



Lycée Charles Coëffin — Sciences physique

Fiche de travaux dirigés — CPGE TSI2

TD 18 : Thermodynamique industrielle

Objectifs

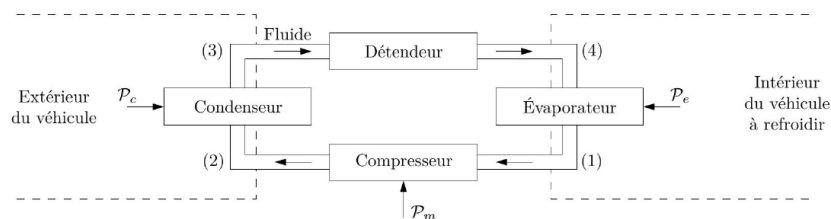
- Relier la notion de travail indiqué massique à la présence de parties mobiles. Établir un bilan de puissance pour un circuit hydraulique ou pneumatique avec ou sans pompe.
- Établir et utiliser les premier et deuxième principes formulés avec des grandeurs massiques. Identifier les termes à négliger en fonction du contexte étudié. Relier l'entropie massique créée aux causes d'irréversibilité.
- Établir et exploiter la variation d'enthalpie massique pour une transformation réversible dans le cas d'un compresseur et d'une turbine calorifugés.
- Établir et exploiter la relation entre les puissances thermiques reçues par les deux écoulements dans le cas d'un échangeur thermique calorifugé double flux.
- Établir et exploiter la nature isenthalpique de la transformation dans le cas d'un détendeur calorifugé.
- Repérer, pour une machine dont les éléments constitutifs sont donnés, les sources thermiques, le sens des échanges thermiques et mécaniques. Relier le fonctionnement d'une machine au sens de parcours du cycle dans un diagramme thermodynamique. Exploiter des diagrammes et des tables thermodynamiques pour déterminer les grandeurs thermodynamiques intéressantes. Définir et exprimer le rendement, l'efficacité ou le coefficient de performance d'une machine. Citer des ordres de grandeur de puissances thermique et mécanique mises en jeu pour différentes tailles de dispositifs.

Pré-requis : thermodynamique TSI 1, fluides en écoulement dans une conduite et diagrammes d'états des fluides réels purs.

1 Exercices

Climatisation d'une voiture ★

La quasi-totalité des véhicules neufs sont aujourd'hui équipés d'une climatisation. Pour refroidir l'air intérieur du véhicule, un fluide frigorigène effectue en continu des transferts énergétiques entre l'intérieur, l'extérieur du véhicule et le compresseur, comme schématisé figure ci-dessous. Les anciens véhicules utilisaient majoritairement le R134a, désormais remplacé par le R1234yf compte tenu de son fort pouvoir de réchauffement.



Sur le diagramme des frigorigènes (P, h) du R134a représenté après, la pression est exprimée en bar et l'enthalpie massique en $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$. Lors de l'exploitation du diagramme, les résultats seront donnés avec les incertitudes suivantes : $\Delta h = \pm 5 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\Delta s = \pm 0,05 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\Delta x = \pm 0,05$, $\Delta T = \pm 5^\circ\text{C}$ et $\Delta p = \pm 5\%$.

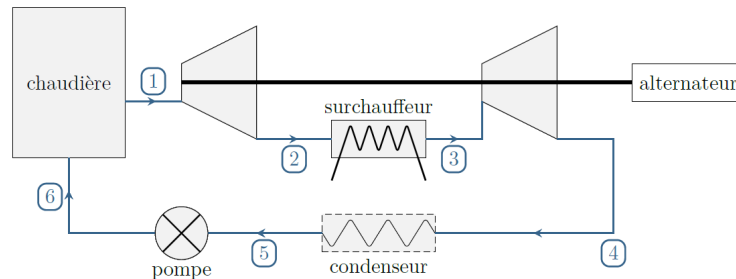
1. Justifier que le condenseur se trouve à l'extérieur du véhicule alors que l'évaporateur se trouve à l'intérieur.
2. Indiquer sur le diagramme les domaines liquide, vapeur et équilibre liquide-vapeur du fluide. Dans quel domaine du diagramme le fluide à l'état gazeux peut-il être considéré comme un gaz parfait ? Justifier.

