

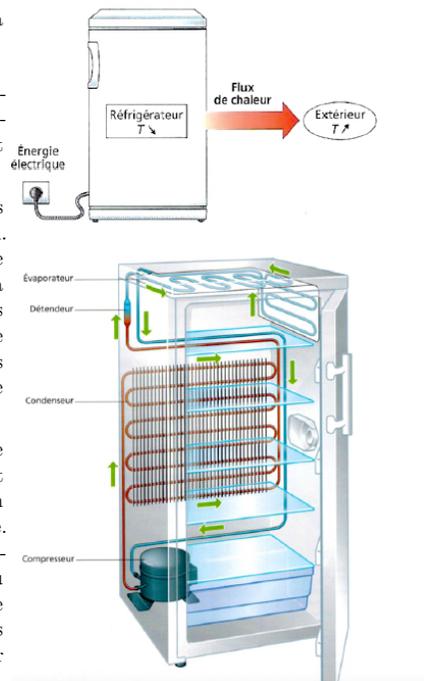
I Réfrigérateur à compresseur

On souhaite analyser le principe de fonctionnement du réfrigérateur à compresseur en s'appuyant d'extraits du livre « La physique par les objets quotidiens » de C. Ray et J.C. Poizat.

Le principe du réfrigérateur est simple : il assure un transfert de chaleur depuis ses compartiments internes, qui se refroidissent, vers la pièce où il se trouve, qui se réchauffe. Ce transfert consomme de l'énergie électrique. [...].

Le compresseur comprime le fluide réfrigérant, alors froid et sous forme gazeuse, ce qui augmente sa température et sa pression. A la sortie du compresseur, le fluide est donc chaud et à haute pression. [...]. Ce gaz chaud et à haute pression circule ensuite à travers le condenseur, où il cède de la chaleur par diffusion vers l'extérieur et subit un changement d'état : le gaz se transforme en un liquide chaud sous haute pression. La condensation (plus exactement la liquéfaction) peut se produire à température élevée car la pression est importante. [...].

En poursuivant son chemin dans le circuit frigorifique, le liquide passe ensuite à travers un détendeur qui abaisse sa pression et sa température, ([...] la détente adiabatique s'effectue dans un fin capillaire). On obtient un mélange liquide-gaz à l'équilibre. Après cette chute de pression, le mélange liquide-gaz froid traverse l'évaporateur où il absorbe la chaleur de l'intérieur du réfrigérateur pour subir un second changement d'état : le liquide se met à bouillir, c'est-à-dire qu'il se vaporise. On obtient alors un gaz froid et à basse pression, qui repart dans le compresseur pour un nouveau cycle.



I.A Principe de fonctionnement du réfrigérateur à compresseur

Pour un cycle complet, on note Q_1 le transfert thermique reçu par le fluide réfrigérant de la part du milieu extérieur, Q_2 le transfert thermique reçu par le fluide réfrigérant de la part de l'intérieur du réfrigérateur et W le travail de compression permettant de faire fonctionner le réfrigérateur.

1. Identifier le nom des organes (compresseur, détendeur, condenseur ou évaporateur) dans lesquels les transferts d'énergie Q_1 , Q_2 et W s'opèrent.

Réponse :

Le transfert thermique Q_1 avec l'extérieur a lieu dans le condenseur. Le transfert thermique Q_2 avec l'intérieur a lieu dans l'évaporateur. Finalement, le travail mécanique de compression a lieu dans le compresseur, comme indiqué par l'énoncé.

Pour aller plus loin :

L'énoncé introduit une notation inhabituelle. On note W le travail utile, et pas le travail total. Cette notation permet de simplifier la suite et prend son sens car pour une machine basée sur un cycle en écoulement stationnaire, $W_{\text{cycle}} = W_{\text{cycle, utile}}$. Les deux notions peuvent alors être confondues.

Cependant, pour un seul élément (le détendeur par exemple), l'égalité ne tient plus car il faut prendre en compte le travail de pression.

