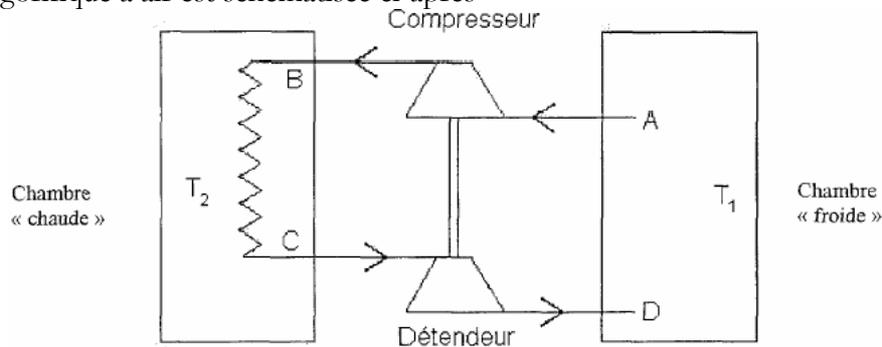


## Cycles frigorifiques

### BTS Fluides Energies Environnement 2003

Une machine frigorifique à air est schématisée ci-après



Elle est destinée à maintenir dans la chambre « froide » une température  $T_1$ . La pression  $y$  est constante. Une masse de 1 kg d'air, prélevée dans la chambre « froide » à la température  $T_A = T_1$  est comprimée adiabatiquement. L'air passe ensuite dans un échangeur plongé dans une pièce dite chambre « chaude » dont la température  $T_2$ , supérieure à  $T_1$ , est considérée comme constante. L'air est ensuite détendu adiabatiquement et renvoyé, à la température  $T_D$ , dans la chambre « froide » où il va se réchauffer jusqu'à la température  $T_1$  considérée comme constante dans toute la chambre froide.

Cette masse de 1 kg d'air subit donc un cycle, passant successivement par les états A, B, C et D. Précisons que la pression de l'air dans l'échangeur est constante et que sa température en C est celle de la chambre « chaude ». Par ailleurs, le travail fourni par le fluide au cours de sa détente est intégralement utilisé par le compresseur. On considère que l'air se comporte comme un gaz parfait et que les transformations sont réversibles.

On donne les valeurs suivantes:

$$T_1 = 268 \text{ K,}$$

$$T_2 = 293 \text{ K,}$$

$$p_A = 1,0 \text{ bar,}$$

$$p_B = 2,0 \text{ bar}$$

Pour l'air :

$$c_p = 1,0 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1},$$

$$\gamma = 1,4$$

- Déterminer la constante massique  $r_{\text{air}}$  du gaz parfait pour 1 kg d'air.
- Vérifier que la température  $T_B$  de l'air après la compression adiabatique est égale à 327 K.
- Déterminer la température  $T_D$  de l'air après la détente adiabatique.
- Déterminer, pour un cycle et par kilogramme d'air, la quantité de chaleur  $Q_{\text{cycle}}$  reçue. En déduire le travail  $W_{\text{cycle}}$  reçu (toujours par cycle et par kilogramme d'air).
- Identifier la quantité de chaleur « utile » et calculer le coefficient  $e$  de performance de la machine,  $e = Q_{\text{utile}} / W_{\text{cycle}}$ .
- Quel est le débit d'air nécessaire pour que la machine ait une puissance frigorifique (quantité de chaleur prélevée chaque seconde à la source « froide ») de 1 kW ?

### BTS Travaux publics 2004

#### Pompe à chaleur : Installation de chauffage.

*Principe.* La chaleur est pompée d'un corps froid et transmise à un corps chaud grâce à un compresseur d'air et à un détendeur. Ce cycle nécessite un apport extérieur d'énergie.

Une pompe à chaleur fonctionne avec deux sources

- une source froide constituée par une nappe souterraine ;
- le circuit de chauffage de l'installation qui constitue la source chaude.

Le fluide utilisé dans cette pompe à chaleur est de l'air assimilable à un gaz parfait de constante  $R = 8,32 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ , de capacité thermique molaire à pression constante  $C_p = 29,1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Le rapport  $\gamma$  des capacités thermiques à pression constante  $C_p$  et à volume constant  $C_v$  est tel que  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,4$

L'air de la pompe à chaleur subit le cycle de transformations suivant :

**Passage de l'état initial A à l'état B par une compression adiabatique réversible dans un compresseur.**

État A : pression  $p_A = 1,0 \times 10^5$  Pa      volume  $V_A$       température  $T_A = 298$  K.  
 État B : pression  $p_B = 2,2 \times 10^5$  Pa      volume  $V_B$       température  $T_B$ .

**Passage de l'état B à l'état C par une transformation isobare pendant laquelle l'air transfère à la source chaude une quantité de chaleur  $Q_C$ .**

État C : pression  $p_C = p_B$       température  $T_C = 340$  K.

**Passage de l'état C à l'état D par une détente adiabatique réversible.**

État D : pression  $p_D = p_A$       température  $T_D$ .

**Passage de l'état D à l'état A par une transformation isobare pendant laquelle l'air reçoit de la source froide une quantité de chaleur  $Q_{DA}$ .**

1. Détermination de la valeur des grandeurs dans chaque état  
 On effectuera les calculs relatifs à une mole d'air ( $n = 1$  mol) puis les résultats des calculs de volume, de pression et de température seront reportés dans le tableau de la feuille réponse.
  - 1.1. Calculer  $V_A$ .
  - 1.2. En déduire  $V_B$ .
  - 1.3. Calculer  $T_B$ .
  - 1.4. Calculer  $V_C$ .
  - 1.5. Calculer  $V_D$ .
  - 1.6. Vérifier alors que  $T_D = 271$  K.
2. Détermination du cycle de Clapeyron
  - 2.1. Compléter le cycle de Clapeyron ( $p, V$ ) sur la feuille réponse en y plaçant les points C et D.
  - 2.2. Préciser le sens de parcours du cycle.
3. On étudie le bilan thermique.
  - 3.1. Calculer les quantités de chaleur échangées  $Q_{BC}$  et  $Q_{DA}$ .
  - 3.2. Donner la valeur de la quantité de chaleur échangée lors d'une transformation adiabatique.
  - 3.3. En déduire le travail  $W$  échangé au cours de la totalité du cycle.
  - 3.4. On définit l'efficacité  $e$  de la pompe par le rapport suivant :  $e = \frac{Q}{W}$  pour lequel  $Q$  est la quantité de chaleur transférée à la source chaude au cours d'un cycle décrit par l'air et  $W$  est le travail échangé par l'air au cours de ce même cycle.  
 Calculer  $e$  et conclure.

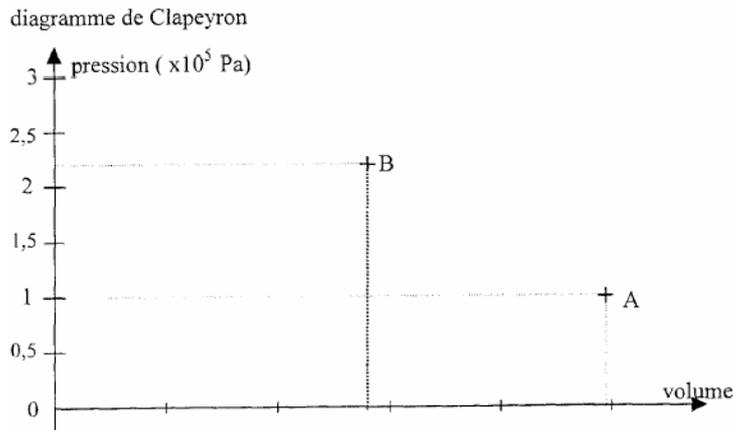
*Rappel.*

- Pour un gaz parfait subissant une transformation adiabatique d'un état caractérisé par les grandeurs ( $p_A, V_A, T_A$ ) à un état B caractérisé par les grandeurs ( $p_B, V_B, T_B$ ), on peut écrire
 
$$p_A \cdot V_A^\gamma = p_B \cdot V_B^\gamma \quad \text{et} \quad T_A \cdot V_A^{\gamma-1} = T_B \cdot V_B^{\gamma-1}$$
- Pour un gaz parfait subissant une transformation isobare  $Q = n \cdot C_p \cdot \Delta T$
- Lors d'un cycle de transformations d'un gaz parfait,  $\Sigma Q + \Sigma W = 0$

**Feuille réponse à joindre à la copie**

Tableau des valeurs des grandeurs pression, volume et température.

	Pression (Pa)	Volume (L)	Température (K)
État A	$p_A = 1 \times 10^5$	$V_A =$	$T_A = 298$
État B	$p_B = 2,2 \times 10^5$	$V_B =$	$T_B =$
État C	$p_C = p_B$	$V_C =$	$T_C = 340$
État D	$p_D = p_A$	$V_D =$	$T_D =$



### BTS Domotique 1991

A. On considère une baie vitrée de surface  $S = 10 \text{ m}^2$ , qui sépare un appartement où la température est  $T_i = 20^\circ\text{C}$ , de l'extérieur où la température est  $T_o = -10^\circ\text{C}$ .

On utilise un double vitrage constitué par un ensemble de 2 glaces de 5 mm d'épaisseur, séparées par une lame d'air de 12 mm.

1. Calculer la quantité de chaleur  $Q$ , qui s'échappe par la baie vitrée en une heure.
  2. Calculer la température de la face interne du vitrage.
  3. Un hygromètre placé dans la pièce indique 46 % d'humidité relative, ( $h_r$ ) quelle est la valeur du point de rosée. Se produit-il une condensation sur le vitrage ?
- B. On suppose que les seules pertes qui interviennent sont dues à la baie vitrée, on utilise pour maintenir la température ( $T_i = 20^\circ\text{C}$ ) : une pompe à chaleur, dont le ventilo-évaporateur est situé à l'extérieur ( $T_o = -10^\circ\text{C}$ ). On désigne par  $Q_c$  et  $Q_f$  les quantités de chaleur échangées avec les sources chaude et froide pendant une heure.

1. Calculer  $|Q_f/Q_c|$  en admettant un fonctionnement réversible.
2. On suppose que  $|Q_c| = 3240 \text{ kJ}$ , et que du fait de l'irréversibilité :  $|Q_f/Q_c| = 0,39$  en déduire la consommation électrique de la pompe à chaleur pour 1 heure de fonctionnement.
3. Quelle aurait été la consommation d'électricité, si l'on avait utilisé un simple radiateur électrique.