On étudie l'évolution du fluide au cours d'un cycle en régime permanent avec un débit massique $D_m = 0,1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

- La puissance thermique P_e reçue par le fluide dans l'évaporateur permet la vaporisation isobare complète du fluide venant de (4) et conduit au point (1) à de la vapeur à température $T_1 = 5^\circ\text{C}$ et pression $P_1 = 3 \text{ bar}$.
 - Le compresseur aspire la vapeur (1) et la comprime de façon isentropique avec un taux de compression $r = P_2/P_1 = 6$.
 - Le fluide sortant du compresseur entre dans le condenseur dans lequel il est refroidi de manière isobare jusqu'à la température $T_3 = 60^\circ\text{C}$.
 - Le fluide sortant du condenseur traverse un détendeur isenthalpique jusqu'à la pression de l'évaporateur P_1 , ce qui constitue l'état (4).
3. Placer les points (1) à (4) sur le diagramme, et donner pour chaque point la température, la pression, l'enthalpie massique et l'entropie massique. Lorsque le fluide est diphasé, relever également le titre en vapeur.
 4. Rappeler l'écriture simplifiée du premier principe en termes de puissances appliqué à un système ouvert traversé par un fluide en écoulement permanent, en négligeant les variations d'énergie mécanique.
 5. Donner la signification de chaque terme dans l'équation obtenue précédemment. Quelle hypothèse simplificatrice permet d'aboutir à cette écriture ?
 6. Déterminer la valeur de la puissance mécanique $\mathcal{P}_m$ reçue par le fluide lors de son passage dans le compresseur. Commenter le signe de $\mathcal{P}_m$.
 7. Déterminer la puissance thermique P_e échangée par le fluide lors de son passage à travers l'évaporateur. L'air intérieur du véhicule est-il bien refroidi ?
 8. Définir l'efficacité e , ou coefficient de performance, du climatiseur. Calculer sa valeur.
 9. Comparer cette valeur à celle d'un climatiseur de Carnot fonctionnant entre la température de l'évaporateur et la température de liquéfaction du fluide sous la pression P_2 . Commenter le résultat obtenu.

