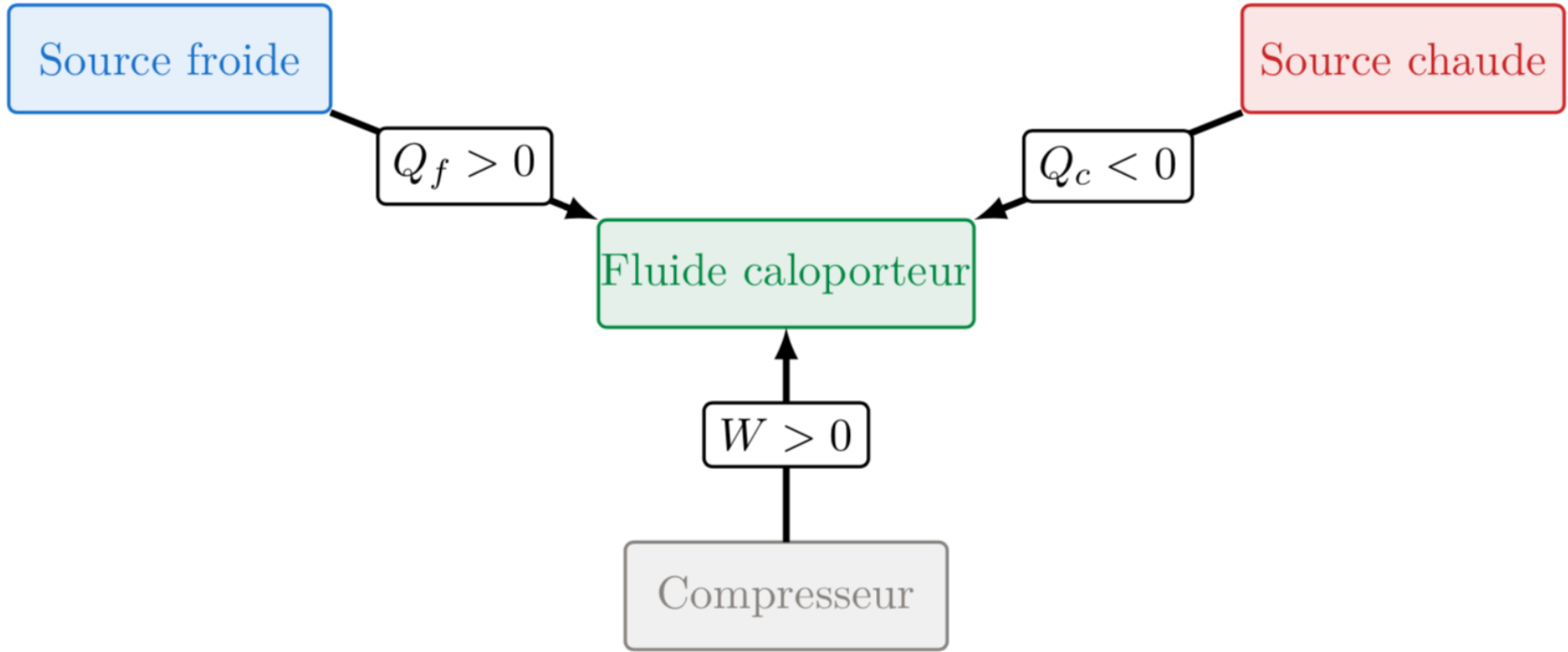


Diagramme des échanges énergétiques, les flèches donnent le sens « conventionnel » de la thermodynamique

UN EXEMPLE DE CYCLE INDUSTRIEL : SYSTÈME RÉFRIGÉRANT

$$h]_e^{\text{na}} = \frac{P_i + P_{\text{th}}}{\lambda_0} \left(\sin i - \sin t \right) = p, \quad \text{Cu}^{2+} + 2\text{H}^+ \rightleftharpoons \text{Cu}^{+} + \text{H}_2$$

$$H(j\omega) = d \frac{\sum_k b_k \omega^k}{\sum_j a_j \omega^j} = \exp\left\{ \sum_k \frac{b_k}{a_k} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^k \right\}$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} \quad H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^k$$

$$\text{div} \vec{A} = 0 \quad \nabla \cdot \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{c} \right) = 0 \quad \Delta_r H^\circ = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^\circ$$

$$\frac{2\pi}{h} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} m \dot{x}^2 \right) = \frac{1}{2} m \ddot{x}^2 = \frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 = \frac{1}{2} m \left(\frac{dx}{dt} \right)^2$$

$$\frac{\lambda_0}{j} = \gamma \vec{E} \quad \Delta_r G = \frac{RT}{\partial \xi} \ln \frac{P}{P^\circ} + \mu_0 \gamma \omega$$