Données

Conductivité thermique du verre :

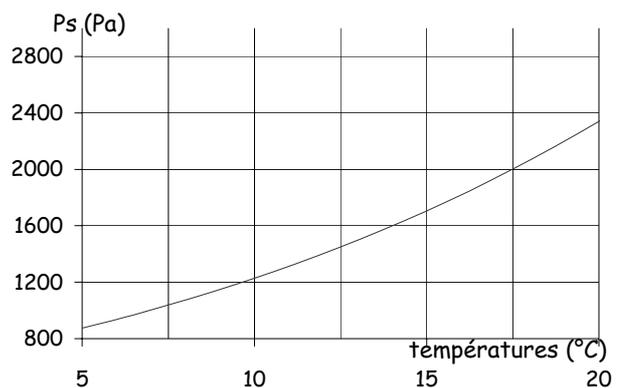
$$\lambda_v = 1,15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Résistance thermique de la lame d'air de 12 mm :  $R_{\text{air}} = 0,16 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

Résistance superficielle interne :  $0,11 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

Résistance superficielle externe :  $0,06 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$

Pression de vapeur saturante de l'eau (Pascal) :  $p_s$



On rappelle que  $h_r = \frac{\text{pression de vapeur saturante au point de rosée}}{\text{pression de vapeur saturante à la température ambiante}}$

### BTS Domotique 1994

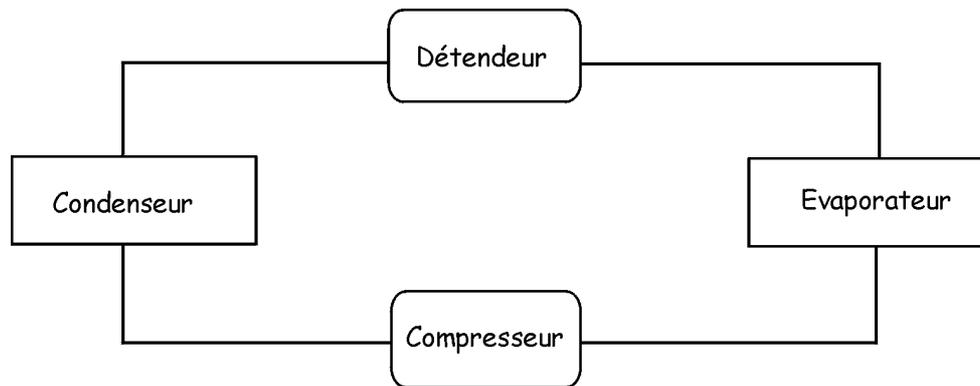
(Pour toute l'étude on supposera que l'on a un fonctionnement réversible).

Étude thermique

Les températures en Kelvin seront notées  $T$  et celle en  $^\circ\text{C}$  seront notées  $\theta$ .

Un réfrigérateur fonctionne à une température intérieure  $\theta_2 = 4^\circ\text{C}$  dans une pièce à la température  $\theta_1 = 19^\circ\text{C}$ .

1. On donne le schéma de principe du fonctionnement d'une machine frigorifique



Placer sur ce schéma :

- 1.1. Le sens de parcours du fluide.
  - 1.2. Les chaleurs et travaux échangés par le fluide en précisant leur signe
  - 1.3. Exprimer son efficacité frigorifique  $e$  en fonction de  $T_1$  et  $T_2$ .
  - 1.4. Calculer la valeur numérique de  $e$ .
2. Un réfrigérateur est initialement ouvert dans une cuisine à la température  $\theta_1 = 19^\circ\text{C}$ . On le ferme, et sa température intérieure finale sera prise égale à  $\theta_2 = 4^\circ\text{C}$ .
- 2.1. Sachant que le compresseur possède une puissance  $P$  et que la capacité calorifique interne du réfrigérateur vaut  $C$ , montrer que l'équation différentielle liant la température  $T$  et le temps  $t$  mis pour l'atteindre s'écrit :
 
$$P \cdot dt = -C \cdot \left( \frac{T_1}{T} - 1 \right) \cdot dT$$
  - 2.2. En déduire le temps  $t$  mis pour obtenir la température  $\theta_2$  à l'intérieur.
  - 2.3. Calculer numériquement  $t$  avec  $P = 400 \text{ W}$  et  $C = 1,5 \times 10^7 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
  - 2.4. Peut-on, en été, refroidir une pièce en ouvrant un réfrigérateur? Justifier votre réponse

### BTS Domotique 1999

Les questions 1., 2. et 3. peuvent être traitées indépendamment.

On admet la relation  $T(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273$

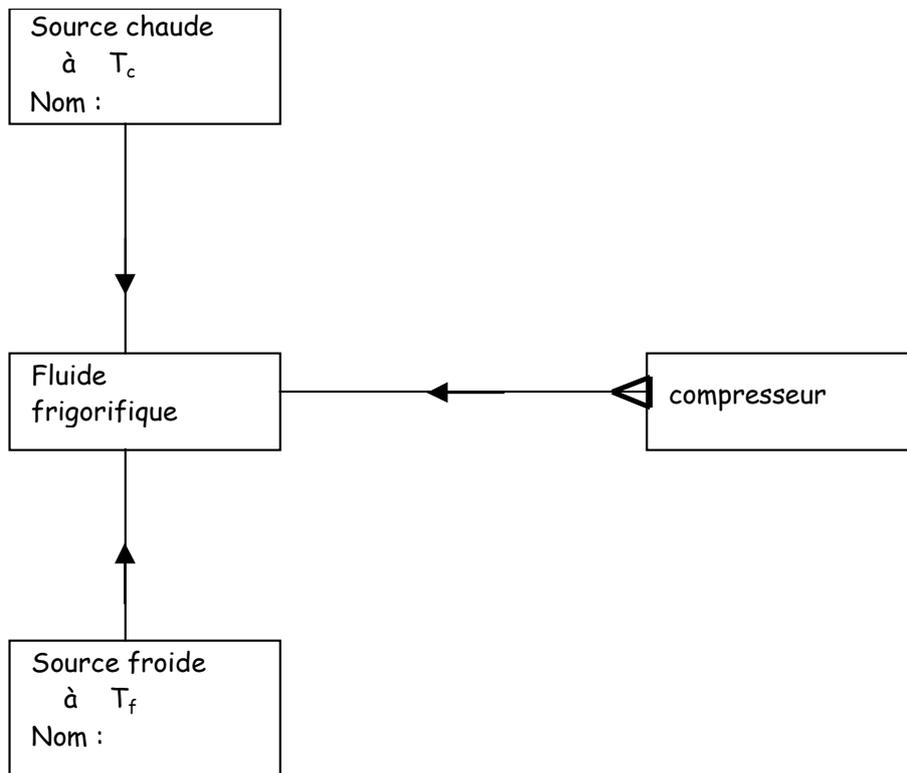
Une installation frigorifique comporte une chambre froide dont les produits sont maintenus à une température de  $-15^\circ\text{C}$ , alors que la température extérieure est de  $18^\circ\text{C}$ . On ne s'intéressera qu'au régime permanent et on supposera que le groupe fonctionne de façon réversible suivant un cycle de Carnot.

On utilisera les indices « c » et « f » pour les quantités de chaleur se rapportant respectivement à la source chaude et à la source froide. Elles seront prises algébriquement et considérées comme positives si elles sont reçues par le fluide.

$W$  et  $Q$  désigneront respectivement le travail et la quantité de chaleur échangés avec le fluide réfrigérant.

On donne en annexe un schéma qui doit être rendu, complété, avec votre copie.

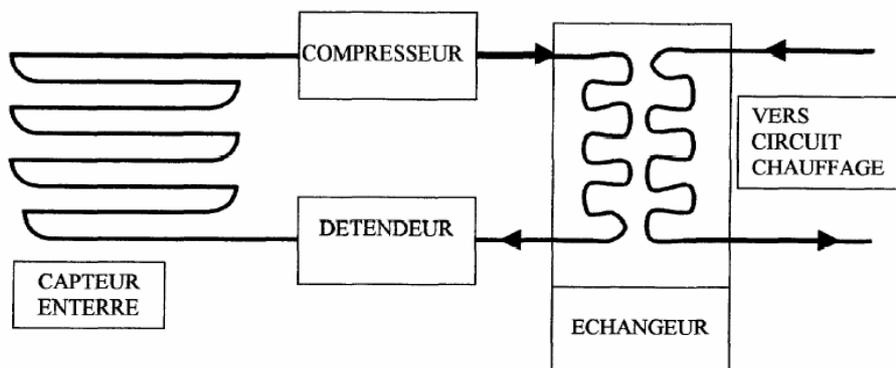
1. Sur ce schéma indiquer :
  - près des traits de liaison, les lettres  $W$ ,  $Q_c$  et  $Q_f$  qui conviennent ;
  - le signe de  $W$ ,  $Q_c$ ,  $Q_f$  en précisant qui reçoit, qui fournit  $|W|$ ,  $|Q_c|$ , ou  $|Q_f|$
  - attribuer à chacune des sources de chaleur son nom : évaporateur ou condenseur.
  - 1.1. Calculer les pertes par conduction thermique à travers les parois de la chambre froide dont le coefficient de transmission thermique global est de  $300 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1}$ .
  - 1.2. En déduire la quantité de chaleur  $|Q_f|$  prise à la source froide en une heure.
2. On admettra que  $|Q_f| = 36 \times 10^3 \text{ kJ/h}$ . Sachant que toutes les transformations sont considérées comme réversible, en appliquant l'égalité de Clausius relative à un cycle de Carnot, calculer la quantité de chaleur  $Q_c$  échangée avec la source chaude en une heure.
3. Appliquer le premier principe et en déduire la puissance minimale qui doit être fournie par le compresseur pour maintenir constante la température de la chambre froide.
4. Calculer l'efficacité théorique  $\varepsilon$  du groupe frigorifique. L'efficacité réelle est assez inférieure. Pourquoi ?



### BTS domotique 2003

#### Utilisation d'une pompe à chaleur (PAC) pour le chauffage individuel

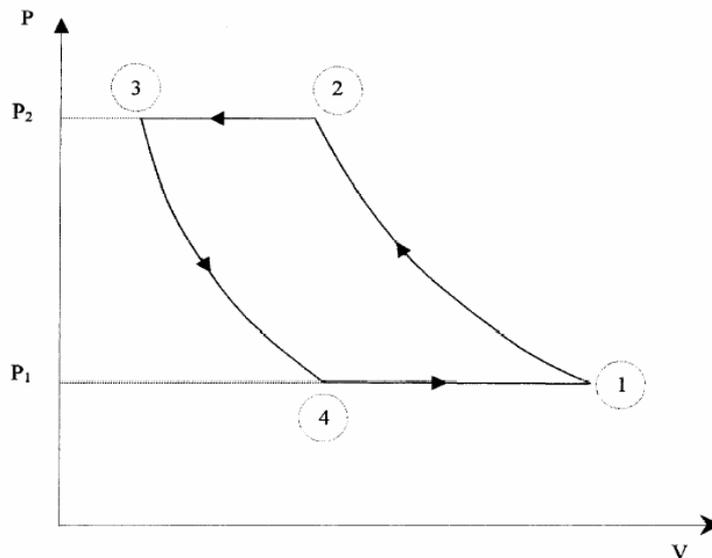
On réalise un chauffage individuel à l'aide d'une PAC. L'installation schématisée ci-dessous comporte un compresseur, un détendeur et deux serpentins qui sont les sièges des échanges thermiques.



