



BLAISE PASCAL  
PT 2024-2025

DM 10 – à rendre mercredi 18 décembre

# Composants thermodynamiques

Travailler avec vos cours et TD ouverts est **chaudement recommandé** : un DM est un entraînement, pas une évaluation. Réfléchir ensemble est une bonne idée, mais le travail de rédaction doit être individuel. En cas de besoin, **n'hésitez pas à me poser des questions**, à la fin d'un cours, par mail ou via l'ENT.



Flasher ou cliquer pour accéder au corrigé

Ceinture		Travail à réaliser
	Ceinture blanche	Parties A et B uniquement
	Ceinture jaune	Parties A et B uniquement
	Ceinture rouge	En entier
	Ceinture noire	En entier

## Atelier de production de vapeur

Une chaîne de production d'acide phosphorique produisant 750 tonnes par jour a besoin pour son fonctionnement de deux tonnes de vapeur d'eau saturante (4 bar) par tonne d'acide phosphorique produite. Cette vapeur provient de la détente d'une vapeur surchauffée (40 bar, 500 °C) produite par une chaîne de production d'acide sulfurique voisine.

On cherche à comparer deux solutions pour produire la vapeur saturante voulue : ou bien une détente à travers un simple détendeur, ou bien dans une turbine avec cogénération d'énergie électrique. Les deux options nécessitent l'utilisation d'un désurchauffeur. Dans les deux cas, les pertes thermiques de l'installation sont négligées, de même que les variations d'énergie cinétique et potentielle.

Tous les débits notés  $D$  sont des débits massiques. Des tables thermodynamiques sont regroupées en fin d'énoncé. Pour simplifier, les valeurs numériques seront approximées à la valeur tabulée la plus proche.

### A - Désurchauffeur isobare

Un désurchauffeur, voir figure 1, est un composant qui permet de refroidir une vapeur surchauffée (température  $T_V$ ) en une vapeur saturante sèche (température  $T^{\text{sat}}(P)$ ). Pour ce faire, un injecteur introduit dans le jet de vapeur des gouttelettes d'eau liquide (température  $T_L$ ). Les deux jets de liquide et de vapeur sont supposés à la même pression  $P$ .

Les enthalpies massiques en entrée  $h_V$  et  $h_L$  sont connues ainsi que l'enthalpie massique en sortie  $h_{\text{vap}}^{\text{sat}}(P)$ . Le débit de sortie  $D_s$  est imposé.

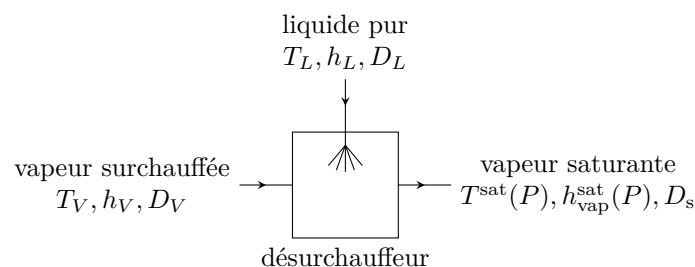


Figure 1 – Schéma de principe d'un désurchauffeur isobare.

1 - Exprimer, en explicitant les hypothèses faites, la conservation du débit et le premier principe industriel appliqués au désurchauffeur.

2 - En déduire les expressions littérales des débits  $D_L$  et  $D_V$  à imposer pour obtenir le débit de sortie  $D_s$  voulu.

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

La vapeur surchauffée issue de l'atelier sulfurique ( $P_1 = 40 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 500 \text{ °C}$ ) est détendue dans un détendeur jusqu'à la pression  $P_2 = 4 \text{ bar}$ . Elle entre dans le désurchauffeur, d'où sort de la vapeur saturante à  $P_3 = 4 \text{ bar}$ . L'installation est schématisée figure 2.

