

DEVOIR N° 6

Pour le vendredi 16 octobre

Étude d'une machine frigorifique

CCINP

On étudie une machine frigorifique destinée à refroidir les bacs d'un magasin de produits surgelés. Elle est constituée de quatre organes représentés sur la figure 1 entre lesquels circule un fluide frigorigène, le 1,1,1,2-tétrafluoroéthane, noté « R134a » par la suite. Mis en mouvement par le compresseur, il refroidit la source froide et réchauffe la source chaude.

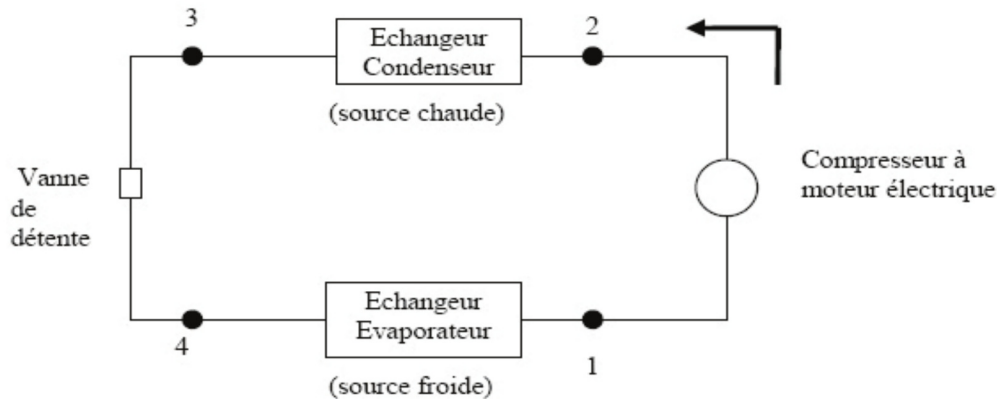


FIGURE 1 – Schéma fonctionnel d'une machine frigorifique

- Dans l'étape $1 \rightarrow 2$, le fluide subit une compression adiabatique réversible.
- Dans l'étape $2 \rightarrow 3$ a lieu dans le condenseur un échange thermique isobare à haute pression $P_2 = 10 \text{ bar}$.
- Dans l'étape $3 \rightarrow 4$, le fluide se détend de manière adiabatique.
- Dans l'étape $4 \rightarrow 1$ a lieu un échange thermique isobare à basse pression $P_1 = 0,85 \text{ bar}$.

Une figure fournie en annexe représente le diagramme pression-enthalpie du fluide. On peut notamment y voir un réseau de courbes isothermes, un réseau de courbes isentropiques et un réseau de courbes iso-titre en vapeur. On rappelle que ce titre est défini par

$$x = \frac{m_v}{m_v + m_\ell}$$

où m_v et m_ℓ sont respectivement les masses de vapeur et de liquide dans une portion de fluide. On note respectivement w_{ij} et q_{ij} le travail et le transfert thermique massiques reçus par le fluide dans l'étape menant de l'état i à l'état j .

Questions préalables sur le fonctionnement d'une machine frigorifique

1. Donner et justifier les signes des quantités algébriques suivantes : w_{12} , q_{23} et q_{41} .
2. Définir l'efficacité de la machine frigorifique sans chercher à la calculer explicitement.
3. Lors de la traversée du condenseur, le fluide frigorigène a-t-il une température supérieure ou inférieure à celle de la source chaude ? Lors de la traversée de l'évaporateur, le fluide a-t-il une température supérieure ou inférieure à celle de la source froide ?
4. Si on considère le réfrigérateur que l'on possède à la maison, où se situent la source froide et la source chaude ?

Propriétés thermodynamiques

5. En utilisant le graphique, déterminer les températures d'équilibre liquide-vapeur T_{sat} à la pression $P_1 = 0,85 \text{ bar}$ et à la pression $P_2 = 10 \text{ bar}$.
6. Déterminer l'enthalpie ℓ_{vap} et l'entropie de vaporisation Δs_{vap} aux deux températures précédentes.
7. En utilisant le graphique, donner une valeur approximative de c_p , la capacité calorifique massique à pression constante de la vapeur pour des pressions comprises entre P_1 et P_2 .

8. Le liquide est traité comme une phase condensée idéale. Déterminer pour ce fluide une valeur de c_{pl} représentative pour des températures comprises entre -30°C et 40°C .

Questions préalables sur l'expression utile du premier principe

9. Rappeler l'expression du premier principe appliqué à un fluide traversant en régime permanent une machine dans laquelle il reçoit un travail massique w et un transfert thermique massique q . On précisera le sens des notations employées.
10. Que peut-on dire du débit massique D_m dans les différents organes et canalisations de la machine en régime permanent ?
11. On admet que le débit massique s'exprime par $D_m = \mu S v$ où μ est la masse volumique du fluide, v sa vitesse d'écoulement et S la section de la canalisation, supposée uniforme sur tout le cycle. On donne la masse volumique du fluide dans les états numérotés de 1 à 4. En quel point la vitesse est-elle maximale ?