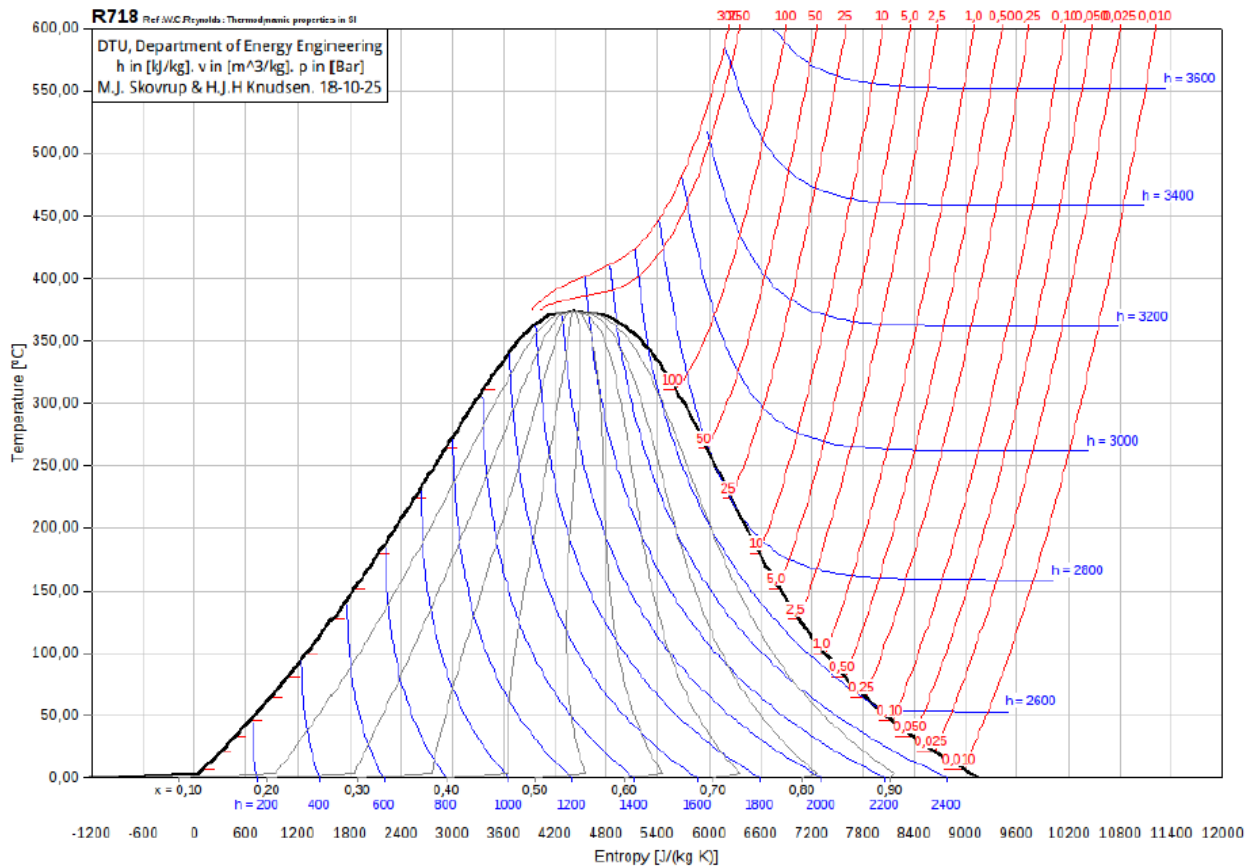
Cycle de Hirn d'une centrale thermique ★ ★

On s'intéresse à l'installation représentée figure ci-dessous, qui modélise une centrale thermique à flamme (gaz ou charbon).



Le fluide thermodynamique est de l'eau, qui suit un cycle de Hirn avec resurchauffe. L'eau liquide est chauffée par une chaudière thermique, qui débite de la vapeur d'eau à 550 °C et 100 bar (état 1). Cette vapeur subit une détente adiabatique réversible dans une première turbine dite haute pression, d'où elle sort à la pression de 10 bar (état 2). Un surchauffeur isobare, lui aussi relié à la chaudière, ramène la vapeur à la température initiale (état 3). La vapeur passe ensuite dans la seconde turbine, dite basse pression, d'où sort de l'eau à la température de 40 °C (état 4). Cette eau est envoyée dans un condenseur d'où elle sort à l'état de liquide juste saturant (état 5), puis elle est pompée de manière adiabatique réversible (état 6) et renvoyée en entrée du générateur de vapeur où elle subit un échauffement isobare. Les arbres des deux turbines sont liés entre eux.

1. Tracer le cycle parcouru par l'eau dans le diagramme entropique du R718 fourni. Pourquoi le point 6 est-il confondu avec le point 5 ? Commenter son sens de parcours.
2. En déduire la température de l'eau dans l'état 2 et l'état de l'eau dans l'état 4.
3. Déterminer les enthalpies massiques de l'eau aux six points du cycle. Comment interpréter physiquement l'égalité $h_5 = h_6$?
4. Déterminer le travail massique disponible sur l'arbre des turbines.
5. Si on considère que l'alternateur a un rendement électromécanique de 90%, déterminer le débit d'eau à imposer pour obtenir une puissance électrique de 400 MW .
6. Quelle est la quantité de chaleur massique dépensée au surchauffeur ?
7. Calculer le rendement thermodynamique de l'installation.



