

## ETUDE D'UNE POMPE A CHALEUR

*Cet énoncé est accompagné d'un document réponse à rendre avec la copie.*

Le réchauffement climatique s'est imposé comme un défi majeur pour notre société. Dans le cadre du développement durable, la pompe à chaleur est une machine thermique particulièrement intéressante en raison de son efficacité supérieure à un. Elle permet ainsi de diviser la consommation énergétique par ce même coefficient. La détermination de cette efficacité est l'objet principal de cette étude.

Si le principe de la pompe à chaleur est ancien (Thomson 1852), sa commercialisation a débuté dans les années 1950 aux États-Unis et se développa comme moyen de chauffage dans les années 1970 en France.

Une pompe à chaleur est une machine thermique comportant deux sources de chaleur (froide et chaude) entre lesquelles un fluide caloporteur subit des cycles de transformation. Afin de protéger la couche d'ozone, les fluides caloporteurs contenant du chlore (appelés CFC : chloro-fluoro-carbone) ont été interdits au niveau international par le protocole de Montreal en 1985. Le fluide utilisé dans la pompe à chaleur du laboratoire est le 1,1,1,2-tétrafluoroéthane  $C_2H_2F_4$  (fluide HFC référencé R134a) est sans effet destructeur pour la couche d'ozone. Notons que ce fluide, très utilisé dans l'industrie, présente toutefois un impact non négligeable sur l'effet de serre.

Nous allons étudier une pompe à chaleur pédagogique : nous aborderons l'étude de la machine thermique en considérant dans un premier temps le système fermé constitué par le fluide caloporteur R134a. Nous considérerons ensuite l'écoulement du fluide dans les différentes machines qui composent la pompe à chaleur. Nous verrons enfin comment fonctionne le cœur du dispositif : le compresseur.



Figure 1 R134a

Le dispositif comprend les différents organes mentionnés figure 2. Le fluide R134a est contenu dans un tuyau de cuivre parfaitement fermé. Sous forme gazeuse à la sortie du compresseur (point 2), il subit une liquéfaction au niveau du condenseur : le tuyau de cuivre prend la forme d'un serpentin plongé dans le seau de droite contenant de l'eau (figure 3). Le liquide subit ensuite une détente au niveau du détendeur (évolution de 4 à 5) avant de se vaporiser complètement au niveau de l'évaporateur : le tuyau de cuivre prend la forme d'un serpentin plongé dans le seau de gauche contenant de l'eau (figure 3). Il retourne à nouveau dans le compresseur (point 1) pour suivre un nouveau cycle.

On dispose de deux manomètres (basse pression et haute pression) permettant une mesure de pression relative ( $P_{r,b}$  et  $P_{r,h}$ ) ; pour obtenir la pression absolue on doit ajouter 1 bar. Ces manomètres présentent une double graduation pression relative et température.

On utilise un système d'expérimentation assistée par ordinateur afin de suivre l'évolution des températures  $T_i$  aux différents points et de la puissance  $\mathcal{P}$  consommée par le compresseur. Pour cette dernière, on utilise un wattmètre (figure 4) disposant d'une sortie en tension proportionnelle à la puissance mesurée.

On peut schématiser le fonctionnement de la pompe à chaleur sur le schéma d'ensemble donné figure 5.

On note les températures exprimées en °C avec la lettre  $\theta$  et celles exprimées en kelvin avec la lettre  $T$ .

### I.A - Modèle de Carnot

Dans cette sous-partie I.A, on modélise la pompe à chaleur par une machine cyclique réversible ditherme de Carnot : au cours d'un cycle le fluide R134a reçoit le transfert thermique  $Q_f$  de la part de la source froide (à la température  $T_f$ ), le transfert thermique  $Q_c$  de la part de la source chaude (à la température  $T_c$ ) et le travail  $W$  de la part du compresseur. On suppose que toutes les évolutions sont réversibles.

#### I.A.1)

a) Appliquer le premier principe au fluide R134a sur un cycle. L'écriture obtenue dépend-elle du caractère réversible des évolutions ?

b) Appliquer le second principe au fluide R134a sur un cycle. L'écriture obtenue dépend-elle du caractère réversible des évolutions ?

#### I.A.2)

a) Donner, en le justifiant, le signe des grandeurs  $Q_f$ ,  $Q_c$  et  $W$ .

b) Comparer  $|Q_f|$  et  $|Q_c|$ . Commenter.