La température du sous-sol est de  $10^\circ\text{C}$ .

Le fluide caloporteur est de l'air, assimilé à un gaz parfait

On étudie les transformations réversibles de 1 kg d'air décrivant le cycle suivant :



Description du cycle

1-2 Dans le compresseur, la compression est adiabatique et la pression passe de  $p_1 = 4 \times 10^5$  Pa à  $p_2 = 15 \times 10^5$  Pa. La température, quant à elle passe de  $T_1 = 283$  K à  $T_2$ .

2-3 Dans le serpentin, au contact du circuit de chauffage, le refroidissement est isobare et la température passe de  $T_2$  à  $T_3 = 323$  K.

3-4 Dans le détendeur, la détente est adiabatique, la pression passant de  $p_3 = p_2$  à  $p_4 = p_1$ , la température passant de  $T_3$  à  $T_4$ .

4-1 Dans le serpentin enterré dans le sous-sol, le réchauffement est isobare, la température augmentant jusqu'à la température  $T_1$ .

On donne:

constante des gaz parfaits  $R = 8,32 \text{ J mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

capacité thermique massique de l'air à pression constante:  $c_p = 1,0 \times 10^3 \text{ J kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

rapport des capacités thermiques massiques de l'air, à pression constante et à volume constant:  $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1,40$

relation des gaz parfaits :  $p \cdot V = n \cdot R \cdot T$

On rappelle que lors d'une transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait, les relations liant les trois paramètres pression  $p$ , température  $T$  et volume  $v$  sont

$p \cdot v^\gamma = \text{constante}$

$p^{1-\gamma} \cdot T^\gamma = \text{constante}$

$v^{\gamma-1} \cdot T = \text{constante}$

On rappelle que la quantité de chaleur échangée pour un fluide passant de la température  $T_1$  à la température  $T_2$  au cours d'une transformation isobare est donnée par la relation  $Q_p = m \cdot c_p (T_2 - T_1)$ .

On rappelle que l'efficacité théorique d'une machine théorique est  $e = \left| \frac{Q_C}{W} \right|$  ou  $\left| \frac{Q_F}{W} \right|$  selon la machine.

1. Montrer que  $T_2 = 413$  K et que  $T_4 = 221$  K
2. Calculer les quantités de chaleur  $Q_{12}$ ,  $Q_{23}$ ,  $Q_{34}$  et  $Q_{41}$ , échangées par une masse d'air de 1 kg au cours de chacune des transformations.
3. Enoncer le premier principe de la thermodynamique pour un cycle.  
En déduire le travail  $W$  reçu par la masse de 1 kilogramme d'air au cours du cycle.
4. On désigne par  $e$  l'efficacité théorique de la pompe à chaleur au cours du cycle.
  - 4.1. Calculer  $e$
  - 4.2. Sachant que les pertes moyennes thermiques de la maison sont de 13 kW, et que la puissance utile du compresseur est de 10 kW, calculer le temps de fonctionnement de la pompe au cours d'une journée.

**BTS Domotique 2004**

Dans une machine frigorifique dont le schéma de principe est donné Figure 1, une masse  $m$  de fluide frigorigène subit le cycle de transformations successives suivant le diagramme Figure 2 (les échelles n'ont pas été respectées)

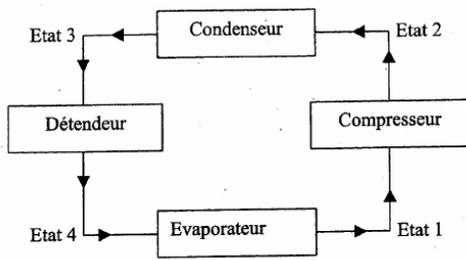


Figure 1

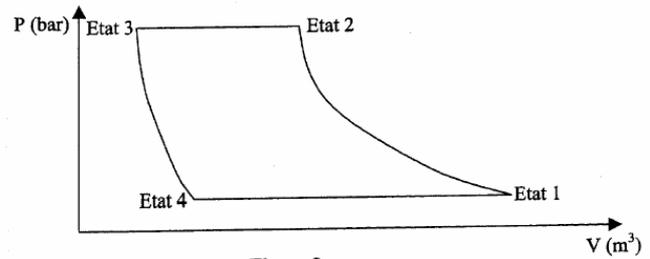


Figure 2

- Le compresseur amène la vapeur saturée sèche de l'état 1 ( $\theta_1 = -10^\circ\text{C}$ ,  $p_1 = 3,5 \text{ bar}$ ) à l'état 2 ( $\theta_2 = 40^\circ\text{C}$ ,  $p_2 = 9,1 \text{ bar}$ ) selon une compression isentropique.
- Le condenseur permet à la vapeur d'atteindre la température de changement d'état puis de se liquéfier totalement (état 3) selon un refroidissement isobare.
- Le détendeur permet au fluide d'atteindre l'état 4 ( $p_4 = p_1$  et  $\theta_4 = \theta_1$ ) ; au cours de cette transformation on considère que le fluide n'échange ni chaleur ni travail avec le milieu extérieur, et on admet que son enthalpie reste constante.
- Le vaporisateur permet au fluide de revenir à son état initial (état 1).

Données:

- Enthalpies massiques dans les différents états

$$h_1 = 401 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad h_2 = 428 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \quad h_3 = h_4 = 224 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$$

- Chaleur latente de vaporisation du fluide dans le condenseur :  $L_v = 188 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
- Chaleur massique (ou capacité calorifique massique) de la vapeur à pression constante  $c_p = 0,800 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$

- On rappelle que pour une transformation isobare  $\Delta h = q$ .

1. Calculer la quantité de chaleur  $Q_E$  échangée par 1 kg de fluide au niveau de l'évaporateur.
2.
  - 2.1. Calculer la quantité de chaleur  $Q_C$  échangée par 1 kg de fluide au niveau du condenseur.
  - 2.2. La température du changement d'état dans le condenseur est notée  $\theta$ . Détailler les échanges thermiques entre les états 2 et 3. En déduire l'expression littérale de  $Q_C$  en fonction de  $c_p$ ,  $\theta$ ,  $\theta_2$  et  $L_v$ .
  - 2.3. Calculer la valeur de  $\theta$ .
3.
  - 3.1. En utilisant le premier principe de la thermodynamique, montrer que le travail reçu par 1 kg de fluide au cours du cycle est  $w = h_2 - h_1$ .
  - 3.2. Déterminer le coefficient d'efficacité frigorifique  $e$  du cycle.
  - 3.3. Le travail reçu par le fluide est fourni par le compresseur. Déterminer la puissance du compresseur sachant que le débit massique du fluide est  $q_m = 0,10 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ .

### BTS Industries Céréalières 2001

On considère un surgélateur industriel en continu qui permet d'obtenir des baguettes crues surgelées. Ce surgélateur peut se modéliser par une machine de Carnot, c'est à dire que la machine peut échanger de la chaleur avec  $S_C$  la source chaude à la température  $\theta_C = 20^\circ\text{C}$  et avec la source froide  $S_F$  à la température  $\theta_F = -25^\circ\text{C}$ . Le débit massique en pâte vaut  $D = 15 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ . On appellera  $P_C$  la puissance thermique échangée entre la machine et la source chaude. On appellera  $P_F$  la puissance thermique échangée entre la machine et la source froide. On appellera  $P_{\text{elec}}$  la puissance électrique reçue par la machine thermique. On notera  $\eta$  le coefficient d'efficacité (ou de performance) de cette machine.

1. Exprimer le coefficient d'efficacité (ou de performance) en fonction de  $P_F$  et de  $P_{\text{elec}}$ . En déduire l'expression de  $\eta$  en fonction de  $\theta_C$  et de  $\theta_F$ . Calculer numériquement  $\eta$ .

Les baguettes, lors de leur surgélation, subissent deux transformations :

Etat fluide de capacité thermique massique $c_F = 2,67 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	solidification		Etat solide de capacité thermique massique $c_S = 1,67 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
	chaleur latente $L_S = -125,4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$		
$\theta = 20^\circ\text{C}$	→	$\theta_1 = -3^\circ\text{C}$	→ $\theta_1 = -3^\circ\text{C}$ → $\theta_F = -25^\circ\text{C}$

2. Calculer la puissance thermique à retirer à la pâte.
3. En déduire la puissance électrique consommée par la machine thermique.

**BTS Industries céréalières 2002**

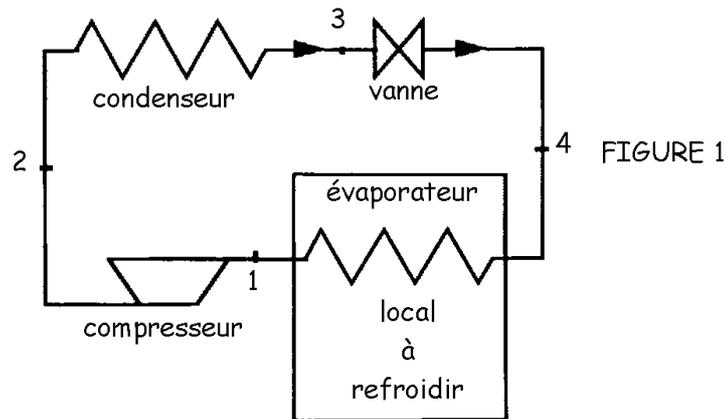
On souhaite installer le chauffage d'un bâtiment industriel. Deux solutions sont possibles : le chauffage par radiateurs électriques ou par pompe à chaleur.

1. Expliquer le principe de fonctionnement d'une pompe à chaleur (un schéma est le bienvenu). Faire un schéma pour illustrer le principe.
2. La pompe à chaleur fonctionne en prenant comme source froide une rivière de température  $\theta_F = 10^\circ\text{C}$ . La source chaude est constituée par l'intérieur du bâtiment de température  $\theta_C = 18^\circ\text{C}$ .
  - 2.1. Comment définir le coefficient d'efficacité  $\eta$  ?
  - 2.2. Exprimer  $\eta$  en fonction de  $\theta_C$  et de  $\theta_F$ .
  - 2.3. Calculer numériquement  $\eta$
3. Le bâtiment étant mal isolé, on estime la perte d'énergie à 55 kJ par seconde.
  - 3.1. Que vaut la puissance  $P_C$  (puissance échangée entre la pompe à chaleur et la source chaude).
  - 3.2. Déduire de ce qui précède la puissance électrique consommée par la pompe à chaleur.
  - 3.3. Quelle serait la puissance électrique consommée si on chauffait le bâtiment avec des radiateurs ?
 Quelle est alors votre conclusion sur le choix du mode de chauffage ?

**BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 1991**

On réalise une machine frigorifique dont le fluide frigorifique est le fréon.

Le schéma de cette machine est le suivant :



Le diagramme enthalpie - pression du fréon est représenté sur le document qui est fourni en double exemplaire. L'un d'eux (document 1) sera utilisé par le candidat pour ses essais et l'autre (document 2) sera remis avec la copie (attention au changement d'échelle en abscisse).

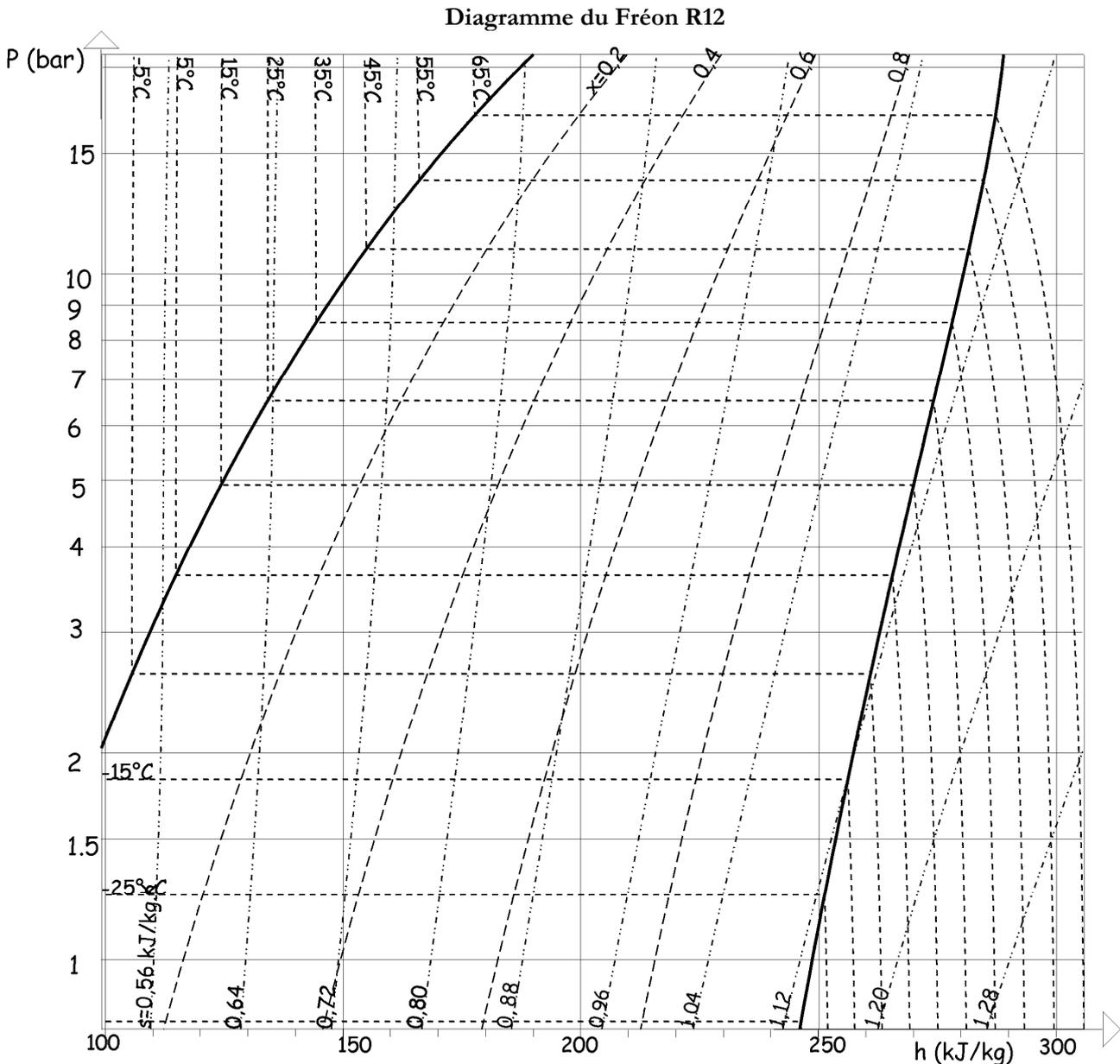
I La vapeur saturante sèche est comprimée isentropiquement de 2,4 bars à 8 bars dans le compresseur (trajet 1-2 sur le schéma ci-dessus).

Elle subit une transformation isobare dans le condenseur jusqu'à liquéfaction totale (trajet 2-3), puis une détente isenthalpique de 8 à 2,4 bars par laminage dans la vanne (trajet 3-4), et enfin une transformation isobare dans l'évaporateur du local à refroidir (trajet 4-1).

1. Quelles sont les indications fournies par le diagramme enthalpie - pression du fréon ?  
Tracer le cycle des transformations 1-2-3-4-1 sur ce diagramme (utiliser des couleurs).
2. Calculer la variation de l'enthalpie massique du fluide au cours de l'évaporation.  
En déduire la quantité de chaleur retirée au local à refroidir par unité de masse de fluide.
3. Calculer la variation d'enthalpie massique du fluide au cours de la compression.  
En déduire le travail massique de compression.
4. Calculer l'efficacité de ce cycle.  
Etablir l'efficacité théorique d'une machine frigorifique réversible fonctionnant entre les mêmes températures ( $T_3$  et  $T_4$ ).
5. La production frigorifique à l'évaporateur étant de 120 000 kJ par heure (soit 120 000 kJ retirés au local à refroidir)  
Calculer le débit du fréon. Quelle est la puissance mécanique de l'installation?

II - Pour améliorer les performances de la machine frigorifique fonctionnant entre les mêmes pressions, on réalise un "sous-refroidissement" isobare 3-3' du liquide avant la détente. La température du liquide est alors abaissée à 18°C.

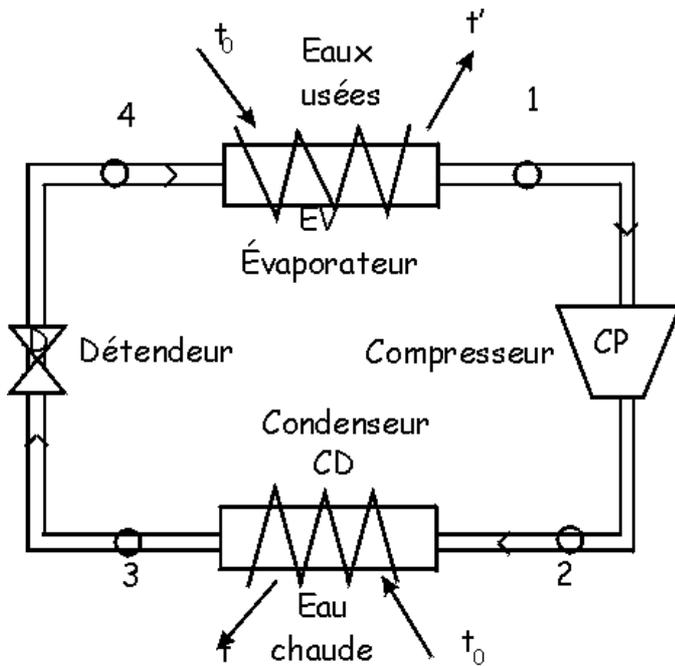
- Placer le point 3' sur le diagramme enthalpie - pression. Après la détente isenthalpique le fluide est à l'état 4'. Placer ce point sur le diagramme.  
Sur le diagramme enthalpie - pression du fréon tracer (en couleurs) le cycle des transformations de la nouvelle machine.  
On maintient le même débit de 1 000 kg/h.
- Calculer la nouvelle production frigorifique.  
Comparer cette installation à la précédente (production frigorifique, efficacité, puissance).



### BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 1995

Ce problème propose l'étude d'une pompe à chaleur alimentant partiellement le circuit d'eau chaude d'une maison à partir de l'énergie thermique extraite des eaux usées.

Un kilogramme du fluide utilisé dans la pompe décrit le cycle représenté sur la figure ci-dessous et sera considéré, en phase vapeur, comme un gaz parfait.



Le fluide est totalement vaporisé à la sortie de l'évaporateur *EV* (point 1) à la température  $T_1$  et la pression  $p_1$  (pression de l'équilibre liquide - vapeur du fluide à cette température).

Il pénètre dans le compresseur *CP* où il subit une compression isentropique. Il en sort à l'état de vapeur sèche, à la pression  $p_2$  et la température  $T_2$  (point 2).

Dans le condenseur *CD* il subit un refroidissement isobare jusqu'à la température  $T_2$ , température de l'équilibre liquide - vapeur du fluide à la pression  $p_2$ , puis une liquéfaction totale (point 3).

Dans le détendeur *D* il est détendu jusqu'à la pression  $p_1$  de manière isenthalpique et partiellement vaporisé. Il subit alors une vaporisation complète dans l'évaporateur à pression constante  $p_1$ .

### Description du cycle

La chaleur reçue par le fluide dans l'évaporateur provient d'un circuit d'eaux usées alors que dans le condenseur, le fluide cède de la chaleur au circuit d'eau chaude de la maison.

Données numériques

- $T_1 = 273 \text{ K}$  ;  $T_2 = 305 \text{ K}$ ,  $p_1 = 5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$   $p_2 = 12,6 \cdot 10^5 \text{ Pa}$
- chaleurs latentes de vaporisation du fluide
- $L_1 (T_1) = 206,0 \text{ kJ /kg}$  ;  $L_2 (T_2) = 184,7 \text{ kJ /kg}$  ;
- constante des gaz parfaits :  $R = 8,32 \text{ J mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- masse molaire du fluide :  $M = 86,5 \text{ g}$  ;
- rapport des chaleurs massiques  $\gamma = C_p / C_v = 1,177$
- chaleur massique du fluide liquide le long de la courbe de saturation :  $c = 1,318 \text{ kJ kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

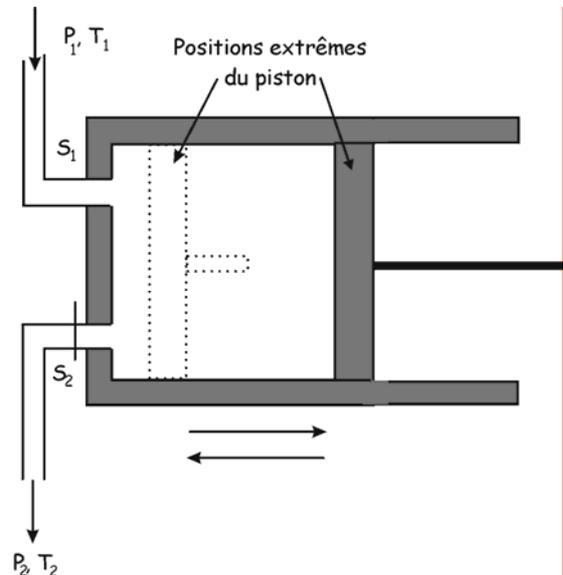
#### I Etude préliminaire

Représenter qualitativement dans un diagramme entropique ( $T, S$ ) la courbe de saturation et les points représentatifs de l'état du fluide au cours du cycle (points 1 à 4 et point intermédiaire intéressant).

