

PT PHYSIQUE

THERMO 6

Thermodynamique industrielle



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

$$h|_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \text{Zn}^{\text{na}}_{(s)} \text{Co}^{\text{na}}_{(s)} \text{Zn}^{\text{na}}_{(s)} \text{rot } E$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= 0 & \oint \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\ \frac{Q}{\lambda_0} (SM)^{\circ} &= \varphi^F (E_{\oplus}^{\circ} - \mu_{P_{\oplus}}^{\circ})^{\text{H}_2(\text{g})} = 0 & 130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} &= \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ} \\ \vec{j} &= \gamma \vec{E} & \Delta_r G &= \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{G^{\circ} T^{\text{H}_2(a)}}{2 \mu_0} \vec{J}_r H^{\circ} \mu_0 \bar{\varepsilon}_0 \vec{P} \\ & & &= (\eta_{\text{ox}}(i) + \eta_{\text{red}}(i)) \mathcal{E} V_{ri} \end{aligned}$$

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.

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \frac{Z\bar{n}_{(s)}^{\text{na}}}{p} \text{C}^{\text{na}}_{\mathcal{E}(g)} \pm Z\bar{n}_k^{\text{na}} \text{rot } E =$$

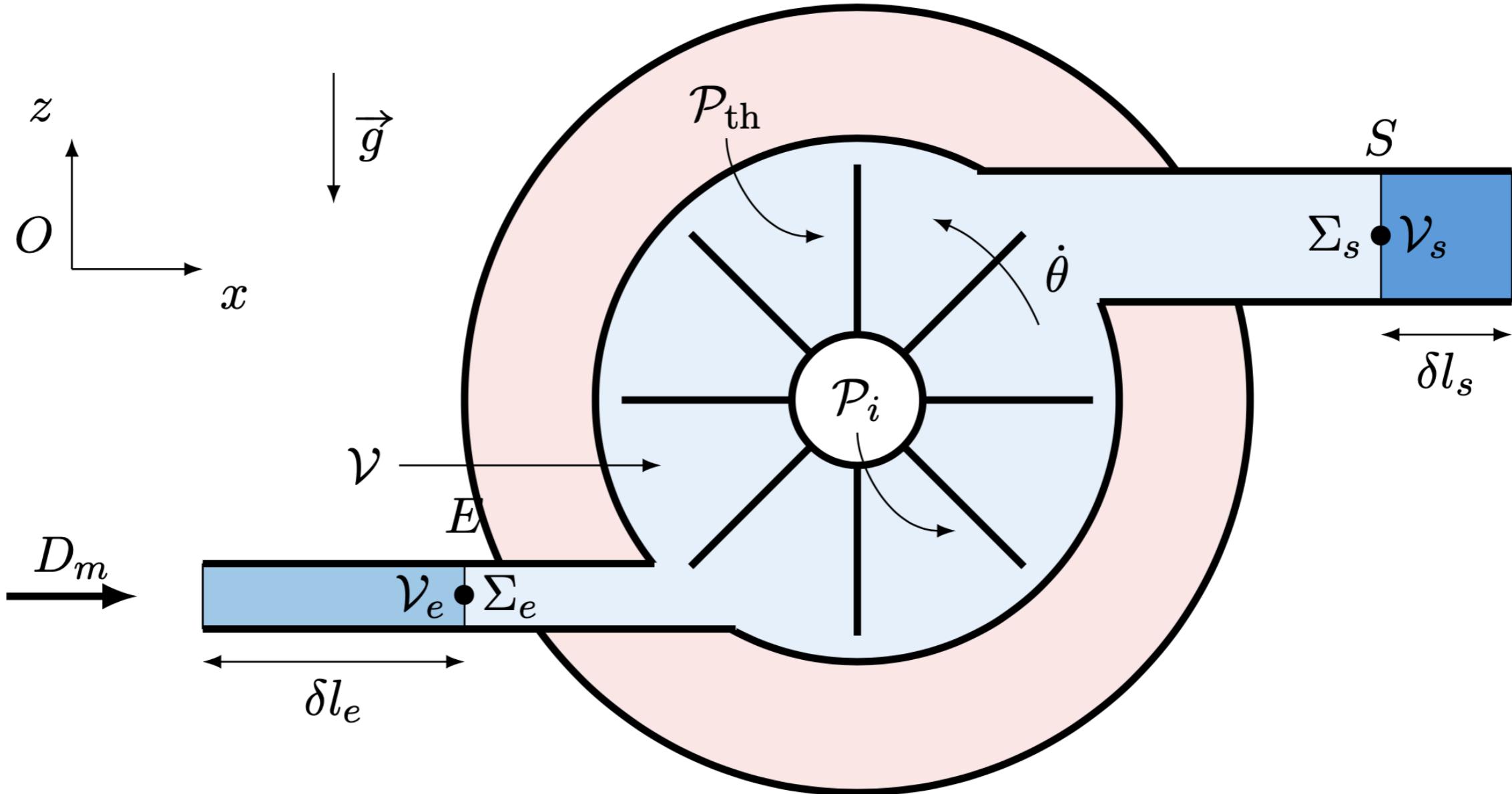
$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}^{\text{S}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{vap}}^{\text{S}}} \right) = 0$$

$$\Delta_{\text{r}} G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial G}{\partial T} \Big|_{P,\xi} \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

DU SYSTÈME OUVERT AU SYSTÈME FERMÉ



Représentation schématique d'un système ouvert

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \underset{\lambda_0}{\overset{\sin i}{\pm}} \underset{p}{\overset{\sin t}{\pm}} \underset{\text{Cu}^{2+}}{\overset{\text{Zn}^{2+}}{\pm}} \underset{\text{Cl}^{-}}{\overset{\text{Br}^{-}}{\pm}} \underset{\mathcal{E}(g)}{\overset{\text{Zn}^{2+}}{\pm}} \underset{\sum_k b_k^k}{\text{rot}} E$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= 0 & \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\ \frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} &= \varphi_0^F (S M)^\circ = \varphi_0^F (E_\oplus^\circ - \mu_{B_\oplus}^\circ) \underset{(B_{2(g)})}{=} 0 & \Delta_r H^\circ &= 130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \\ \vec{j} &= \gamma \vec{E} & \Delta_r G &= \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \underset{G^\circ}{=} \frac{G^\circ - G^\circ_{T=0}}{2\mu_0} \vec{J}_r H^\circ \mu_0 \bar{\varepsilon}_0 \vec{P} \\ & & &= (\eta_{\text{ox}}(i) + \eta_{\text{red}}(i)) \mathcal{E} V_{ri} \end{aligned}$$

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 :

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

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 $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$).

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{p} \text{C}^{\text{na}}_{\text{B}^{(g)}} \pm \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{\sum_k b_k^{\text{na}}} \text{rot } E =$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0 \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}^{\text{H}_2}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{B}}^{\text{o}} (E_{\oplus}^{\text{o}} - \varphi_0^{\text{F}} (E_{\oplus}^{\text{o}} - \mu_{\text{B}}^{\text{o}})^2)} \right) = 0$$

$$\Delta_{\text{r}} H^{\circ} = 130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\Delta_{\text{f}} H^{\circ} = \sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}$$

$$\Delta_{\text{r}} G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P, T} \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P, T} \Delta_{\text{r}} H^{\circ} \Big|_{P, T} \frac{\partial P}{\partial \xi} \Big|_{P, T} \gamma \omega \Big|_{P, T}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

SECOND PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE DES SYSTÈMES 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, $\delta s_e = \frac{q_{\text{th}}}{T_{\text{th}}}$ l'entropie échangée massique avec le thermostat à température T_{th} , et $\delta s_c > 0$ est l'entropie créée massique en $[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$.

$$h]_c^{\sigma} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{+\infty} \mp \text{Zn}_{(\text{S})}^{\pm} \text{Cg}_{0\pm}^{\pm} \text{Zn}_{\sum_k b_k^{\pm} \zeta_k}^{\mp} \text{rot } E = \\ \underline{H}(\text{j}\omega) = d_{\sum_j \frac{1}{\Delta E_j}}^{\sigma} \exp \left(\frac{i}{\partial \text{rot}} \right)$$

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 .

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \text{Zn}^{\text{na}} \text{C}^{\text{na}}_{\text{Zn}} \text{Zn}^{\text{na}}_{\text{C}} \text{rot } E =$$

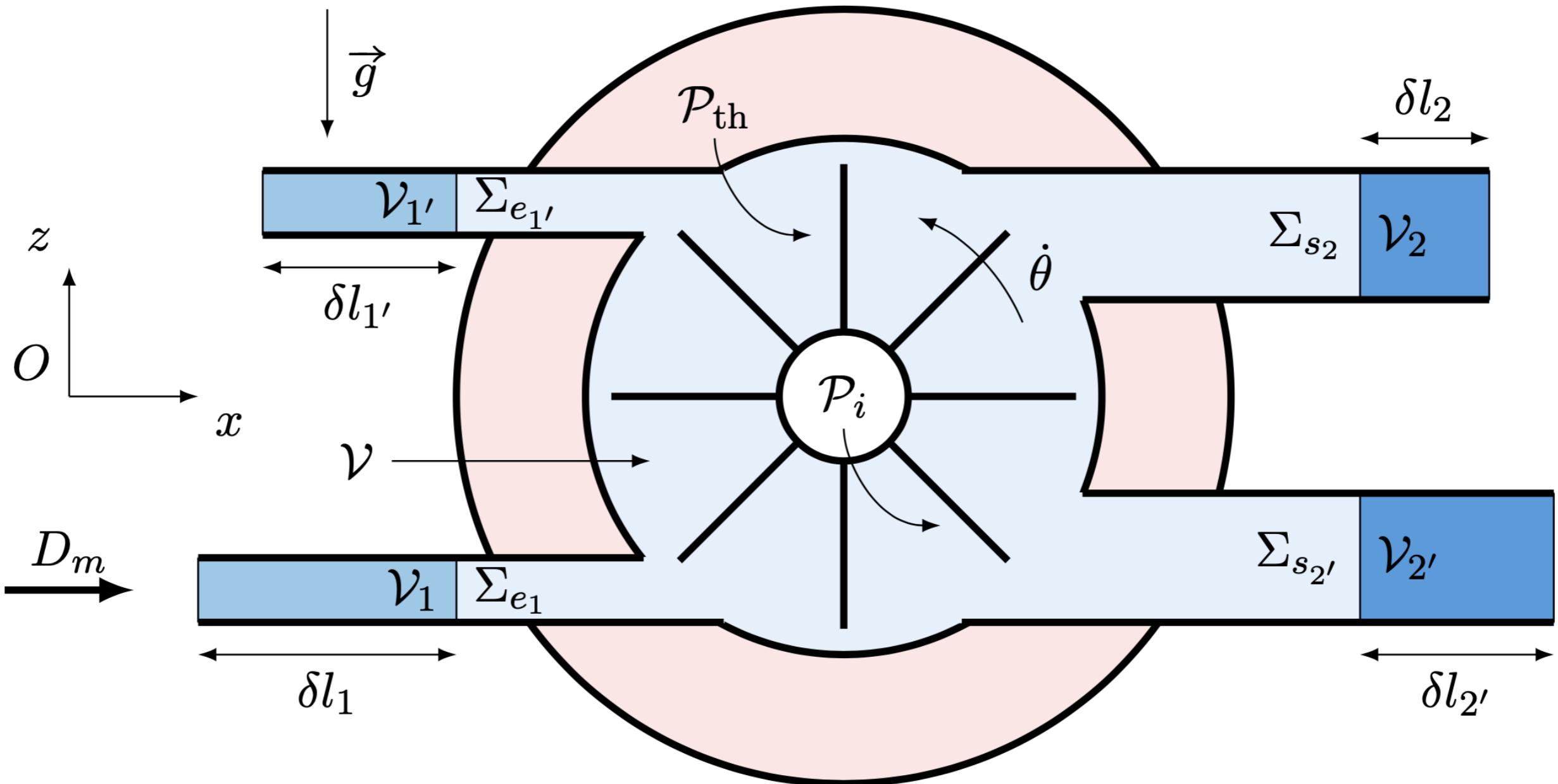
$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = d \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}} S} = \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{\partial \pi}{\lambda_0} \left(\vec{S} M^{\circ} \right) = \varphi^F \left(E_{\oplus}^{\circ} \mu_{B_{\oplus}}^{\circ} \right) = 0$$

$$\Delta_r G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} = \frac{\partial G}{\partial P} \Big|_{T,\mu} = \frac{\partial G}{\partial T} \Big|_{P,\mu} = \frac{\partial G}{\partial \mu} \Big|_{P,T}$$

$$- (|\eta_{\text{Ox}}(i)| + |\eta_{\text{Red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

