



# Composants thermodynamiques

## Atelier de production de vapeur

### A - Désurchauffeur isobare

1 Le régime étant stationnaire, la conservation du débit massique s'écrit simplement

$$D_V + D_L = D_s.$$

On suppose les variations d'énergie cinétique et potentielle négligeables devant celles d'enthalpie. Sachant que le désurchauffeur est calorifugé (pertes thermiques négligées) et qu'il ne contient pas de pièce mobile, le premier principe prend la forme

$$D_s \left( h_{\text{vap}}^{\text{sat}} + \cancel{\frac{1}{2}v_s^2} + \cancel{gz_s} \right) - D_V \left( h_V + \cancel{\frac{1}{2}v_V^2} + \cancel{gz_V} \right) - D_L \left( h_L + \cancel{\frac{1}{2}v_L^2} + \cancel{gz_L} \right) = \cancel{\mathcal{P}_i} + \cancel{\mathcal{P}_{\text{th}}}$$

soit

$$D_V h_V + D_L h_L = D_s h_{\text{vap}}^{\text{sat}}.$$

2 Le premier principe se réécrit

$$\begin{aligned} (D_s - D_L)h_V + D_L h_L &= D_s h_{\text{vap}}^{\text{sat}} \\ D_L(h_L - h_V) + D_s h_V &= D_s h_{\text{vap}}^{\text{sat}} \end{aligned}$$

$$D_L = \frac{h_{\text{vap}}^{\text{sat}} - h_V}{h_L - h_V} D_s.$$

On en déduit ensuite

$$D_V = D_s - D_L = \left( 1 - \frac{h_{\text{vap}}^{\text{sat}} - h_V}{h_L - h_V} \right) D_s$$

ce qui s'écrit encore

$$D_V = \frac{h_{\text{vap}}^{\text{sat}} - h_L}{h_V - h_L} D_s.$$

### B - Première option : utilisation d'un détendeur

Point	$T$ °C	$P$ bar	état	$h$ kJ · kg <sup>-1</sup>	$s$ kJ · K <sup>-1</sup> · kg <sup>-1</sup>	$D$ tonnes par jour
1	500	40	vap. sèche	3445	7,09	1184
2	480	4	vap. sèche	3445	8,14	1184
3	143	4	vap. saturante	2737	6,89	1500
4	20	4	liquide	83,860	0,2963	315

3 Sur la table de vapeur surchauffée à 40 bar, on lit à 500 °C  $h_1 = 3445 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  et  $s_1 = 7,09 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

Sur la table de la vapeur saturante, on lit à 4 bar  $T_3 = 143 \text{ °C}$ ,  $h_3 = 2737 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  et  $s_3 = 6,89 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

4 Un détendeur ne contient pas de parties mobiles ( $w_i = 0$ ). En le supposant calorifugé ( $q = 0$ ), et en négligeant les variations d'énergie cinétique et potentielle, le premier principe donne

$$\Delta h + \cancel{\Delta e_c} + \cancel{\Delta e_p} = q_{12} + w_{12} \quad \text{soit} \quad h_2 - h_1 = 0 \quad \text{et} \quad h_2 = h_1 = 3445 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

5 On constate à partir de la table de vapeur saturante que  $h_2 > h_{\text{vap}}^{\text{sat}}(4 \text{ bar})$  : on en déduit que l'eau est à l'état de vapeur surchauffée au point 2. Sur la table de vapeur surchauffée à 4 bar, on lit pour  $h = 3442 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \simeq h_2$   $T_2 = 480 \text{ °C}$  et  $s_2 = 8,14 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

Si on avait  $h_{liq}^{sat} < h_2 < h_{vap}^{sat}$  alors le système serait diphasé, et il serait à l'état liquide si  $h_2 < h_{liq}^{sat}$ .