2. Préciser si Q_1 , Q_2 et W sont positifs ou négatifs.

Réponse :

Le compresseur fournit un travail au fluide donc $W > 0$ (sinon, le réfrigérateur fonctionnerait gratuitement !). De plus, le fluide va prélever de la chaleur à l'intérieur donc $Q_2 > 0$ (le transfert thermique a lieu de la partie intérieure du réfrigérateur donc à l'extérieur du fluide caloporteur, vers le fluide caloporteur). Finalement, le fluide va donner de la chaleur à l'extérieur donc $Q_1 < 0$.

3. Le compresseur met en jeu une compression rapide que l'on peut supposer adiabatique. Proposer une explication de l'augmentation de la température du gaz supposé parfait à l'issue de cette compression.

Réponse :

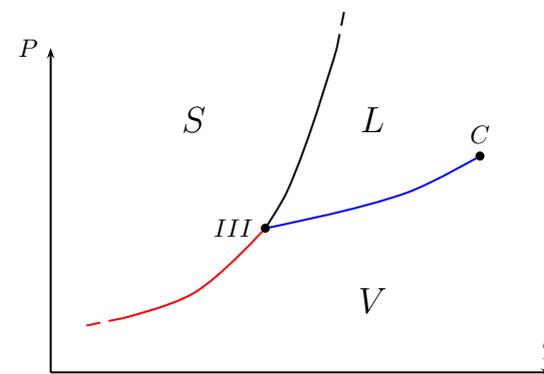
Le premier principe appliqué au fluide lors de son passage dans le compresseur indique $\Delta U = W + Q$ or son fonctionnement est adiabatique. On en déduit que $C_V \Delta T = W > 0$ (pas de changement d'état ici.) d'où ΔT qui augmente car $C_V > 0$.

Pour aller plus loin :

Dans cette question, on ne peut pas se contenter d'utiliser uniquement l'équation d'état. En effet, pour une compression, P augmente et V diminue donc on ne peut conclure sur $T = PV/(nR)$.

4. Dessiner l'allure du diagramme (P, T) pour le seul équilibre liquide / gaz et préciser les phases dans chaque partie du diagramme et sur la courbe $P(T)$. A quelle condition une liquéfaction peut-elle s'observer à « température élevée » ?

Réponse :



Ainsi, on peut observer une liquéfaction à température élevée si la pression de travail est aussi élevée. En effet, la pression de vapeur saturante $P_s(T)$ est une fonction croissante de la température.

5. Définir le coefficient de performance, noté CoP , également appelé efficacité, du réfrigérateur puis l'exprimer en fonction de Q_1 et Q_2 uniquement.

Réponse :

On a d'après le cours :

$$CoP = \frac{\text{energie utile}}{\text{energie couteuse}} = \left| \frac{Q_2}{W} \right| = \frac{Q_2}{W}$$

De plus, la machine à un fonctionnement cyclique donc l'application du premier principe au fluide caloporteur sur le cycle complet donne $\Delta U \underbrace{=}_\text{cycle} 0 = W + Q_1 + Q_2$. En combinant ces deux résultats, on obtient :

$$CoP = -\frac{Q_2}{Q_2 + Q_1} = -\frac{1}{1 + \frac{Q_1}{Q_2}}$$

On suppose le régime stationnaire atteint : la température T_{ext} de l'extérieur et la température de consigne T_{int} à l'intérieur du réfrigérateur sont alors constantes.

6. Déterminer l'expression du coefficient de performance maximal théorique (cas réversible) du réfrigérateur, noté CoP_r , en fonction de T_{ext} et T_{int} .

Réponse :

On a d'après le second principe appliqué au fluide caloporteur lors d'un cycle :

$$\Delta S \underbrace{=}_\text{cycle} 0 = \frac{Q_1}{T_{ext}} + \frac{Q_2}{T_{int}} + S_c \text{ avec } S_c \geq 0$$

On en déduit $Q_1/Q_2 = -\frac{T_{ext}}{T_{int}} - S_c \frac{T_{ext}}{Q_2}$ soit pour l'efficacité :

$$CoP = -\frac{1}{1 + \frac{Q_1}{Q_2}} = -\frac{1}{1 - \frac{T_{ext}}{T_{int}} - S_c \frac{T_{ext}}{Q_2}} = \frac{T_{int}}{T_{ext} - T_{int} + S_c \frac{T_{ext} T_{int}}{Q_2}}$$

L'efficacité maximale de Carnot est alors obtenue en supposant les transformations réversibles ($S_c = 0$) soit au final :

$$CoP_r = \frac{T_{int}}{T_{ext} - T_{int}}$$

Remarque :

On peut aboutir plus vite à ce résultat en utilisant l'inégalité de Carnot (mais attention à la manipulation des inégalités) ou bien en citant le cours pour justifier que le rendement maximal est obtenu lorsque le cycle est réversible.