PPTSO : SYSTÈMES À MULTIPLES E/S



$$h|_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\text{d}}{p} \text{Zn}^{\text{na}} \text{C}^{\text{na}} \text{Zn}^{\text{na}} \text{rot } E =$$

$$\vec{H}(\text{j}\omega) = d \sum_j \vec{K} \vec{\Delta} \vec{E} = \exp \frac{d}{\Delta}$$

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 :

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

$$\begin{aligned}
h_e^{\text{na}} &= \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \cdot \frac{\text{Cu}^{\text{na}} \cdot \frac{1}{p} \cdot \text{Zn}^{\text{na}} \cdot \text{Cu}^{\text{na}}}{\sum_k b_k^{\text{na}}} \cdot \text{rot } E = \\
H(j\omega) &= d \frac{\sum_k b_k^{\text{na}}}{\sum_j K_j^{\text{na}}} \cdot \exp \left(\frac{j\omega}{\tau_{\text{th}}} \right) \\
\operatorname{div} \vec{j} &= 0 \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\
\frac{2\pi Q}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} &+ \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0^{\text{air}}} \right) = 0 \quad 130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \quad \Delta_r H^\circ = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^\circ \\
\vec{j} &= \gamma \vec{E} \quad \Delta_r G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \Delta_r H^\circ \quad \mu_0 \varepsilon_0 \vec{F} \\
&- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_i i
\end{aligned}$$

UN EXEMPLE DE CYCLE INDUSTRIEL : SYSTÈME RÉFRIGÉRANT

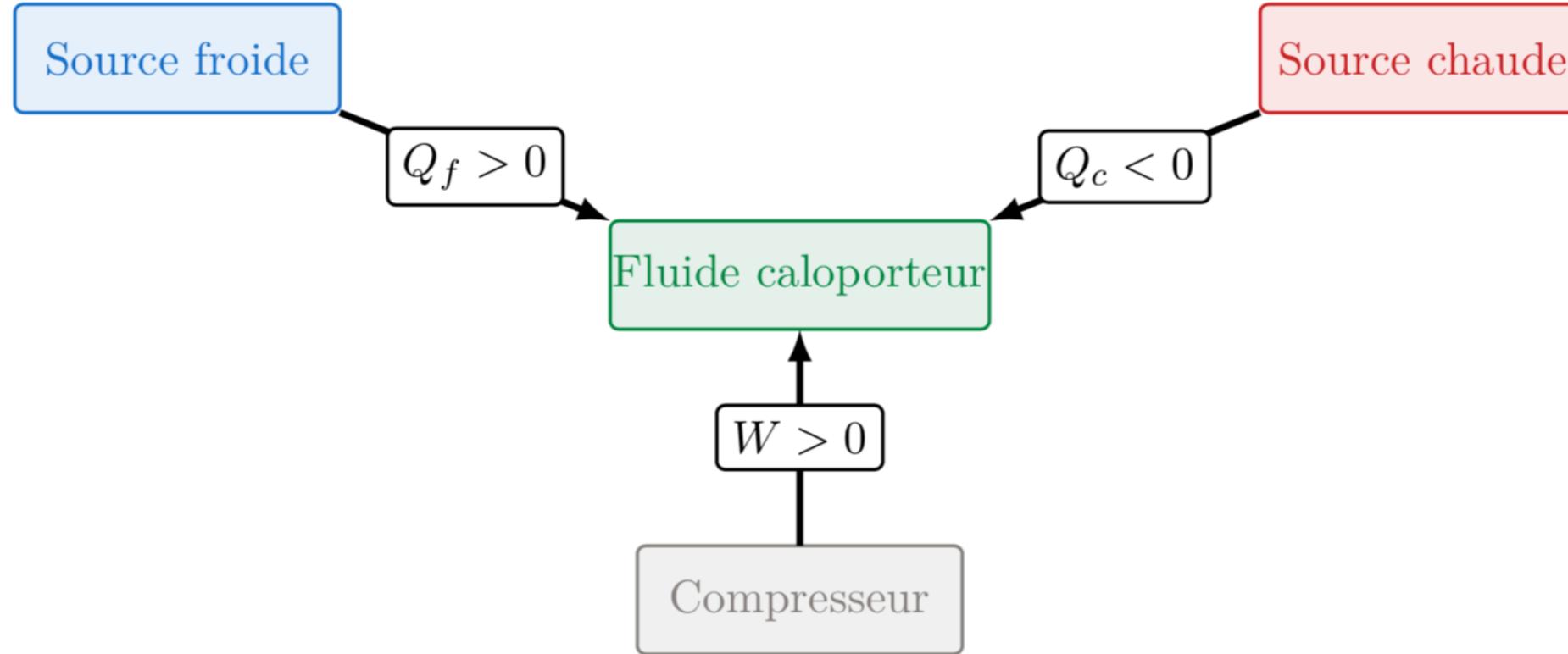


Diagramme des échanges énergétiques, les flèches donnent le sens « conventionnel » de la thermodynamique

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \cdot \frac{\text{Cu}^{\text{aux}} \cdot \frac{1}{p} \cdot \text{Zn}^{\text{t}} \cdot \text{Cl}^{\text{t}} \cdot \text{Zn}^{\text{z}}}{\sum_k b_k^{\text{t}}} \cdot \text{rot } E$$

$$\tilde{H}(j\omega) = d \frac{\sum_k b_k^{\text{t}}}{\sum_j K_j^{\text{t}}} \tilde{E} = \exp \frac{d}{\partial \lambda}$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

$$\oint \vec{S} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}} H_{\text{ALI}}}{\varepsilon_0} = \frac{d \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}}}}{\Delta_{\text{vap}} S} = \frac{T_{\text{vap}}}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{Q}{\lambda_0} \frac{d}{dt} \left(\vec{S} M^{\text{vap}} \right) = \varphi_0^F \left(E_{\oplus} - \mu_{E_{\oplus}}^{\text{vap}} \right) = 0$$

$$\Delta_r G = \frac{\partial \Delta G}{\partial \xi} \frac{\partial \xi}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \mu_0} \frac{\partial \mu_0}{\partial \varepsilon_0} \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial \delta} = \frac{\partial \Delta G}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial \mu_0} \frac{\partial \mu_0}{\partial \varepsilon_0} \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial \delta}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

UN EXEMPLE DE CYCLE INDUSTRIEL : SYSTÈME RÉFRIGÉRANT

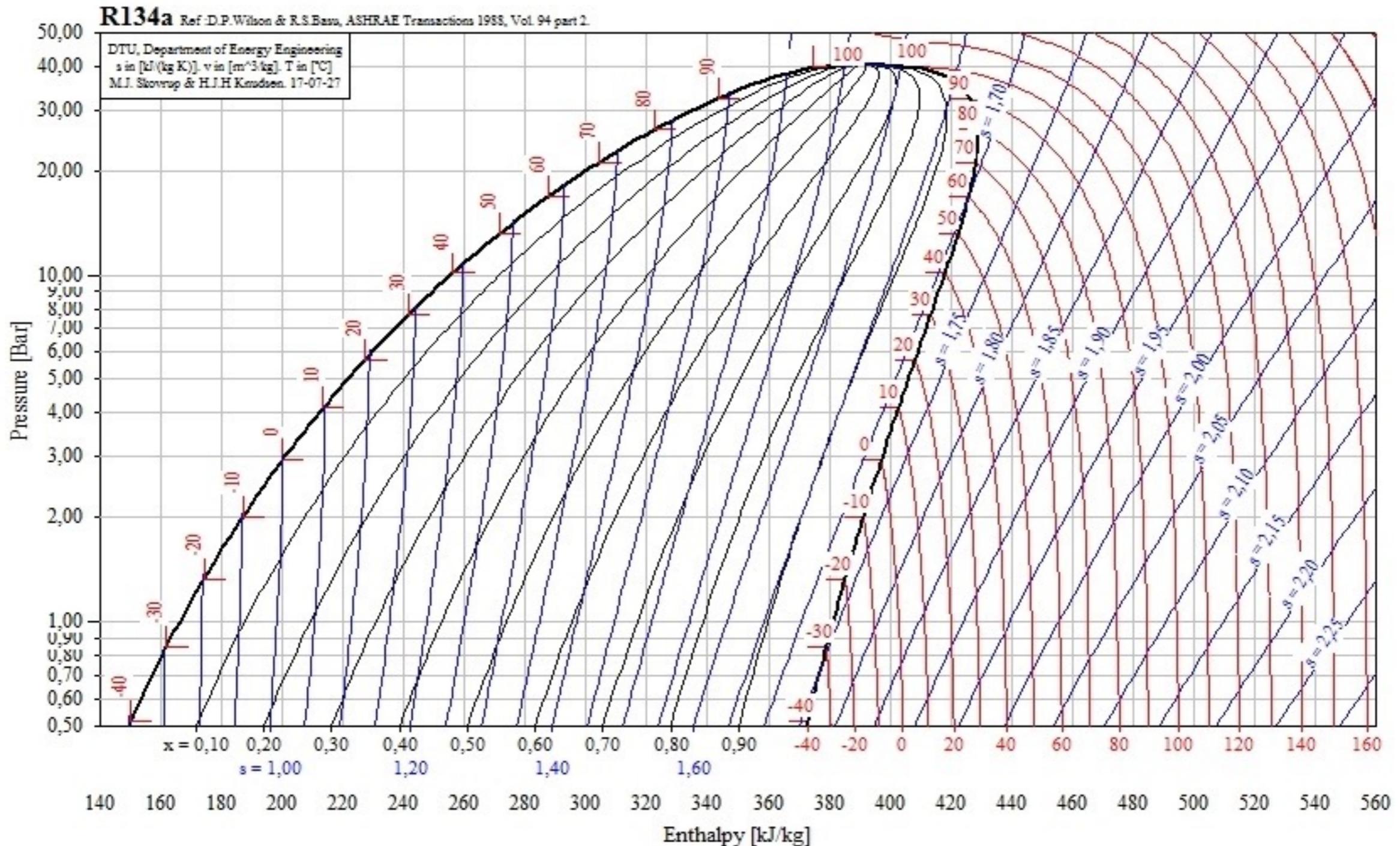


Diagramme des frigoristes du R134a

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \cdot \frac{\text{Cu}^{\text{na}} + \sum_{p \in \text{Cu}^{\text{na}}} b_k^p}{\sum_k b_k^p} \cdot \text{rot } E$$

$$\tilde{H}(j\omega) = d \frac{\sum_k b_k^p}{\sum_j K_j^{\text{na}}} \exp(j\omega)$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

$$\oint \vec{S} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}^{\text{S}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{2\pi Q}{\lambda_0} j \cdot \vec{E} + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{vap}}^{\text{S}}} \right) = 0$$

$$\Delta_{\text{r}} H^{\circ} = \sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}$$