$$+ (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) F V_i$$

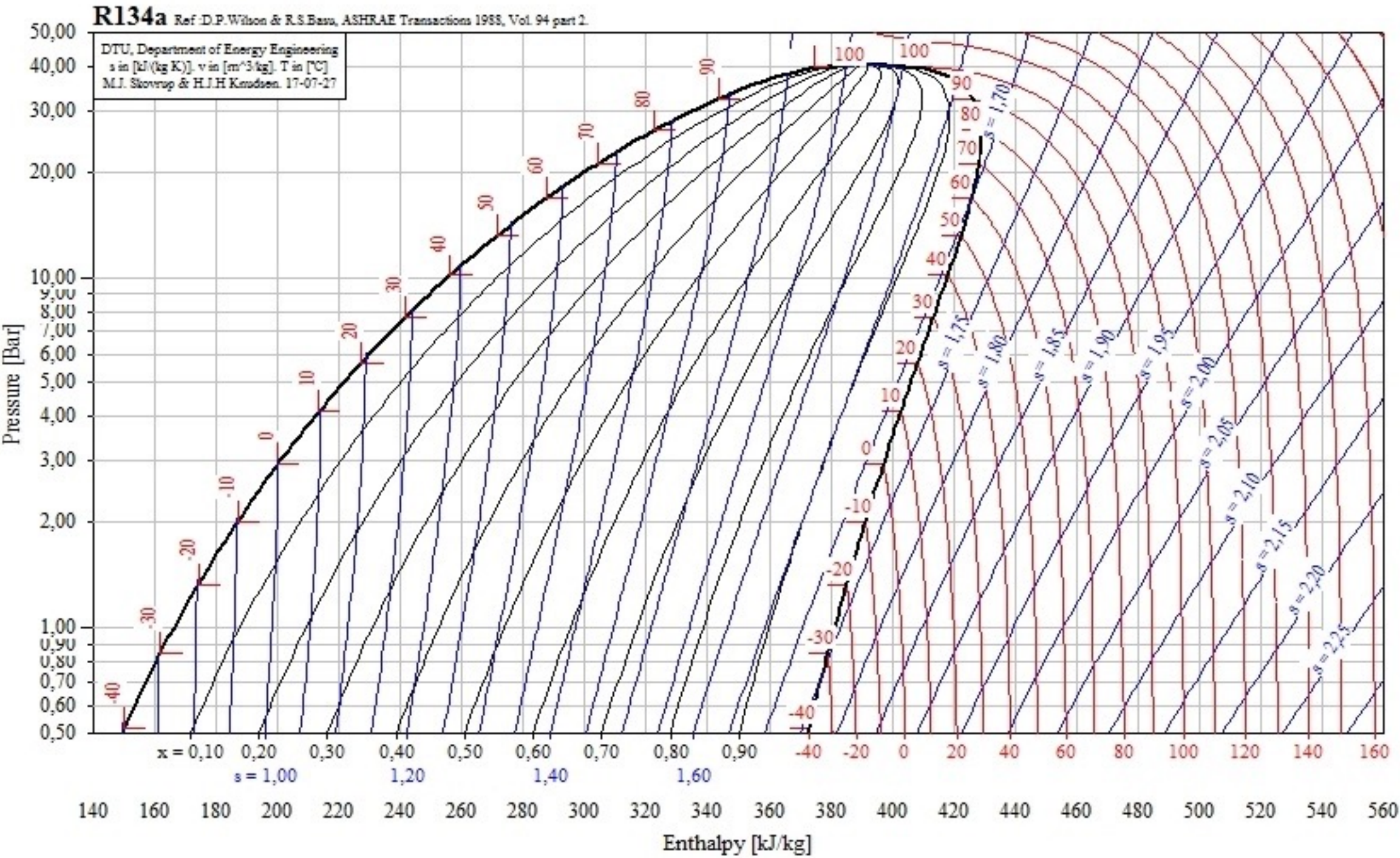


Diagramme des frigoristes du R134a

$$h_e = p_i + p_{th} \quad \text{rot } E = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times B$$

$$H(j\omega) = d_{\sum_j} \frac{K_j}{\omega_j} \exp\left(\frac{j\omega}{\omega_j}\right)$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \quad \Delta_{vap} = \frac{\mu_0}{T_{vap}}$$

$$\text{div } \vec{A} = 0 \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \right) = 0$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \right) = 0 \quad \Delta_r H^\circ = \sum_i \nu_i \Delta_r H_i^\circ$$

$$\Delta_r G = \Delta_r H^\circ - T \Delta_r S^\circ$$

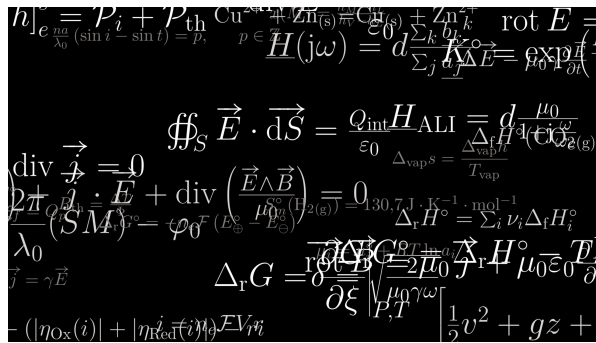
$$\frac{1}{2} v^2 + gz + \dots$$

COMPOSANTS : DÉTENDEUR

Détendeur

On appelle *détendeur*, tout appareil ou mécanisme permettant de faire passer un fluide stocké à une certaine pression, vers une pression inférieure.