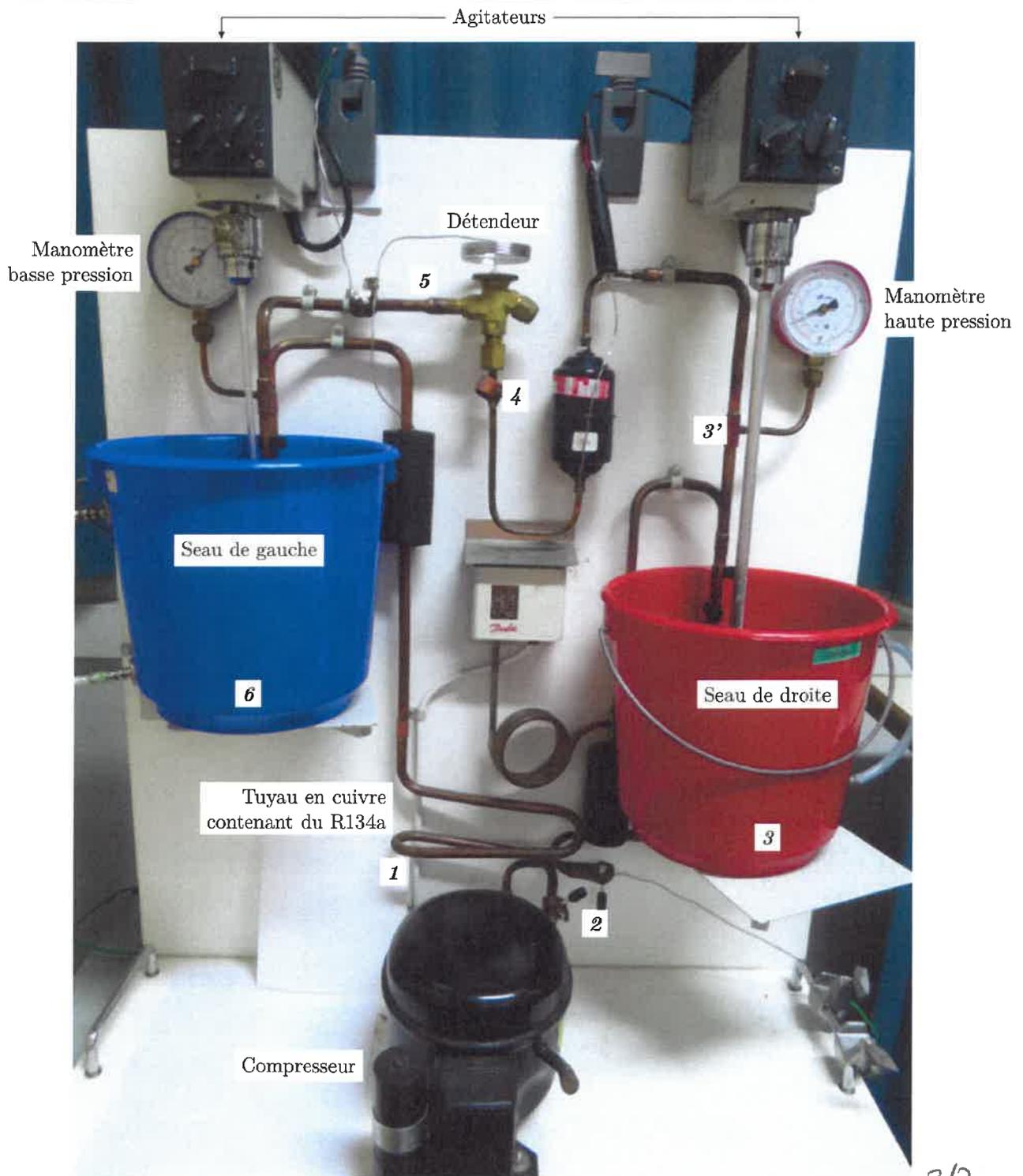


Figure 2 Vue d'ensemble de la pompe à chaleur

**I.A.3)** La pompe à chaleur est utilisée ici comme un réfrigérateur.

- a) Définir l'efficacité  $\eta_{fc}$  de cette machine et l'exprimer en fonction des températures des sources.
- b) Faire l'application numérique avec  $\theta_c = 26\text{ °C}$  et  $\theta_f = 0\text{ °C}$ .
- c) Commenter le résultat en se référant à un ordre de grandeur de l'efficacité d'une machine réelle actuelle.