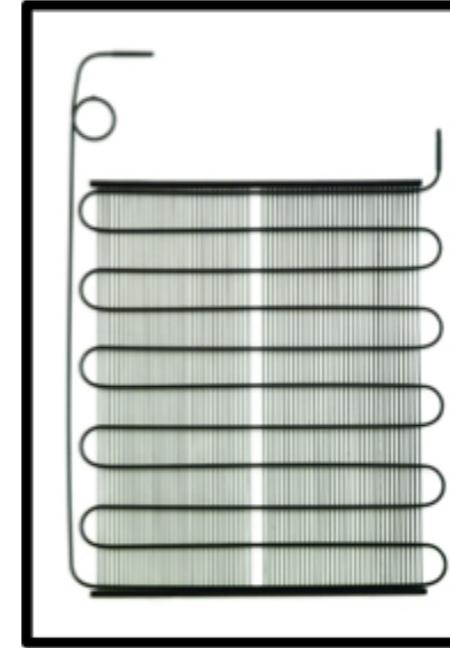
$$\Delta_{\text{r}} G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \gamma \omega \left[\frac{1}{2} v^2 + gz + \right]$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

UN EXEMPLE DE CYCLE INDUSTRIEL : QUELQUES COMPOSANTS POSSIBLES



Compresseur



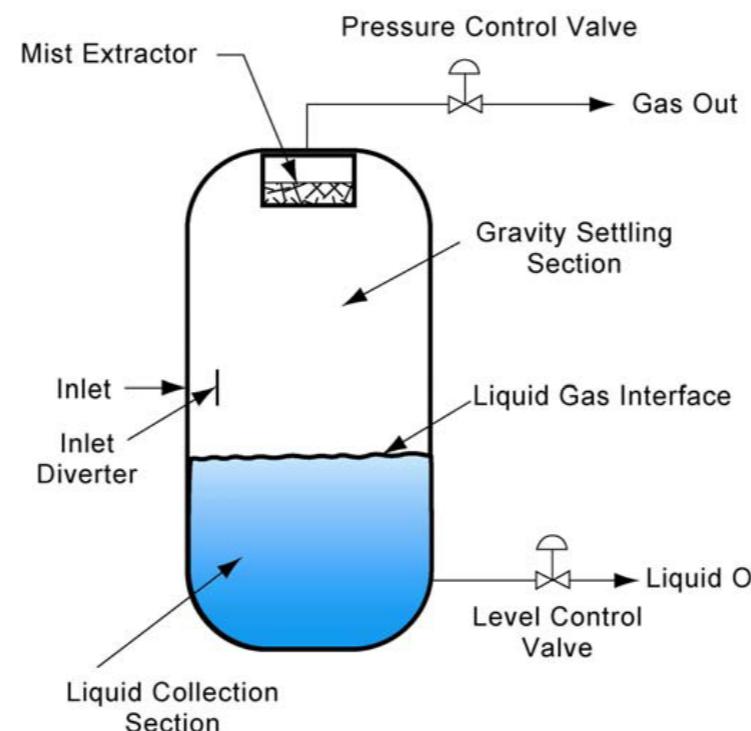
Échangeur de chaleur



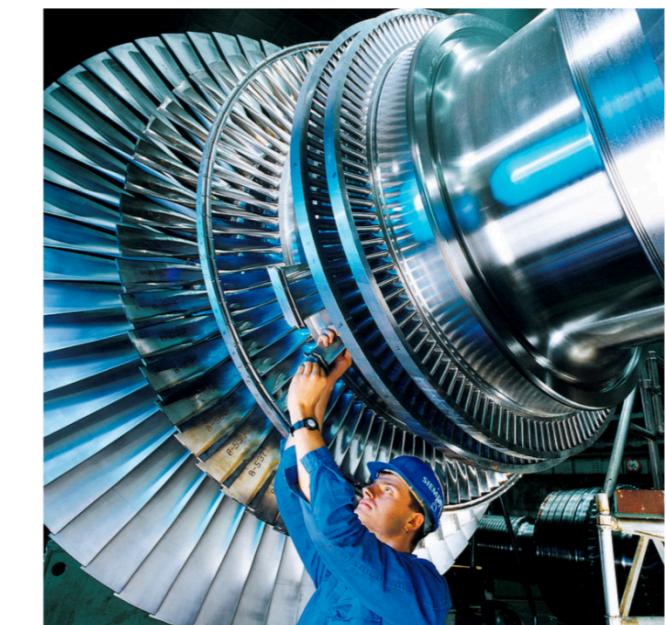
Tuyère



Détendeur



Séparateur / mélangeur diphasique



Turbine

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \cdot \frac{\text{Cu}^{\text{na}} + \sum_{k=1}^n b_k z_k}{p} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot \text{rot } E =$$

$$\tilde{H}(j\omega) = d \frac{\sum_k b_k z_k}{\sum_j K_j \Delta E_j} \exp(j\omega)$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

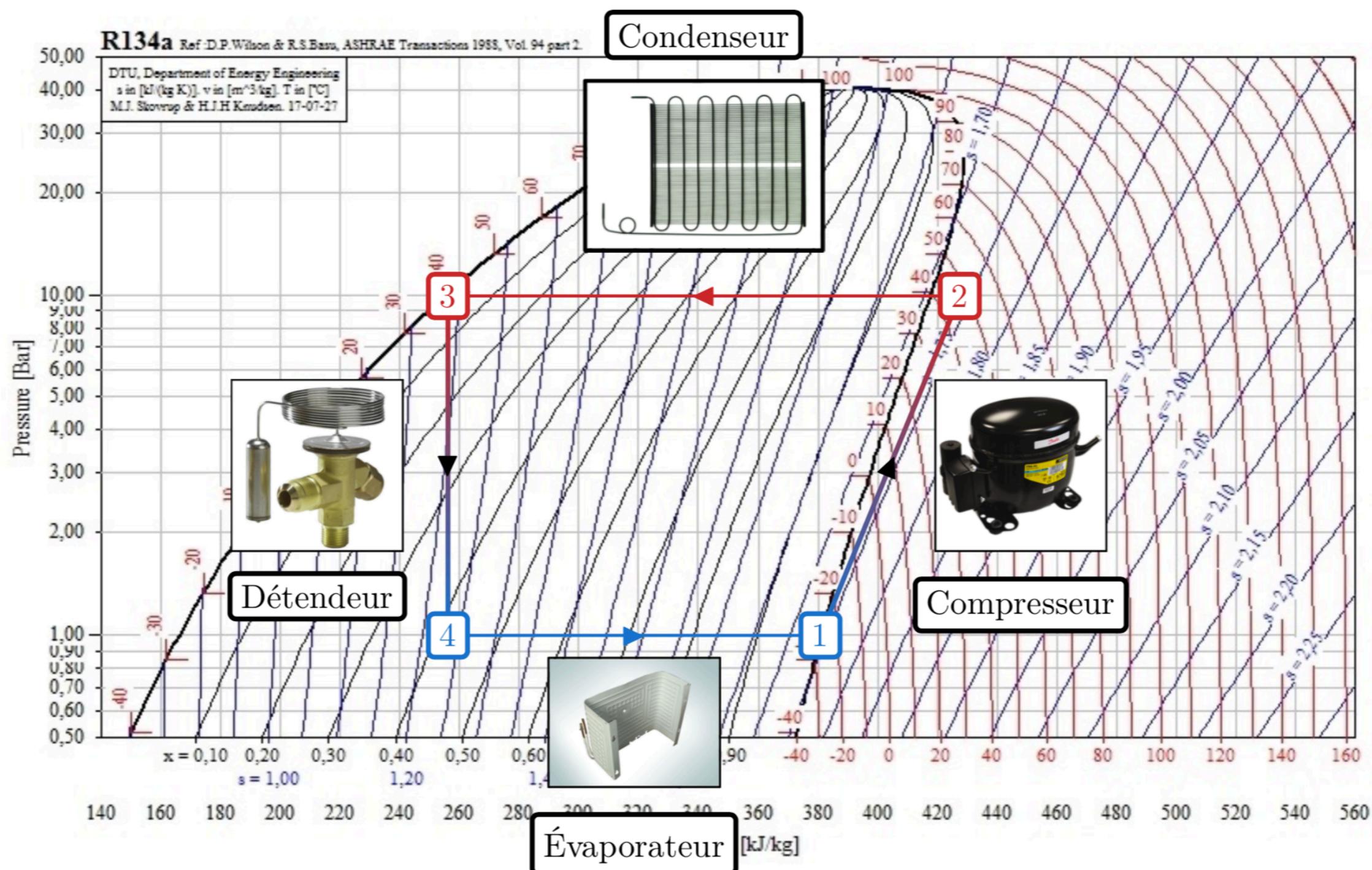
$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{Q}{\lambda_0} \left(\frac{1}{M} \right)^{\frac{1}{2}} = \varphi_0^F \left(\frac{H_{\text{vap}}^{\circ}}{H_{\text{f}}^{\circ}} \right)^{\frac{1}{2}} = 0$$

$$\Delta_r G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial H^{\circ}}{\partial \mu_0} \Big|_{P,T} \gamma \omega$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

UN EXEMPLE DE CYCLE INDUSTRIEL : SYSTÈME RÉFRIGÉRANT



Représentation du cycle en diagramme des frigoristes

$$h|_{\frac{n}{\lambda_0}}^{\circ} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}}, \quad p \in \tilde{H}(j\omega) = d_{\sum_k b_k^* \tilde{H}_k}^{\sum_k \frac{n}{\lambda_0} \tilde{H}_k + \sum_k \frac{n}{\lambda_0} \tilde{H}_k^*} \exp \left(\frac{i}{\pi} \int_0^\pi \text{rot } E \right) =$$

$$\begin{aligned} \oint\!\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}^{\text{S}}} \frac{\mu_0 \omega}{(4\pi\epsilon_0)k_B T_{\text{vap}}(g)} \\ \operatorname{div} \vec{j} &= 0 \\ \partial \frac{\vec{E}}{E} \cdot \vec{j} + \operatorname{div} (\vec{E} \wedge \vec{B}) &= 0 \\ \frac{\lambda_0}{\vec{j} = \gamma \vec{E}} \quad \Delta_r G = \frac{1}{\partial \xi} \overline{\partial} \overline{\Box} G^{\alpha_1 \dots \alpha_n}_{P,T} \overline{\partial} H^{\circ} \mu_0 \overline{\varepsilon}_0 \overline{T} &= 0_{130.71 \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}} \\ \varphi_0^{\mathcal{F}(E_\oplus^{\otimes n} / E_\oplus^{\otimes n})} &= \varphi_0^{\mathcal{F}(H_{2(g)})} \\ -(|\eta_{\text{Ox}}(i)| + |\eta_{\text{Red}}^k(i)|) \mathcal{E} V_i \eta & \end{aligned}$$

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.