7. Calculer ce CoP_r si $T_{ext} = 25^\circ C$ et $T_{int} = 5^\circ C$.

Réponse :

Pensez à bien convertir les températures en Kelvin !

On trouve alors $[CoP_r \approx 14]$. En pratique l'efficacité réelle sera beaucoup plus basse (car le cycle réel n'est pas réel).

I.B Etude du cycle du fluide réfrigérant dans un diagramme entropique $T(s)$

Nous allons étudier plus précisément les différentes transformations que le fluide réfrigérant subit. L'écoulement du fluide réfrigérant est stationnaire, de débit massique D_m . Les variations d'énergies cinétique et potentielle du fluide seront négligées. Nous supposons également que le fluide réfrigérant décrit le cycle suivant (on note $\{T_i, P_i\}$ le couple température/pression relatif à l'état i du fluide) :

- Avant d'entrer dans le compresseur, le fluide est un gaz surchauffé (i.e. non saturant) (état $A\{T_A, P_A\}$). Le compresseur impose une compression adiabatique et irréversible. Le fluide reste à l'état gazeux (état $B\{T_B, P_B\}$).
- Le fluide circule ensuite dans le condenseur où il opère un refroidissement isobare puis une liquéfaction complète isobare (et donc isotherme) à la pression P_B . On obtient un liquide saturant (état $C\{T_C, P_C\}$).
- Le liquide subit une détente isenthalpique (détente de type Joule-Thomson sans travail utile et sans transfert thermique) faisant apparaître un mélange diphasé après avoir traversé le détendeur (état $D\{T_D, P_D\}$).
- Le fluide pénètre dans l'évaporateur et évolue de manière isobare jusqu'à l'état A

On prendra les valeurs suivantes : $P_A = 2 \text{ bar}$, $P_B = 7 \text{ bar}$, $T_A = 5^\circ C$, $T_B = 55^\circ C$ et $D_m = 1 \times 10^{-2} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$. Une tolérance de $\pm 3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ sur la lecture de l'enthalpie massique sera acceptée. Une tolérance de $\pm 2^\circ C$ sur la lecture des températures sera acceptée.

On rappelle, en tenant compte de nos hypothèses de travail, le premier principe industriel appliqué à un fluide en écoulement stationnaire dans une conduite, recevant une puissance thermique \mathcal{P}_{th} et une puissance mécanique \mathcal{P}_{meca} (mise en jeu par les éventuelles parties mobiles d'une machine présente dans la conduite) avec h_e et h_s les enthalpies massiques du fluide à l'entrée et à la sortie de la conduite et D_m le débit massique :

$$D_m(h_s - h_e) = \mathcal{P}_{th} + \mathcal{P}_{meca}$$

8. Repérer sur le diagramme entropique fourni en document-réponse (figure I.1) les domaines liquide, diphasique et gazeux. Ce diagramme est réalisé avec l'entropie massique en abscisse et la température en ordonnée. D'autres grandeurs (x_v, h, P) peuvent aussi être lue à l'aide des isolignes tracées en couleurs.

Réponse :

A gauche, on a la zone de basse entropie qui correspond au liquide et à droite, la zone de haute entropie qui correspond au gaz (vapeur). Entre les deux courbes de changement d'état, il se trouve le domaine de l'équilibre liquide/vapeur.