**I.A.4)** La pompe à chaleur est utilisée ici comme un dispositif de chauffage.

- a) Définir l'efficacité  $\eta_{cc}$  de cette machine et l'exprimer en fonction des températures des sources.
- b) Faire l'application numérique avec  $\theta_c = 26\text{ °C}$  et  $\theta_f = 0\text{ °C}$ . Commenter.



Serpentin évaporateur



Serpentin condenseur



Manomètre basse pression ( $P_{rb}$ )

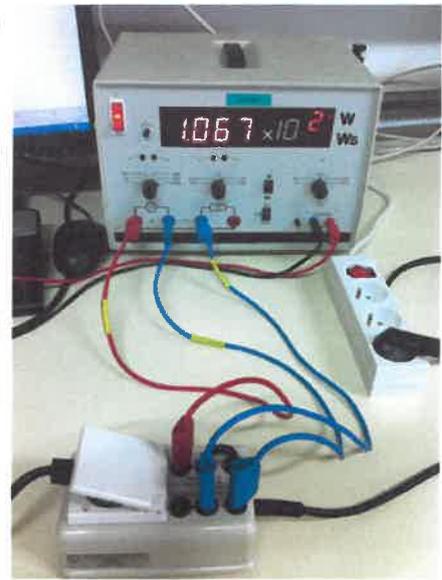


Manomètre haute pression ( $P_{rh}$ )

Figure 3



Pompe à chaleur avec dispositif d'acquisition



Wattmètre

Figure 4

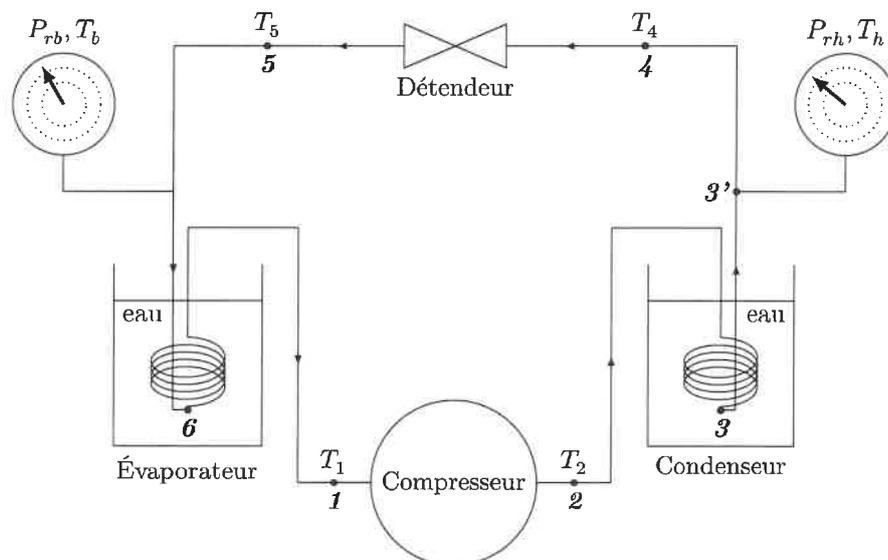


Figure 5 Schéma d'ensemble de la pompe à chaleur

### I.B. Diffusion thermique

On étudie maintenant le phénomène de diffusion thermique dans l'eau des seaux. On modélise le serpentin par un conducteur de cuivre compris entre les cylindres de hauteur  $H$  et de rayons  $R'$  et  $R > R'$  (figure 7). L'intérieur ( $r < R'$ ) est rempli d'eau de conductivité thermique  $\lambda_e$ , de capacité thermique massique  $c_e$  et masse volumique  $\rho_e$  grandeurs supposées constantes. On suppose que la température dans le conducteur de cuivre est constante égale à  $T_c$ . L'eau est initialement à la température  $T_0$ . On suppose que le champ de température dans l'eau est fonction de la distance  $r$  à l'axe  $Oz$  et du temps  $t$ . La conductivité thermique de la glace est  $\lambda_g = 2,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  et celle de l'eau liquide  $\lambda_e = 0,60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

On donne  $R' = 4 \text{ cm}$ ,  $R = 4,2 \text{ cm}$ ,  $H = 15 \text{ cm}$ ,  $c_e = 4,2 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  et  $\rho_e = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

**I.B.4)** Établir l'équation de diffusion thermique vérifiée par la température  $T(r, t)$  dans l'eau à partir d'un bilan enthalpique sur un système élémentaire que l'on précisera et de la loi de Fourier que l'on commentera. On ne prendra en compte ici que le phénomène de diffusion thermique.

