

**THERMODYNAMIQUE**

**I) Etude globale d'un réfrigérateur ditherme**

I – 1 ) Soit  $Q_2$  la chaleur reçue par le fluide calorifique de la part de la source froide et  $W$  le travail reçu par le fluide, lors d'un cycle.  $r = \frac{Q_2}{W}$ . Appliquons les principes de la thermodynamique au

fluide calorifique lors d'un cycle. On en déduit  $r = \frac{T_2}{T_1 + T_2}$

I – 2 ) On peut réaliser une échange thermique de manière réversible en mettant en contact **des corps de même température** à un infiniment petit près. Pour augmenter la température d'un système, il faut donc le mettre en contact avec une **infinité de sources de températures successivement voisines**. Cela prendrait évidemment un **temps infini**. La durée d'un cycle deviendrait donc infinie et donc ferait tendre la puissance de refroidissement vers 0.

**II) Réfrigérateur à absorption à trois sources de chaleur**

II – 1 )  $Q_1 > 0$  car la source (1) constitue le principal réservoir d'énergie du réfrigérateur.

$Q_3 > 0$  évidemment puisque le but est de refroidir la source (3)

Le premier principe appliqué au fluide calorifique sur un cycle donne  $Q_1 + Q_2 + Q_3 = 0$  d'où  $Q_2 < 0$ .

Donc  $Q_1 + Q_3 = -Q_2$  soit  $|Q_2| = |Q_1 + Q_3|$ . Comme  $Q_3 > 0$  donc  $|Q_2| > |Q_1|$ .

II- 2 )  $r = \frac{Q_3}{Q_1}$ ; Les cycles étant irréversibles, le deuxième principe s'écrit :

$\Delta S = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} + \frac{Q_3}{T_3} \leq 0$  qui donne  $r \leq r_1 = \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_2} \frac{T_3}{T_1}$  On augmente le rendement en augmentant

$r_1$ . En faisant tendre  $T_1$  vers l'infini, le rendement maximal  $r_1$  tend vers  $\frac{T_3}{T_2 - T_3}$ .

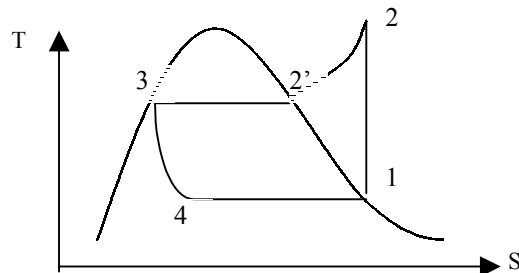
**III) Réfrigérateur à compression de vapeur**

III – 1 ) 1-2 : compression isentropique représentée par un segment vertical.

2-3 : condensation isobare. A, l'état de vapeur sèche, c'est l'arc 2-2'. A l'équilibre liquide vapeur, c'est un palier de liquéfaction à la température  $T_3$  : c'est le segment horizontal 2'-3.

3-4 : laminage adiabatique (détente adiabatique) isenthalpique, c'est l'arc 3-4

4-1 : vaporisation isobare et donc isotherme, représentée par le palier de vaporisation à la température  $T_1$  : segment horizontal 4-1.



III – 2 ) L'équation des machines pour un écoulement dont on néglige les variations des énergies potentielles et cinétique s'écrit :  $h_{\text{sortie}} - h_{\text{entrée}} = q + w$  (grandeurs massiques). Le détendeur ne possède pas de partie mobile supposée échanger du travail mécanique avec le fluide donc  $w = 0$ . De plus, il est dit à parois athermanes donc  $q = 0$ . On obtient donc  $h_4 - h_3 = 0$ . C'est l'**enthalpie massique** qui se conserve dans le détendeur.

III – 3 ) Les transformations 2'-3 et 4-1 ont lieu sur des paliers de liquéfaction du fluide. Ce sont des **isothermes**. Donc  $T_2' = T_3$  et  $T_4 = T_1$ . Durant la transformation 2-2', le fluide, à l'état de vapeur sèche, subit une condensation isobare mais pas isotherme !

III – 4 ) Etat 1 : vapeur saturante à la pression  $p_1$  :  $h_1 = h''(p_1)$

Etat 3 : liquide saturant à la pression  $p_3$  :  $h_3 = h'(p_3)$

Etat 4 : mélange liquide-vapeur. Mais la transformation 3-4 est isenthalpique dont  $h_4 = h_3 = h'(p_3)$ .

Le titre massique en vapeur  $x_4$  dans l'état 4 s'introduit en évaluant

$$h_4 = x_4 \cdot h''(p_1) + (1-x_4) \cdot h'(p_1). \text{ Or } h_4 = h_3 = h'(p_3) \text{ d'où : } x_4 = \frac{h'(p_3) - h'(p_1)}{h''(p_1) - h'(p_1)}$$

On pourrait déduire des tables l'enthalpie massique du fluide dans l'état 2 en invoquant la conservation de cette enthalpie massique sur le cycle  $h_1 + h_2 + h_3 + h_4 = 0$  d'où  $h_2 = - [h''(p_1) + 2 \cdot h'(p_3)]$ .

III – 5 ) Le transfert thermique avec la **source froide se fait** lors de la vaporisation à la température

$T_1$ , donc lors de la transformation 4-1.  $r = \frac{q_{4-1}}{w} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$   $h_2$  étant une fonction croissante de  $p_2$ , il n'est pas avantageux d'augmenter  $p_2$ .