9. Reporter la position des points A, B, C et D sur le document-réponse fourni en annexe et à rendre avec la copie.

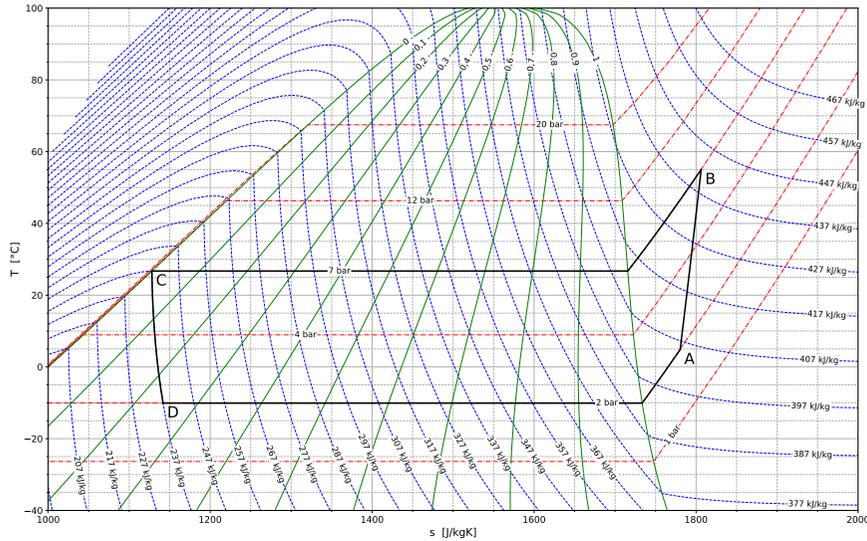
Réponse :

Pour les points A et B , on dispose des coordonnées de température et de pression.

Ensuite, entre B et C , la transformation se déroule en deux étapes. D'abord un refroidissement (T diminue) isobare, puis un changement d'état isobare et isotherme jusqu'à condensation complète de la vapeur.

Entre C et D on a une transformation isenthalpique (donc on sur place sur une courbe $h = cste$ et entre D et A , une transformation isobare. Il convient alors de placer D à l'intersection de l'isobare issue de A et de l'isenthalpique issue de C .

On obtient au final le diagramme suivant :



10. Justifier rigoureusement, à l'aide d'une lecture graphique que la compression adiabatique n'est pas réversible. Quelle conséquence cela peut-il avoir sur l'efficacité de la machine thermique ?

Réponse :

On observe que les points A et B ne correspondent pas à la même entropie. Ainsi, $\Delta s_{AB} > 0$. De plus, l'application du second principe à la compression indique

$$\Delta s = \underbrace{s_e}_{=0 \text{ adiabatique}} + s_c > 0$$

d'où le résultat. Cela aura pour conséquence de réduire l'efficacité de la machine thermique.

11. Donner, par lecture sur le diagramme entropique, la température T_l de liquéfaction du fluide réfrigérant observée pour le cycle étudié.

Réponse :

La liquéfaction s'effectue entre les points B et C. La température du palier (changement d'état) est ici $T_l = 27^\circ\text{C}$. On remarque au passage que cette température est supérieure à la température extérieure. Le transfert thermique ira donc bien du fluide caloporteur (qui se condense) vers l'extérieur.

12. Donner, par lecture sur le diagramme entropique, la température T_v de vaporisation du fluide réfrigérant observée pour le cycle étudié.

Réponse :

La vaporisation s'effectue entre les points D et A. La température du palier (changement d'état) est ici $T_v = -10^\circ\text{C}$. Ici, la température est bien inférieure à la température souhaitée à l'intérieur du réfrigérateur.

13. Exprimer puis calculer la puissance \mathcal{P}_{th2} reçue par le fluide pendant la transformation menant de l'état D à l'état A.

Réponse :

Dans l'évaporateur, Le fluide ne reçoit aucun travail mécanique et donc uniquement des transferts thermiques. On en déduit à l'aide du premier principe industriel :

$$D_m(h_A - h_D) = \mathcal{P}_{th2}$$

Il convient alors de lire les valeurs des enthalpies massique sur le diagramme donné et on obtient $h_A \approx 404 \text{ kJ/kg}$ et $h_D \approx 236 \text{ kJ/kg}$. On en déduit $\mathcal{P}_{th2} \approx 1,68 \text{ kw}$

14. Exprimer puis calculer la puissance \mathcal{P}_{meca} reçue par le fluide pendant la transformation menant de l'état A à l'état B.

Réponse :

Le premier principe industriel pour une transformation adiabatique ($P_{th} = 0$) donne :

$$D_m(h_B - h_A) = \mathcal{P}_{meca}$$

Après lecture graphique, on trouve $h_B \approx 442 \text{ kJ/kg}$. L'application numérique donne alors $\mathcal{P}_{meca} \approx 0,38 \text{ kw}$

15. Exprimer puis calculer la puissance \mathcal{P}_{th1} reçue par le fluide pendant la transformation menant de l'état B à l'état C.