Circuit H.P



Détendeur

$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{p} \text{C}^{\text{na}}_{\mathfrak{E}^{(g)}} \pm \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{k} \text{rot } E =$$

$$\begin{aligned} \text{div } \vec{j} &= 0 & \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = d \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}} S} \\ \frac{\partial \vec{M}}{\lambda_0} \cdot \vec{j} &= 0 & \varphi_0^F(E_{\oplus}^{\circ}) &= \varphi_0^F(E_{\ominus}^{\circ}) \frac{\mu_0^{\circ}}{\mu_0^{\circ}(H_{\text{2(g)}})} = 0 \\ \vec{j} &= \gamma \vec{E} & \Delta_r G &= \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \end{aligned}$$

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**

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \frac{Zn^{\text{na}}}{\sin i} \frac{C}{\sin t} \frac{Zn^{\text{na}}}{\sum_k b_k^{\text{na}}} \frac{Zn^{\text{na}}}{\sum_k b_k^{\text{na}}} \text{rot } E =$$

$$\vec{H}(\omega) = d \frac{\sum_k b_k^{\text{na}}}{\sum_j K_j^{\text{na}}} \exp \frac{i \omega}{\tau}$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}^{\text{na}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

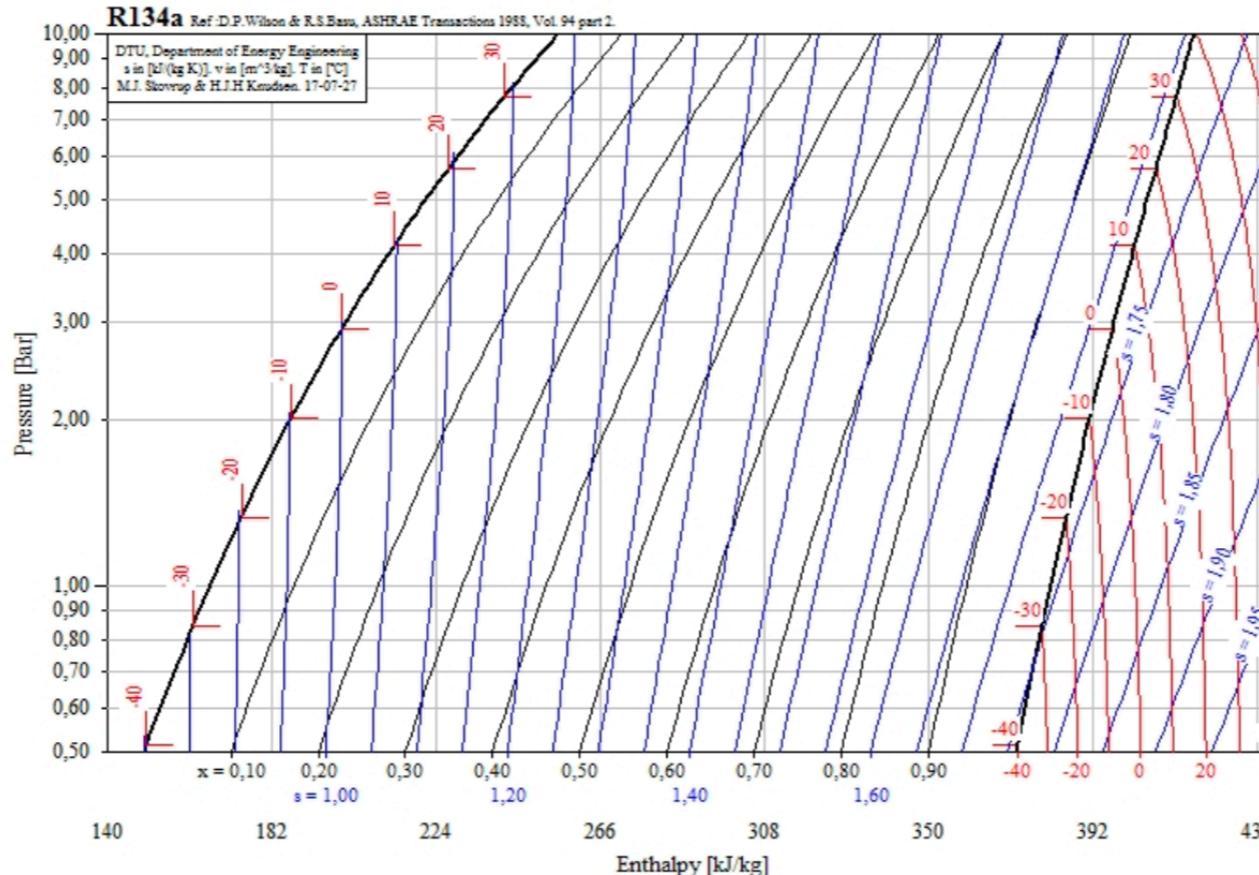
$$\frac{2\pi}{\lambda_0} Q(SM)^{\text{na}} = \varphi_0^F (E_{\oplus}^{\text{na}} \mu_{B_{\oplus}}^{\text{na}})^{(B_{\text{2(g)}})} = 130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$\Delta_r G = \frac{\partial \Delta E}{\partial \xi} \frac{G_{T=0}^{\text{na}}}{2\mu_0} \vec{J}_r H^{\text{na}} \mu_0 \varepsilon_0 \vec{F}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

EXERCICE D'APPLICATION 2

Un fluide s'écoule dans une conduite où un détendeur calorifugé provoque une chute de pression importante. On néglige les variations d'énergie cinétique et potentielle et on étudie l'évolution de divers fluides à travers la vanne :



- Quelles hypothèses courantes peut-on faire ici pour étudier ce détendeur ?
- En déduire une expression simplifiée du premier principe de la thermodynamique en système ouvert.
- Le fluide est du R134a, entre dans le détendeur sous forme de liquide saturant à $P_e = 4,0$ bar et en sort à $P_s = 1,0$ bar. En déduire sa température de sortie, son état physique, et la fraction massique en vapeur.

$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \text{Zn}^{\text{na}} \text{C}^{\text{na}}_{\mathfrak{E}^{(g)}} \pm \text{Zn}^{\text{z+}}_{k^{\text{z+}}} \text{rot } E =$$

$$\int \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}^{\text{H}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{\partial \pi}{\lambda_0} \frac{\partial \vec{j}}{\partial \vec{E}} = \vec{0} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{B_\oplus}^{\text{so}} (B_{2(\mathbb{g})}^{\text{so}})} \right) = 0$$

$$\Delta_{\text{r}} G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial G}{\partial T} \Big|_{P,\xi} \Delta_{\text{r}} H = \sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^\circ$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

COMPOSANTS : COMPRESSEUR & TURBINE

Turbine

On appelle *turbine*, tout dispositif rotatif destiné à utiliser l'énergie totale d'un fluide pour faire tourner un arbre supportant les aubes de la turbine. Le travail utile reçu par le fluide traversant le système ouvert turbine est négatif, c'est donc un moteur : $w_i < 0$ et $\mathcal{P}_i < 0$.

Compresseur

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 $\mathcal{P}_i > 0$.

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \text{Zn}^{\text{na}} \text{Cg}^{\text{na}} \pm \text{Zn}^{\text{z+}} \text{rot E} =$$

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = d \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}} S} = \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \exp \frac{f}{\lambda_0}$$

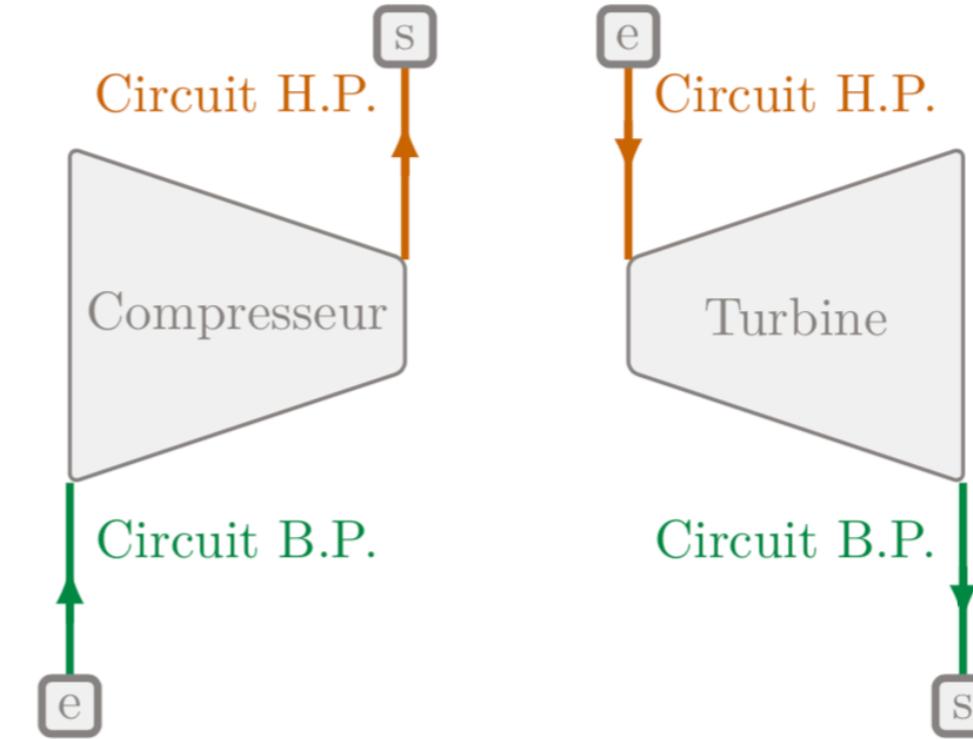
$$\frac{\partial \vec{j}}{\partial t} = \vec{0} + \text{div} \left(\vec{E} \wedge \vec{B} \right) = 0$$

$$\frac{\partial \vec{S}}{\partial t} = \varphi^F \left(E_{\oplus}^{\circ} - E_{\ominus}^{\circ} \right) = 0$$

$$\Delta_r G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} = \frac{\partial G}{\partial P} \Big|_{T,\mu} \Delta_r H^{\circ} = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

COMPOSANTS : COMPRESSEUR & TURBINE



$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{p} \text{C}^{\text{na}}_{\mathfrak{B}^{(g)}} \pm \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{k} \text{rot } E =$$

$$\begin{aligned} \text{div} \vec{j} &= 0 & \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\ \frac{Q}{\lambda_0} (S M)^{\circ} &= \varphi_0^F (E_{\oplus}^{\circ} - E_{\ominus}^{\circ})^{\text{H}_2(\text{g})} = 0 & \Delta_r H^{\circ} &= \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ} \\ \vec{j} &= \gamma \vec{E} & \Delta_r G &= \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \end{aligned}$$

mol^{-1}

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 :

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

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \frac{Zn^{\text{na}}}{\sin i} \frac{C}{\sin t} \frac{G}{\sin \theta} \frac{z}{k} \text{rot } E$$

$$\vec{H}(j\omega) = d \sum_j \vec{K} \vec{\Delta} \vec{E} = \exp \frac{d}{\partial \lambda}$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

