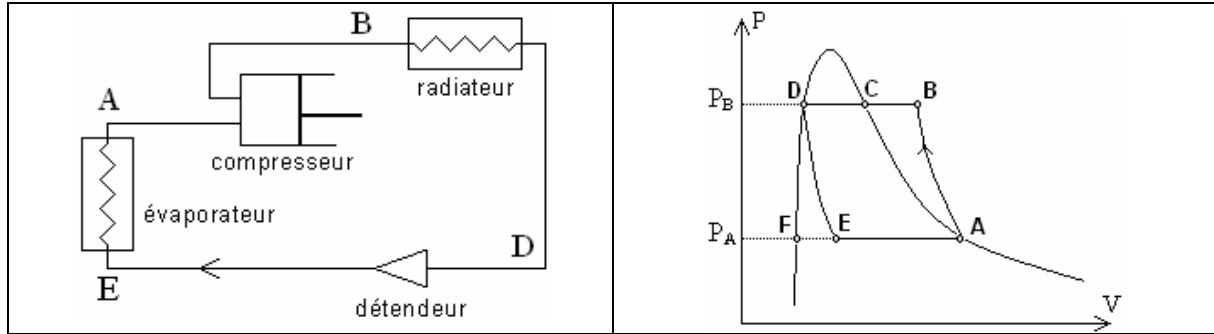


**Thermodynamique II – Sections A, B et C**  
**Contrôle d'évaluation 2 – Durée : 1h 30min**

On se propose d'étudier le fonctionnement d'une pompe à chaleur destinée au chauffage d'une habitation (voir figures ci-dessous). Cette machine est une thermopompe à compression utilisant comme vapeur condensable de l'ammoniac ( $\text{NH}_3$ ) de masse molaire  $M = 17 \text{ g.mol}^{-1}$ .



Dans cette machine, une masse  $m = 1 \text{ kg}$  de fluide pris en **A** à l'état de vapeur saturante à la pression  $P_A = 2,9 \text{ bar}$  et à la température  $T_A = 263 \text{ K}$ , subit une compression adiabatique réversible jusqu'à l'état **B** de pression  $P_B = 10 \text{ bar}$ , et de température  $T_B$ . La vapeur sèche jusqu'à son état saturant (état **A**) pourra être considérée comme un gaz parfait de rapport  $\gamma = 1,31$ .

1°) En utilisant la relation de Laplace  $T^\gamma P^{1-\gamma} = \text{cte}$ , déterminer la température  $T_B$  atteinte en fin de compression. Calculer sa valeur.

2°) On donne : la constante universelle des gaz parfaits  $R = 8,32 \text{ J.K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$  ; les enthalpies massiques  $h_A = 1450 \text{ kJ.kg}^{-1}$  ;  $h_B = 1620 \text{ kJ.kg}^{-1}$  et  $h_C = 1520 \text{ kJ.kg}^{-1}$  de l'ammoniac respectivement aux points **A**, **B** et **C**, la chaleur latente de vaporisation à la température  $T(\text{K})$  :  $\ell_{\text{vap}}(T) = -3,967.T + 2343$  (en  $\text{kJ.kg}^{-1}$ ).

Calculer les chaleurs massiques latentes de vaporisation  $\ell_{\text{vap}}(T_A)$  et  $\ell_{\text{vap}}(T_B)$ .

3°) Le fluide est ensuite refroidi de manière isobare jusqu'à l'état **C** situé sur la courbe de rosée, puis entièrement liquéfié dans un radiateur (source chaude) à pression constante et à la température  $T_D$  (état **D**). On donne : la chaleur spécifique à pression constante de l'ammoniac en phase vapeur  $c_p = 2068,2 \text{ J.K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ .

**a** - Calculer la variation de l'enthalpie massique  $\Delta h_{BC}$ .

**b** - Exprimer la température  $T_C$  en fonction de  $T_B$ ,  $\Delta h_{BC}$ ,  $M$ ,  $\gamma$  et  $R$ . Calculer sa valeur.

**c** - Pourquoi  $T_D$  est-elle égale à  $T_C$  ?

**d** - Calculer les quantités de chaleur massiques de refroidissement  $q_{BC}$  et de liquéfaction  $q_{CD}$  échangées avec la source chaude. En déduire la chaleur totale  $q_{BD}$ .

4°) Le fluide traverse ensuite un détendeur où il subit une détente isenthalpique qui ramène sa pression de  $P_B$  à  $P_A$ , et se trouve alors, en fin de détente, partiellement liquéfié (état **E**). Il pénètre ensuite dans l'évaporateur (source froide) et se vaporise complètement à la pression  $P_A$  jusqu'au point **A**.