Turbine à gaz ★ ★

De la vapeur d'eau assimilée à un gaz parfait évolue dans une turbine horizontale, de section constante $\Sigma = 1 \text{ m}^2$, munie d'une hélice. À l'extérieur, la température est constante égale à $T_0 = 35^\circ\text{C}$. La vapeur est admise dans la turbine à la température $T_1 = 400^\circ\text{C}$ et pression $P_1 = 6 \text{ bar}$, et ressort à la température $T_2 = 100^\circ\text{C}$ sous pression $P_2 = 1,0 \text{ bar}$. Le débit au travers de la turbine vaut $D = 1 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$.

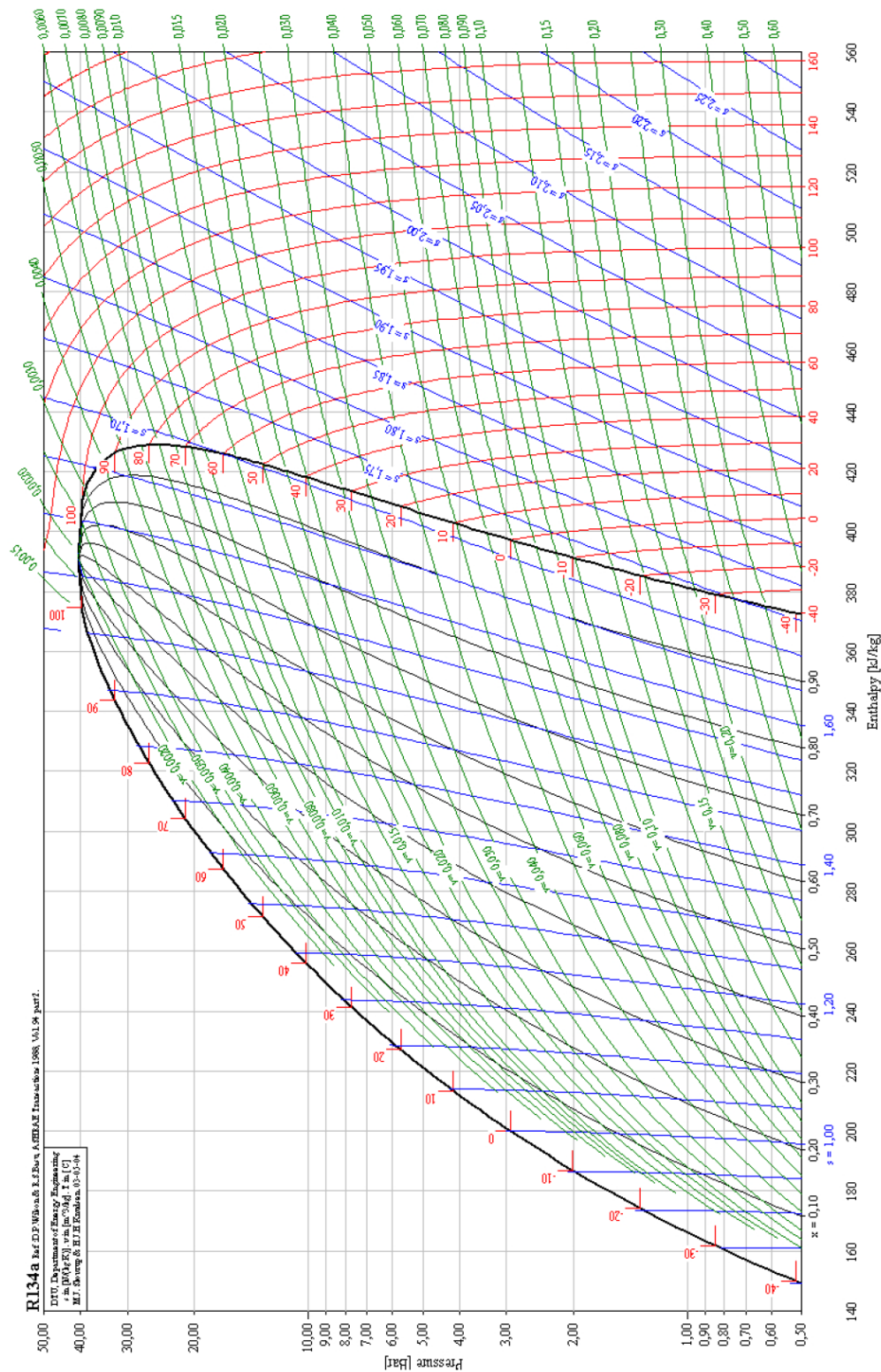
On donne l'expression de l'entropie molaire d'un gaz parfait :

