

Machine frigorifique (CCP PSI)

1

1. Pour compresser un fluide il faut lui fournir du travail donc $w_{12} > 0$.

Pour condenser un fluide à P constant, il faut évacuer de la chaleur donc $q_{23} < 0$.

Pour évaporer un fluide à P constant, il faut lui fournir de la chaleur donc $q_{41} > 0$.

2.
$$e = \frac{q_{41}}{w_{12}}$$

3. Les transferts thermiques par contact se font toujours des corps les plus chauds vers les corps les plus froids. Soit T la température du fluide.

Dans la traversée du condenseur, on a donc $T > T_c$.

Dans la traversée de l'évaporateur, on a $T < T_F$.

4. À la maison, la source froide est constituée par les aliments dans le réfrigérateur et la source chaude par l'air de la cuisine.

5. On lit $T_{\text{sat}}(P_1) = -30^\circ\text{C}$ $T_{\text{sat}}(P_2) = 39^\circ\text{C}$

6.
$$l_{\text{vap}}(T) = h_{\text{vap}}(T) - h_f(T)$$

où h_{vap} et h_f sont les abscisses des points de la courbe de saturation.

2 L'entropie de changement d'état est donnée par

$$\Delta s_{\text{vap}} = \frac{h_{\text{vap}}(T)}{T}$$

T °C	h_{vap} kJ kg ⁻¹	h_l kJ kg ⁻¹	h_{vap} kJ kg ⁻¹	Δs_{vap} kJ kg ⁻¹ K ⁻¹
-30	380	162	218	0,897
39	417	255	162	0,519

7. \bar{A} P constant, $dh = c_p dT$.

On observe les isothermes dans le domaine de la vapeur: elles sont équidistantes pour un accroissement identique de T. \bar{A} P = 3 bar par exemple, h varie de $\Delta h = 38$ kJ kg⁻¹ quand T passe de 30°C à 70°C.

$$c_p = \frac{\Delta h}{\Delta T} \quad \underline{c_p = 0,96 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}}$$

8. Pour une phase condensée idéale, h ne dépend pas de P et $dh = c_{pl} dT$. On lit les valeurs de h le long de la courbe de saturation.

$$\bar{a} \text{ 40°C, } h_l = 256 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$\bar{a} \text{ -30°C, } h_l = 160 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

$$c_{pl} = \frac{\Delta h}{\Delta T} = \frac{96}{70} \quad \underline{c_{pl} = 1,3 \text{ kJ.kg}^{-1} \text{ K}^{-1}}$$

9. $\Delta(h + e_c + e_p) = w + q$ cf cours

10. En régime permanent le débit massique est le même partout à chaque instant.

11. Comme $D_m = \mu S v$ est constant et comme S l'est aussi, le produit μv est constant. La vitesse est maximale là où μ est minimale, c'est à dire dans l'état 1.

12.
$$e_{c \max} = \frac{1}{2} v_{\max}^2 = 0,5 \text{ J kg}^{-1} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ kJ kg}^{-1}$$

L'énergie cinétique ne varie pas de plus de $0,5 \cdot 10^{-3} \text{ kJ kg}^{-1}$ ce qui est négligeable devant des transferts de plusieurs dizaines de kilojoules par kilogrammes.

13. $e_p = g z$. l'altitude z varie au plus de 2 mètres donc e_p varie au plus de 20 J kg^{-1} , négligeable.

On néglige $e_m = e_c + e_p$ pour écrire

$$\Delta h = w + q$$

14. À cause de la viscosité, la pression diminue vers l'aval de l'écoulement. On néglige ce phénomène nommé « perte de charge ».

15. Les pistons assurant la compression doivent se mouvoir assez lentement pour que P reste uniforme avec le gaz en équilibre à chaque instant.

16. $T_1 = T_{\text{sat}}(P_1) + 10^\circ\text{C} = -20^\circ\text{C} \quad \rightarrow : \Delta = \text{cte}$

17. $T_3 = T_{\text{sat}}(P_3) - 10^\circ\text{C} = 29^\circ\text{C}$

Pour placer le point (3), on utilise $P_3 = 10 \text{ bar}$ et le fait que les isothermes sont verticales dans le domaine du liquide : l'isotherme 29°C est légèrement à gauche de 30°C .

18. Dans cette étape $w = 0$ et $q = 0$ donc $\Delta h = 0$
 $h_4 = h_3$: (4) est à la verticale de (3) sur l'isobare P_1 .

19. a) $h = u + Pv = u + \frac{P}{\mu}$

b) Entre (3) et (3'), $\Delta h = 0$.