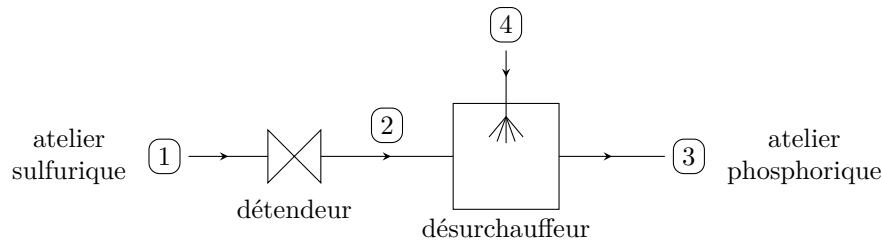


Figure 2 – Première solution technique, avec un détendeur.

Les points de fonctionnement sont récapitulés dans le tableau ci-dessous. Le reproduire sur la copie et le compléter au fur et à mesure des questions.

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			
2		4				
3		4	vap. saturante			1500
4	20	4	liquide	83,860	0,2963	

3 - Compléter les valeurs de  $h$  et  $s$  aux points 1 et 3 ainsi que la température  $T_3$ .

4 - Déterminer la valeur  $h_2$  en explicitant les hypothèses faites.

5 - Justifier que l'eau est à l'état de vapeur surchauffée au point 2. En déduire les valeurs de  $T_2$  et  $s_2$ .

6 - Calculer en tonnes par jour les débits massiques  $D_2$  et  $D_4$ , puis le débit  $D_1$ .

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

La seconde solution consiste à remplacer le détendeur par une turbine couplée à un alternateur en vue de générer de l'énergie électrique. La turbine utilisée a un rendement isentropique  $\eta_S = 0,85$ , défini comme

$$\eta_S = \frac{w}{w_{\max}},$$

où  $w$  est le travail massique réellement récupéré sur l'arbre de la turbine et  $w_{\max}$  le travail maximum récupérable pour une turbine isentropique. En sortie de la turbine, on obtient une vapeur sèche notée 2'.

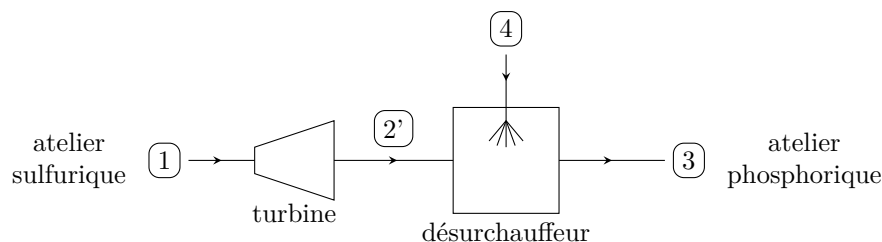


Figure 3 – Seconde solution technique, avec cogénération d'électricité par une turbine.

Les points de fonctionnement sont récapitulés dans le tableau ci-dessous. Le reproduire sur la copie et le compléter au fur et à mesure des questions.

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			
2'		4	vap. sèche			
3		4	vap. saturante			1500
4	20	4	liquide	83,860	0,2963	

- 7 - Compléter les valeurs de  $h$  et  $s$  aux points  $\boxed{1}$  et  $\boxed{3}$  ainsi que la température  $T_3$ .
- 8 - Déterminer numériquement l'enthalpie massique  $h_{2'S}$  au point  $\boxed{2'}$  si la turbine était isentropique.
- 9 - Montrer que  $h_{2'} = h_1 + \eta_S(h_{2'S} - h_1)$ . En déduire numériquement les caractéristiques du point  $\boxed{2'}$ .
- 10 - Calculer en tonnes par jour les débits massiques  $D_{2'}$  et  $D_4$ , puis le débit  $D_1$ .
- 11 - Déterminer le travail massique récupéré sur l'arbre de la turbine, puis la puissance correspondante, exprimée en kWh par jour.