COMPOSANTS : DÉTENDEUR

Bilan énergétique d'un détendeur calorifugé

Un détendeur calorifugé, pour lequel on peut négliger les variations d'énergie cinétique et potentielle massique, obéit à l'équation :

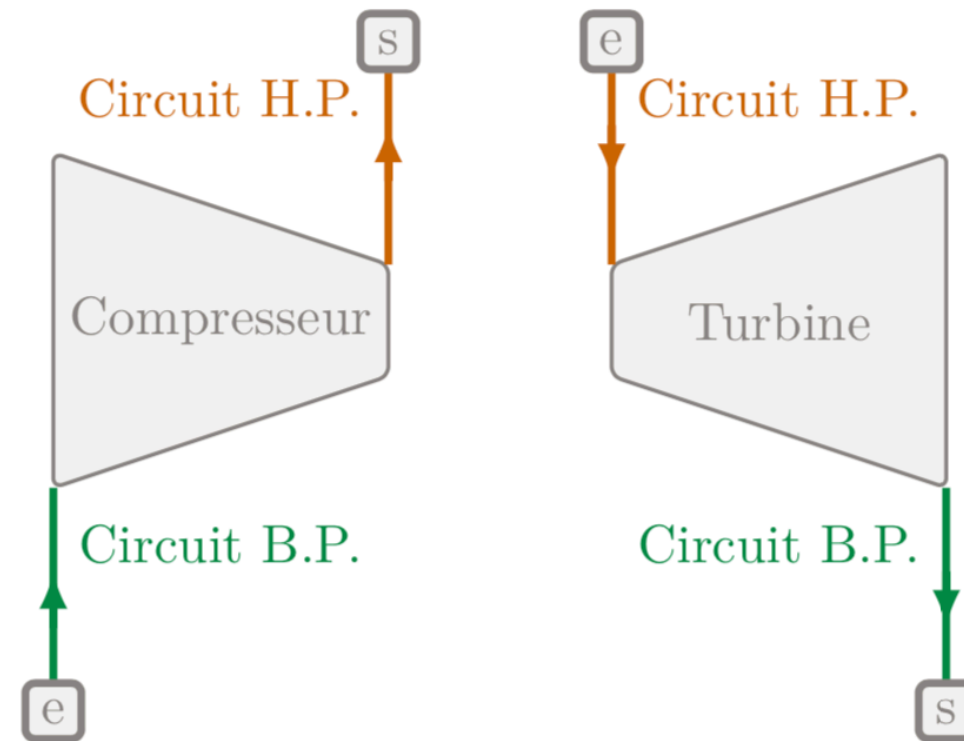
$$[h]_E^S = 0 \Leftrightarrow h_S = h_E$$

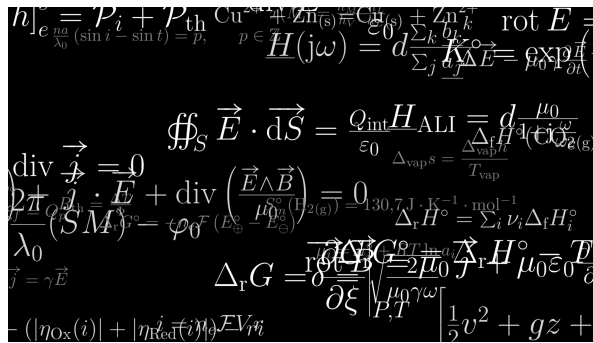
C'est donc un système qui conserve l'enthalpie massique du fluide qui le traverse. La détente est dite de JOULE-THOMSON

$$n]e=\frac{p_i}{\lambda_0}+\frac{p_{th}}{(\sin i-\sin t)=p_i},\quad \frac{Cu^{2+}+Zn(s)}{H(j\omega)}=\frac{Cu(s)}{d\frac{k}{\sum_j\frac{1}{f_j}}}\frac{Zn^{2+}}{K_{eq}}\text{rot}E=$$

On appelle *compresseur*, tout dispositif rotatif destiné à augmenter par un procédé uniquement mécanique la pression d'un gaz. Le travail utile reçu par le fluide traversant le système ouvert compresseur est positif, c'est donc un récepteur : $w_i > 0$ et $\mathcal{P}_i > 0$.

COMPOSANTS : COMPRESSEUR & TURBINE





COMPOSANTS : COMPRESSEUR & TURBINE

Bilan énergétique d'une turbine ou d'un compresseur calorifugé

Une turbine ou d'un compresseur calorifugé, pour lequel on peut négliger les variations d'énergie cinétique et potentielle massique, obéit à l'équation :

$$\begin{aligned} D_m [h]_E^S &= \mathcal{P}_i \\ D_m (h_S - h_E) &= \mathcal{P}_i \\ h_S - h_E &= w_i \end{aligned}$$

$$h_e = p_i + p_{th} \quad \text{Cu}^{2+} + \text{Zn}^{2+} \rightleftharpoons \text{Cu}^{+} + \text{Zn}^{+} \quad \text{rot } E =$$

$$\frac{H(j\omega)}{H(j\omega)} = d \frac{\sum_k b_k}{\sum_j a_j} \exp$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \quad \Delta_{vap} s = \frac{\Delta_{vap} h}{T_{vap}}$$

