

du Contrôle de thermodynamique du Mardi 22 janvier 2013

## 1 Pompe à Chaleur :

1. Le point A en sortie de condenseur correspond à un liquide saturé à la température de  $40^{\circ}\text{C}$  qu'on placera sur la courbe d'ébullition. La détente isenthalpique mène au point B qui se trouve donc à la verticale du point A sur le palier de vaporisation à la température de  $0^{\circ}\text{C}$ . L'évaporation du fluide à cette même température mène au point C qui se situera sur la courbe de rosée puisqu'il s'agit d'une vapeur saturée. Enfin, le point D en sortie de compresseur se trouve dans la zone surchauffée. En effet, il est à la même pression que le point A (DA isobare) et sa température est supérieure à la température d'équilibre liquide vapeur pour cette pression qui est ici de  $40^{\circ}\text{C}$ . Le point D sera donc à l'intersection de l'isobare correspondante et de l'isotherme  $47,18^{\circ}\text{C}$ . L'ensemble donne le tracé sur la figure 1.

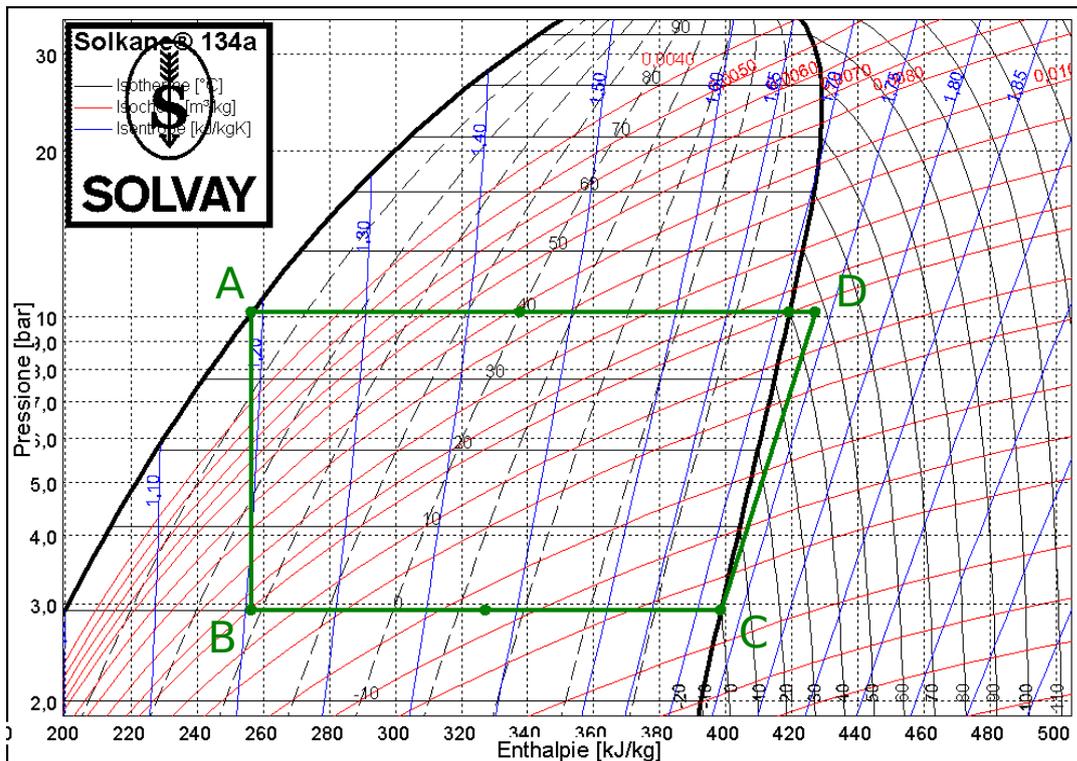


FIGURE 1 – cycle sur diagramme enthalpique

2. Le point B se situe sur le palier de vaporisation à la température de  $0^{\circ}\text{C}$ . Son enthalpie est égale à celle du point A puisque la détente est isenthalpique. L'enthalpie du point A est donnée par les tables de saturation du R134a. On prendra bien entendu l'enthalpie du liquide saturé à  $40^{\circ}\text{C}$  soit :  $h_B = h_A = h'(40) = 256,43 \text{ KJ/Kg}$
3. Le titre de vapeur en B peut être déterminé à partir des enthalpies du liquide saturé  $h'$  et de la vapeur saturée  $h''$  à  $0^{\circ}\text{C}$ . La table de saturation du R134a donne :  $h' = 200 \text{ KJ/Kg}$  et  $h'' = 398,49 \text{ KJ/Kg}$  à cette température. On en déduit le titre de vapeur :