#### II - Etude du compresseur

Le compresseur est schématisé ci-contre. La compression s'y déroule en trois étapes :

- Le volume interne du compresseur est initialement nul, la soupape d'admission  $S_1$  ouverte et la soupape de refoulement  $S_2$  fermée. On aspire, à  $p_1$  et  $T_1$  constants un kilogramme de fluide vapeur qui occupe alors un volume  $V_1$ .
- Les deux soupapes sont fermées, on comprime cette vapeur de façon adiabatique jusqu'à la pression  $p_2$  et la température  $T_2$ , la vapeur occupant alors un volume  $V_2$ .
- $S_2$  est ouverte et  $S_1$  fermée. On refoule la vapeur à  $p_2$  et  $T_2$  constants. Le piston revient à sa position initiale.



1. Représenter les trois phases du fonctionnement du compresseur dans un diagramme donnant la pression  $p$  en fonction du volume interne  $V$  du compresseur.
2. Vérifier que la constante massique  $r$  du fluide vaut  $r = 96,2 \text{ J kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
3. Après avoir établi l'expression du travail échangé entre le fluide et le piston au cours de chaque étape, déterminer celle du travail total  $W_{\text{tot}}$  valeur massique en fonction de  $r, \gamma, T_1$  et  $T_2$ .

4. Déterminer l'expression littérale de  $T_2$  en fonction de  $\gamma$ ,  $T_1$ ,  $p_1$  et  $p_2$  puis celle de  $W_{\text{tot}}$  en fonction de  $\gamma$ ,  $r$ ,  $T_1$ ,  $p_1$ , et  $p_2$ .  
Calculer les valeurs de  $T_2$  et  $W_{\text{tot}}$

### III - Etude du condenseur

Déterminer littéralement et numériquement la chaleur  $q$  échangée par l'unité de masse du fluide avec le circuit d'eau chaude (on prendra  $T_2 = 314 \text{ K}$ ).

### IV - Etude du détendeur

Déterminer littéralement et numériquement la fraction massique  $x$  de fluide vaporisé à la sortie du détendeur en fonction de  $c$ ,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $L_1$

### V - Etude de l'évaporateur

En considérant l'évaporateur parfaitement calorifugé, déterminer la chaleur  $q'$  échangée par l'unité de masse du fluide avec le circuit d'eaux usées

Faire l'application sachant que  $x = 0,205$ .

### VI - Efficacité

Déterminer l'expression littérale de l'efficacité de cette pompe à chaleur.

Justifier et calculer sa valeur numérique.

## BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 1997

Pour chauffer l'eau, on a choisi d'installer une pompe à chaleur dont le schéma est donné en annexe 3.

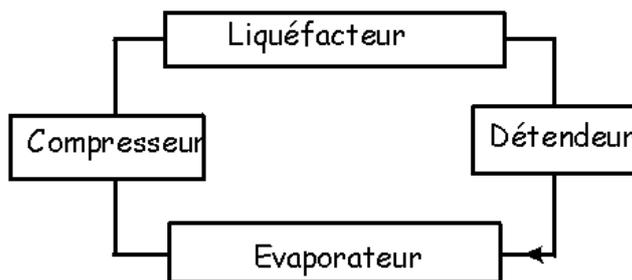
Le fluide, du fréon, est à l'état de vapeur à la sortie de l'évaporateur (point  $A$ ). Il est comprimé dans le compresseur, se condense dans le liquéfacteur, est détendu dans un détendeur où il se vaporise partiellement, puis termine de se vaporiser dans l'évaporateur pour revenir à l'état  $A$ . Ce cycle de transformations est représenté sur le diagramme  $(T, s)$  en annexe 4 page 6.

- Quelle partie du dispositif doit-on placer à l'extérieur (source froide à  $T_f = -5^\circ\text{C}$ ) et quelle partie doit-on placer en contact avec le circuit d'eau des radiateurs (source chaude à  $T_c = +70^\circ\text{C}$ ) pour obtenir le chauffage de l'eau ?
- La pompe à chaleur est supposée en fonctionnement réversible. Montrer que l'efficacité thermique théorique est  $e_{th} = \frac{1}{1 - \frac{T_f}{T_c}}$  en écrivant les bilans énergétique et entropique pour l'unité de masse de fréon au

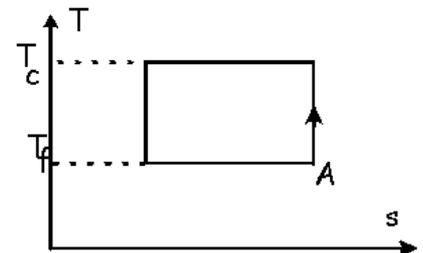
cours du cycle de transformations qu'il subit.

- Calculer la quantité de chaleur fournie en 1 heure par cette pompe à chaleur si le compresseur a une puissance de 5000 W et si la pompe a une efficacité réelle égale au tiers de l'efficacité théorique.
- Calculer le coût d'une heure de fonctionnement sachant qu'EDF facture le kilowatt – heure à 0,70 F. T.T.C.

### Annexe 3 : Pompe à chaleur



### Annexe 4 : diagramme $(T, s)$



## BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 1998

### Système de réfrigération à compression étagée

Pour améliorer la performance d'un système de réfrigération fonctionnant sur une vaste gamme de température, on utilise le principe de la compression étagée.

Un système de réfrigération idéal fonctionnant sur ce principe est décrit sur la figure ci-jointe page 3

Le diagramme représentant la pression  $p$  du fluide frigorigène utilisé en fonction de son enthalpie massique  $h$  est joint au sujet.

Description du système

- **point 1** : Le fluide frigorigène sort du condenseur à l'état de liquide saturé à  $\theta_1 = +38^\circ\text{C}$  et  $p_1 = 10 \text{ bar}$ .
- **du point 1 au point 2** : Le fluide est détendu par étranglement dans le détendeur (a) jusqu'à la température  $\theta_2 = -20^\circ\text{C}$ .

- **du point 2 aux points 3 et 3'** : Dans le séparateur, à  $-20^{\circ}\text{C}$ , le liquide est séparé de la vapeur.
- **du point 3 au point 4** : Le liquide est ensuite détendu dans le détendeur (b) jusqu'à la température de l'évaporateur  $\theta_4 = -60^{\circ}\text{C}$ .
- **du point 4 au point 5** : Le fluide traverse l'évaporateur et sort au point 5 à l'état de vapeur saturée.
- **du point 5 au point 6** : La vapeur sortant de l'évaporateur à  $\theta_5 = -60^{\circ}\text{C}$  est comprimée dans le compresseur (a) jusqu'à la pression commune aux points 2 ; 3 ; 3'.
- **aux points 6 ; 3' ; 7** : Cette vapeur (point 6) est ensuite mélangée avec la vapeur (point 3') sortant du séparateur.
- **du point 7 au point 8** : L'ensemble est comprimé dans le compresseur (b) jusqu'à la pression  $p_8 = 10 \text{ bar}$ .

Hypothèses

- **Les deux compresseurs, les deux détendeurs, le séparateur, le mélangeur, les canalisations sont tous supposés parfaitement calorifugés.**
- **Les pertes de charge dans l'installation sont négligeables.**
- **Les transformations du fluide dans les compresseurs sont supposées isentropiques.**
- **Les détenteurs dans les détendeurs sont isenthalpiques**

QUESTIONS

**1. Etude du détendeur (a) : Transformation 1  $\rightarrow$  2**

- 1.1. Placer le point 1 sur le diagramme du fluide frigorigène utilisé (*page 4*) En déduire l'enthalpie massique  $h_1$  du fluide.
- 1.2. En appliquant le premier principe de la thermodynamique au détendeur, déterminer la valeur de l'enthalpie massique  $h_2$  du fluide au point 2.  
Placer le point 2 sur le diagramme et relever les valeurs de la pression  $p_2$  et la fraction massique de gaz  $x_2$  au point 2.

**2. Etude du séparateur : points 2 ; 3 ; 3'.**

Placer sur le diagramme les points 3 et 3'

Relever les valeurs des enthalpies massiques  $h_3$  et  $h_{3'}$ .

**3. Etude du détendeur (b) : Transformation 3  $\rightarrow$  4**

- 3.1. A l'aide du premier principe, déterminer la valeur de l'enthalpie massique du fluide  $h_4$  au point 4.
- 3.2. Placer le point 4 sur le diagramme et en déduire par lecture la valeur de la fraction massique de gaz  $x_4$  au point 4.

**4. Etude de l'évaporateur : Transformation 4  $\rightarrow$  5**

- 4.1. Placer le point 5 sur le diagramme et en déduire la valeur de l'enthalpie massique du fluide  $h_5$  au point 5.
- 4.2. En appliquant le premier principe à l'évaporateur, déterminer la valeur de la chaleur massique échangée par le fluide,  $q_{45}$ .

**5. Etude du compresseur (a) : Transformation 5  $\rightarrow$  6**

- 5.1. Placer le point 6 sur le diagramme et en déduire la valeur de l'enthalpie massique du fluide  $h_6$  au point 6.
- 5.2. A l'aide du premier principe, déterminer la valeur du travail massique  $w_{56}$  échangé par le fluide à la traversée du compresseur (a).

**6. Etude du compresseur (b) : Transformation 7  $\rightarrow$  8.**

On prendra pour la suite  $h_7 = 396 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  et  $t_7 = -8^{\circ}\text{C}$  ( $h_7$  et  $t_7$  enthalpie massique et température correspondantes au point 7)

- 6.1. Placer les points 7 et 8 sur le diagramme et en déduire la valeur de l'enthalpie massique  $h_8$  du fluide au point 8.
- 6.2. En appliquant le premier principe de la thermodynamique, déterminer  $w_{78}$  travail massique échangé par le fluide, lors de cette transformation.