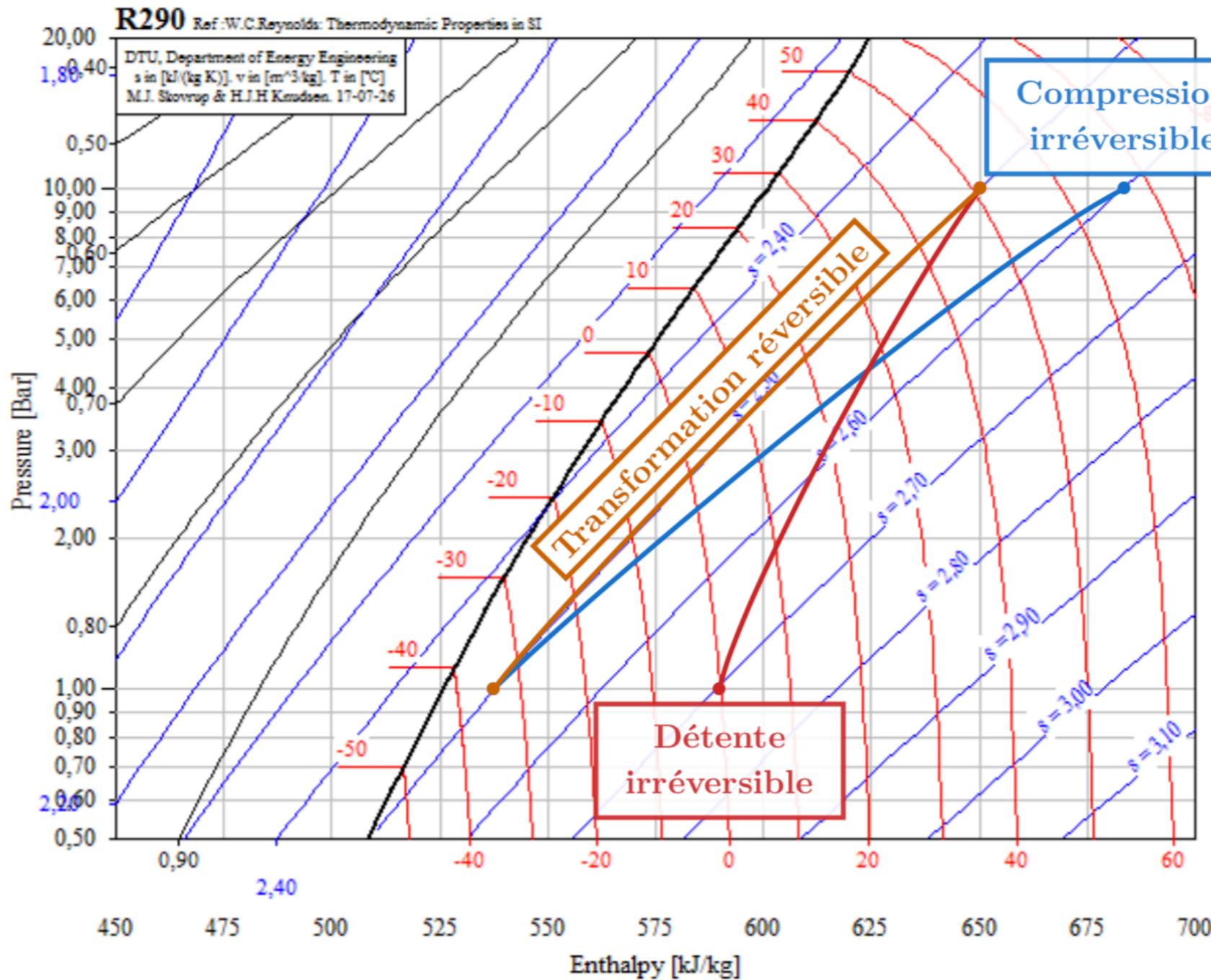
$$\oint \vec{S} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{1}{\lambda_0} \frac{Q}{\lambda_0} \left(\vec{S} \vec{M} \right)^{\circ} = \varphi_0^F \left(\vec{E} \wedge \vec{B} \right) = 0$$

$$\Delta_r G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial \xi}{\partial \omega} \Big|_{P,T} \frac{\partial P}{\partial \omega} \Big|_{P,T} = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

COMPOSANTS : COMPRESSEUR & TURBINE



$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{p} \text{C}^{\text{na}}_{\mathfrak{B}^{(g)}} \pm \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{k} \text{rot } E =$$

$$\int \vec{j} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\vec{j} \cdot \vec{E} \right) + \text{div} \left(\vec{E} \wedge \vec{B} \right) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\vec{S} M^{\text{vap}} \right) = \varphi_0^F (E_{\oplus} - \mu_{B_{\oplus}}^{\text{vap}}) (H_{\text{vap}}) = 0$$

$$\lambda_0 = \gamma \vec{E}$$

$$\Delta_r G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial G}{\partial P} \Big|_{P,T} \frac{\partial H}{\partial \mu_0} \Big|_{P,T} \frac{\partial H}{\partial \varepsilon_0} \Big|_{P,T}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

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 :

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

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \frac{Zn^{\text{na}}}{\sin i} \frac{Cn^{\text{na}}}{\sin t} \frac{Zn^{\text{na}}}{\sin b_k^{\text{na}}} \frac{Zn^{\text{na}}}{\sin k} \text{rot } E$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= 0 & \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\ \frac{2\pi}{\lambda_0} j &= \vec{E} + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{vap}}^{\circ} (E_{\oplus}^{\circ})} \right) = 0 & \Delta_{\text{vap}} &= \frac{\Delta_{\text{vap}}}{T_{\text{vap}}} \\ \vec{j} &= \gamma \vec{E} & \Delta_{\text{r}} G &= \frac{\partial G}{\partial \xi} \frac{\partial G}{\partial T} \frac{\partial G}{\partial P} \frac{\partial G}{\partial \mu_0} \frac{\partial G}{\partial \varepsilon_0} \frac{\partial G}{\partial \omega} \\ -(|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri} & & & \end{aligned}$$

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	$5,26 \times 10^{-2}$

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

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

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

$$\tilde{h}_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \text{Zn}^{\text{na}} \text{C}^{\text{na}}_{\mathfrak{E}^{(g)}} \pm \text{Zn}^{\text{na}}_{\mathfrak{k}} \text{rot } E =$$

$$\int \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{j}{\lambda_0} \right) + \nabla \cdot \vec{E} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{rel}}^{\text{vap}}} \right) = 0$$

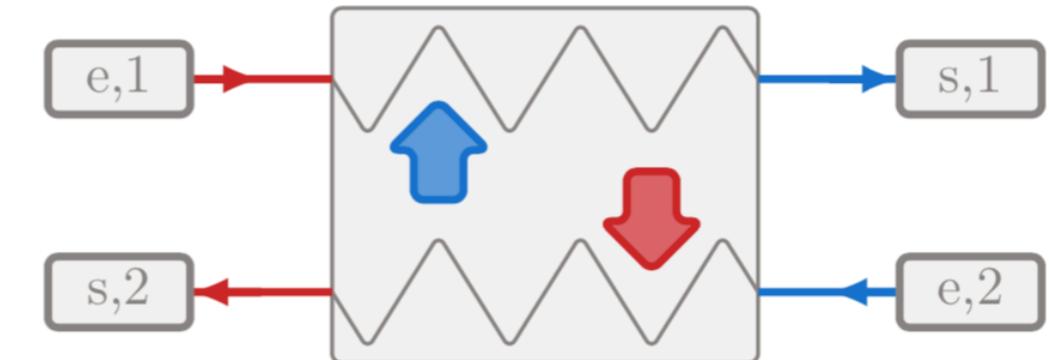
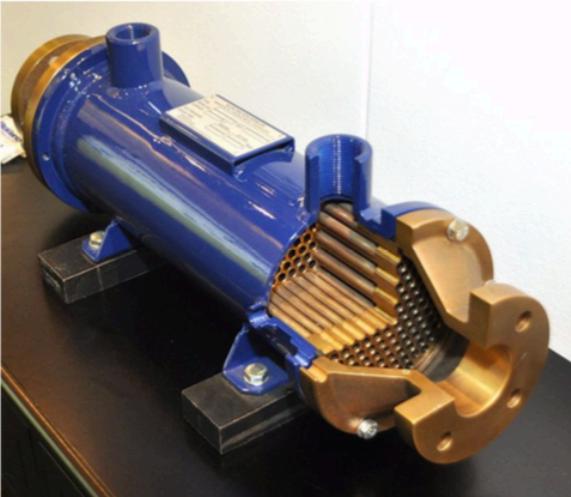
$$\Delta_{\text{vap}} = \frac{\Delta_{\text{vap}}}{T_{\text{vap}}}$$

$$- (\eta_{\text{ox}}(i)) + |\eta_{\text{red}}(i)| \mathcal{E} V_{ri}$$

COMPOSANTS : ÉCHANGEUR

Échangeur thermique

On appelle échangeur thermique calorifugé, tout dispositif permettant de transférer de l'énergie thermique d'un fluide vers un autre, sans les mélanger.



Echangeur

$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na} \mp \frac{1}{p}} \text{C}^{\frac{1}{p}}_{\mathfrak{B}^{(g)}} \pm Z \mathfrak{n}^z_k \text{ rot } E$$

$$\begin{aligned} \text{div} \vec{j} &= 0 \\ \frac{\partial \vec{j}}{\lambda_0} \cdot \vec{E} &+ \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0^{\text{vap}}} \right) = 0 \\ \Delta_{\text{vap}} G &= \varphi_0^F (E_{\oplus}^{\circ}) \mu_0^{\text{vap}} (B_{\text{2(g)}}) = 0 \\ \Delta_{\text{vap}} S &= \frac{\Delta_{\text{vap}} H^{\circ}}{T_{\text{vap}}} = \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \end{aligned}$$

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 :

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

$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \frac{Zn^{\text{na}}}{\sin i} \frac{Ch^{\text{na}}}{\sin t} \frac{Zn^{\text{na}}}{\sum_k b_k^{\text{na}}} \frac{Zn^{\text{na}}}{\sum_k K_k^{\text{na}}} \frac{\text{rot } E}{\exp \frac{f}{\partial \lambda}}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= 0 & \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}^S} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\ \frac{2\pi}{\lambda_0} \frac{j}{(SM)^{\gamma_{\text{vap}}}} &= \varphi_0^F \left(\frac{H^{\circ}}{P_0^{\text{vap}}} \right) = 0 & 130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} &= \Delta_f H_i^{\circ} = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ} \\ j &= \gamma \vec{E} & \Delta_r G &= \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial H}{\partial \mu_0} \frac{\partial P}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \gamma \omega \\ -(|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri} & \end{aligned}$$

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 $(1,1) \rightarrow (2,1)$ et D_2 dans la conduite $(1,2) \rightarrow (2,2)$. 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 $D_1 = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