$$x_B = \frac{h_B - h'}{h'' - h'} = \frac{256,43 - 200}{398,49 - 200} = 0,284$$

4. Non, la compression n'est pas isentropique car l'entropie finale  $s_D = 1,7357 \text{ KJ.K}^{-1}.\text{Kg}^{-1}$  est différente de l'entropie initiale  $s_C = 1,7267 \text{ KJ.K}^{-1}.\text{Kg}^{-1}$ . Cette dernière valeur est obtenue sur la table de saturation pour la vapeur saturée à  $0^{\circ}\text{C}$  ( $s''$  à  $0^{\circ}\text{C}$ ). La valeur de  $s_D$  est bien conforme au deuxième principe de la thermodynamique car  $s_D > s_C$ . En effet, dans le cas d'une transformation adiabatique, l'entropie ne peut qu'augmenter.
5. Le coefficient de performance est donné par le rapport

$$\varepsilon_c = \left| \frac{Q_c}{W} \right| = \frac{-q_c}{w_u} = \frac{-(h_A - h_D)}{h_D - h_C} = \frac{427,25 - 256,43}{427,25 - 398,49} = 5,94$$

En effet, la quantité de chaleur rejetée au condenseur est donnée par  $q_c = h_C - h_B$  car il n'y a pas de travail utile dans le condenseur et les variations d'énergie cinétique sont négligées. De même dans le compresseur où c'est la quantité de chaleur qui est nulle et la variation d'enthalpie se réduit au travail utile.

6. La puissance de chauffage est donnée par  $\dot{Q}_c = -\dot{Q}_{cond} = -\dot{m}_f (h_A - h_D)$  d'où l'on déduit le débit massique du fluide frigorigène :

$$\dot{m}_f = \frac{Q_c}{h_D - h_A} = \frac{8.10^3}{427,25 - 256,43} = 0,0468 \text{ Kg/s}$$

7. La puissance mécanique reçue par le fluide au cours de sa compression est donnée par le premier principe appliqué aux systèmes ouverts. Ici  $q = 0$  et la variation d'énergie cinétique est négligée. Il reste :

$$\dot{W} = \dot{m}_f = (h_D - h_C) = 0,0468 (427,25 - 398,49) = 1,35 \text{ KW}$$

8. La puissance calorifique absorbée par l'air s'écrit :

$$\dot{Q}_{air} = \dot{Q}_c = \dot{m}_a (h_s - h_e) = \dot{m}_a c_p (T_s - T_e)$$

où les indices  $e$  et  $s$  réfèrent respectivement à l'entrée et à la sortie de l'air. On en déduit le débit d'air :

$$\dot{m}_a = \frac{\dot{Q}_c}{c_p (T_s - T_e)} = \frac{8.10^3}{1003 (30 - 20)} = 0,797 \text{ Kg/s} \text{ soit } 2871 \text{ Kg/h}$$

## 2 Mélange de deux flux d'air

1. La pression partielle de la vapeur d'eau dans le mélange d'air humide peut être calculée à l'aide de la définition du degré hygrométrique :  $\varphi = \frac{P_v}{P_s(T)}$  d'où l'on déduit immédiatement :

$$P_{v1} = \varphi_1 P_s(5^\circ\text{C}) = 0,9 \times 0,00478471 = \boxed{0,0078471 \text{ bar}}$$

L'humidité absolue (ou spécifique) est donnée par :

$$\eta_1 = \frac{m_e}{m_a} = \frac{M_e}{M_a} \times \frac{P_v}{P - P_v} = \frac{18}{29} \times \frac{0,0078471}{1 - 0,0078471} = \boxed{0,0049195}$$

soit environ 4,9 g de vapeur d'eau par Kg d'air sec.

2. De la même manière, pour le point 2 :

$$P_{v2} = \varphi_2 P_s(30^\circ\text{C}) = 0,6 \times 0,04241 = \boxed{0,025446 \text{ bar}}$$

$$\eta_2 = \frac{M_e}{M_a} \times \frac{P_v}{P - P_v} = \frac{18}{29} \times \frac{0,025446}{1 - 0,025446} = \boxed{0,01624}$$

soit 16 g de vapeur d'eau par Kg d'air sec.