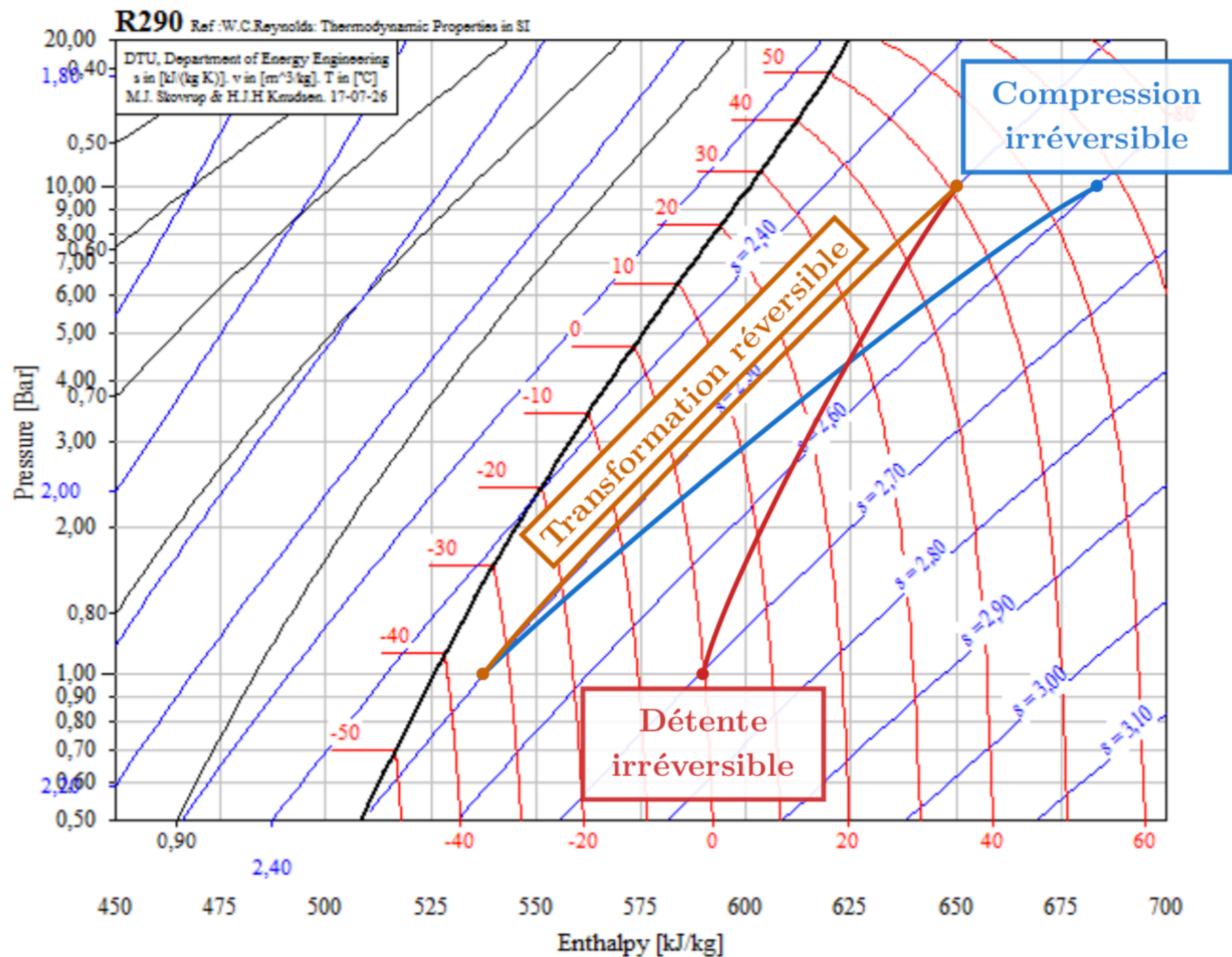
$$\text{div } \vec{A} = 0 \quad \nabla \cdot \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \right) = 0 \quad \Delta_r H^\circ = \sum_i \nu_i \Delta_r H_i^\circ$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right)$$

$$\Delta_r G = \Delta_r G^\circ + RT \ln Q \quad \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right) = \frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 \right)$$

$$-(|\eta_{Ox}(i)| + |\eta_{Red}(i)|) EV_i$$

COMPOSANTS : COMPRESSEUR & TURBINE



$$\begin{aligned}
 h_e &= p_i + p_{th} \\
 \frac{e}{\lambda_0} (\sin i - \sin t) &= p, \\
 p &\in \mathbb{R} \\
 H(j\omega) &= d_{\sum_j \frac{b_j}{s_j}} \exp\left\{ \frac{\sum_k \frac{a_k}{s_k}}{\sum_j \frac{b_j}{s_j}} \right\} \exp\left\{ \frac{\sum_l \frac{c_l}{s_l}}{\sum_j \frac{b_j}{s_j}} \right\} \\
 \text{rot } E &= \frac{\mu_0}{4\pi} \nabla \times \vec{E} \\
 \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\epsilon_0} \\
 \Delta_{\text{vap}} &= \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{1}{T_{\text{vap}}} \\
 \text{div } \vec{E} &= 0 \\
 \nabla \cdot \vec{E} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \right) &= 0 \\
 \Delta_r H^\circ &= \sum_i \nu_i \Delta_r H_i^\circ \\
 \Delta_r G &= \sum_i \nu_i \Delta_r G_i^\circ \\
 \Delta_r G &= \sum_i \nu_i \Delta_r G_i^\circ \\
 \Delta_r G &= \sum_i \nu_i \Delta_r G_i^\circ \\
 \Delta_r G &= \sum_i \nu_i \Delta_r G_i^\circ
 \end{aligned}$$