**7. Etude du condenseur : Transformation 8  $\rightarrow$  1.**

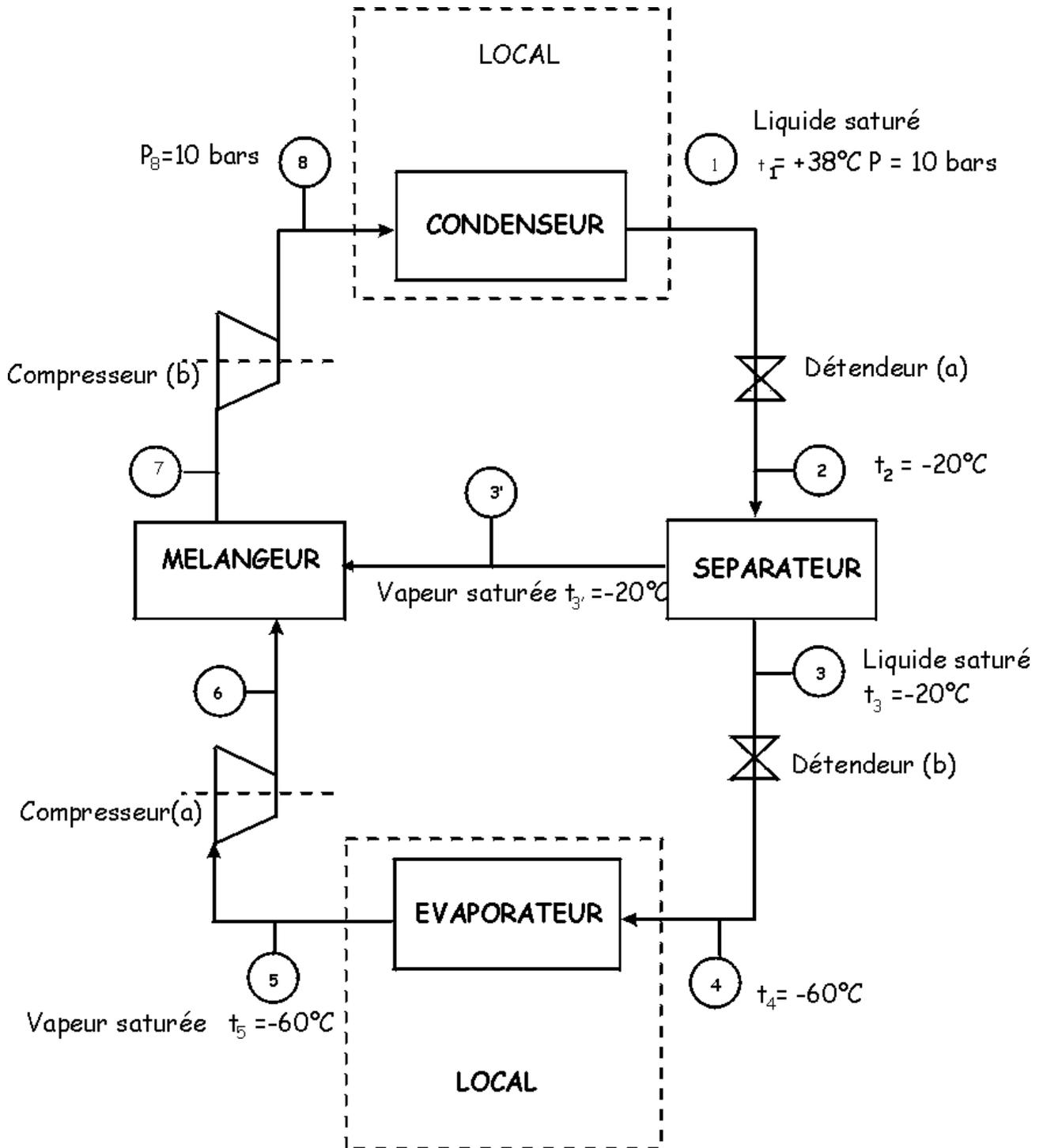
En appliquant le premier principe, déterminer la chaleur massique échangée par le fluide  $q_{81}$ .

**8. Bilan énergétique de l'installation**

- 8.1. Pour 1 kg de fluide arrivant au séparateur, calculer le travail total reçu par le fluide au cours d'un cycle. (Attention ! Seulement une partie du fluide traverse le compresseur (a).)
- 8.2. Sachant que le but de l'installation est de refroidir un local, donner la définition de l'efficacité de l'installation encore appelée coefficient de performance  $COP_{\text{réel}}$ , puis la calculer.
- 8.3. Système de réfrigération fonctionnant suivant le cycle de Carnot :  
Calculer l'efficacité d'un système de réfrigération idéal fonctionnant suivant le cycle de Carnot ( $COP_{\text{Carnot}}$ ) entre les mêmes températures extrêmes  $+38^{\circ}\text{C}$  et  $-60^{\circ}\text{C}$ .

En déduire le rendement de l'installation défini ci-après :  $\eta = \frac{COP_{réel}}{COP_{Carnot}}$

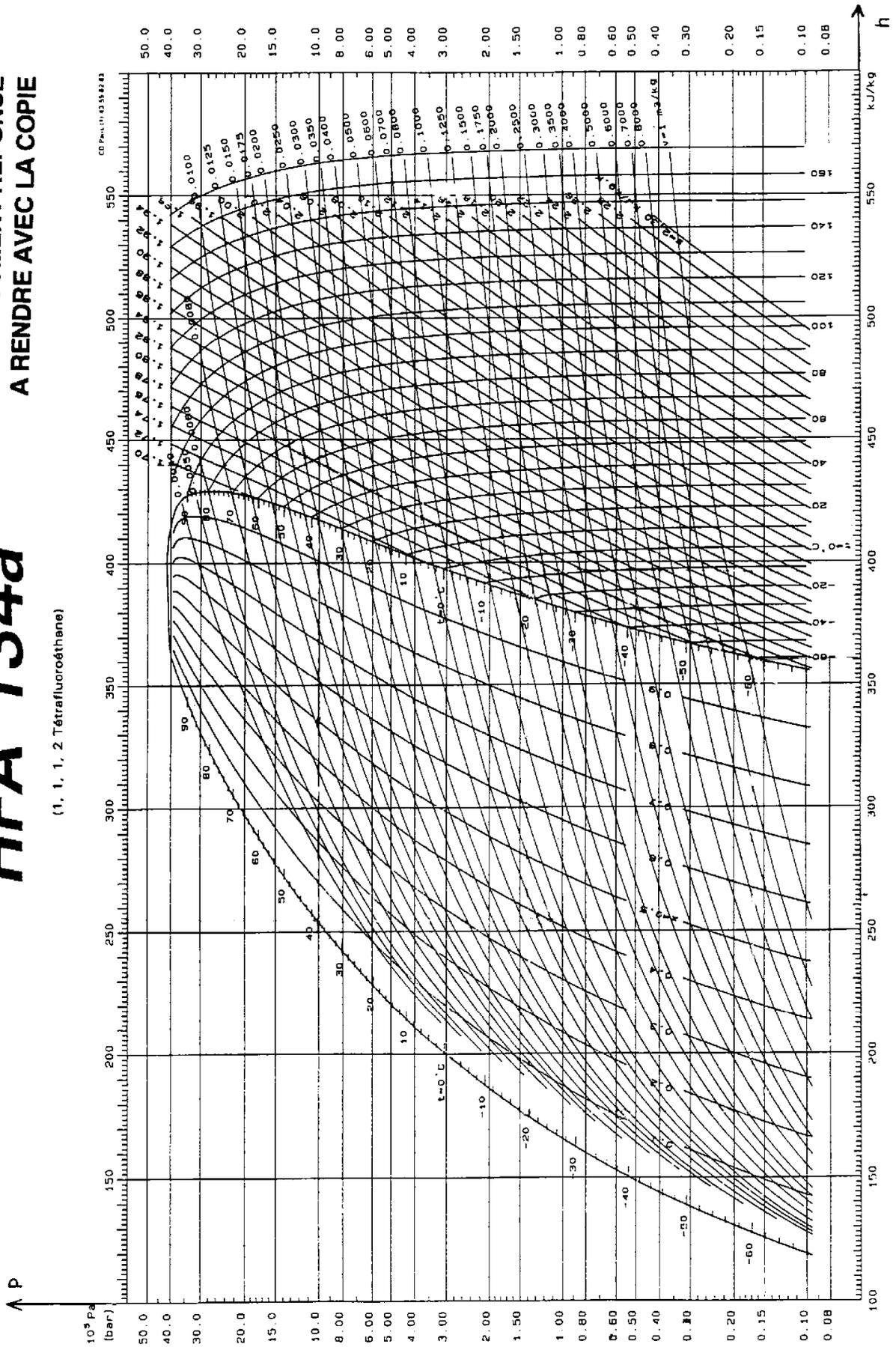
Commenter le résultat.



# HFA 134a

DOCUMENT REPONSE  
A RENDRE AVEC LA COPIE

(1, 1, 1, 2 Tétrafluoroéthane)

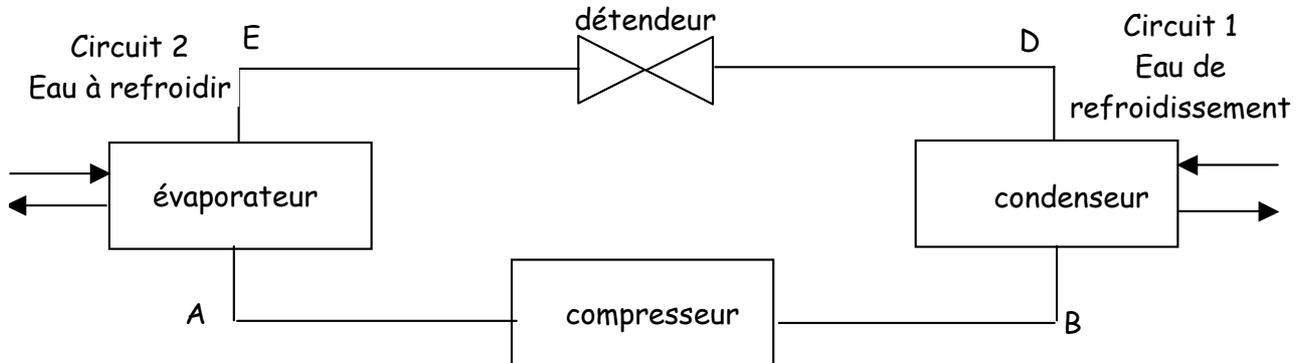


Enthalpie massique

**BTS Contrôle Industriel et Régulation Automatique 2003.****ÉTUDE D'UN GROUPE FRIGORIFIQUE**

La réaction chimique de polymérisation permettant la synthèse industrielle du polychlorure de vinyle (PVC) est une réaction exothermique. Pour contrôler la température du milieu réactionnel, on utilise un circuit d'eau refroidie par le groupe frigorifique que l'on se propose d'étudier.

Dans ce groupe frigorifique, un fluide frigorigène (ici le fréon 22), décrit le cycle fermé de transformations suivant et schématisé sur la figure ci-dessous.



