

TD 11 - Thermodynamique industrielle

03/12/2025

1 Premier principe industriel (cours, III)

On considère le système représenté sur la figure 1, schématisant un élément de machine thermique à travers lequel un fluide s'écoule. L'écoulement du fluide à travers cet élément est supposé stationnaire. On cherche à redémontrer le premier principe industriel dans cet exercice.

1. On définit Σ le système contenant l'élément de machine thermique. Ce système est-il fermé ou ouvert ? Peut-on alors appliquer le premier principe de la thermodynamique à ce système ?
2. On définit δm_e la masse entrant dans Σ entre t et $t + dt$, et δm_s la masse sortant de Σ entre t et $t + dt$. Définir ainsi un système Σ^* qui est fermé entre les instants t et $t + dt$.
3. Soit $m(t)$ la masse contenue dans Σ à l'instant t et $m^*(t)$ la masse contenue dans Σ^* à l'instant t . Effectuer un bilan de masse sur le système fermé Σ^* et montrer qu'on a $\delta m_e = \delta m_s = \delta m$.

Si on note U^* l'énergie interne contenue dans Σ^* , E_c^* et E_p^* les énergies cinétiques et potentielles de pesanteur contenues dans Σ^* . Les mêmes variables sans $*$ correspondent aux quantités contenues dans Σ . On note c la vitesse du fluide et en minuscule les grandeurs massiques : u , v , h , w_u et q correspondent à l'énergie interne, le volume, le travail utile et la chaleur *massiques*. On cherche à utiliser le premier principe appliqué à notre système fermé Σ^* entre les instants t et $t + dt$

$$dU^* + dE_c^* + dE_p^* = \delta W + \delta Q. \quad (1)$$

4. Exprimer $dU^* = U^*(t + dt) - U^*(t)$ puis utiliser le fait que l'écoulement est stationnaire pour donner la relation entre dU^* , δm , u_e et u_s .
5. Faire de même pour dE_m^* et dE_p^* .

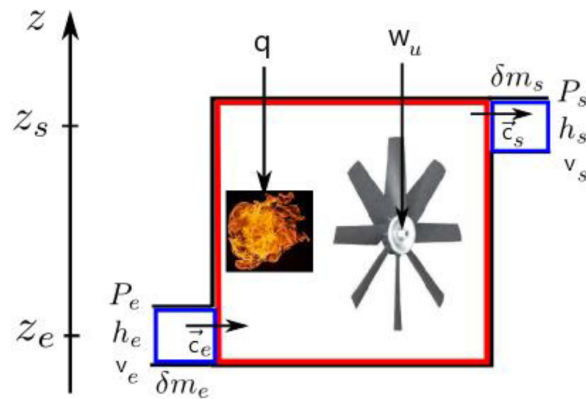


FIGURE 1 – Élément de machine thermique

- On a $\delta W = \delta W_p + \delta W_u$, où δW_p correspond au travail des forces de pression et $\delta W_u = \delta W_i$ est le travail utile (ou travail indiqué). Exprimer δW_p en fonction de P_e , P_s , dV_e et dV_s .
- Exprimer maintenant, en faisant attention aux signes, dV_e en fonction de δm et de v_e et dV_s en fonction de δm et de v_s . On rappelle que $v = 1/\rho$ est le volume massique, inverse de la masse volumique.
- On note $w_u = \delta W_u/\delta m$ et $q = \delta Q/\delta m$. Appliquer le premier principe à Σ^* , utiliser tous les résultats obtenus et montrer qu'on aboutit à la relation

$$\left[h + \frac{c^2}{2} + gz \right]_e^s = w_u + q \quad (2)$$

2 Enthalpie de changement d'état - II

Dans un calorimètre entièrement calorifugé et de capacité thermique négligeable, on introduit une masse $m_l = 1,00 \text{ kg}$ d'eau liquide de température $T_1 = 20^\circ\text{C}$. On y ajoute une masse $m_g = 0,50 \text{ kg}$ de glace de température $T_2 = 0^\circ\text{C}$. On donne l'enthalpie de changement d'état de l'eau $\Delta h_{\text{fus}} = 3,3 \times 10^2 \text{ kJ/kg}$ et la capacité thermique massique de l'eau liquide $c = 4,2 \text{ kJ K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$.

- La transformation est-elle monobare? Que vaut alors la variation d'enthalpie ΔH entre l'état initial et l'état d'équilibre final?
- On suppose qu'à l'état final l'eau contenue dans le calorimètre est entièrement liquide. Calculer la température T_F et commenter le résultat.
- On suppose maintenant qu'à l'état finale le mélange est biphasé donc sous forme liquide et solide. Que sait-on alors sur l'état final? Déterminer la composition du système à l'état final, c'est à dire la masse de chaque phase.

3 Turbine à gaz - III

De la vapeur d'eau assimilée à un gaz parfait évolue dans une turbine horizontale, de section constante $S = 1 \text{ m}^2$, munie d'une hélice. À l'extérieur, la température est constante égale à $T_0 = 35^\circ\text{C}$. La vapeur est admise dans la turbine à la température $T_1 = 400^\circ\text{C}$ et pression $P_1 = 6,0 \text{ bar}$, et ressort à la température $T_2 = 100^\circ\text{C}$ sous pression $P_2 = 1,0 \text{ bar}$. Le débit massique au travers de la turbine vaut $D_m = 1,0 \text{ kg/s}$. On donne l'expression de l'entropie massique d'un gaz parfait

$$s(T, P) = \frac{\gamma R}{M(\gamma - 1)} \ln \frac{T}{T_1} - \frac{R}{M} \ln \frac{P}{P_1} + s(T_1, P_1) \quad (3)$$

avec M la masse molaire de l'eau, $M = 18 \text{ g/mol}$ et γ l'indice adiabatique (ou coefficient de Laplace) $\gamma = C_p/C_v = 1,3$.