$$S_m(T, P) = \frac{\gamma R}{\gamma - 1} \ln \left(\frac{T}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{P}{P_1} \right) + S_m(T_1, P_1).$$

Données : masse molaire de l'eau $M = 18 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, coefficient isentropique $\gamma = C_{P,m}/C_{V,m} = 1,3$.

1. Rappeler l'expression des deux principes pour un fluide en écoulement stationnaire.
2. On néglige les variations d'énergie cinétique. Que dire des échanges de chaleur entre le gaz et l'extérieur? Montrer que la puissance cédée à la turbine est maximale dans l'hypothèse d'un écoulement adiabatique.
3. Calculer la variation d'entropie entre l'entrée et la sortie. Est-ce en contradiction avec l'hypothèse d'un écoulement adiabatique?
4. Calculer la puissance cédée à la turbine en la supposant réversible.

5. Calculer la vitesse du fluide à l'entrée et à la sortie de la turbine. Peut-on vraiment négliger la variation d'énergie cinétique ?



2 Annale

Partie III - Réfrigérateur à compresseur

Le réfrigérateur à compresseur est le réfrigérateur le plus courant dans les cuisines. Comment le reconnaître ? Si votre réfrigérateur fait du bruit de temps en temps, c'est justement à cause du compresseur !

Un réfrigérateur a pour but de refroidir les aliments qu'il contient pour permettre leur conservation. Pour cela, un fluide va décrire un cycle thermodynamique appelé cycle frigorifique.

On se propose, dans cette partie, d'étudier un modèle thermodynamique simple du fonctionnement du réfrigérateur.

On considère une machine frigorifique ditherme cyclique basée sur le principe de fonctionnement suivant : " Un fluide frigorigène circule entre les différents organes de la machine. Mis en mouvement par le compresseur, ce fluide refroidit la source froide et réchauffe la source chaude ".

Un schéma simplifié de ce réfrigérateur est donné **figure 6**.

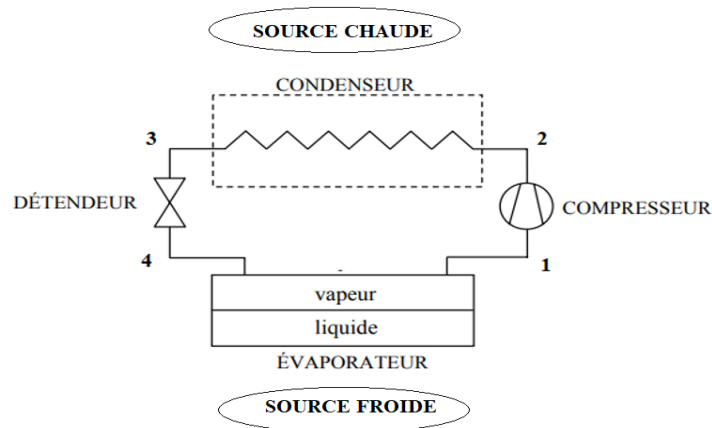


Figure 6 - Schéma simplifié du réfrigérateur

On notera Q_f et Q_c les transferts thermiques reçus algébriquement par le fluide de la part, respectivement de la source froide et de la source chaude au cours d'un cycle modèle.