**a** - Calculer l'enthalpie massique  $h_D$  au point **D** à la sortie du radiateur.

**b** - En déduire l'enthalpie massique  $h_E$  au point **E** à la sortie du détendeur.

**c** - Calculer le titre en vapeur  $x_E$  du mélange à l'état **E**.

5°) On donne les entropies massiques  $s_E = 1,45 \text{ kJ.K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$  et  $s_A = 4,76 \text{ kJ.K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ . Calculer la quantité de chaleur massique  $q_{EA}$  échangée avec la source froide à la température  $T_A$  pendant la phase de vaporisation complète du fluide (transformation  $E \rightarrow A$ ).

6°) En appliquant le 1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique, déterminer le travail massique  $w$  fourni à cette machine. On négligera tous les phénomènes de dissipation au cours du cycle.

7°) Calculer le coefficient de performance  $\varepsilon$  de cette machine.

### Corrigé :

1°) Relation de Laplace :  $T^\gamma P^{1-\gamma} = \text{cte} \Rightarrow T_A^\gamma P_A^{1-\gamma} = T_B^\gamma P_B^{1-\gamma} \Rightarrow T_B = T_A \left( \frac{P_B}{P_A} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = 352,5 \text{ K}.$

2°)  $\ell_{\text{vap}}(T_A) = -3,967.263 + 2343 = 1299,7 \text{ kJ.kg}^{-1};$

$\ell_{\text{vap}}(T_B) = -3,967.352,5 + 2343 = 944,6 \text{ kJ.kg}^{-1}.$

3°) a -  $\Delta h_{BC} = h_C - h_B = (1520 - 1620).10^3 = -100 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

b -  $\Delta h_{BC} = c_p (T_C - T_B) \Rightarrow T_C = T_B + \frac{\Delta h_{BC}}{c_p} = T_B + \Delta h_{BC} \frac{M(\gamma-1)}{R\gamma}$

$\Rightarrow T_C = 352,5 - 100.10^3 \cdot \frac{17.10^{-3}.0,31}{8,32.1,31} = 304,1 \text{ K}.$

c - La liquéfaction d'un corps pur à pression constante se fait à température constante.

d - Chaleur sensible :  $q_{BC} = c_p.(T_C - T_B) = 2068,2.(304,1 - 352,5) = -100,1 \text{ kJ.kg}^{-1}.$

Chaleur latente :  $q_{CD} = -\ell_{\text{vap}}(T_B) = -944,6 \text{ kJ.kg}^{-1}.$

Chaleur totale :  $q_{BD} = q_{BC} + q_{CD} = -1044,7 \text{ kJ.kg}^{-1}.$   $q_{BD} < 0$  : c'est la chaleur extraite du fluide et utilisée pour chauffer l'habitation (source chaude).

4°) a -  $\Delta h_{CD} = -\ell_{\text{vap}}(T_B) = h_D - h_C \Rightarrow h_D = h_C - \ell_{\text{vap}}(T_B).$

$\Rightarrow h_D = (1520 - 944,6).10^3 = 575,4 \text{ kJ.kg}^{-1}.$

b - D→E est une transformation isenthalpique :  $h_E = h_D = 575,4 \text{ kJ.kg}^{-1}.$

c -  $x_E = \frac{h_E - h_F}{h_A - h_F} = \frac{h_D - h_F}{\ell_{\text{vap}}(T_A)} \quad \text{or} \quad \ell_{\text{vap}}(T_A) = \Delta h_{FA} = h_A - h_F$

$\rightarrow h_F = h_A - \ell_{\text{vap}}(T_A) = (1450 - 1299,7).10^3 = 150,3 \text{ kJ.kg}^{-1}, \rightarrow x_E = \frac{575,4 - 150,3}{1299,7} = 0,328.$

5°)  $\Delta s_{EA} = \frac{q_{EA}}{T_A} \rightarrow q_{EA} = T_A \cdot \Delta s_{EA} \rightarrow q_{EA} = 263.(4,76 - 1,45).10^3 = 870,5 \text{ kJ.kg}^{-1} > 0.$

6°) 1<sup>er</sup> principe :  $w + q_{BD} + q_{EA} = 0 \rightarrow w = -q_{BD} - q_{EA}$

$\rightarrow w = 1044,7 - 870,5 = 174,2 \text{ kJ.kg}^{-1} > 0.$

7°) COP  $\varepsilon = \frac{-q_{BD}}{w} = \frac{1044,7}{174,2} = 6.$