

Froid et Pompes à Chaleur

Correction de l'exercice réfrigérateur à absorption

Unité de réfrigération à l'Ammoniac

1. La pression est la même dans le condenseur et le désorbeur. Il en est de même pour l'évaporateur et l'absorbeur. C'est la pompe qui permet de passer de la basse pression régnant dans l'absorbeur à la haute pression régnant dans le désorbeur. Rappel : L'avantage par rapport au compresseur est que le travail nécessaire pour comprimer un liquide est beaucoup plus faible que celui qui est nécessaire pour comprimer une vapeur (en raison de la faible compressibilité du liquide). L'absorbeur et l'évaporateur communiquant par des tuyauteries de diamètres appréciables, celles-ci n'imposent pas de perte de charge appréciable et la pression sera sensiblement la même dans ces deux éléments. La même analyse vaut pour le désorbeur et le condenseur. En revanche les détendeurs placés entre les points **3** et **4** puis les points **e** et **f** imposent une baisse de pression.

On aura donc à l'évaporateur la pression de saturation à 3°C et au condenseur la pression de saturation de l'eau à 34°C

$$P_{evap} = P_{abs} = P_{sat}(3^\circ C) = 0,758 \text{ kPa}$$

$$P_{cond} = P_{desorb} = P_{sat}(34^\circ C) = 5,325 \text{ kPa}$$

2. point **1** : la vapeur d'eau sortant de l'évaporateur est saturée à 3°C. Ses caractéristiques sont données par la table de saturation

Le point **2** est à la température $T_2 = 80^\circ C$ et la pression est celle du condenseur. On a donc une vapeur surchauffée. Les valeurs sont à lire sur l'isobare $P_2 = 5,325 \text{ kPa}$

point **3** : liquide saturé à 34°C

pour le point **4**, il est défini par sa pression $P_4 = 0,758 \text{ kPa}$ et son enthalpie ($h_4 = h_3$).

On peut alors calculer

$$x_4 = \frac{h_4 - h'}{h'' - h'} = 0,5207$$

où h' et h'' sont les enthalpies massiques respectivement du liquide et de la vapeur saturée à 3°C.

On en déduit l'entropie massique en **4**

$$s_4 = x_4 s'' + (1 - x_4) s' = 0,51609 \text{ kJ.K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$$

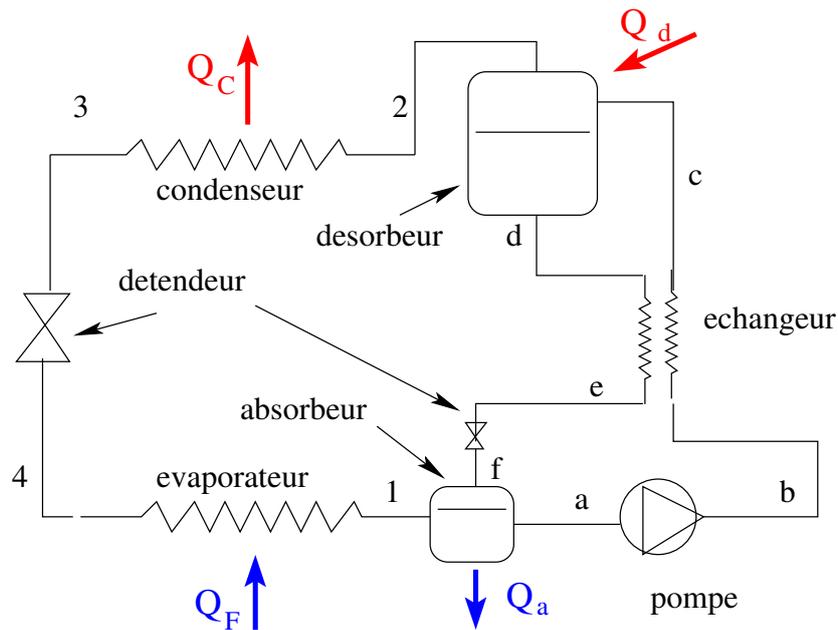


FIGURE 1 – Schéma de la machine

où s' et s'' sont les entropies massiques du liquide et de la vapeur saturée à 3°C .
ce qui donne le tableau suivant :

	t	P	h	s	x
	$^\circ\text{C}$	bar	kJ/kg	kJ/kg.K	
1	3	0,00758	2506,4	9,0765	1
2	80	0,053251	2650,1	8,6365	-
3	34	0,053251	142,45	0,49155	0
4	3	0,00758	142,45	0,51609	0,05207

3. La puissance frigorifique est $\dot{Q}_F = \dot{m}(h_1 - h_4) = 100 \text{ kW}$ d'où l'on déduit :

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_F}{(h_1 - h_4)} = 0,0423 \text{ kg/s}$$

4. La puissance calorifique rejetée au condenseur est donnée par :

$$\dot{Q}_C = \dot{m}(h_3 - h_2) = -106,07 \text{ kW}$$

le signe négatif exprimant le fait que cette chaleur est rejetée vers le milieu extérieur.