De plus, $\mu_3 = \mu_{3'}$, car la phase liquide est incompressible. Donc :

$$\Delta u + \frac{1}{\mu_3} \Delta P = 0$$

$$c_v (T_{3'} - T_3) + \frac{1}{\mu_3} (P_{3'} - P_3) = 0$$

$$T_{3'} - T_3 = \frac{P_3 - P_{3'}}{\mu_3 c_v} = \frac{(10 - 7,4) \cdot 10^5}{1,3 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^3}$$

$$\underline{T_{3'} - T_3 = 0,2 \text{ K}}$$

variation négligeable devant les autres : le modèle est valide

20. On utilise le point (4') : liquide saturant à

5

P_1 .

$$\Delta h_{34} = h_4 - h_3 = h_4 - h_{4'} + h_{4'} - h_3$$

• $h_{4'} - h_4$: évaporation d'une fraction x_4 donc

$$h_{4'} - h_4 = x \text{ l}_{\text{vap}}(T_4)$$

• $h_{4'} - h_3$: changement de température d'une phase condensée idéale $h_{4'} - h_3 = c_{pl}(T_4 - T_3)$

$$\Delta h_{34} = x \text{ l}_{\text{vap}}(T_4) + c_{pl}(T_4 - T_3)$$

21. $\Delta h_{34} = 0$ donc $T_4 - T_3 = \frac{-x \text{ l}_{\text{vap}}(T_4)}{c_{pl}}$

c_{pl} calculé en 8). $x = 0,36$ (lecture graphique)

$T_4 - T_3 = -60^\circ\text{C}$. ou $h_4 = x h_v(P_1) + (1-x) h_l(P_1)$

En réalité, l'écart est de $-33 - 29 = -62^\circ\text{C}$.

L'écart s'explique sans doute par la valeur imprécise de c_{pl} obtenue en 8.

22. On applique à chaque fois $\Delta h = w + q$

$$w_{12} = h_2 - h_1$$

$$w_{12} = 55 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$q_{23} = h_3 - h_2$$

$$q_{23} = -200 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$q_{41} = h_1 - h_4$$

$$q_{41} = 145 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\underline{23.} \quad e = \frac{q_{41}}{w_{12}} \quad \underline{e = 2,64}$$

$$\underline{24.} \quad \Delta s_{12} = \underbrace{\Delta e_{12}}_0 + \underbrace{\Delta cr_{12}}_{>0}$$

En réalité, on a donc $s_2 > s_1$. Le point (2) se trouve plus à droite et h_2 est plus grande.

w_{12} est donc augmenté ce qui abaisse le rendement.

25. En sous-refroidissant, on amène le point (3) plus à gauche, donc le point (4) aussi. Donc $q_{41} = h_1 - h_4$ est augmenté ainsi que l'efficacité.

Pour sous-refroidir le liquide, il faut le laisser plus longtemps au contact de la source froide donc le faire s'écouler moins vite. Cela réduit la puissance de la machine.

$$\underline{26.} \quad e_c = \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad e_c = 7,4$$

Comme $e < e_c$, le cycle étudié est irréversible. Les deux étapes 2-3 et 4-1 mettent par exemple en jeu des chocs thermiques.

$$27. \quad \Delta s_{23} = \Delta s_{22'} + \Delta s_{2'3''} + \Delta s_{3''3}$$

$$\Delta s_{22'} = 1,78 - 1,71 = -0,07 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\Delta s_{2'3''} = -\Delta s_{\text{vap}}(P_2) = -0,519 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\Delta s_{3''3} = \int_{T_3''}^{T_3} c_{pl} \frac{dT}{T} = c_{pl} \ln \frac{T_3}{T_3''} = -0,032 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\underline{\Delta s_{23} = -0,63 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

Le second principe appliqué à l'étape $2 \rightarrow 3$ s'écrit

$$s_{c23} = \Delta s_{23} - \frac{q_{23}}{T_c} \quad \underline{s_{c23} = 0,05 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

Comme $\Delta s_{23} = s_3 - s_2$, $s_3 = s_2 + \Delta s_{23}$

$$s_3 = 1,78 - 0,63 \quad \underline{s_3 = 1,15 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}}$$

$$28. \quad \Delta s_{41} = \Delta s_{41'} + \Delta s_{1'1}$$

• $\Delta s_{41'}$ correspond à la vaporisation d'une fraction $(1-x_4)$ de fluide donc $\Delta s_{41'} = (1-x_4) \Delta s_{\text{vap}}(P_1)$

$$\Delta s_{41'} = 0,57 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\bullet \Delta s_{1'1} = 1,78 - 1,75 = 0,03 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\bullet \underline{\Delta s_{41} = 0,60 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\bullet s_{c41} = \Delta s_{41} - \frac{q_{41}}{T_F} \quad \underline{s_{c41} = 0,04 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

$$\bullet s_4 = s_1 - \Delta s_{41} \text{ donne } \underline{s_4 = 1,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}}$$

29. Comme $q_{34} = 0$, $\Delta c_{34} = \Delta_4 - \Delta_3$.

$$\Delta c_{34} = 0,03 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

30. L'entropie créée sur tout le cycle est

$$\Delta c_{cr} = 0,12 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{q_c}{T_c} + \frac{q_F}{T_F} + \Delta c_{cr} = 0 \\ q_c + q_F + w = 0 \end{array} \right.$$