**I.B.5)** En évaluant une durée caractéristique, justifier la nécessité de remuer l'eau.

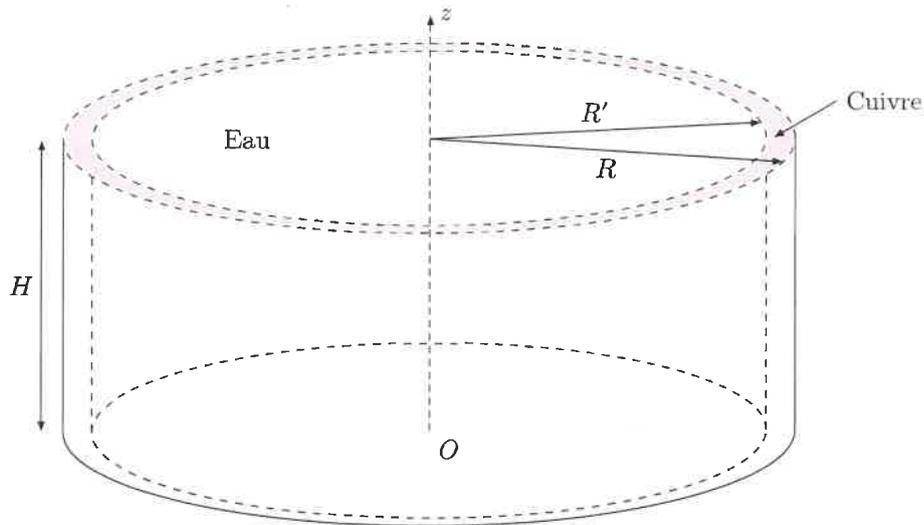


Figure 7 Diffusion thermique

## II Étude thermodynamique de l'écoulement stationnaire

### II.A – Écoulements stationnaires à travers les différents composants

Dans cette sous-partie II.A, on considère cette fois que le fluide est en écoulement stationnaire à travers les différentes machines qui composent la pompe à chaleur (compresseur, condenseur, détendeur, évaporateur, tuyau). De plus, on réalise un écoulement d'eau dans le seau de droite (figure 8) : le seau de droite est alimenté en eau par un robinet et l'eau du seau s'évacue ensuite dans un évier.



Figure 8 Pompe à chaleur avec dispositif de refroidissement

Au bout d'une vingtaine de minutes, la température de l'eau du seau de droite (notée  $\theta_3$ ) est constante. Il en va de même pour celle du seau de gauche. Les températures et pressions se stabilisent alors dans l'ensemble du dispositif comme le montre le relevé donné figure 9.

Le régime permanent atteint, on effectue alors les mesures de température  $\theta_i$  et de pression  $P_i$  reportées dans le tableau 1.

	1	2	3	3'	4	5	6
$P_r$ (bar)	1,9	5,8	5,8	5,8	5,8	1,9	1,9
$P$ (bar)	2,9	6,8	6,8	6,8	6,8	2,9	2,9
$\theta$ (°C)	12	44	26	26	19	0	0

Tableau 1

II.A.1) Pour quelle raison obtient-on une température constante dans le seau de gauche ?

II.A.2) Pour quelle raison a-t-on une double graduation pression relative  $P_r$  et température  $\theta$  sur les manomètres (figure 3) ?