état	1	2	3	4
$\mu \text{ (kg.m}^{-3}\text{)}$	4,2	45,5	$1,3 \cdot 10^3$	12, 5

12. La vitesse maximale est de l'ordre de 1 mètre par seconde. Les transferts énergétiques sont de l'ordre de quelques dizaines ou de quelques centaines de kilojoules par kilogramme. Justifier que l'on peut négliger les variations d'énergie cinétique du fluide.
13. Justifier que l'on peut aussi négliger les variations de l'énergie potentielle de pesanteur. En déduire l'expression simplifiée du premier principe applicable dans ce problème.
14. Les échangeurs thermiques sont considérés isobares alors que le fluide s'y écoule¹. Quel type de forces néglige-t-on dans ce modèle ?
15. Que signifie concrètement l'hypothèse selon laquelle la compression s'effectue de manière réversible ?

Analyse du cycle

16. Pour ne pas dégrader le compresseur, il est crucial que le fluide caloporteur soit purement gazeux à l'entrée de cet organe, toute goutte de liquide entraînant son usure prématurée. C'est pourquoi le fluide à la sortie de l'évaporateur est « surchauffé » : sa température T_1 est supérieure de 10°C à celle de la vapeur saturante $T_{sat}(P_1)$. La surchauffe est une marge de sécurité qui permet de garantir que le fluide sera bien gazeux à l'entrée du compresseur même si le fonctionnement de la machine est perturbé.
- Placer le point correspondant à l'état (1) sur le graphique puis, en justifiant la démarche, le point correspondant à l'état (2).
17. Le fluide à la sortie du condenseur (état 3) est « sous-refroidi » : sa température de sortie T_3 est plus basse de 10°C que la température de vapeur saturante $T_{sat}(P_3)$. Placer le point représentant l'état (3) dans le graphique. Le liquide est traité comme une phase condensée idéale.
18. Le détendeur peut être assimilé à un simple étranglement local de conduite. Il n'y a pas de pièce mobile et les parois sont calorifugées. Justifier que cette étape $3 \rightarrow 4$ est isenthalpique puis placer le point 4 et tracer complètement le cycle.
19. Dans la zone située à gauche de la courbe de saturation, les isothermes sont verticales conformément au modèle de phase condensée idéale. On souhaite ici vérifier la validité de ce modèle sur la première phase de la détente $3 \rightarrow 4$, avant la vaporisation, entre le point (3) et le point (3') où on atteint la courbe de saturation.
- Exprimer l'enthalpie massique en fonction de l'énergie interne massique u , de la masse volumique μ et de la pression P .
 - On admet que $\Delta u = c_v \Delta T$ avec $c_v \simeq 1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ en ordre de grandeur. Déterminer $T'_3 - T_3$ et conclure sur la validité du modèle.
20. La suite de la détente $3 \rightarrow 4$ provoque une vaporisation du R134a. Établir qu'au cours de cette vaporisation, la variation d'enthalpie massique peut s'écrire : $\Delta h_{34} = x_4 \ell_{vap}(T_4) + c_{pl}(T_4 - T_3)$. On explicitera clairement la démarche adoptée.
21. En déduire par le calcul une valeur numérique de la variation de température $T_4 - T_3$ attendue lors de la transformation. Cette valeur est-elle du même ordre de grandeur que celle lue sur le diagramme ?

1. Seuls les 5/2 peuvent répondre à la question

Efficacité de la machine

22. En utilisant le graphique, déterminer numériquement w_{12} , q_{23} et q_{41} .
23. Calculer numériquement l'efficacité de la machine.
24. Dans la réalité, la compression réelle qui amène le fluide de P_1 à P_2 est nécessairement irréversible, contrairement à l'hypothèse simplificatrice de notre modèle. Proposer une modification simple de la courbe $1 \rightarrow 2$ dans le diagramme (P, h) . En déduire une conséquence sur l'efficacité.
25. Expliquer en quoi le sous-refroidissement permet d'augmenter l'efficacité de la machine, tous les autres paramètres étant gardés identiques. Y voyez-vous cependant un inconvénient cinétique ?

Analyse entropique

26. La source froide se trouve à la température $T_F = -15^\circ\text{C}$ et la source chaude à $T_C = 20^\circ\text{C}$. Calculer l'efficacité de Carnot et commenter.
27. En décomposant la transformation $2 \rightarrow 3$, calculer Δs_{23} et l'entropie créée s_{c23} dans cette étape. On rappelle que pour une phase condensée idéale, $ds = c_p dT/T$. Donner aussi la valeur de s_3 .
28. En décomposant la transformation $4 \rightarrow 1$, calculer Δs_{41} et l'entropie créée s_{c41} dans cette étape. Donner aussi la valeur de s_4 .
29. Calculer l'entropie créée s_{c34} dans l'étape de détente.
30. En appliquant le premier et le second principes à l'unité de masse du fluide au cours d'un cycle complet, exprimer l'efficacité e sous la forme

$$e = e_c \kappa$$

où κ est un facteur dépendant de T_c , s_c et w_{12} .

31. Calculer numériquement κ et vérifier que sa valeur est compatible avec celle de l'efficacité obtenue plus haut.