3. Compte tenu des points de référence indiqués dans le cours, l'enthalpie qui est donnée par :

$$h = h_0 + c_{pa}(T - T_0) + \eta[c_{pv}(T - T_0) + L_{v0}]$$

se réduit à :

$$h_1 = c_{pa} t_1 + \eta[c_{pv} t_1 + L_{v0}] = 4,15 \text{ Kcal/Kg} = \boxed{17,36 \text{ KJ/Kg}}$$

avec  $t_1 = T_1 - T_0 = 5^\circ\text{C}$  et les valeurs des chaleurs massiques de l'air et de l'eau données dans le cours soit :  $c_{pa} = 0,24 \text{ Kcal.Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$  et  $c_{pv} = 0,46 \text{ Kcal.Kg}^{-1}\text{K}^{-1}$  ainsi que celle de la chaleur latente de vaporisation de l'eau à  $0^\circ\text{C}$   $L_{v0} = 597 \text{ Kcal/Kg}$ .

4. De même pour le flux n°2 :

$$h_2 = c_{pa} t_2 + \eta[c_{pv} t_2 + L_{v0}] = 17,12 \text{ Kcal/Kg} = \boxed{71,25 \text{ KJ/Kg}}$$

5. L'équation de conservation de l'énergie pour le mélange d'air adiabatique s'écrit :

$$\dot{m}_{a1} h + \dot{m}_{a2} h_2 = (\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}) h_3$$

d'où l'on déduit aisément :

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} \frac{h_3 - h_2}{h_1 - h_3} = \boxed{0,0368 \text{ Kg/s}} \text{ soit } 132,6 \text{ Kg/h}$$

6. L'équation de conservation de la masse pour le mélange s'écrit :

$$\dot{m}_{a1} \eta_1 + \dot{m}_{a2} \eta_2 = (\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}) \eta_3$$

d'où l'on peut déduire  $\eta_3$  :

$$\eta_3 = \frac{\dot{m}_{a1} \eta_1 + \dot{m}_{a2} \eta_2}{\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}} = \boxed{0,01172}$$

soit 11,7 g de vapeur d'eau par Kg d'air sec.

7. Les trois points ont été tracés sur le diagramme donné à la figure 2. Le point 3 doit être situé sur la droite joignant les 2 points 1 et 2. C'est le barycentre des points 1 et 2 affectés des coefficients  $\dot{m}_{a1}$  et  $\dot{m}_{a2}$ . Les deux segments 1-3 et 2-3 doivent être dans le rapport des débits.

### 3 Des-humidification

1. On peut considérer que le débit d'eau entrant s'écrit :  $\dot{m}_{e1} = \eta_1 \dot{m}_a$ . Ceci résulte de la définition de l'humidité absolue. De même pour le débit d'eau sortant :  $\dot{m}_{e2} = \eta_2 \dot{m}_a$ . Le débit d'air sec lui ne change pas. Le débit d'eau condensée est la partie du débit d'eau perdue entre l'entrée et la sortie soit :

$$\dot{m}_{cond} = \Delta \dot{m}_e = \dot{m}_{e2} - \dot{m}_{e1} = \dot{m}_a (\eta_2 - \eta_1) = \boxed{-0,0067 \text{ Kg/s}} = -24 \text{ g/h}$$

le signe négatif indique qu'il s'agit d'un débit d'eau retiré au flux d'air.

2. La puissance calorifique perdue par l'air est donnée par l'application du premier principe à cet écoulement. Ici, il n'y a pas de travail utile et les variations d'énergie cinétique sont négligées. Il reste :

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_a (h_2 - h_1) = \boxed{-28 \text{ KW}}$$