5. Le point a correspond à une solution saturée sous la pression $P_a = 0,758 \text{ kPa}$ à la température $T_a = 25^\circ\text{C}$. Il sera donc placé sur le diagramme de Merkel à l'intersection de l'isobare et de l'isotherme correspondante. On en déduit par lecture graphique la fraction massique de LiBr $y_a = 0,509$ ainsi que l'enthalpie massique de la solution : $h_a = -185 \text{ kJ/kg}$.

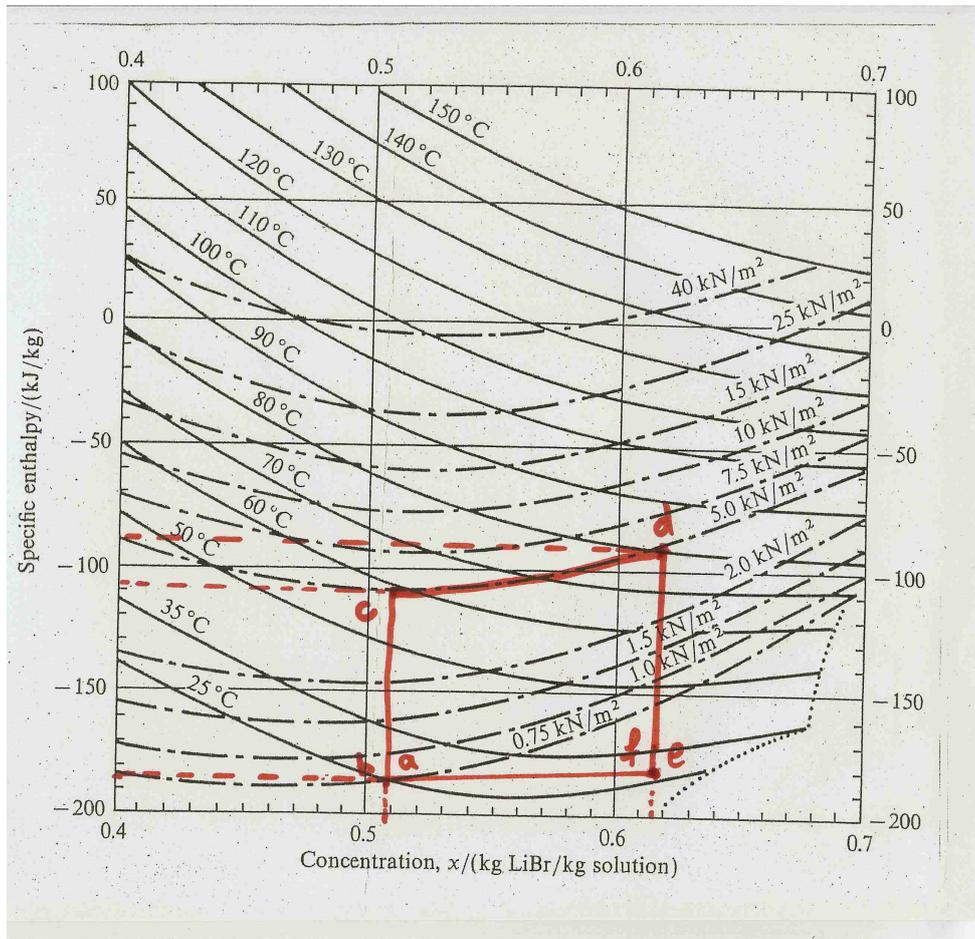


FIGURE 2 – « cycle » de la solution sur le diagramme de Merkel

6. De même, la solution est saturée en **d** à $T_d = 80^\circ\text{C}$ et $P_d = 5,32\text{ kPa}$ d'où l'on déduit par lecture graphique la fraction massique $y_d = 0,615$ et l'enthalpie $h_d = -90\text{ kJ/kg}$.
7. La solution arrive en **c** saturée sous la pression $P_c = 5,32\text{ kPa}$ et l'on connaît par ailleurs sa composition qui est la même que celle du point **a** : $y_c = y_a = 0,509$. Ceci permet de placer le point sur le diagramme et l'on en déduit la température $T_c = 60^\circ\text{C}$ puis l'enthalpie massique : $h_c = -108\text{ kJ/kg}$.
8. Remarquons tout d'abord que les débits de solution ne changent pas au passage par la pompe, l'échangeur de chaleur et le détenteur, c'est à dire dans leur trajet entre l'absorbeur et le désorbeur (et réciproquement). En revanche le débit de solution varie au passage dans l'absorbeur (le LiBr se charge en eau venant de l'évaporateur) ou au passage dans le désorbeur (l'eau dirigée vers le condenseur est extraite de la solution). On a donc :