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

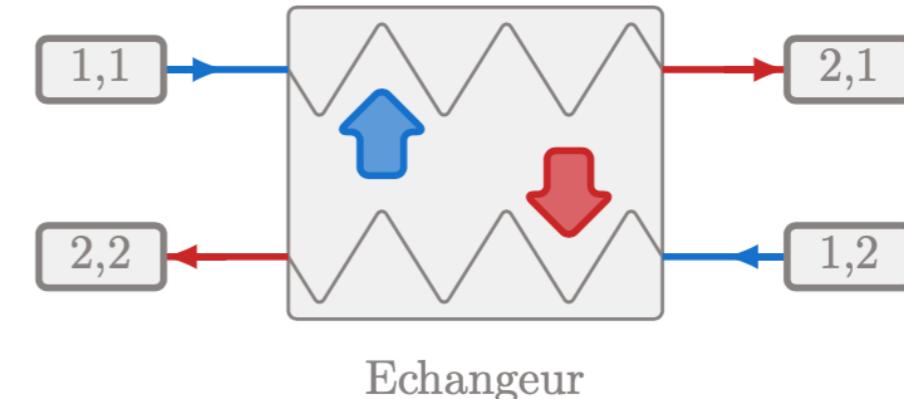


Fig. 8.1 – Schéma d'échangeur à contre-courant

$$\tilde{h}_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{p} \text{C}^{\text{na}}_{\mathfrak{B}^{(g)}} \pm \frac{\text{Zn}^{\text{zr}}}{k} \text{rot } E =$$

$$\tilde{H}(\mathbf{j}\omega) = d \frac{\sum_k b_k^{\text{zr}}}{\sum_j K_j^{\text{zr}}} \exp \frac{if}{\partial \lambda}$$

$$\operatorname{div} \vec{j} = 0$$

$$\oint \vec{S} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}^{\text{zr}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{B}}^{\text{zr}} (E_{\oplus}^{\text{zr}})} \right) = 0$$

$$\Delta_{\text{r}} H^{\circ} = \sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E}$$

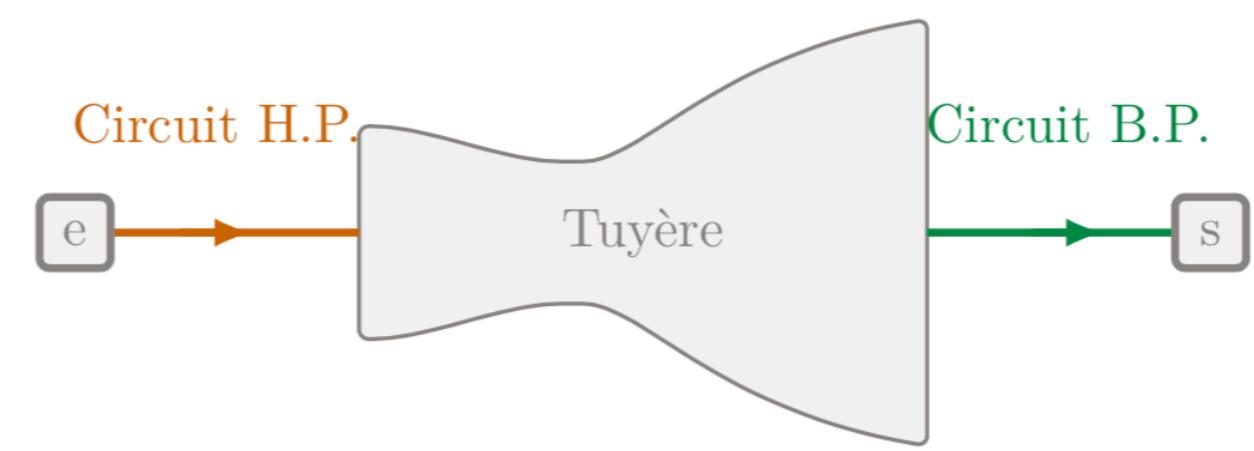
$$\Delta_{\text{r}} G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial G}{\partial P} \Big|_{T,\xi} \Delta_{\text{r}} H^{\circ} \mu_0 \bar{\varepsilon}_0 \frac{\partial}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \xi} \Big|_{T,P} \frac{1}{2} v^2 + gz +$$

$$- (|\eta_{\text{Ox}}(i)| + |\eta_{\text{Red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

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.



$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{p} \text{C}^{\text{na}}_{\mathfrak{B}^{(g)}} \pm \text{Zn}^{\text{na}}_{k^{\text{na}}} \text{rot } E =$$

$$\int \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = d \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}} S} = \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{\partial \pi}{\lambda_0} \frac{\partial j}{\partial t} \cdot \vec{E} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{B_\oplus}^{\text{so}} (\text{H}_2(\text{g}))} \right) = 0$$

$$\Delta_{\text{r}} G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{F,T} = \frac{G_{T,\infty} - G_F}{2\mu_0} \mathcal{J}_{\text{r}} H^\circ \mu_0 \bar{\varepsilon}_0 \frac{T}{\partial \xi}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

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 :

$$\frac{1}{2} v_s^2 + [h]_E^S = 0$$

$$v_s = \sqrt{2(h_S - h_E)}$$

$$h|_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{\sin i} \frac{\text{Cn}^{\text{na}}}{\sin t} \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{\sin b} \frac{\text{Cn}^{\text{na}}}{\sin k} \text{rot } E =$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= 0 & \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = \frac{d}{\Delta_{\text{vap}}} \frac{\mu_0}{T_{\text{vap}}} \\ \frac{Q}{\lambda_0} (SM)^{\circ} &= \varphi_0^F (E_{\oplus}^{\circ} - \mu_{B_{\oplus}}^{\circ})^{\text{H}_2(\text{g})} = 0 & \Delta_{\text{vap}} &= \frac{130,7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}}{\sum_i \nu_i \Delta_{\text{f}} H_i^{\circ}} \\ \vec{j} &= \gamma \vec{E} & \Delta_{\text{r}} G &= \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{G_{T=0}^{\infty} - G}{2 \mu_0} \vec{J}_{\text{r}} H \mu_0 \bar{\varepsilon}_0 \vec{P} \\ -(|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri} & \end{aligned}$$

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.

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

$$h]_c^{\sigma} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{+\infty} \mp \text{Zn}_{(\text{S})}^{\pm} \text{Cg}_{0\pm}^{\pm} \text{Zn}_{\pm}^{\mp} \text{rot } E = \\ \underline{H}(\text{j}\omega) = d_{\sum_k \frac{b_k}{k} \text{e}^{\text{j}\omega k}}^{\sigma} \exp \left(\frac{\text{j}\Delta E}{\sum_j \frac{d_j}{j}} \right)$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{\frac{\partial}{\partial x}} &= 0 \\ \frac{\partial \vec{\pi}}{\partial \vec{x}} \cdot \vec{\frac{\partial}{\partial x}} &= \operatorname{div} \left(\vec{\frac{\partial}{\partial x}} \cdot \vec{\frac{\partial}{\partial x}} \right) = 0 \\ \frac{\lambda_0}{\vec{x} = \gamma \vec{E}} &= \Delta_r G = \frac{\overline{\delta G}}{\overline{\delta \xi}} \sqrt{\frac{G_{T, \text{max}}}{2 \mu_0}} \overline{\delta H} \overline{\mu_0 \epsilon} \overline{\delta P} \end{aligned}$$

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}).

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \text{Zn}^{\text{na}} \text{C}^{\text{na}} \text{Zn}^{\text{na}} \text{rot } E =$$

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = d \frac{\mu_0}{\sum_j K_j \Delta E_j} \exp \frac{i}{\partial \lambda}$$

$$\text{div} \vec{j} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot \vec{j} + \text{div} \left(\vec{E} \wedge \vec{B} \right) = 0$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot \vec{j} + \varphi_0^F \left(E_{\oplus}^{\circ} - \mu_{E_{\oplus}}^{\circ} \right) = 0$$

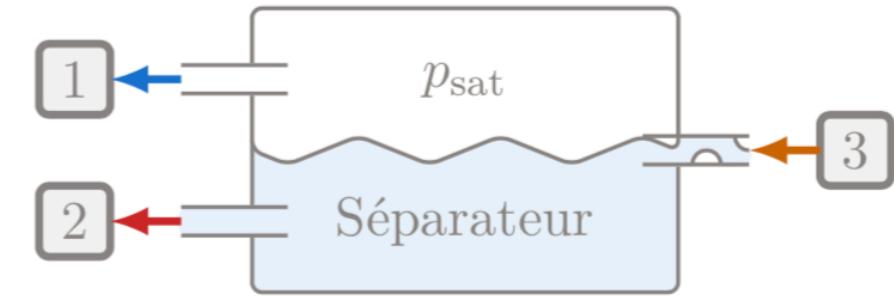
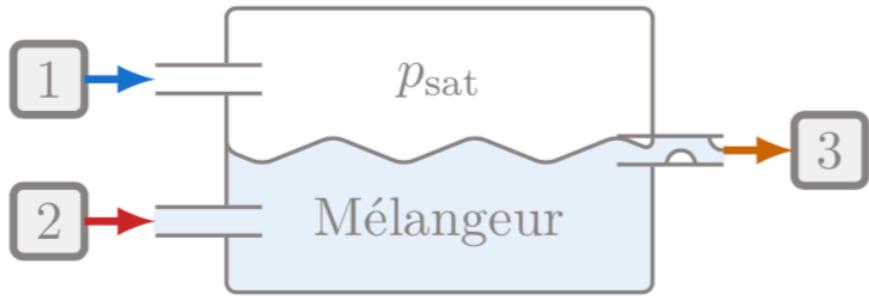
$$\Delta_{\text{vap}} S = \frac{\Delta_{\text{vap}} H}{T_{\text{vap}}}$$

$$\frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot \vec{j} = \gamma \vec{E}$$

$$\Delta_r G = \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} \frac{\partial \xi}{\partial \omega} \Big|_{P,T} \frac{\partial \omega}{\partial \mu_0} \frac{\partial \mu_0}{\partial \varepsilon_0} \frac{\partial \varepsilon_0}{\partial T}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