**IV) Installation frigorifique à deux étages de froid**

1-2 : compression isentropique

2-3 : refroidissement isobare

3-4 : mélangeur isobare

4-5 : compression isentropique

5-6 : condensation isobare

6-7 : détente isenthalpique

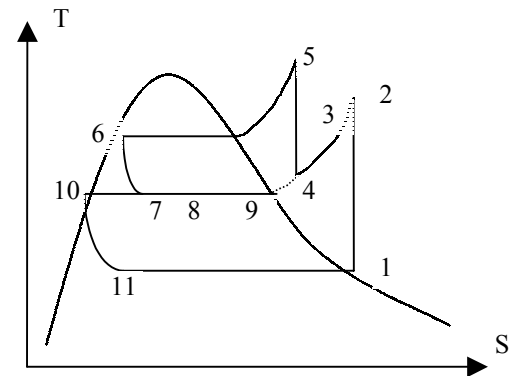
7-8 : évaporateur isobare-isotherme

8-9 : extraction isobare de la vapeur

8-10 : extraction isobare du liquide

10-11 : détente isenthalpique

11-1 : évaporateur isobare-isotherme



IV – 1 ) Refroidisseur isobare :  $p_2 = p_3$

Séparateur isobare :  $p_8 = p_9 = p_{10}$

D'où  $p_2 = p_3 = p_4 = p_7 = p_8 = p_9 = p_{10} = 3,459 \text{ bar}$ .

Mélangeur isobare :  $p_9 = p_3 = p_4$

Evaporateur isobare :  $p_7 = p_8$

IV – 2 ) Les chaleurs latentes massique de vaporisation du fluide sont les différence d'enthalpie massique entre l'été gazeux et l'état liquide.

$$l_{\text{vap}}(-5^\circ\text{C}) = h''(-5^\circ\text{C}) - h'(-5^\circ\text{C}) = 1277,6 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$l_{\text{vap}}(-20^\circ\text{C}) = h''(-20^\circ\text{C}) - h'(-20^\circ\text{C}) = 1326,3 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

IV - 3 ) Dans le détendeur  $R_2$  (calorifugé sans partie mobile), la transformation est isenthalpique donc  $h_6 = h_7$ . Or, dans l'état 6, le fluide est un liquide saturant à  $20^\circ\text{C}$  d'où  $h_6 = h'(20)$ . Dans l'état 7, c'est un mélange liquide-vapeur, d'où  $h_7 = x_7 \cdot h''(-5) + (1-x_7) \cdot h'(-5)$ . En égalisant ces

enthalpies on trouve :  $x_7 = \frac{h'(20) - h'(-5)}{h''(-5) - h'(-5)} = 9,12\%$

De même, dans le détendeur  $R_1$ , le fluide subit une transformation isenthalpique. D'où  $h_{10} = h_{11}$  avec  $h_{10} = h'(-5)$  car le fluide est à l'état de liquide saturant. Et  $h_{11} = x_{11} \cdot h''(-20) + (1-x_{11}) \cdot h'(-20)$  car le mélange liquide-vapeur se trouve à la pression  $p_{11} = 1,90 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  se trouve donc à la température  $-20^\circ\text{C}$ . D'où

$x_{11} = \frac{h'(-5) - h'(-20)}{h''(-20) - h'(-20)} = 5,15\%$

IV - 4 ) Appliquons la conservation de la masse entre l'entrée et la sortie du séparateur. Pendant  $\Delta t$ , il entre la masse  $(1+y) \cdot q_m \cdot \Delta t$ . Cette masse est égale à la masse sortante, pendant le même intervalle de temps, issue du séparateur où la fraction massique de vapeur est  $x_8$  :

$[x_8 \cdot y \cdot q_m + (1-x_8) \cdot q_m] \cdot \Delta t$ . D'où  $y = \frac{x_8}{1-x_8}$

IV - 5 ) Les transferts thermiques ont lieu dans les évaporateurs  $V_1$  et  $V_2$ .

$P_{qh} = q_m \cdot (h_8 - h_7)(1+y) = q_m [(x_8 - x_7) \cdot l_{vap}(-5)]$

$P_{qb} = q_m \cdot (h_1 - h_{11}) = q_m [(x_1 - x_{11}) \cdot l_{vap}(-20)]$

D'où  $a = \frac{P_{qh}}{P_{qb}} = \frac{(x_8 - x_7) \cdot l_{vap}(-5)}{(1-x_8) \cdot (x_1 - x_{11}) \cdot l_{vap}(-20)}$   $x_1 = 1$  car l'état 1 est l'état de vapeur saturante.  $a = 2,5$

IV - 6 )  $x_8 = \frac{x_7 \cdot l_{vap}(-5) + a \cdot (1-x_{11}) \cdot l_{vap}(-20)}{l_{vap}(-5) + a \cdot (1-x_{11}) \cdot l_{vap}(-20)} = 73,7\%$  d'où  $y = 2,81$

IV - 7 ) Le mélange se fait à enthalpie constante puisque le mélangeur est calorifugé et sans partie mobile. Donc l'enthalpie massique entrante et l'enthalpie massique sortante sont égales.

$(1+y) \cdot q_m \cdot h_4 = q_m \cdot h_3 + y \cdot q_m \cdot h_9$  soit  $h_4 = \frac{h_3 + y \cdot h''(-5)}{1+y} = 1687,7 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$

IV - 8 )  $P_{qb} = (h_1 - h_{11}) \cdot q_m = q_m \cdot x_{11} \cdot l_{vap}(-20)$  d'où  $q_m = \frac{P_{qb}}{x_{11} \cdot l_{vap}(-20)} = 0,340 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

IV - 9 )  $P_m = (h_2 - h_1) \cdot q_m + (h_5 - h_4) \cdot (1+y) \cdot q_m = 200,9 \text{ kW}$  d'où  $\eta = 0,404$

