

1. $1 \rightarrow 2$: compression $\Rightarrow w_{12} > 0$
 $2 \rightarrow 3$: contact avec source chaude $\Rightarrow q_{23} < 0$ (on réchauffe la source chaude).
 $4 \rightarrow 1$: contact avec source froide $\Rightarrow q_{41} > 0$ (on refroidit la source froide).
2. La question précédente nous permet d'affirmer que lors de la transformation $2 \rightarrow 3$, la température du fluide est supérieure à celle de la source chaude ($q_{23} < 0$) ; de même la température du fluide est inférieure à celle de la source froide ($q_{41} > 0$).
3. À la maison, la source froide est l'intérieur du réfrigérateur, alors que la source chaude est la cuisine dans laquelle se trouve le réfrigérateur.
4. $D_m = \mu v S$
5. À section S constante, le débit volumique dépend de μv ; lorsque μ est minimale, alors v est maximale, pour que le débit reste constant (cycle, donc pas d'accumulation de fluide).
6. Au cours de la compression, $\Delta h \approx 50 \text{ kJ.kg}^{-1}$ et $\Delta(\frac{1}{2}v^2) < \frac{1}{2}v_1^2 \approx 0,5 \text{ J.kg}^{-1}$. La variation d'énergie cinétique est bien négligeable devant les autres termes du premier principe.
7. Comme les variations d'altitude du fluide ne dépassent pas les 2 m, on a $\Delta(gz) < 20 \text{ J.kg}^{-1}$. Les variations d'altitude sont aussi négligeables devant les autres termes du premier principe.
8. Au point 1 : $T_1 \approx -20^\circ\text{C}$ et sur la courbe de saturation (courbe en gras) $T_{sat}(P_{bp}) \approx -30^\circ\text{C}$, soit $T_1 - T_{sat}(P_{bp}) \approx 10^\circ\text{C}$.
9. De même, au point 3 : $T_3 \approx 30^\circ\text{C}$ et sur la courbe de saturation (courbe en gras) $T_{sat}(P_{hp}) \approx 40^\circ\text{C}$, soit $T_3 - T_{sat}(P_{hp}) \approx -10^\circ\text{C}$.
10. Sur $3 \rightarrow 4$, pas de partie mobile, donc $w = 0$ et la transformation est adiabatique ($q = 0$) par hypothèse, soit $\Delta h = 0$.
11. Sur la partie de $2 \rightarrow 3$ où le fluide est totalement liquide (à gauche de la courbe de saturation), on a $\Delta h \approx 255 - 242 = 13 \text{ kJ.kg}^{-1}$, soit $\Delta T = \frac{\Delta h}{c_P} \approx 13 \text{ K}$. Comme $T = 313 \text{ K}$ au niveau du liquide saturant (correspondant à 40°C), on trouve $T_3 = 313 - 13 = 300 \text{ K}$ (correspondant à 23°C). Or l'isenthalpe verticale donne une température d'environ 30°C pour T_3 , ce qui est cohérent.

De plus, sur $3 \rightarrow 4$, le fluide passe de $P_{hp} = 10 \text{ bar}$ à $P = 8 \text{ bar}$, alors

$$\frac{P_{hp} - P}{\mu_3} = \frac{(10 - 8) \cdot 10^5}{1,3 \cdot 10^3} = 154 \text{ J.kg}^{-1} \ll h_3 \approx 242 \text{ kJ.kg}^{-1}$$

12. En 3, le système est liquide, et en 4 il est diphasé. Le fluide est donc, sur cette étape la réunion des sous-systèmes : $S_1 =$ liquide qui se vaporise (la quantité qui se vaporise est Δn_{vap}) + $S_2 =$ liquide qui "reste liquide" (quantité n_{liq}).

Pour S_2 , $\Delta H_2 = \frac{n_{liq}}{M} c_P \Delta T = c_P (T_4 - T_3)$, alors que pour S_1 $\Delta H_1 = \frac{\Delta n_{vap}}{M} (c_P (T_4 - T_3) + L_{vap}(T_4))$ (refroidissement de T_3 à T_4 puis vaporisation à T_4) ; la variation d'enthalpie est la somme (grandeur extensive) des deux, puis on divise par m , ce qui donne le résultat.

13. $L_{vap}(T_4) = h_{vap}(T_4) - h_{liq}(T_4) \approx 218 \text{ kJ.kg}^{-1}$; par le théorème des moments, on trouve $\Delta x_{vap} \approx 0,36$, et, puisque $3 \rightarrow 4$ est une isenthalpique, on obtient :

$$T_4 - T_3 = -\frac{\Delta x_{vap} L_{vap}(T_4)}{c_P} \approx -78 \text{ K}$$

14. Le liquide doit être incompressible (sur l'échelle de température étudiée).
15. La détente doit être adiabatique ($q = 0$) et réversible (frottements fluides dans le compresseur négligés).
16. L'énergie massique utile est le transfert thermique massique avec la source froide (prélevé à l'intérieur du réfrigérateur), qui correspond à q_{41} ; l'énergie massique coûteuse est le travail mécanique nécessaire pour comprimer le fluide, qui correspond à w_{12} .
 $q_{41} = h_1 - h_4 \approx 145 \text{ kJ.kg}^{-1}$
 $w_{12} = \Delta u_{12} = \Delta h_{12} = h_2 - h_1 \approx 55 \text{ kJ.kg}^{-1}$.
 $e \approx 2,6$
17. Voir cours :

Le PP sur un cycle donne $W + Q_F + Q_C = 0$

et l'inégalité de Carnot-Clausius (cas d'égalité) donne

$$\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{Q_C}{Q_F} = -\frac{T_C}{T_F}$$

$$\text{soit } e_c = \frac{Q_F}{W} = \frac{Q_F}{Q_C + Q_F} = \frac{1}{1 + \frac{Q_C}{Q_F}} = \frac{1}{1 - \frac{T_C}{T_F}} \approx 7,4$$

L'efficacité de Carnot est bien supérieure, cela est prévisible de par son caractère réversible. Les irréversibilités sont présentes par les frottements dans le compresseur, les fuites d'énergies thermiques dans tout le cycle (surtout dans le détendeur),...

18. Si la transformation $1 \rightarrow 2$ n'est pas réversible, on ne suit pas une isentropique ($s = cste$) comme sur le diagramme.
 En conséquence, $\Delta s_{12} = s_c > 0$, et alors le point 2 se retrouve à une valeur d'entropie plus élevée : le point 2 sera plus à droite et W sera plus grand, l'efficacité correspondante sera donc plus faible.
19. Le sous-refroidissement à la pression P_{hp} consiste graphiquement à déplacer 3 sur la gauche donc sur la verticale (isenthalpique), à déplacer de même 4 sur la gauche et donc à accroître le transfert thermique Q_F lors de $4 \rightarrow 1$ qui est l'objectif de la machine, cela augmente ainsi l'efficacité.