COMPOSANTS : COMPRESSEUR & TURBINE

Rendement isentropique d'une turbine

On appelle *rendement isentropique d'une turbine*, la grandeur sans dimension et inférieure à 1, telle que :

$$\eta_{\text{turb}} = \frac{\Delta_{e \rightarrow s} h_{\text{réel}}}{\Delta_{e \rightarrow s} h_{\text{isen}}}$$

Rendement isentropique d'un compresseur

On appelle *rendement isentropique d'un compresseur*, la grandeur sans dimension et inférieure à 1, telle que :

$$\eta_{\text{comp}} = \frac{\Delta_{e \rightarrow s} h_{\text{isen}}}{\Delta_{e \rightarrow s} h_{\text{réel}}}$$

EXERCICE D'APPLICATION 3

Un compresseur de turboréacteur admet un débit massique de $D_m = 1,5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ d'air. Les données thermodynamiques du fluide sont :

| | Pression (bar) | Énergie interne ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$) | Volume massique ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) |
|--------|----------------|--|---|
| Entrée | 1,00 | 289,6 | 0,242 |
| Sortie | 10 | 359,2 | $5,26 \times 10^{-2}$ |

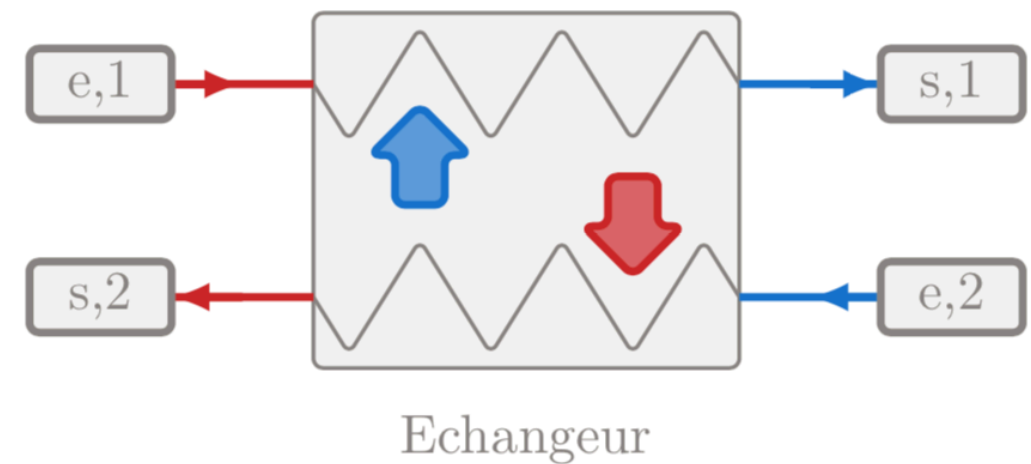
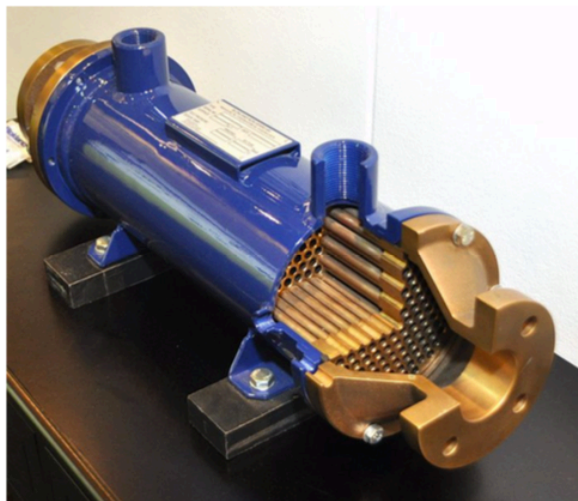
1. Quelles hypothèses courantes peut-on faire ici pour étudier ce compresseur ?
2. En déduire une expression simplifiée du premier principe de la thermodynamique en système ouvert.
3. Calculer l'enthalpie massique en entrée et sortie du compresseur.
4. On suppose que le compresseur est également calorifugé, quelle est sa puissance ? Commenter le signe obtenu.

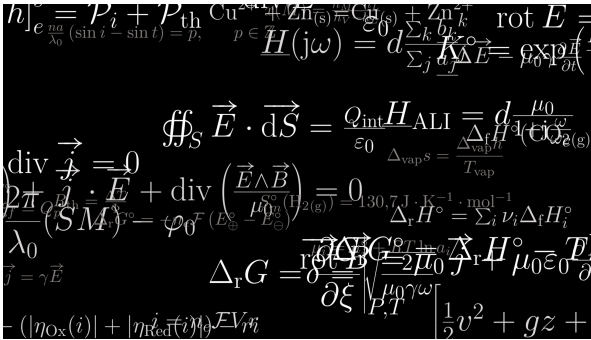
Le rendement isentropique du compresseur est $\eta_{\text{isen}} = \frac{[h_{\text{isen}}]_e^s}{[h_{\text{réel}}]_e^s} = 0,811$.