- Dans le compresseur, le fréon initialement dans l'état A sous forme de vapeur saturée (ou saturante sèche), subit une compression adiabatique irréversible jusqu'à l'état B. ( $p_B = 10 \text{ bar}$   $h_B = 450 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ).
- Dans le condenseur, la transformation est isobare. Le fréon est d'abord refroidi (jusqu'à l'état C) puis complètement liquéfié jusqu'à l'état de liquide saturant (état D). Le condenseur est un condenseur à eau. L'énergie est prise au fréon par l'eau du circuit de refroidissement (circuit 1 sur la figure).
- Dans le détendeur, le fréon subit une détente isenthalpique (jusqu'à l'état E).
- Dans l'évaporateur, il termine sa vaporisation lors d'une transformation isobare (retour à l'état A). L'échange thermique correspondant est effectué avec l'eau du circuit 2.

*Données*

$p_A = 5,5 \text{ bar}$ ,  $p_B = 10 \text{ bar}$ ,  $h_B = 450 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

Puissance absorbée sur l'arbre du compresseur  $P_c = 1\,000 \text{ kW}$ .

Capacité thermique massique de l'eau  $c = 4\,185 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Masse volumique de l'eau:  $1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

**Les questions 2, 3, 4 et 5 peuvent être traitées indépendamment l'une de l'autre.**

1. Questions préliminaires.
  - 1.1. Placer sur le diagramme enthalpique joint en *annexe 1* (à rendre avec la copie) les points A, B, C, D, et E. En déduire les valeurs numériques des enthalpies massiques  $h_A$ ,  $h_C$ ,  $h_D$ , et  $h_E$  correspondantes.
  - 1.2. Sous quels état(s) physique(s) le fréon se trouve-t-il à la sortie du compresseur ? à la sortie du détendeur ? En utilisant le diagramme déterminer les proportions massiques des états physiques éventuellement coexistants.
2. Étude du compresseur.
  - 2.1. Calculer le travail mécanique (technique)  $w_C$  échangé par unité de masse de fréon lors de sa compression.
  - 2.2. Calculer le débit massique.
3. Étude du condenseur.
  - 3.1. Calculer la quantité de chaleur  $q_{BC}$  cédée par unité de masse de fréon lors de son refroidissement dans le condenseur. Lire sur le diagramme enthalpique la valeur de la température d'entrée  $\theta_B$  et la valeur de la température de fin de refroidissement  $\theta_C$ .  
En déduire une valeur numérique de la capacité thermique massique du fréon gazeux, en admettant qu'il se comporte comme un gaz parfait.
  - 3.2. Déterminer la valeur de la chaleur latente de vaporisation  $L_V$  du fréon sous 10 bar.
4. Étude de l'évaporateur.
  - 4.1. Calculer la quantité de chaleur  $q_{EA}$  échangée par unité de masse de fréon dans l'évaporateur.
  - 4.2. L'eau du circuit à refroidir subit une baisse de température de  $5,7 \text{ }^\circ\text{C}$  lorsque son débit est de  $600 \text{ m}^3$  par heure. En déduire la valeur du débit massique du fréon dans l'évaporateur.
5. Étude de l'efficacité thermique de l'installation.
 

Établir l'expression de l'efficacité thermique  $e$  de l'installation puis calculer sa valeur numérique

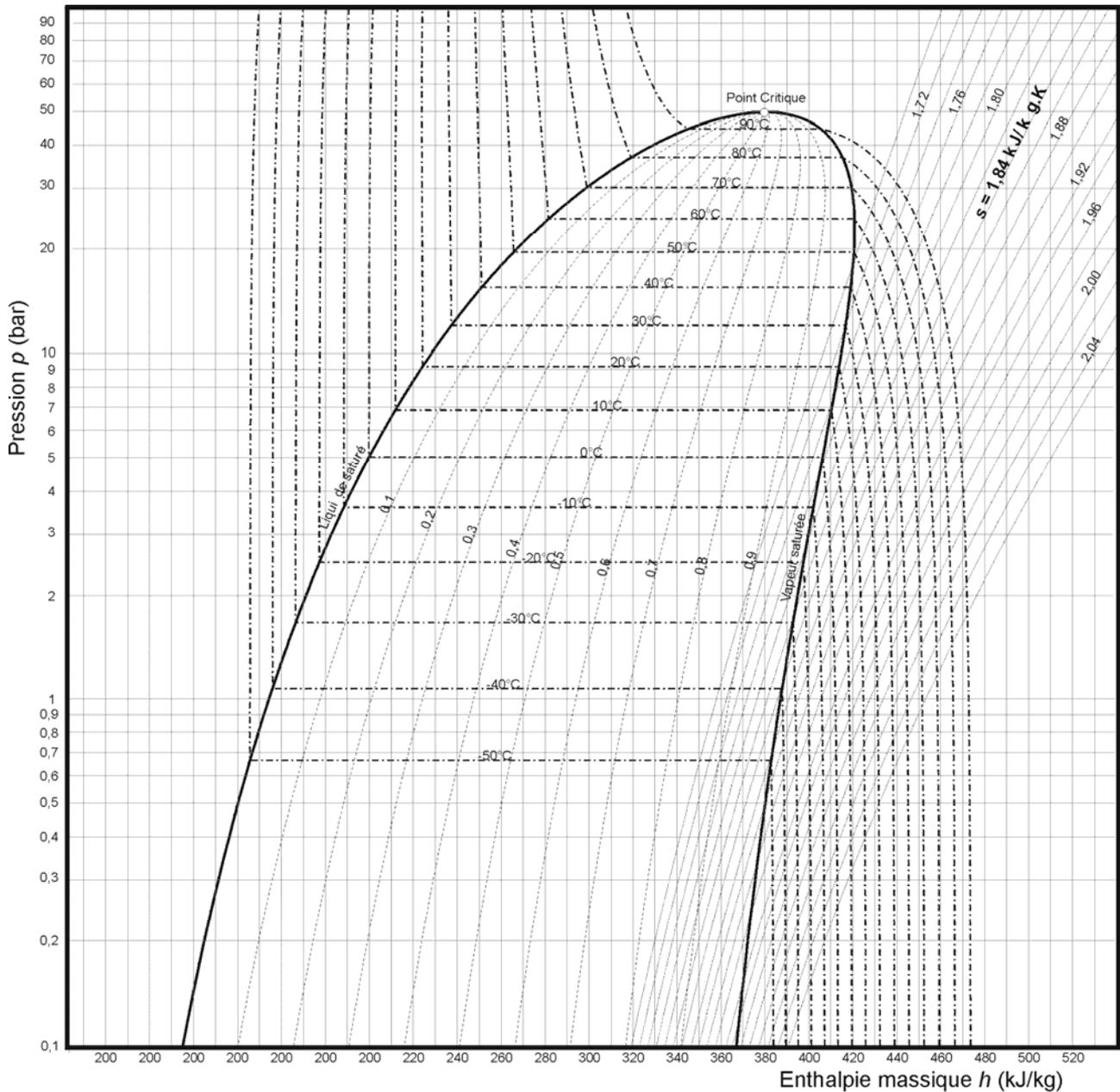
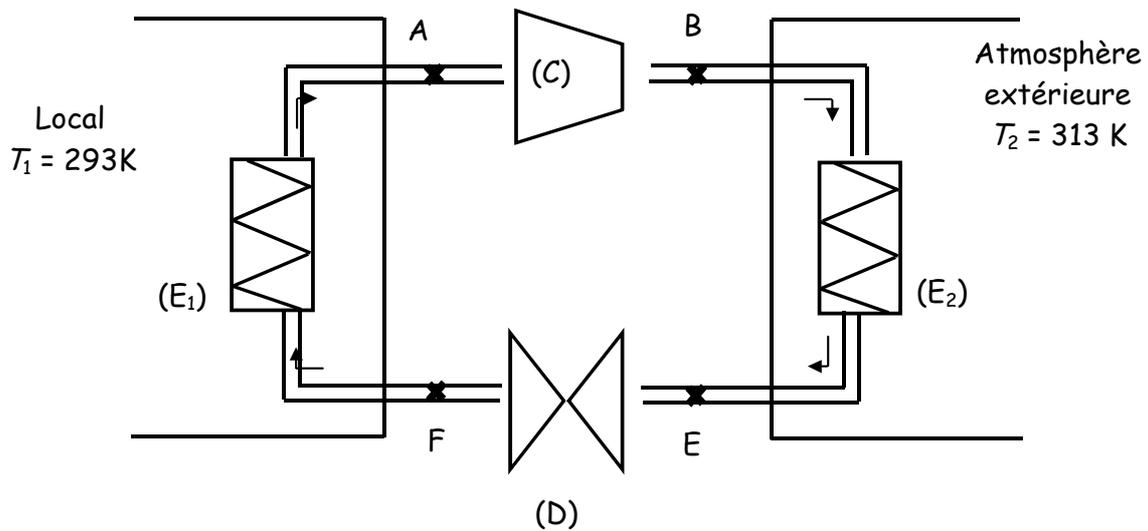


Diagramme du Fréon R22

**BTS Chimiste 2001**

Dans un local fermé, on souhaite maintenir une température  $T_1 = 293$  K tandis que l'air extérieur est à la température  $T_2 = 313$  K.

Pour cela, on considère une machine frigorifique dont le schéma de principe est représenté ci-après



Le fluide qui décrit le cycle est de l'hélium, assimilé à un gaz parfait pour lequel  $\gamma = \frac{5}{3}$ , la capacité thermique massique à pression constante  $c_p = 5260 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  et la masse molaire  $M = 4,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

Le fluide traverse successivement

- un compresseur (C) où le fluide subit une compression adiabatique réversible qui l'amène de A ( $T_1, p_1$ ) à l'état B ( $T_3, p_2$ ).
- un échangeur ( $E_2$ ) où la quantité de chaleur échangée entre le fluide et la source chaude est  $Q_2$ , ce qui amène le fluide dans l'état E ( $T_2, p_2$ ).
- une vanne de détente (D) où le fluide subit une détente adiabatique réversible qui l'amène dans l'état F ( $T_4, p_1$ ).
- un échangeur ( $E_1$ ) où la quantité de chaleur échangée entre le fluide et la source froide est  $Q_1$  ce qui ramène le fluide dans l'état initial A ( $T_1, p_1$ ).