On élimine q_c pour trouver $e = \kappa e_c$ avec

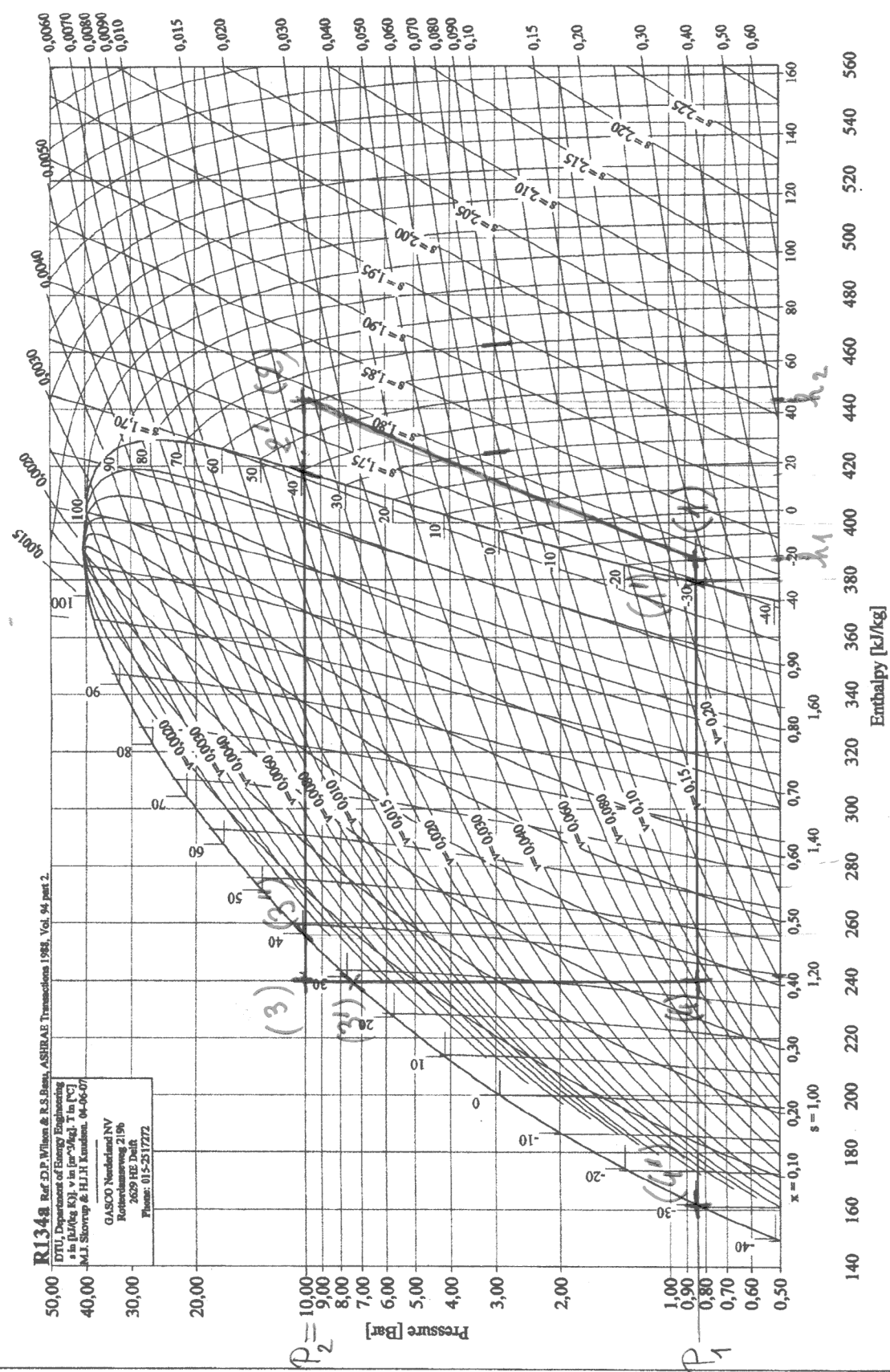
$$\boxed{\kappa = 1 - \frac{T_c \Delta c_{cr}}{w_{12}}}$$

31. $\kappa = 0,36$ $e_c \kappa = 2,66$

Avec erreurs de lecture près, on retrouve la valeur obtenue en question 23.

R134a Ref. D.P. Wilson & R.S. Bantu, ASHRAE Transactions 1981, Vol. 94 part 2.
 DTU, Department of Energy Engineering
 s in [kJ/kg], v in [m³/kg], T in [°C]
 M.J. Storrup & H.J.H. Kaudins, 04-06-07

GASCO Nederland NV
 Rotterdamsweg 219b
 2629 HE Delft
 Phone: 015-2517272



$P_2 = 10,00$

P_1