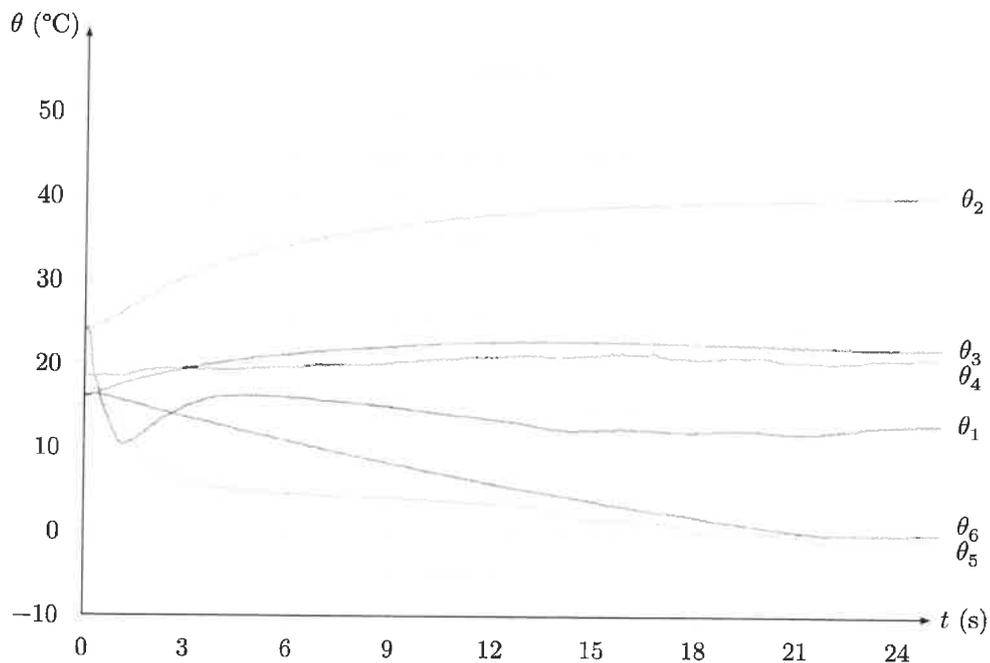


Figure 9 Relevé de températures

En régime permanent d'écoulement, le fluide R134a subit les transformations suivantes (on peut se reporter à la figure 5)

- $1 \rightarrow 2$  : le fluide à l'état gazeux sous la pression  $P_b$  est comprimé dans un compresseur à piston. Il ressort à la pression  $P_h$ . On considère que cette compression est isentropique ;
- $2 \rightarrow 3$  : le gaz se refroidit de façon isobare jusqu'au condenseur (seau de droite contenant une masse d'eau  $m_e$ ). On parle de désurchauffe. Au point 3 le gaz est assimilé à de la vapeur saturante sèche ;
- $3 \rightarrow 3'$  : le gaz se condense au contact thermique de l'eau du condenseur (seau de droite) jusqu'au liquide saturé ;
- $3' \rightarrow 4$  : dans le tuyau de cuivre, le liquide se refroidit de façon isobare jusqu'au détendeur. On parle de sous-refroidissement ;
- $4 \rightarrow 5$  : le liquide subit une détente dans le détendeur ; il commence à se vaporiser ; la pression de sortie est  $P_b$  (manomètre de gauche). Cette détente peut être considérée comme adiabatique ;
- $5 \rightarrow 6$  : le fluide poursuit sa vaporisation à la pression  $P_h$  notamment dans le serpentin évaporateur baignant dans de l'eau (seau de gauche contenant une masse d'eau  $m_e$ ) ;
- $6 \rightarrow 1$  : dans le tuyau de cuivre, le gaz se réchauffe de façon isobare jusqu'à l'entrée du compresseur. On parle de surchauffe. Elle permet de s'assurer qu'aucune goutte de liquide ne pénètre dans le compresseur.

On obtient le tableau 2.

	1	2	3	3'	4	5	6
$P$ (bar)	2,9	6,8	6,8	6,8	6,8	2,9	2,9
$\theta$ (°C)	12	44	26	26	19	0	0
$T$ (K)	285	317	299	299	292	273	273
$x$	vapeur sèche	vapeur sèche	1	0	Liquide	$x_5$	1
$v$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0,073	0,033	0,030	$8,3 \times 10^{-4}$	$8,1 \times 10^{-4}$	0,012	0,070
$h$ ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	408	430	412	233	226	$h_5$	396
$s$ ( $\text{kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	1,76	$s_2$	1,72	1,13	1,09	1,08	1,72

Tableau 2

II.A.3) On considère une machine (M), présentant une entrée et une sortie, dans laquelle un fluide est en écoulement permanent unidimensionnel.

Établir le premier principe sous la forme :  $\Delta h + \Delta e_c + \Delta(gz) = w_i + q_e$ .