On notera W , le travail reçu par le fluide au cours d'un cycle.

Q35. Donner et justifier les signes des quantités algébriques suivantes : Q_f , Q_c et W .

Q36. Sachant que le réfrigérateur est installé dans la cuisine, indiquer où se situe la source froide et où se situe la source chaude.

Le condenseur est la série de longs et fins tubes noirs situés généralement sur la face arrière du réfrigérateur.

Q37. Sans utiliser le diagramme enthalpique de la **figure 7**, indiquer si, lorsque le fluide traverse le condenseur, sa température est supérieure, inférieure ou égale à celle de l'air ambiant.

La **figure 7** représente le diagramme enthalpique (pression P en fonction de l'enthalpie massique h) d'un fluide frigorigène (ici le R134a). Les transformations au cours d'un cycle sont :

- 1 $\rightarrow$ 2 : compression adiabatique réversible du fluide dans le compresseur calorifugé ;
- 2 $\rightarrow$ 3 : échange thermique isobare à haute pression P_c dans le condenseur ;
- 3 $\rightarrow$ 4 : détente isenthalpique dans le détendeur ;
- 4 $\rightarrow$ 1 : échange thermique isobare à basse pression P_e dans l'évaporateur.

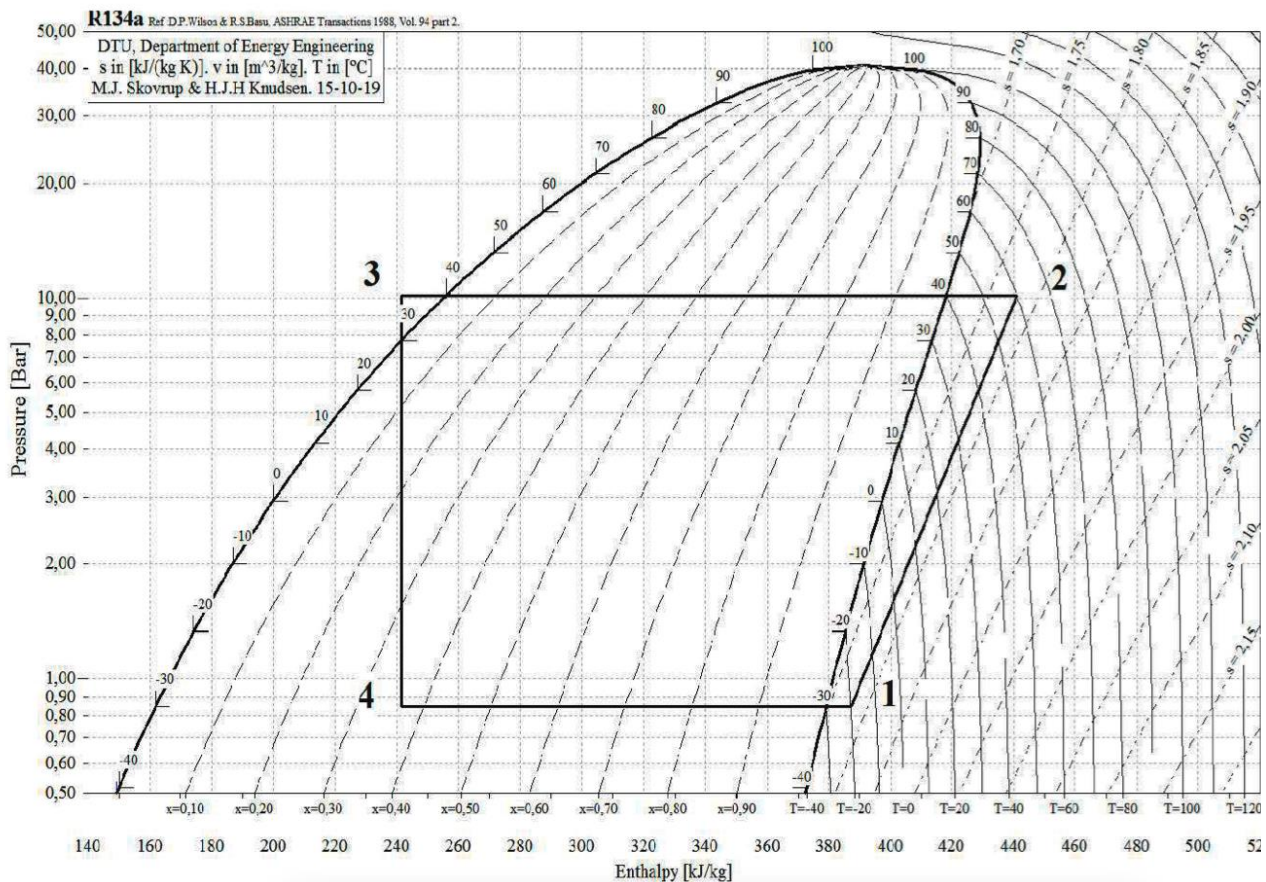


Figure 7 - Cycle suivi par le fluide R134a dans le diagramme enthalpique

Q38. En utilisant le diagramme enthalpique ci-dessus, répondre aux questions suivantes.

- Donner les valeurs des pressions P_e au sein de l'évaporateur et P_c au sein du condenseur.
- Déterminer le titre massique x_v en vapeur au point 4.
- Donner la valeur de la température T_2 en sortie du compresseur.

Q39. Donner l'expression générale du premier principe lorsqu'il est appliqué à un fluide en écoulement stationnaire unidimensionnel en nommant les grandeurs introduites.

Dans la suite des questions, on négligera les variations d'altitude et de vitesse du fluide.