5. En déduire l'enthalpie et le volume massique en sortie du compresseur réversible.

$$n]_e = p_i + p_{th}^{Cu^{+2} + Zn(s) \rightleftharpoons Cu(s) + Zn^{+2}} \cdot \text{rot } E = \frac{p}{H(j\omega)} = d_{\sum_j \frac{p_j}{-j}} \cdot K_{\Delta E} = \exp \left[\frac{p}{\omega H} \right]$$

Échangeur thermique





COMPOSANTS : ÉCHANGEUR

Bilan énergétique d'un échangeur thermique calorifugé

Un échangeur thermique calorifugé, pour lequel on peut négliger les variations d'énergie cinétique et potentielle massique, obéit à l'équation :

$$D_{m,1} [h_1]_{E_1}^{S_1} + D_{m,2} [h_2]_{E_2}^{S_2} = 0$$

EXERCICE D'APPLICATION 4

On considère un échangeur thermique constitué de deux circulations d'eau à contre-courant. L'échangeur est supposé parfaitement calorifugé et les écoulements supposés isobares et en régime permanent. La capacité thermique massique de l'eau est supposée indépendante de la température et on note $T_{1,1}$ et $T_{1,2}$ les températures d'entrée dans l'échangeur et $T_{2,1}$ et $T_{2,2}$ les températures de sortie.

Le débit massique est noté D_1 dans la conduite (1,1) \mapsto (2,1) et D_2 dans la conduite (1,2) \mapsto (2,2). On donne $T_{1,1} = 350 \text{ K}$, $T_{2,1} = 290 \text{ K}$, $T_{1,2} = 280 \text{ K}$, $T_{2,2} = 340 \text{ K}$, $c_p = 4,17 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et $D_1 = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

1. Quelles hypothèses courantes peut-on faire ici pour étudier cet échangeur thermique ?
2. En déduire une expression simplifiée du premier principe de la thermodynamique en système ouvert.
3. Exprimer puis calculer D_2 en fonction des données du problème. Calculer sa valeur numérique.
4. Exprimer la variation d'entropie massique entre l'entrée et la sortie d'un écoulement de fluide isobare en fonction des données du problème.
5. Exprimer puis calculer le taux d'entropie $\frac{dS_c}{dt}$ créée dans l'échangeur complet en fonction des données du problème. Commenter.

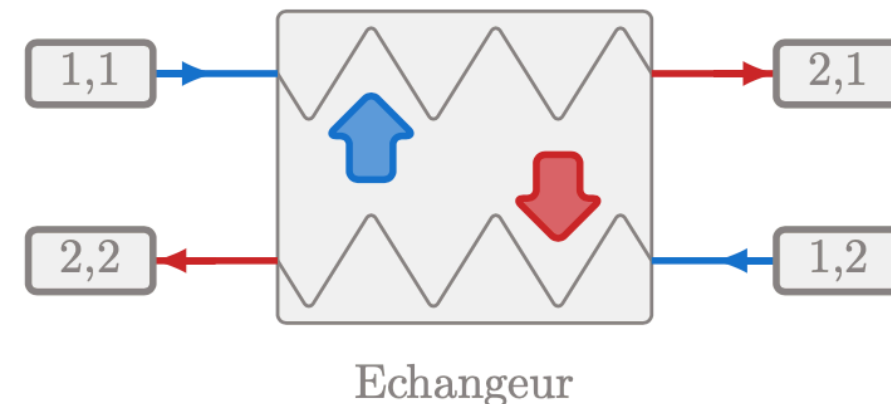


Fig. 8.1 – Schéma d'échangeur à contre-courant

$$h_e = p_i + p_{th} \quad \text{Cu}^{2+} + \text{Zn}^{2+} \rightleftharpoons \text{Cu}^{+} + \text{Zn}^{+} \quad \text{rot } E =$$

$$H(j\omega) = d \frac{\sum_k b_k z^{-k}}{\sum_j a_j z^{-j}} \exp\left\{ \frac{j\omega}{\omega_0} \right\}$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \quad \Delta_{vap} = \frac{\mu_0}{T_{vap}} \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} \right) = 0$$

$$\Delta_r G = \Delta_r G^\circ + RT \ln Q = \Delta_r G^\circ + RT \ln \left(\frac{p_B}{p_A} \right) \quad \Delta_r H^\circ = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^\circ$$