Dans toute la suite du problème, on négligera les variations d'énergies cinétique et potentielle massiques devant les variations d'enthalpie massique.

II.A.4) On s'intéresse au détendeur. Il s'agit d'un organe sans pièce mobile. La détente est supposée adiabatique.

a) Quel(s) argument(s) permet(tent) de justifier l'adiabaticité de la transformation ( $4 \rightarrow 5$ ) dans le détendeur ?

b) Montrer qu'une fonction d'état massique se conserve au cours de la transformation.

II.A.5) On s'intéresse au compresseur. L'évolution du fluide peut être considérée comme isentropique.

a) Quels arguments permettent de justifier l'isentropicité de la transformation ( $1 \rightarrow 2$ ) dans le compresseur ?

b) Calculer le travail massique indiqué  $w_{i12}$  reçu par le fluide de la part du compresseur. Commenter.

## II.B – Diagramme enthalpique

On considère le diagramme enthalpique (ou diagramme des frigoristes) fourni sur le document réponse. Sur ce diagramme, on peut identifier la courbe de saturation composée de la courbe d'ébullition (liquide saturé,  $x = 0$ , courbe de gauche) et de la courbe de rosée (vapeur saturante sèche,  $x = 1$ , courbe de droite). On peut également identifier les isotitres, les isothermes, les isentropiques et les isochores.

II.B.1) Commenter l'allure des isothermes dans chaque domaine (vapeur sèche, état diphasé, phase liquide).

II.B.2) Placer les points **1**, **2**, **3**, **3'**, **4**, **5** et **6** sur le diagramme des frigoristes et tracer le cycle parcouru par le fluide.

II.B.3)

a) Lors du changement d'état  $A \rightarrow B$  d'un corps pur à la température  $T$ , quelle relation a-t-on entre  $\Delta s_{AB}(T)$  et  $\Delta h_{AB}(T)$  ?

b) Vérifier numériquement cette relation pour  $T = 299 \text{ K}$ .

c) Déterminer graphiquement la valeur de l'enthalpie massique de vaporisation du fluide R134a pour  $T = 273 \text{ K}$ . Commenter l'ordre de grandeur en comparant à des ordres de grandeur connus.

II.B.4) Déterminer la valeur de la fraction massique  $x = m_g/m$  au point **5**.

pas de partie C

## II.D – Efficacité de la pompe à chaleur

Dans toute la suite du problème, on prendra comme valeur du débit massique en R134a :  $D_m = 2,12 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ .

II.D.1) Le wattmètre mesurant la puissance électrique consommée par le compresseur affiche une valeur moyenne  $\mathcal{P} = 110 \text{ W}$ . Déterminer le rendement  $r$  du compresseur. Commenter.

II.D.2) La pompe à chaleur est utilisée comme chauffage en hiver.

a) Donner le sens de tous les transferts énergétiques ; on s'aidera pour cela d'un schéma.

b) Définir l'efficacité  $\eta_c$  de la pompe à chaleur en tenant compte de la désurchauffe et du sous-refroidissement mais sans tenir compte du rendement  $r$  du compresseur.

c) Faire l'application numérique et comparer-la à l'efficacité  $\eta_{cc}$  de Carnot.

d) Quel est l'intérêt de la désurchauffe (**2**  $\rightarrow$  **3**) et du sous-refroidissement (**3'**  $\rightarrow$  **4**) ?

e) Que valent les efficacités calculées précédemment si l'on tient compte du rendement du compresseur ?

II.D.3) La pompe à chaleur est utilisée comme système de réfrigération en été.

Reprendre l'étude précédente : sens des échanges, efficacité  $\eta_f$ , application numérique, intérêt de la surchauffe (**6**  $\rightarrow$  **1**) et prise en compte du rendement du compresseur.

II.D.4) Le compresseur serait endommagé par une entrée de liquide (« liquid shock »). Quel nouvel avantage a-t-on en réalisant la surchauffe (**6**  $\rightarrow$  **1**) ?

II.D.5) Évaluer la puissance thermique reçue par le fluide lors de la surchauffe. Commenter le résultat.

# DOCUMENT REPONSE A RENDRE AVEC LA COPIE

NOM :

Prénom :

Épreuve de Physique-Chimie

Ne rien noter sur cette feuille avant d'avoir rempli complètement l'en-tête.