COMPOSANTS : MÉLANGEUR & SÉPARATEUR



Bilan énergétique d'un séparateur isobare calorifugé

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

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

Bilan énergétique d'un mélangeur isobare calorifugé

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

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

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \frac{\pi}{p} \text{Zn}^{\text{na}} \text{C}^{\text{na}}_{\text{Zn}} \text{rot } E =$$

$$\vec{H}(j\omega) = d \sum_j \vec{K}^{\text{na}} \vec{E} = \exp(j\omega)$$

CYCLE INDUSTRIEL : SYSTÈME RÉFRIGÉRANT ET PAC

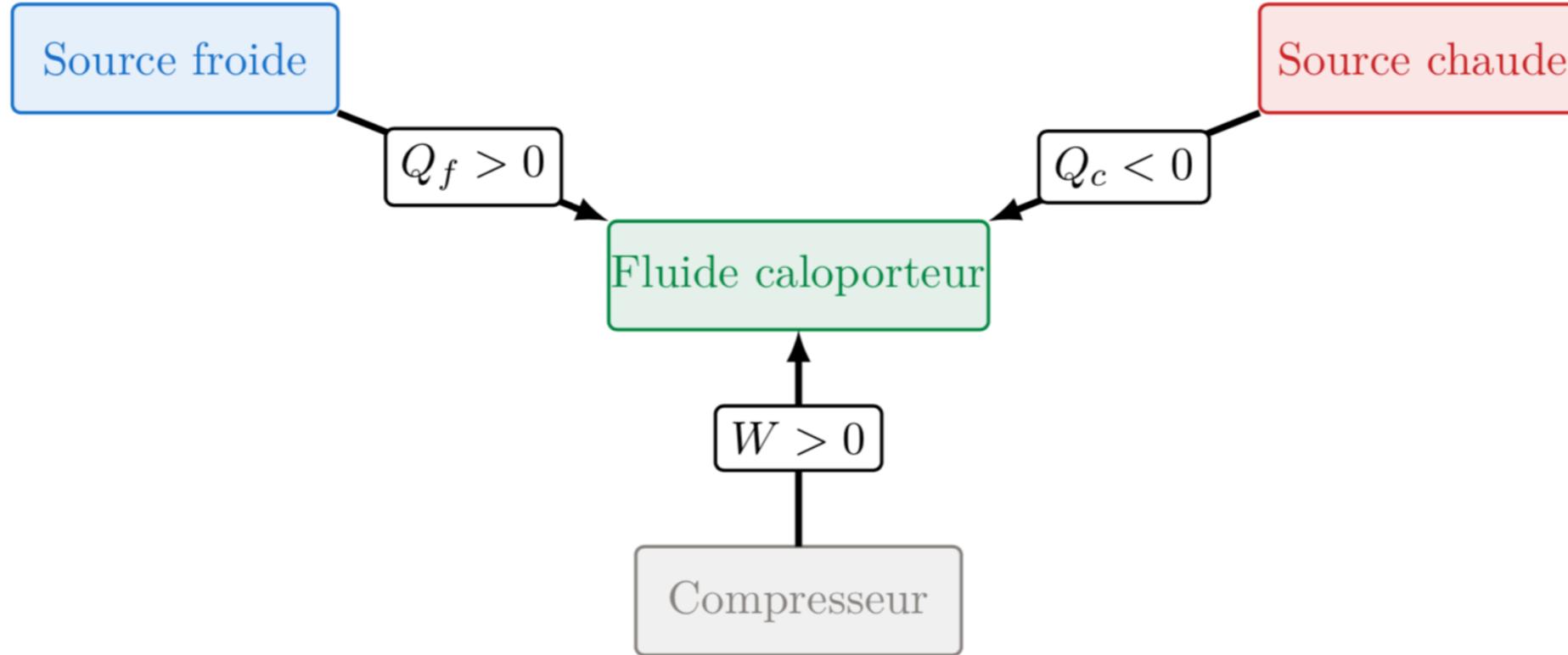
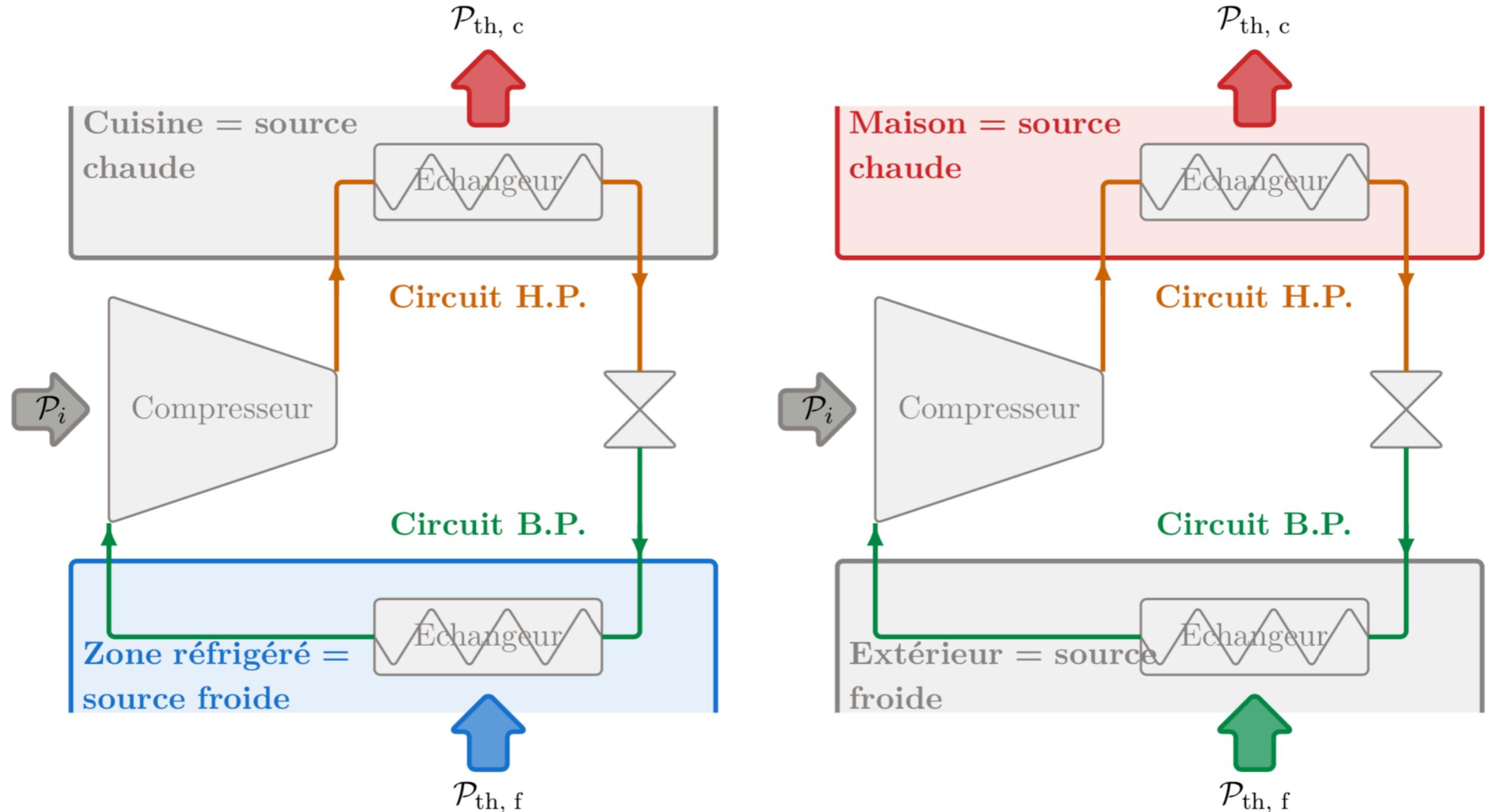


Diagramme des échanges énergétiques, les flèches donnent le sens « conventionnel » de la thermodynamique

CYCLE INDUSTRIEL : SYSTÈME RÉFRIGÉRANT ET PAC



Schématisation des cycles. À gauche : système frigorifique ; à droite : pompe à chaleur

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \cdot \frac{\text{Cu}^{\text{na}} \mp \text{Zn}^{\text{na}}}{p} \cdot \frac{\text{Cu}^{\text{na}} \pm \text{Zn}^{\text{na}}}{\sum_k b_k^{\text{na}}} \cdot \text{rot } E = d \sum_j K_j^{\text{na}} \cdot \frac{\text{rot } E}{\sum_k b_k^{\text{na}}} = \exp \frac{f}{\partial \lambda}$$

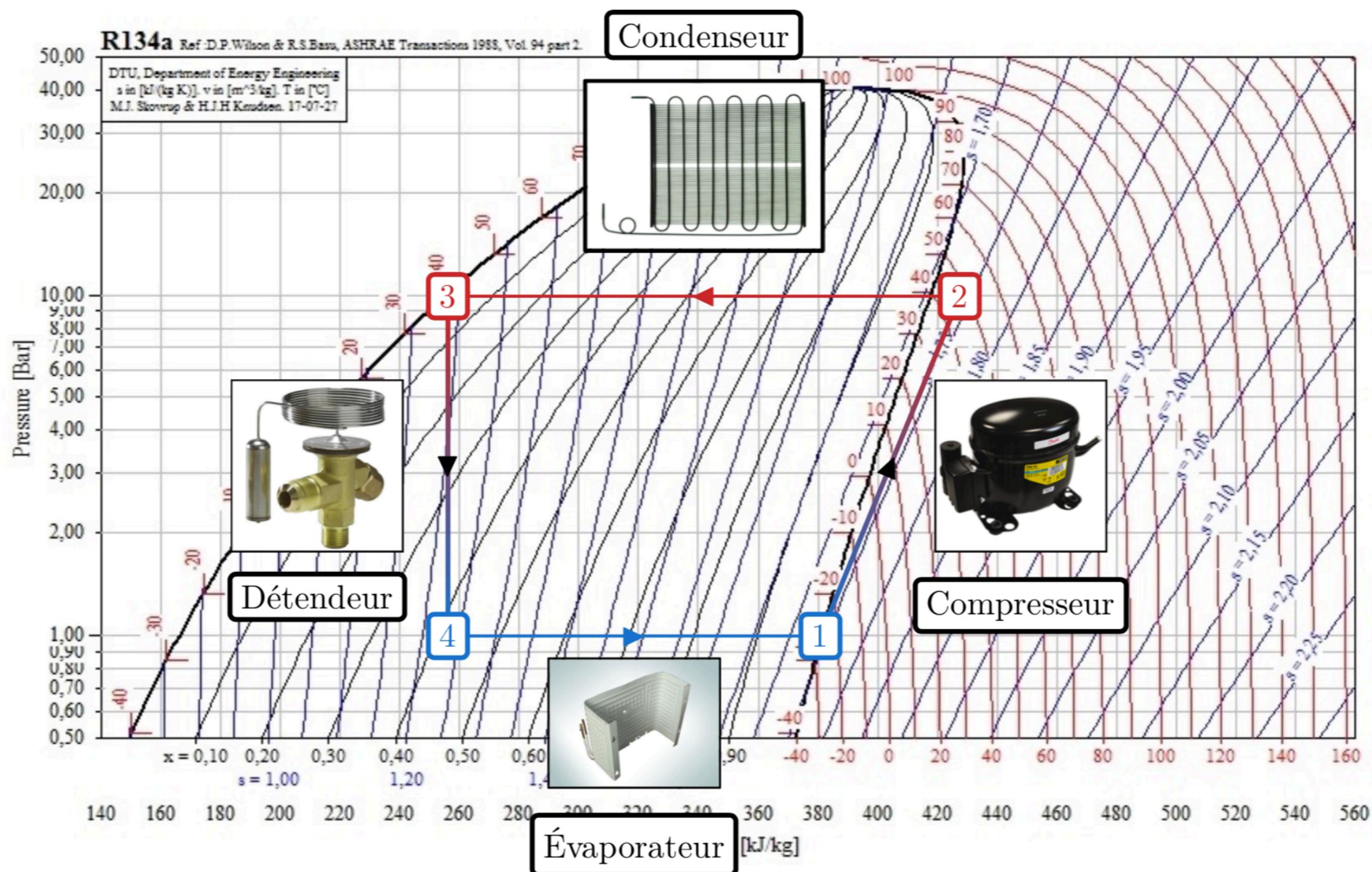
$$\operatorname{div} \vec{j} = 0 \quad \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = d \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}} S} = \frac{\Delta_{\text{vap}}}{T_{\text{vap}}} \cdot \frac{\mu_0}{\gamma E}$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial T} \left(\bar{S} M \right)_{\text{vap}} = \varphi_0^F \left(E_{\oplus} - \mu_{E_{\oplus}}^{\circ} \right)_{\text{vap}} = 0 \quad 130,71 \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \quad \Delta_r H_i^{\circ} = \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ}$$