- Rappeler l'expression des deux principes industriels pour un fluide en écoulement stationnaire. Exprimer le premier version puissance.
- Calculer la variation d'entropie massique entre l'entrée et la sortie. L'écoulement à travers la turbine peut-il être adiabatique?
- On suppose que l'écoulement à travers la turbine se fait de manière réversible. À l'aide du second principe industriel, en déduire la valeur de P_{th} la puissance thermique reçue par le fluide. Commenter le signe.
- On rappelle l'expression de c_P pour un gaz parfait

$$c_P = \frac{\gamma R}{M(\gamma - 1)}. \quad (4)$$

À l'aide du premier principe industriel calculer la puissance utile cédée de la part du fluide à la turbine.

4 Lecture d'un diagramme enthalpique

Sur la page suivante est représenté le diagramme enthalpique du R22 (figure 2). Par lecture de ce diagramme, déterminer

- l'état physique, l'enthalpie massique et l'entropie massique du fluide sous $P = 3$ bar et à $T = 50$ °C.
- la composition du système à $T = 20$ °C et $h = 240$ kJ/kg.
- l'enthalpie de vaporisation sous $P = 20$ bar.
- la pression de vapeur saturante à $T = 0$ °C

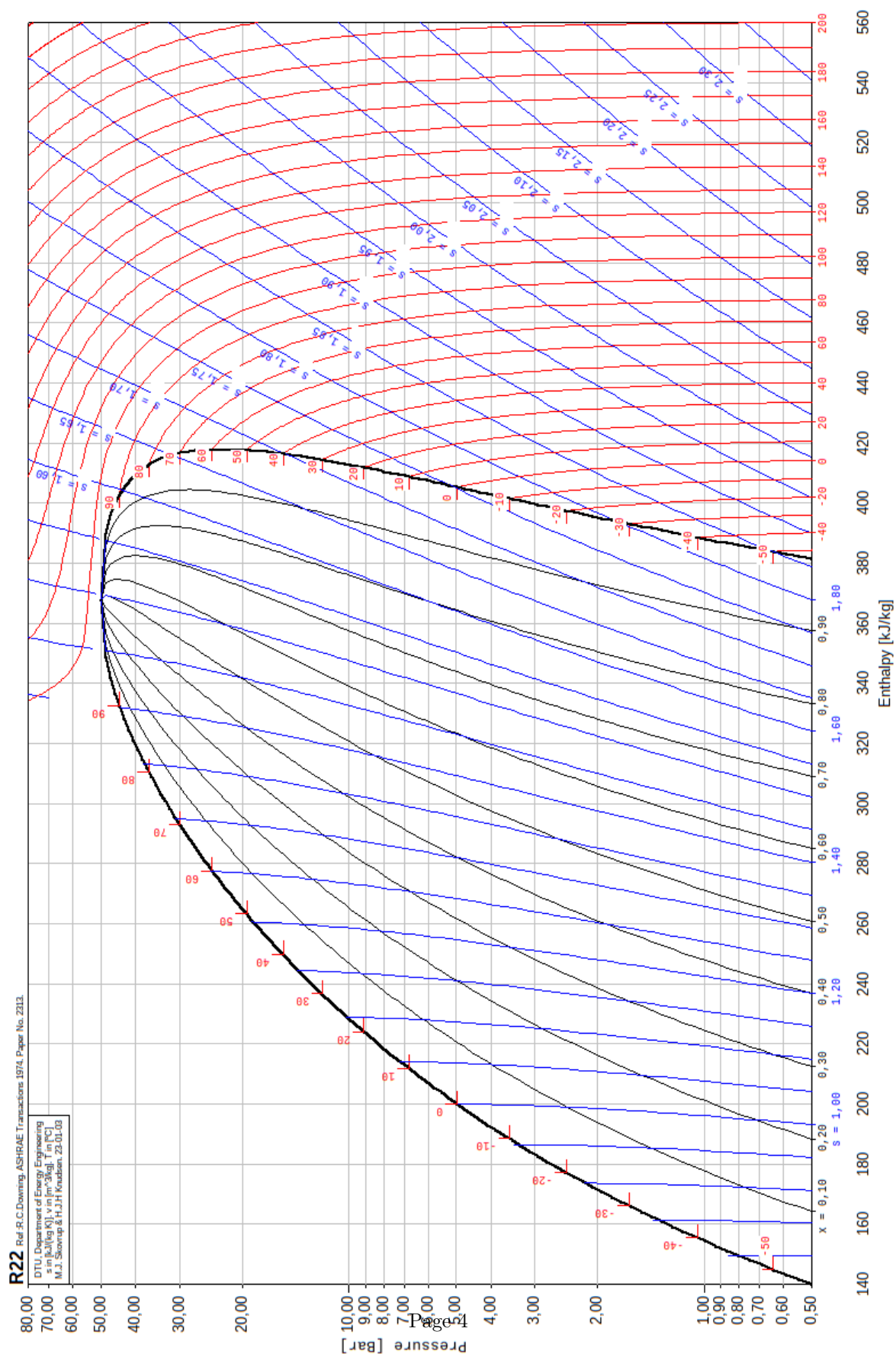


FIGURE 2 – Diagramme enthalpique du R22. Le cadre en haut à gauche du diagramme indique les unités