## D - Comparaison économique des deux solutions techniques

La vapeur  $\boxed{1}$  issue de l'atelier sulfurique a un coût de 25 €/tonne. L'eau injectée au point  $\boxed{4}$  est à température ambiante et faiblement comprimée, on suppose son coût négligeable. L'utilisation de la turbine induit un coût fixe de 2200 €/jour (maintenance, usure, assurance, etc.) alors que les coûts fixes associés au détendeur sont négligeables. L'alternateur relié à l'arbre de la turbine a un rendement  $\eta_{alt} = 90\%$ .

12 - Sans tenir compte de la revente d'électricité, calculer en €/jour le coût quotidien des deux solutions techniques proposées.

13 - Déterminer le prix auquel le kWh électrique doit être revendu pour que le prix d'une tonne de vapeur  $\boxed{3}$  soit le même dans les deux options.

*En pratique, EDF rachète aux industriels l'électricité à 0,10 €/kWh l'hiver en heures pleines, mais seulement 0,015 €/kWh en été où la consommation est moindre (pas de chauffage électrique!), si bien que certaines usines sont équipées des deux options et les utilisent alternativement en été et hiver. Plutôt que la revente, une autre possibilité est bien sûr d'utiliser directement l'électricité en auto-consommation au sein de l'usine ... auquel cas la rentabilité se détermine à partir du prix d'achat du kWh électrique.*

Données : tables thermodynamiques.

▷ Tables de la vapeur surchauffée : la barre indique une grandeur d'état massique (convention de notation du génie des procédés).

P / bar	4		
t	$\bar{v}$	$\bar{h}$	$\bar{s}$
° C	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
140			
160	0,4837	2774,2	6,9805
180	0,5093	2817,8	7,0788
200	0,5343	2860,4	7,1708
220	0,5589	2902,3	7,2576
240	0,5831	2943,9	7,3402
260	0,6072	2985,1	7,4190
280	0,6311	3026,2	7,4947
300	0,6549	3067,2	7,5657
320	0,6785	3108,3	7,6379
340	0,7021	3149,4	7,7061
360	0,7256	3190,6	7,7723
380	0,7491	3232,1	7,8367
400	0,7725	3273,6	7,8994
420	0,7959	3315,4	7,9606
440	0,8192	3357,4	8,0203
460	0,8426	3399,7	8,0787
480	0,8659	3442,1	8,1359
500	0,8892	3484,9	8,1919

P / bar	40		
t	$\bar{v}$	$\bar{h}$	$\bar{s}$
° C	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
240			
260	0,05172	2835,6	6,1353
280	0,05544	2902,0	6,2576
300	0,05883	2962,0	6,3642
320	0,06200	3017,5	6,4593
340	0,06499	3069,8	6,5461
360	0,06787	3119,9	6,6265
380	0,07066	3168,4	6,7019
400	0,07338	3215,7	6,7733
420	0,07604	3262,3	6,8414
440	0,07866	3308,3	6,9069
460	0,08125	3354,0	6,9702
480	0,08381	3399,6	7,0314
500	0,08634	3445,0	7,0909
520	0,08886	3490,4	7,1489
540	0,09135	3535,8	7,2055
560	0,09384	3581,4	7,2608
580	0,09631	3627,0	7,3149
600	0,09876	3672,8	7,3680
620	0,10121	3718,7	7,4200

▷ Table de la vapeur saturante :

$P^{\text{sat}}$	$T^{\text{sat}}$	$v_{\text{liq}}^{\text{sat}}$	$v_{\text{vap}}^{\text{sat}}$	$h_{\text{liq}}^{\text{sat}}$	$h_{\text{vap}}^{\text{sat}}$	$s_{\text{liq}}^{\text{sat}}$	$s_{\text{vap}}^{\text{sat}}$
bar	°C	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$		$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$		$\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$	
4	143,62	0,001 083	0,462 20	604,67	2737,6	1,7764	6,8943
40	250,33	0,001 252	0,049 75	1087,40	2800,3	2,7965	6,0685