Réponse :

Encore une fois, l'application du premier principe industriel au fluide caloporteur soumis à aucune forces autres que celles de pression donne :

$$D_m(h_C - h_B) = \mathcal{P}_{th1}$$

On a de plus $h_C \approx 236 \text{ kJ/kg} = h_D$ car la transformation reliant C et D est isenthalpique. L'application numérique donne finalement $\mathcal{P}_{th1} \approx -2,06 \text{ kw}$

16. Les résultats précédents, aux incertitudes de lecture près, permettent d'écrire $\mathcal{P}_{meca} = -(\mathcal{P}_{th1} + \mathcal{P}_{th2})$. Commenter cette relation.

Réponse :

Pour un cycle parcouru par le fluide, on a d'après le premier principe $\Delta U_{cycle} = 0 = W + Q_1 + Q_2$. On peut alors diviser cette relation par Δt , la durée de parcours du cycle et obtenir le bilan de puissance $\mathcal{P}_{meca} + \mathcal{P}_{th1} + \mathcal{P}_{th2} = 0$ d'où le résultat.

Cette relation traduit ainsi la conservation de l'énergie pour le fluide caloporteur.

17. En déduire l'expression puis une estimation de la valeur du coefficient de performance CoP_{vrai} (deux chiffres significatifs seront acceptés pour la valeur de CoP_{vrai}). Vérifier que la valeur obtenue est proche de $CoP_{vrai,precis} = 4,4$. En cas de désaccord, reprenez vos mesures !

Réponse :

D'après le résultat de la question 5, on a $CoP = CoP_{vrai} = \frac{Q_2}{W} = \frac{\mathcal{P}_{th2}}{\mathcal{P}_{meca}} \approx 4,42 \Rightarrow CoP_{vrai} \approx 4,4$

18. Les résultats précédents impliquent que $CoP_{vrai} < CoP_r$. Interpréter ce résultat.

Réponse :

On trouve ainsi une efficacité inférieure à la valeur maximale théorique obtenue précédemment (valant 14) mais tout de même acceptable. En effet, certaines transformations sont irréversibles (en particulier celles impliquant des transferts thermiques non isothermes et non quasi-statique).

D'autre effet peuvent aussi jouer, comme les forces de viscosité, qui s'oppose au mouvement du fluide dans les conduites lorsque les transformations ne sont plus quasi-statiques (ces forces sont proportionnelles à la vitesse du fluide).

19. Lors d'un processus adiabatique, on peut déterminer, à l'aide du diagramme entropique, le travail massique w_f des forces de viscosité du fluide car $w_f = - \int_{E.I}^{E.F} T ds$

Estimer la puissance \mathcal{P}_f associée à ces forces de viscosité lors de la compression (pour ce calcul la représentation de la transformation menant de l'état A à B sera linéarisée et donc assimilée à un simple segment reliant les points A et B). Commenter ce dernier résultat sachant que la viscosité d'un fluide est à l'origine d'une dissipation d'énergie lors de l'écoulement de ce fluide.

Réponse :

Le premier principe appliqué au compresseur donne $h_B - h_A = w_u + q$ avec $q = 0$. On en déduit $w_u = 37 \text{ kJ/kg}$. De plus, l'intégrale proposée s'exprime selon :

$$w_f = - \int_{E.I}^{E.F} T(s) ds = - \int_{E.I}^{E.F} T_A + \frac{T_B - T_A}{s_B - s_A} (s - s_A) ds = -T_A (s_B - s_A) + \frac{T_A - T_B (s_B - s_A)^2}{s_B - s_A} \quad (I.1)$$

$$= -T_A (s_B - s_A) + \frac{T_A - T_B}{2} (s_B - s_A) = (s_A - s_B) \frac{T_A + T_B}{2} \approx -6 \text{ kJ/kg} \quad (I.2)$$

Pour aller plus loin :

On aurait pu retrouver ce résultat en calculant l'aire sous la courbe comme étant le produit entre la largeur $\Delta s = s_B - s_A$ et la hauteur moyenne $T_{moy} = \frac{T_A + T_B}{2}$. On trouve bien au final un travail négatif (c'est le fluide qui fournit à la paroi un travail mécanique lié aux forces de viscosités), qui est très petit (en valeur absolue) par rapport au travail total reçu par le fluide w_u .