$$\vec{j} = \gamma \vec{E} \quad \Delta_r G = \frac{\partial \Delta G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} = \frac{\partial \Delta G}{\partial \mu_0} \Big|_{P,T} = \frac{\partial \Delta G}{\partial \omega} \Big|_{P,T} = \frac{\partial \Delta G}{\partial v} \Big|_{P,T} = \frac{\partial \Delta G}{\partial z} \Big|_{P,T}$$

$$- (|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri}$$

CYCLE INDUSTRIEL : SYSTÈME RÉFRIGÉRANT

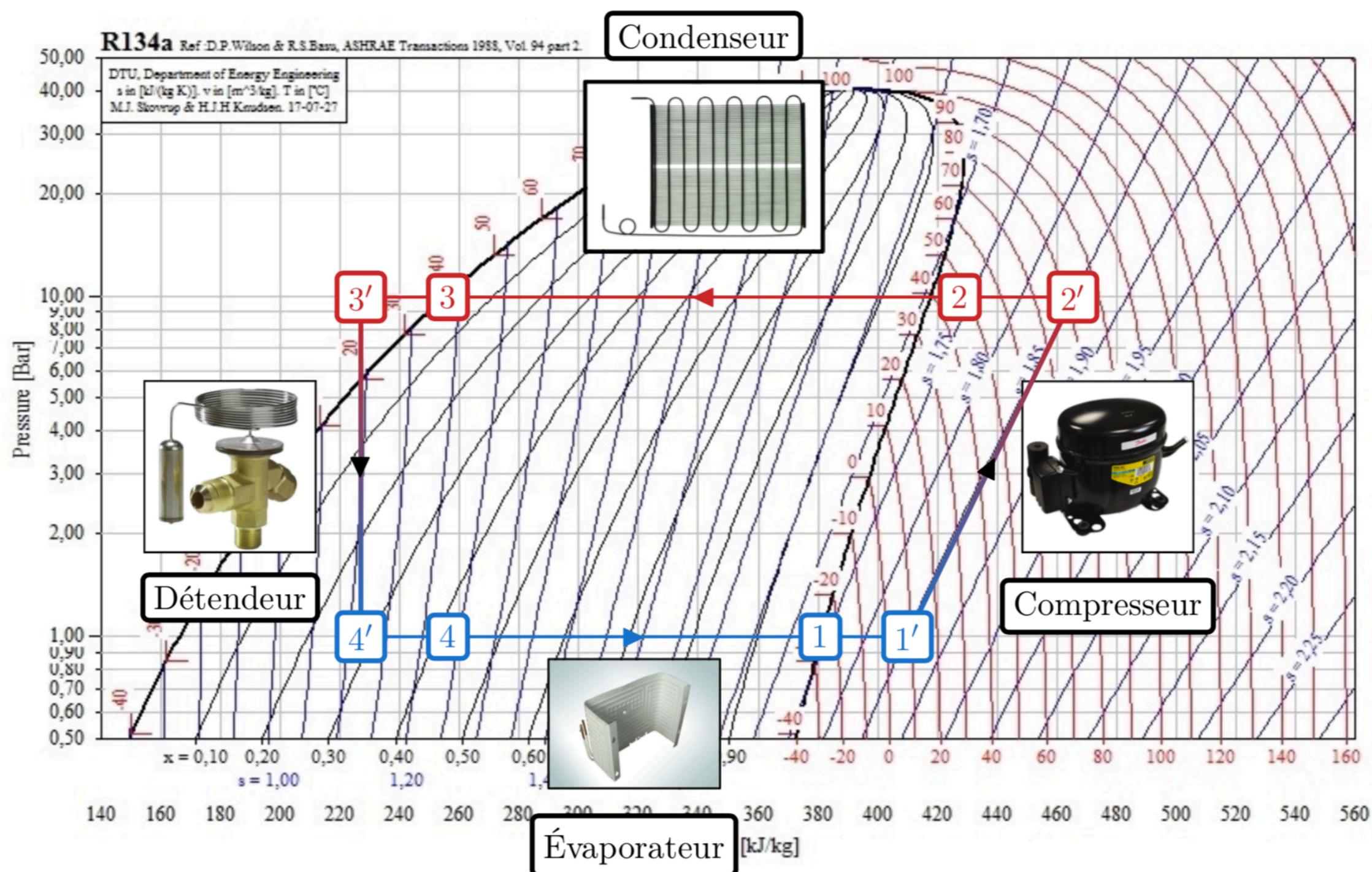


Représentation du cycle en diagramme des frigoristes

$$h_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \cdot \frac{\text{Cu}^{\text{na}} \mp \text{Zn}^{\text{na}}}{p} \cdot \frac{\text{Cu}^{\text{na}} \pm \text{Zn}^{\text{na}}}{\sum_k b_k^{\text{na}}} \cdot \text{rot } E = d \sum_j \underline{K} \underline{\Delta E} = \exp \frac{f}{\partial \lambda}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{j} &= 0 & \oint \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} &= \frac{Q_{\text{int}}}{\varepsilon_0} H_{\text{ALI}} = d \frac{\mu_0}{\Delta_{\text{vap}} S} \\ \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot \vec{j} &= 0 & \operatorname{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_0^{\text{vap}}} \right) &= 0 \\ \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot \vec{j} &= \varphi_0^F \left(E_{\oplus}^{\circ} - \mu_0^{\text{vap}} \right) \vec{B}_{\oplus}^{\text{vap}} & \Delta_r H^{\circ} &= \sum_i \nu_i \Delta_f H_i^{\circ} \\ \vec{j} &= \gamma \vec{E} & \Delta_r G &= \frac{\partial G}{\partial \xi} \Big|_{P,T} = \frac{\partial G}{\partial P} \Big|_{T,\xi} \vec{P} \\ -(|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri} & \end{aligned}$$

CYCLE INDUSTRIEL : SYSTÈME RÉFRIGÉRANT



Optimisation du cycle par surchauffe et désurchauffe

$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \text{Zn}^{\text{na}} \text{C}^{\text{na}}_{\text{g}} \pm \text{Zn}^{\text{na}} \text{rot } E =$$

$$\underline{H}(\mathbf{j}\omega) = d \frac{\sum_k b_k^*}{\sum_j K_j^*} \underline{E} = \exp \frac{i}{\omega}$$

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 :

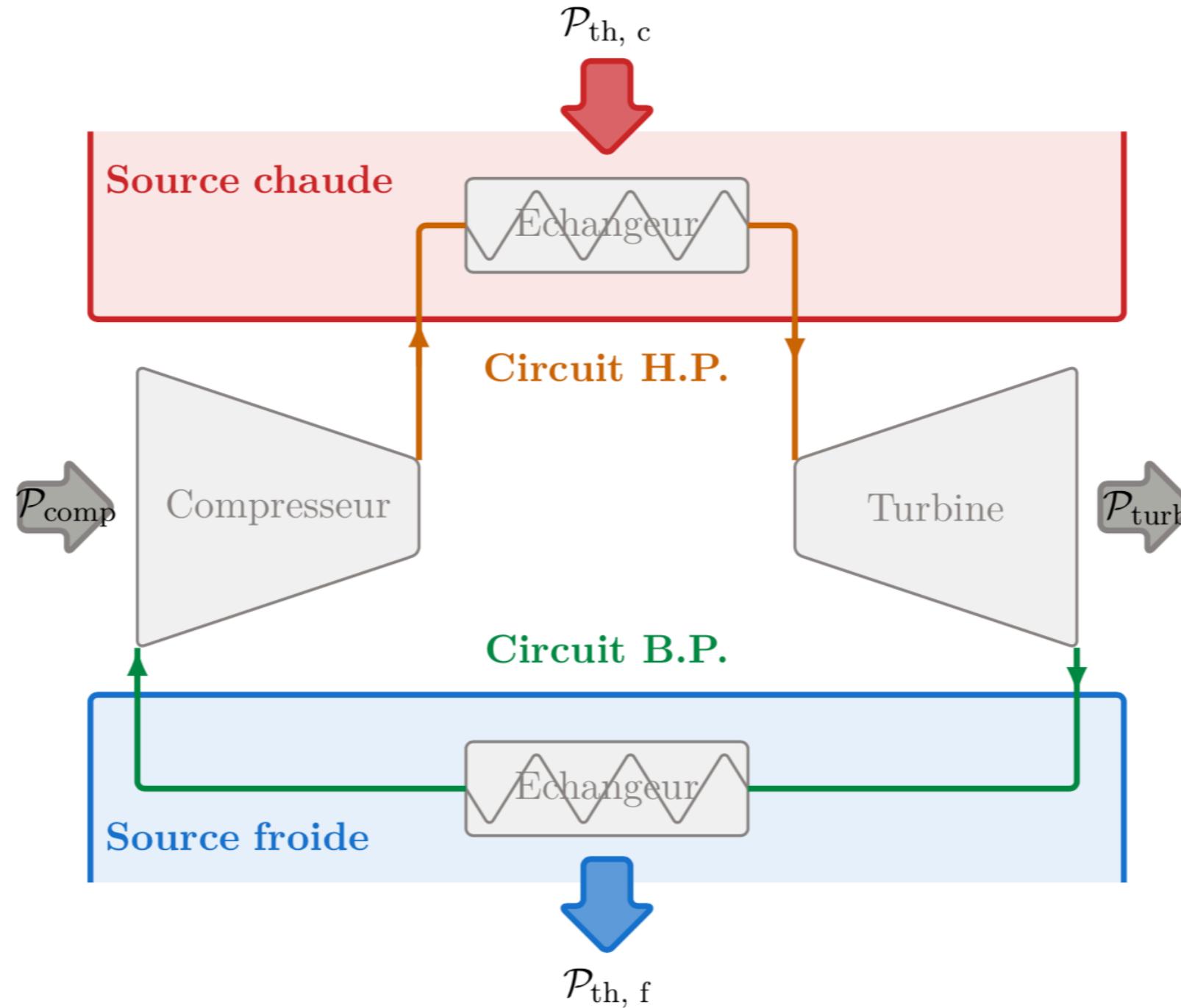
$$\text{COP} = e = \frac{\text{but}}{\text{coût}} = \frac{\mathcal{P}_{\text{th, f}}}{\mathcal{P}_i}$$

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 : MOTEUR



Schématisation d'un cycle moteur

$$h]_e^{\text{na}} = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{\text{th}} \text{Cu}^{\text{na}} \mp \frac{\text{Zn}^{\text{na}}}{p} \text{C}^{\text{na}}_{\mathfrak{B}^{(g)}} \pm \frac{\text{Zn}^{\text{z+}}}{k} \text{rot } E =$$

$$\begin{aligned} \text{div} \vec{j} &= 0 \\ \frac{2\pi}{\lambda_0} \vec{j} \cdot \vec{E} + \text{div} \left(\frac{\vec{E} \wedge \vec{B}}{\mu_{\text{rel}}^{\text{vap}}} \right) &= 0 \\ \vec{j} = \gamma \vec{E} & \\ -(|\eta_{\text{ox}}(i)| + |\eta_{\text{red}}(i)|) \mathcal{E} V_{ri} & \end{aligned}$$

CYCLE INDUSTRIEL : COP MOTEUR

Coefficient de performance d'un moteur

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

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