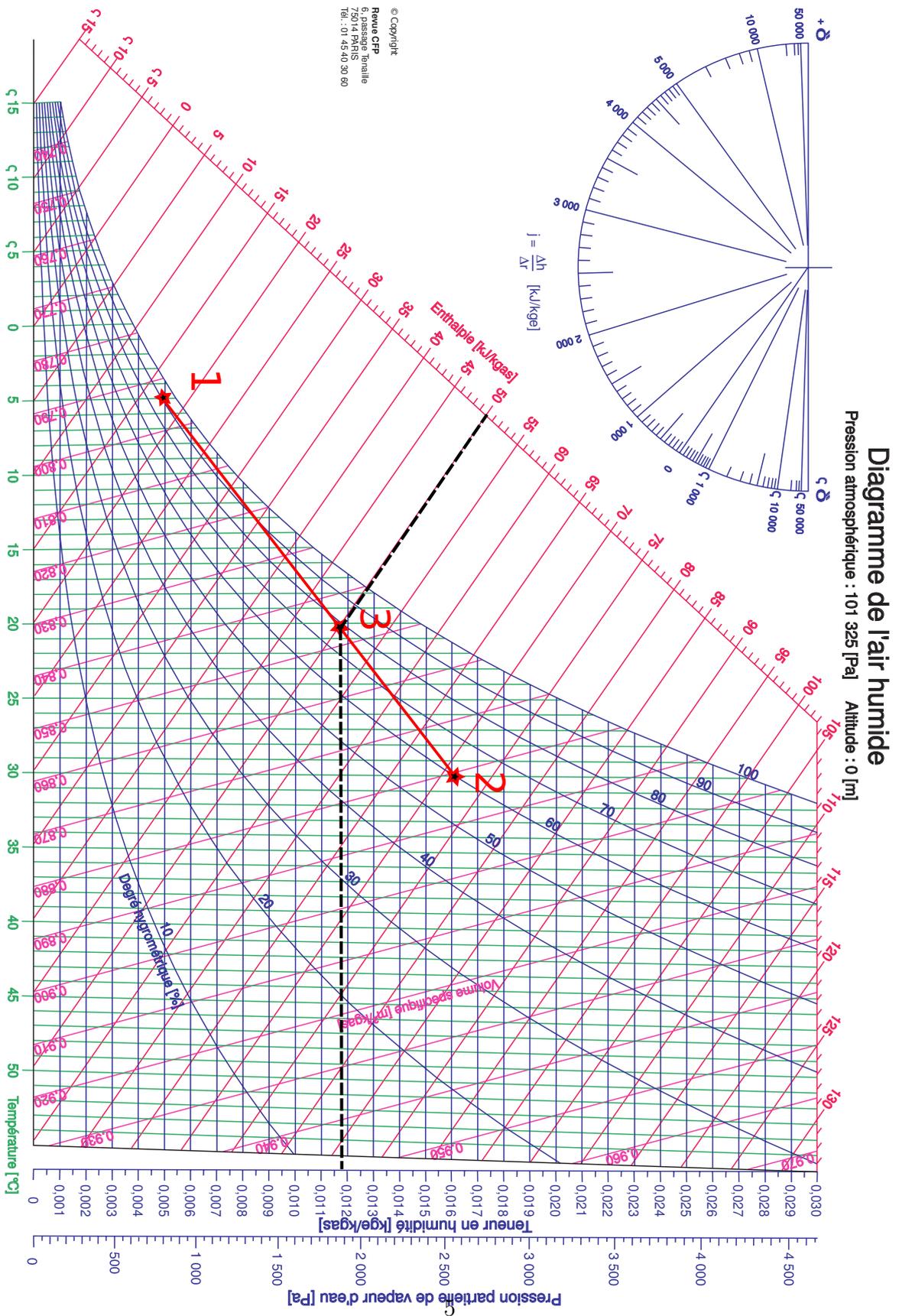
ici encore, le signe indique qu'il s'agit d'énergie perdue par l'air.

3. L'énergie perdue par l'air est transférée à l'eau. On fait l'hypothèse qu'il n'y a pas de pertes significatives vers l'extérieur. La puissance calorifique absorbée par l'eau est donc :

$$\dot{Q}_e = -\dot{Q}_a = \dot{m}_e (h_{e4} - h_{e3}) = \dot{m}_e c_{pe} (T_{e4} - T_{e3})$$

où l'indice  $e$  réfère ici à l'eau circulant dans la batterie de refroidissement (à ne pas confondre avec l'eau contenue dans l'air comme à la question 1 ci-dessus) et les indices 3 et 4 correspondent respectivement à l'entrée et à la sortie de cette eau de la batterie de refroidissement. On en déduit :

$$T_4 = T_3 + \frac{\dot{Q}_e}{\dot{m}_e c_{pe}} = 4 + \frac{28.10^3}{2 \times 4185} = \boxed{7,38^\circ\text{C}}$$



© Copyright  
 Reuus CFP  
 6, passage Fenaille  
 75014 PARIS  
 Tél. : 01 45 50 50 50

FIGURE 2 – mélange