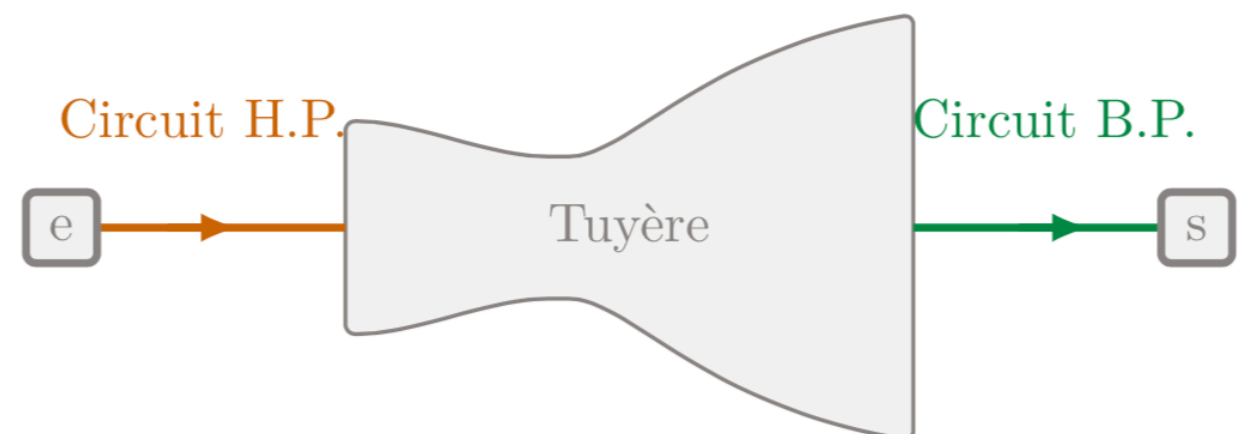
$$\frac{\partial}{\partial \xi} \left(\frac{\mu_0 \gamma \omega}{P_T} \right) \quad \frac{1}{2} v^2 + gz +$$

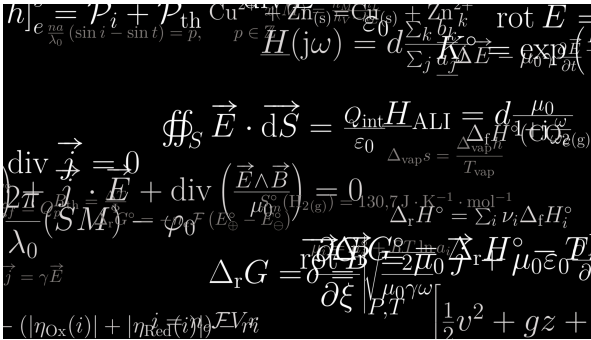
$$-(|\eta_{Ox}(i)| + |\eta_{Red}(i)|) F V_i$$

COMPOSANTS : TUYÈRE

Tuyère

On appelle *tuyère*, tout conduit de section droite variable placé à l'arrière d'un moteur produisant des gaz de combustion chauds qui permet de transformer l'énergie thermique de ceux-ci en énergie cinétique.





COMPOSANTS : TUYÈRE

Bilan énergétique d'une tuyère calorifugée

Une tuyère calorifugée, pour lequel on peut négliger la variation d'énergie potentielle massique et l'énergie cinétique massique en entrée, obéit à l'équation :

$$\frac{1}{2}v_s^2 + [h]_E^S = 0$$
$$v_s = \sqrt{2(h_S - h_E)}$$

EXERCICE D'APPLICATION 5

On s'intéresse à la tuyère d'un turboréacteur, dans laquelle l'écoulement d'air est compressible ce qui a pour conséquence que la pression de l'air chute tandis que sa vitesse augmente. Le débit massique d'air à travers la tuyère est de $D_m = 26 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Les données thermodynamiques sont les suivantes :

| | Vitesse ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | Pression (bar) | Température (K) | Volume massique ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$) |
|--------|--|----------------|-----------------|---|
| Entrée | 10 | 2,28 | 950 | 1,36 |
| Sortie | | 1,00 | 780 | 2,55 |

On admettra que les propriétés thermodynamiques de l'air, notamment sa capacité thermique massique $c_v = 0,823 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ restent inchangées.

1. Quelles hypothèses courantes peut-on faire ici pour étudier cette tuyère ?
2. En déduire une expression simplifiée du premier principe de la thermodynamique en système ouvert.
3. Calculer alors la vitesse des gaz en sortie de tuyère.
4. Le débit volumique est-il inchangé ? Commenter.

$$h_e = p_i + p_{th} \quad \text{rot } E = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times B$$

$$H(j\omega) = d \frac{\sum_k b_k z^{-k}}{\sum_j a_j z^{-j}} \quad \exp \left(\frac{\mu_0}{\Delta_{vap}} \right)$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\epsilon_0} \quad \Delta_{vap} = \frac{\mu_0}{T_{vap}}$$

$$\text{div } \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0} = 0$$

$$\Delta_r H^\circ = \sum_i \nu_i \Delta_r H_i^\circ$$

$$\Delta_r G = \Delta_r H^\circ - T \Delta_r S^\circ$$

$$\frac{1}{2} v^2 + gz + \dots$$

COMPOSANTS : MÉLANGEUR & SÉPARATEUR

Mélangeur isobare calorifugé

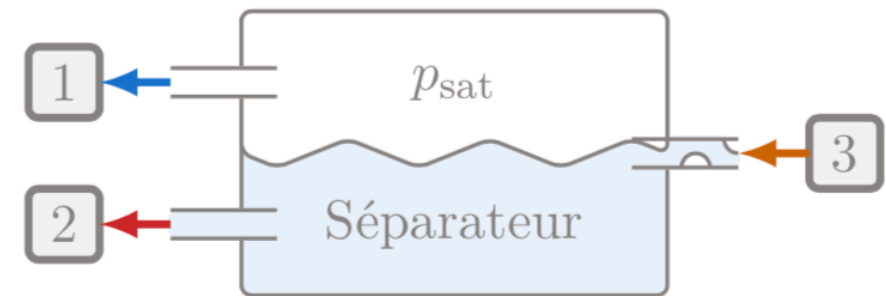
On appelle *mélangeur isobare calorifugé*, tout système ouvert à 3 accès comportant :