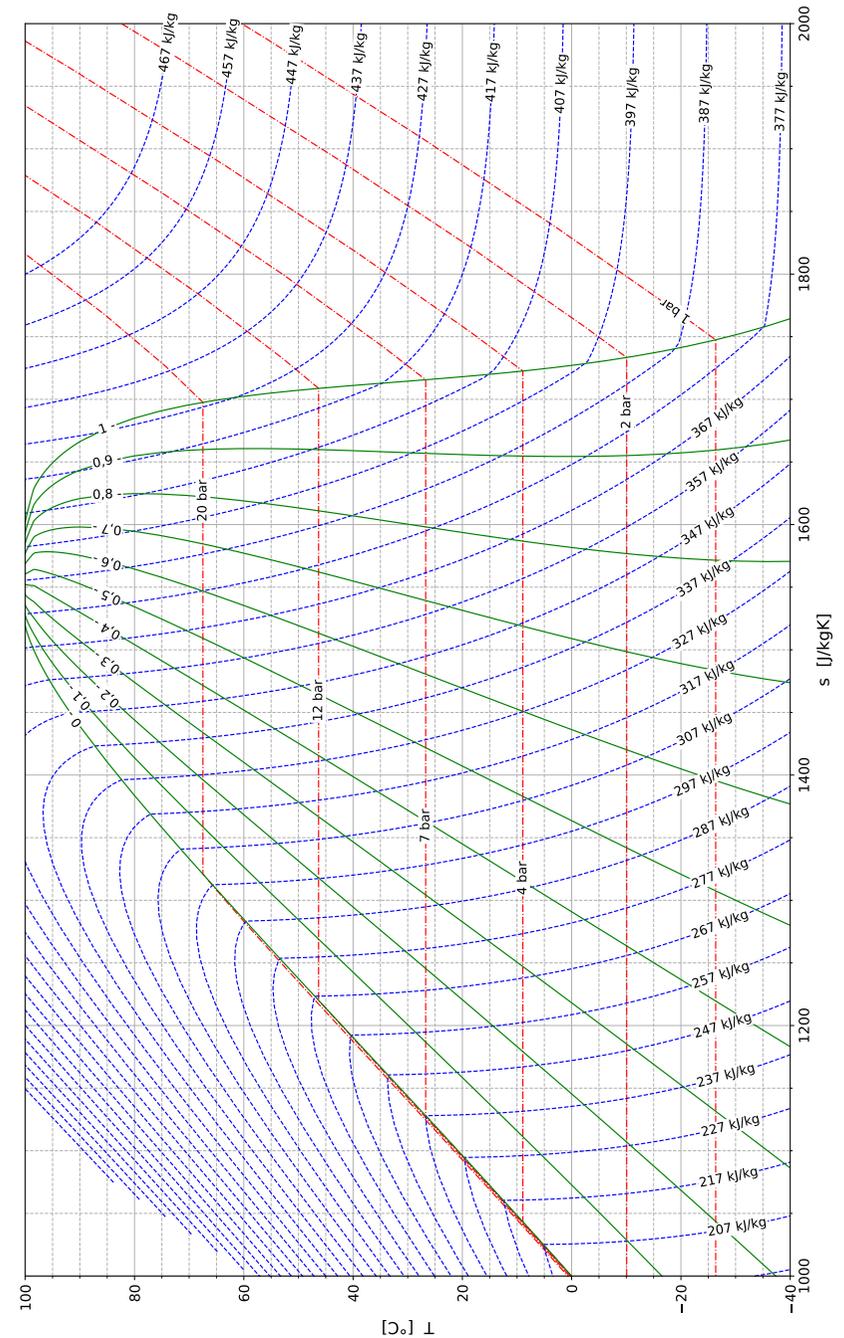


FIGURE I.1 – Diagramme entropique T, s du fluide R134a. Les courbes isotropes (x_v) sont représentées en vert (traits pleins), les isenthalpiques sont représentées en bleu (tirets) et les isobares en rouge (alternance tirets/points)