6 Par application des résultats de la partie A,

$$D_4 = \frac{h_3 - h_2}{h_4 - h_2} D_3 = 315 \text{ tonnes par jour} \quad \text{et} \quad D_2 = D_3 - D_4 = 1184 \text{ tonnes par jour}.$$

Le détenteur ne comptant qu'une seule entrée,

$$D_1 = D_2 = 1184 \text{ tonnes par jour}.$$

### C - Seconde option : utilisation d'une turbine et cogénération d'énergie électrique

Point	$T$ °C	$P$ bar	état	$h$ kJ · kg <sup>-1</sup>	$s$ kJ · K <sup>-1</sup> · kg <sup>-1</sup>	$D$ tonnes par jour
1	500	40	vap. sèche	3445	7,09	1407
2'	220	4	vap. sèche	2912	7,26	1407
3	143	4	vap. saturante	2737	6,89	1500
4	20	4	liquide	83,860	0,2963	93

7 Aucune différence par rapport à la partie B.

8 Si la turbine était isentropique, on aurait

$$s_{2'S} = s_1 = 7,09 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

On constate sur la table de la vapeur saturante que  $s_{2'S} > s_{vap}^{sat}(4 \text{ bar})$ , l'eau y serait donc à l'état de vapeur sèche. Sur la table de vapeur surchauffée à 4 bar, on lit alors

$$h_{2'S} = 2818 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

9 Comme la turbine est calorifugée et que les variations d'énergie cinétique et potentielle sont négligées, alors le premier principe appliqué à la turbine prend la forme

$$\Delta h + \Delta e_e + \Delta e_p = q_{12'} + w \quad \text{soit} \quad h_{2'} - h_1 = w \quad \text{et} \quad h_{2'S} - h_1 = w_{\max}.$$

Par définition du rendement isentropique,

$$\eta_S = \frac{h_{2'} - h_1}{h_{2'S} - h_1}$$

d'où on déduit

$$h_{2'} = h_1 + \eta_S (h_{2'S} - h_1) = 2912 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Par lecture de la table de la vapeur surchauffée à 4 bar,

$$T_{2'} = 220 \text{ °C} \quad \text{et} \quad s_{2'} = 7,26 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

10 Par application des résultats de la partie A,

$$D_4 = \frac{h_3 - h_{2'}}{h_4 - h_{2'}} D_3 = 93 \text{ tonnes par jour} \quad \text{et} \quad D_{2'} = D_3 - D_4 = 1407 \text{ tonnes par jour}.$$

Le détenteur ne comptant qu'une seule entrée,

$$D_1 = D_{2'} = 1407 \text{ tonnes par jour}.$$

11 Comme à la question 9, le premier principe appliqué à la turbine indique que le travail récupéré (compté positivement) vaut

$$w_{\text{turb}} = |h_{2'} - h_1| = 533 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

La puissance correspondante s'écrit

$$\mathcal{P}_{\text{turb}} = D_1 w_{\text{turb}}$$

Numériquement, puisque 1 kWh = 3600 kJ,

$$\mathcal{P}_{\text{turb}} = 1407 \cdot 10^3 \times \frac{533}{3600} = 2,1 \cdot 10^5 \text{ kWh par jour}.$$

**D - Comparaison des deux solutions techniques**

**12** La première solution consomme 1184 tonnes de vapeur par jour, **ce qui coûte 29 600 €/jour**. La seconde solution nécessite 1407 tonnes de vapeur par jour, auxquels il faut ajouter les frais fixes dus à la turbine, on obtient donc un **coût total de 37 375 €/jour**.

**13** La puissance électrique récupérée en sortie de l'alternateur vaut

$$\mathcal{P}_{\text{élec}} = \eta_{\text{alt}} \mathcal{P}_{\text{turb}} = 1,9 \cdot 10^5 \text{ kWh par jour}$$

La vente de cette énergie électrique devant compenser le surcoût induit par la seconde solution, il faut un prix

$$p = \frac{37\,375 - 29\,600}{1,9 \cdot 10^5} = 0,04 \text{ €/kWh.}$$

La seconde solution n'est rentable que si l'électricité produite est rachetée à un **tarif supérieur à 4 centimes du kWh**.