- une entrée notée 1, de vapeur saturante dans les conditions du point de rosée (pression d'admission p_{sat} et température d'ébullition T_{eb}),
- une entrée notée 2, de liquide saturant dans les conditions du point d'ébullition (pression d'admission p_{sat} et température de rosée T_{eb}),
- une sortie notée 3, de mélange liquide-vapeur dans les conditions de changement d'état (pression de vapeur saturante p_{sat} et température d'ébullition T_{eb}).

Séparateur isobare calorifugé

On appelle *séparateur isobare calorifugé*, tout système ouvert à 3 accès comportant :

- une entrée notée 3, de mélange liquide-vapeur dans les conditions de changement d'état (pression de vapeur saturante p_{sat} et température d'ébullition T_{eb}),
- une sortie notée 2, de liquide saturant dans les conditions du point d'ébullition (pression d'admission p_{sat} et température de rosée T_{eb}),
- une sortie notée 1 de vapeur saturante dans les conditions du point de rosée (pression d'admission p_{sat} et température d'ébullition T_{eb}).

$$\begin{array}{l} n]e^{\frac{p_i}{\lambda_0} + p_{th}} \frac{Cu^{+2.4} + Zn(s)}{H(j\omega)} = Cu(s) + \frac{Zn^{+2}}{H(j\omega)} \cdot \text{rot } E = \\ \frac{e^{na}}{\lambda_0} (\sin i - \sin t) = p, \quad p \in \frac{H(j\omega)}{d_{\sum_j \frac{b_j}{-f_j}}} = d_{\sum_j \frac{b_j}{-f_j}} \cdot K \Delta E = \exp \left\{ \frac{p}{\rho_0} \right\} \\ \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{int}}{\varepsilon_0} \frac{H_{ALI}}{\Delta_{vap,s}} = d_{\frac{\mu_0}{\Delta_{vap,s} H}} \frac{\mu_0}{(\text{erg})^2} \\ \left. \begin{array}{l} \text{div } \vec{A} = 0 \\ 2\pi \frac{1}{Q} \vec{A} \cdot \vec{E} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0^{\text{SC}}(T)} \right) = 0 \end{array} \right\} \frac{1}{(SM)} = \varphi^0 \frac{F(E_{\oplus} - E_{\odot})}{-430,7,1 \cdot K^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}} \Delta_r H^{\circ} = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ} \\ \frac{\lambda_0}{f} = \gamma \vec{E} \quad \Delta_r G = 0 \quad \frac{\partial \Delta G}{\partial \xi} = 2H_0 \sqrt{\mu_0 \gamma \omega} \quad \vec{X}_r \cdot H^{\circ} \vec{e}_0 \frac{\partial}{\partial} \\ -(|n_{\text{Ox}}(i)| + |n_{\text{Red}}(i)|) \frac{EVr_i}{P,T} \quad \frac{1}{2} v^2 + gz + \end{array}$$

$$h_3 = x_V h_V + (1 - x_V) h_L$$
$$h_3 = x_V h_V + (1 - x_V) h_L$$

CYCLE INDUSTRIEL : COP SYSTÈME RÉFRIGÉRANT ET PAC

Coefficient de performance d'un système frigorifique

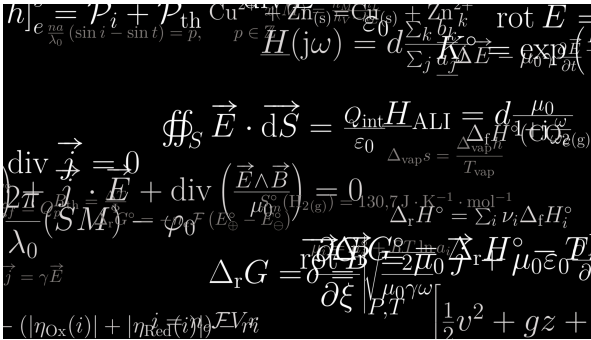
On appelle *coefficient de performance ou efficacité d'un système frigorifique*, la grandeur sans dimension :

$$\text{COP} = e = \frac{\text{but}}{\text{coût}} = \frac{\mathcal{P}_{\text{th, f}}}{\mathcal{P}_i}$$

Coefficient de performance d'une pompe à chaleur

On appelle *coefficient de performance ou efficacité d'une pompe à chaleur*, la grandeur sans dimension :

$$\text{COP} = e = \frac{\text{but}}{\text{coût}} = \frac{-\mathcal{P}_{\text{th, c}}}{\mathcal{P}_i}$$



CYCLE INDUSTRIEL : COP MOTEUR

Coefficient de performance d'un moteur

On appelle *coefficient de performance ou rendement d'un moteur*, la grandeur sans dimension :

$$\text{COP} = e = \frac{\text{but}}{\text{coût}} = \frac{\mathcal{P}_{\text{i, net}}}{\mathcal{P}_{\text{th, c}}}$$