Q40. Déterminer les transferts thermiques massiques reçus par le fluide de la part de la source froide q_f et de la source chaude q_c , ainsi que le travail indiqué (ou utile) massique w reçu au cours du cycle.

Q41. Montrer que l'efficacité e_1 de ce réfrigérateur est proche de 3,0.

Q42. En appliquant les deux principes de la thermodynamique à un cycle réversible, montrer que l'expression de l'efficacité de Carnot pour une machine frigorifique fonctionnant entre une source chaude T_c et une source froide T_f , est donnée par :

$$e_{\text{Carnot}} = \frac{T_f}{T_c - T_f}.$$

Q43. Donner une valeur numérique approchée de l'efficacité de Carnot du réfrigérateur dans le cas d'une source froide à la température $T_f = 3,0\text{ °C}$ et d'une source chaude à la température $T_c = 23\text{ °C}$. Comparer à la valeur trouvée pour le cycle précédent. Le résultat de cette comparaison était-il prévisible ? Justifier la réponse apportée.

Du givre peut se former à l'intérieur du réfrigérateur : en effet, l'évaporateur étant très froid, la vapeur d'eau se transforme en fines couches de glace appelée givre.

Q44. Nommer le changement d'état relatif à cette formation du givre.

Si on laisse s'accumuler une couche de givre, on admet que l'entropie créée S_c augmente pour un même transfert thermique pris à la source froide lors d'un cycle.

Q45. Montrer que l'on obtient pour un cycle réel la relation suivante :

$$\frac{Q_c}{Q_f} = -\alpha \frac{T_c}{T_f}$$

où α est une constante à préciser en fonction de T_f , Q_f et de S_c .

En prenant une valeur de α égale à 1,55, l'efficacité du réfrigérateur est à présent égale à $e_2 = 1,50$.

Q46. En déduire la surconsommation électrique du réfrigérateur due à la présence de givre. On pourra donner le résultat en pourcentage.