$$\dot{m}_a = \dot{m}_b = \dot{m}_c$$

$$\dot{m}_d = \dot{m}_e = \dot{m}_f$$

On peut d'ailleurs en dire autant pour les fractions massiques y_i . Pour calculer les débits de solution nous devons les exprimer en fonction du débit de vapeur dans la boucle frigorifique (qui est connu) et des compositions de solution (connues également). Nous sommes amenés à réaliser un bilan matière sur l'absorbeur soit :

$$\dot{m}_a = \dot{m}_1 + \dot{m}_f \quad (1)$$

et en limitant le bilan au seul bromure de lithium :

$$y_a \dot{m}_a = y_1 \dot{m}_1 + y_f \dot{m}_f \quad (2)$$

avec $y_1 = 0$ car nous avons fait l'hypothèse que la vapeur circulant dans la boucle frigorifique était pure et $y_f = y_d$ comme signalé plus haut. Le système d'équation ci-dessus se résout aisément. On peut par exemple tirer de 2 :

$$\dot{m}_a = \frac{y_f}{y_a} \dot{m}_f$$

puis

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_1}{\frac{y_f}{y_a} - 1} = 0,2031 \text{ kg/s} \quad \text{d'où} \quad \dot{m}_a = 0,2454 \text{ kg/s}$$

9. Le bilan enthalpique au désorbeur, en l'absence de travail mécanique et de variation d'énergie cinétique ou potentielle se réduit à :

$$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_d h_d - \dot{m}_c h_c = \dot{Q}_d = 120,33 \text{ kW}$$

10. L'ensemble du fonctionnement de la machine est cyclique. Le premier principe impose donc : $\sum \dot{W} + \sum \dot{Q} = 0$ soit :

$$\dot{Q}_F + \dot{Q}_C + \dot{Q}_a + \dot{Q}_d + \dot{W}_p = 0$$

ce qui donne en négligeant le travail de la pompe :

$$\dot{Q}_a = -\dot{Q}_F - \dot{Q}_C - \dot{Q}_d = -114,25 \text{ kW}$$

On note que le signe indique que cette puissance est bien rejetée dans le milieu extérieur.

11. Comme pour la question 9, on applique le premier principe, ici à l'absorbeur, qui se réduit à :

$$\dot{m}_a h_a - \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_f h_f = \dot{Q}_a$$

d'où l'on tire :

$$h_f = \frac{1}{\dot{m}_f} [\dot{m}_a h_a - \dot{m}_1 h_1 - \dot{Q}_a] = -183,3 \text{ kJ/kg}$$

12. On supposera la détente isenthalpique soit : $h_f = h_e$. De même on pourra négliger la variation d'enthalpie au passage de la pompe. Notons que cette hypothèse est cohérente avec celle faite à la question 10, à savoir que le travail mécanique de la pompe est négligeable. nous avons donc : $h_b \simeq h_a$.

Calculons les échanges de chaleur côté chaud et froid de l'échangeur :

$$\dot{Q}_{chaud} = \dot{m}_d (h_e - h_d) = -18,89 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_{froid} = \dot{m}_c (h_c - h_b) = 18,89 \text{ kJ/kg}$$

ce qui satisfait à l'hypothèse d'un échangeur sans pertes vers l'extérieur.

13. L'efficacité frigorifique d'un tel système s'apprécie en remarquant que le système nécessite pour fonctionner un apport de chaleur au désorbeur et le travail mécanique de la pompe. En négligeant ce dernier, on obtient :

$$\varepsilon_f = \frac{\dot{Q}_F}{\dot{Q}_d + \dot{W}_p} \simeq \frac{\dot{Q}_F}{\dot{Q}_d} = 0,831$$

ce qui peut paraître faible par rapport aux efficacités des systèmes à compression vus jusqu'ici mais présente l'énorme avantage de ne nécessiter que très peu de travail mécanique.

Bonus

Rappelons que sur le diagramme de Merkel, les lignes d'équilibre (courbes de bulle) sont tracées à pression constante. Les isothermes sont approximativement indépendantes de la pression. Il en résulte qu'on peut placer sur ce diagramme des points d'équilibre pour lesquels, la pression et la température correspondent bien à l'isobare et l'isotherme passant par le point. En revanche, pour les points représentant un liquide sous-saturé, seule la température correspond à l'isotherme passant par le point. Ici, seuls les points **a**, **c** et **d** correspondent à des solutions saturées. Les points **b**, **e** et **f** peuvent toutefois être positionnés sur le diagramme car on connaît la composition et soit l'enthalpie soit la température. Le point **b** est quasiment superposé au point **a** bien que sa pression soit différente. En effet, on a $h_b \simeq h_a$ et $T_b \simeq T_a$ (on rappelle qu'il s'agit de liquide). Quant au point **f**, on peut le placer sur le diagramme car on a calculé son enthalpie mais on voit bien que sa pression réelle est supérieure à celle du point d'équilibre auquel il se superpose. De même pour le point **e** dont la pression est encore plus élevée. Pour représenter l'ensemble du cycle, il faudrait une troisième dimension.