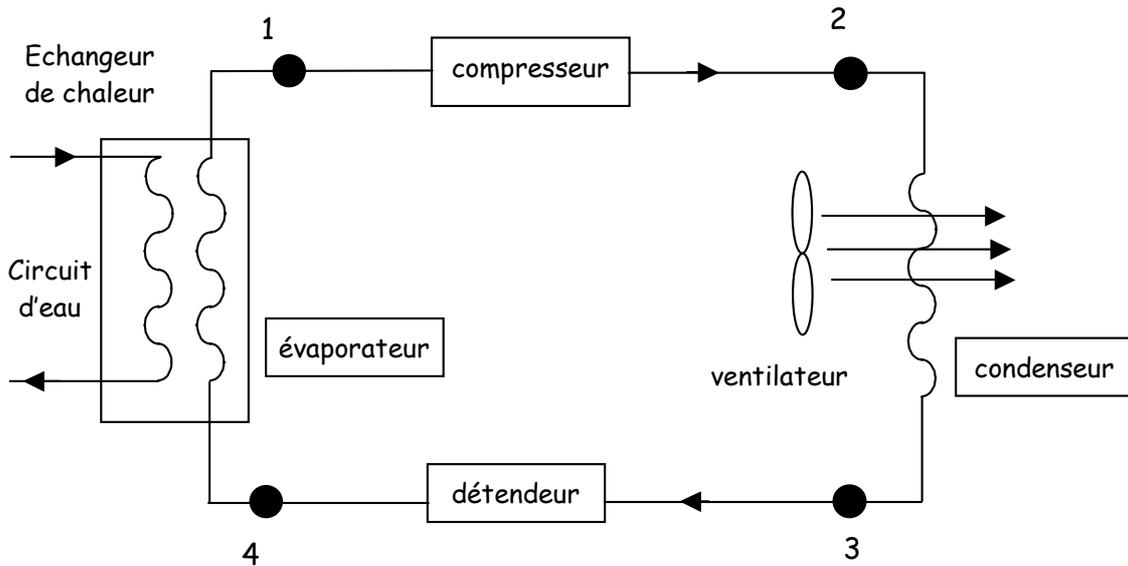
On donne

$$p_1 = 2,0 \times 10^5 \text{ Pa} \quad p_2 = 3,0 \times 10^5 \text{ Pa} \quad R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}.$$

1. Calculer les températures  $T_3$  et  $T_4$  des états B et F.
2. Donner l'allure du cycle en coordonnées ( $p, V$ ). Préciser le sens de parcours du cycle. Conclure.
3. Calculer les valeurs des quantités de chaleur  $Q_1$  et  $Q_2$  échangées par une masse  $m = 1,0 \text{ kg}$  d'hélium lors de la traversée des échangeurs ( $E_1$ ) et ( $E_2$ ).
4. Comme le compresseur (C) fonctionne en régime d'écoulement continu, le travail utile  $W_u$  échangé par l'hélium est égal à sa variation d'enthalpie.
  - 4.1. Déterminer le travail utile  $W_u$  échangé au cours d'un cycle par une masse  $m = 1,0 \text{ kg}$  d'hélium.
  - 4.2. Calculer l'efficacité de l'installation :  $e' = \frac{Q_1}{W_u}$ .
5. La puissance thermique évacuée pour climatiser le local étant  $P_{th} = 2,6 \text{ kW}$ , calculer la puissance minimale du moteur qui actionne le compresseur.
6. Calculer la masse d'hélium qui doit, par seconde, décrire le cycle afin de climatiser le local.

### BTS Fluides Energies Environnement 2002 Epreuve de Physique

On s'intéresse à un système de production d'eau glacée dont le schéma de principe est donné ci-dessous.



Le fluide frigorigène utilisé est le R12. A l'état gazeux il sera considéré comme un gaz parfait dont les constantes sont  $r = 68,8 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  et  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,2$ .

Le cycle théorique est le suivant (on n'envisage pas les surchauffes et sous-refroidissements)

- En 1, le fluide est entièrement gazeux :  $p_1 = 3,5 \text{ bar}$  et  $\theta_1 = 5^\circ \text{ C}$ . Il subit alors une compression adiabatique qui l'amène à la pression  $p_2 = 10,8 \text{ bar}$  et à la température  $\theta_2$ .
- Entre 2 et 3, à pression constante, la vapeur se refroidit jusqu'à la température  $\theta_3 = 45^\circ \text{ C}$  et se condense entièrement.
- Entre 3 et 4, détente isenthalpique du fluide, qui l'amène à la pression  $p_4 = 3,5 \text{ bar}$  et  $\theta_4 = 5^\circ \text{ C}$ .
- En 4, entrée dans l'évaporateur et retour à l'état 1.

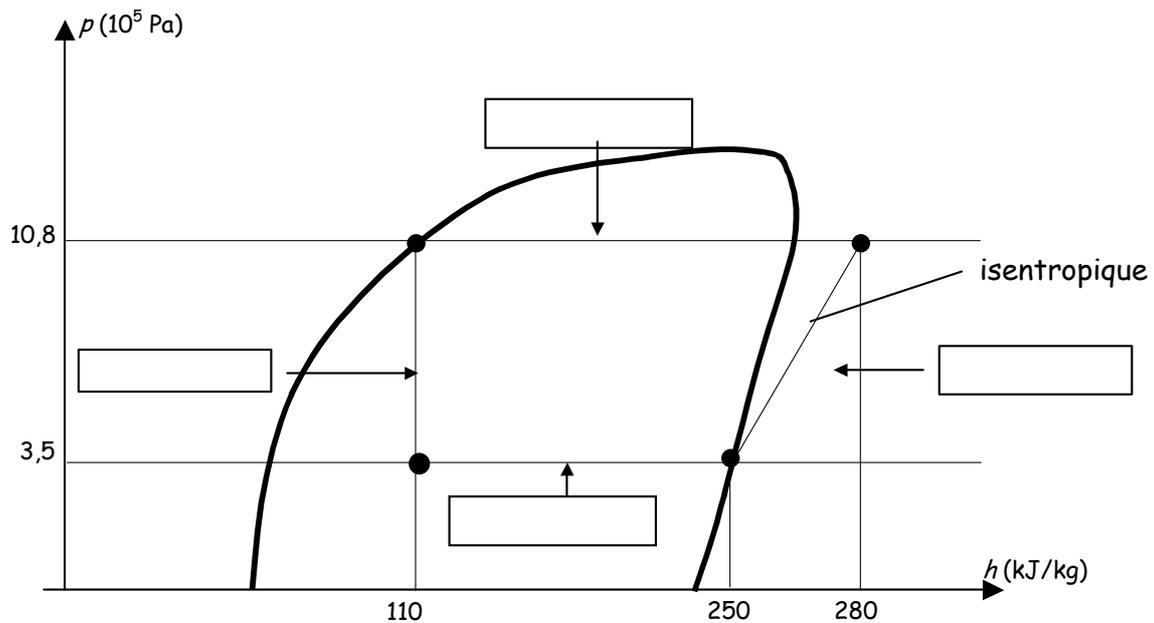
Toutes les transformations seront considérées comme réversibles. Les questions 1. et 2. sont indépendantes.

1. On raisonne pour une masse  $m = 1,0 \text{ kg}$  de fluide.

- 1.1. Ecrire l'équation d'état des gaz parfaits en utilisant la constante massique  $r$  du fluide; préciser les unités des grandeurs utilisées.
- 1.2. Calculer le volume occupé (en L) par 1 kg de vapeur R12 dans l'état 1 ( $p_1 = 3,5 \text{ bar}$  et  $\theta_1 = 5^\circ \text{ C}$ ).
- 1.3. La compression étant isentropique (adiabatique réversible), quelle relation existe-t-il entre  $p_1$ ,  $V_1$ ,  $p_2$  et  $V_2$  (relation de Laplace) ? Calculer le volume  $V_2$  occupé par 1 kg de vapeur R12 dans l'état 2 ( $p_2 = 10,8 \text{ bar}$ ).
- 1.4. Calculer  $\theta_2$ .

2. Sur le document joint, qui est à rendre avec la copie, on donne un extrait du diagramme pression, enthalpie ( $p, h$ ) de l'équilibre " liquide - vapeur " du R12. Cet extrait comporte quelques valeurs relatives au système étudié.

- 2.1. Dessiner, sur le document réponse, le cycle théorique du fluide et l'orienter ; placer les états 1, 2, 3, 4 correspondant à ceux du schéma de principe. Remplir les cadres avec les mots : compresseur, détendeur, condenseur et évaporateur.
- 2.2. Dans quel élément du circuit, le fluide échange-t-il du travail ? Quel est, du point de vue du fluide, le signe de ce travail ? Quelle en est, pour 1,0 kg de fluide, la valeur ? Justifier.
- 2.3. Dans quel élément du circuit, le fluide rejette-t-il de la chaleur vers le milieu extérieur ? Quelle est, pour 1 kg de fluide, la quantité de chaleur rejetée ? Justifier.
- 2.4. Entre quels états le fluide reçoit-il de la chaleur ? Quelle est, pour 1 kg de fluide, la quantité de chaleur reçue ? Justifier.
- 2.5. Définir et calculer le C.O.P. (coefficient de performance aussi appelé efficacité frigorifique  $\varepsilon$ ) théorique de cette machine de production d'eau glacée.



### BTS Maintenance Industrielle: 1995, Nouméa

Une pompe à chaleur fonctionne entre deux sources : une nappe souterraine qui constitue la source froide et l'eau du circuit de chauffage qui constitue la source chaude.

Le fluide utilisé dans cette pompe à chaleur est de l'air assimilable à un gaz parfait de constante  $R = 8,32 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , de capacité thermique molaire à pression constante  $C_p = 29,1 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Le rapport des capacités thermiques molaires à pression constante  $C_p$  et à volume constant  $C_v$  vaut  $\gamma = 1,4$ .

L'air de la pompe à chaleur décrit le cycle de transformations réversibles suivant :

- Passage de l'état initial  $A$ , à l'état  $B$  par une compression adiabatique dans un compresseur
  - état  $A$  : pression :  $p_A = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$ , volume  $V_A$ , température  $T_A = 298 \text{ K}$  ;
  - état  $B$  : pression :  $p_B = 2,2 \times 10^5 \text{ Pa}$ , volume  $V_B$ , température  $T_B$ .
- Passage de l'état  $B$  à l'état  $C$  par une transformation isobare pendant laquelle l'air reçoit de la source chaude une quantité de chaleur  $Q_1$ .
  - état  $C$  : pression  $p_C = p_B$ , température  $T_C = 340 \text{ K}$
- Passage de l'état  $C$  à l'état  $D$  par une détente adiabatique
  - état  $D$  : pression  $p_D = p_A$ , température  $T_D$
- Passage de l'état  $D$  à l'état  $A$  par une transformation isobare laquelle l'air reçoit de la source froide une quantité de chaleur  $Q_2$ .

On effectuera les calculs relatifs à une mole d'air.

1. Placer les points  $B$ ,  $C$ ,  $D$  sur la figure a du document réponse.
2. Calculer les volumes  $V_A$  et  $V_B$ .
3. Calculer les températures  $T_B$  et  $T_D$ .
4. Pour chaque cycle décrit par une mole d'air, calculer :
  - 4.1. les quantités de chaleur  $Q_1$  et  $Q_2$ ,
  - 4.2. le travail  $\mathcal{W}$  reçu au cours de la totalité du cycle.
5. L'efficacité  $\varepsilon$  de la pompe à chaleur est le rapport de la quantité de chaleur reçue par la source chaude au cours d'un cycle décrit par l'air, et du travail reçu par l'air au cours de ce même cycle.
  - 5.1. Exprimer  $\varepsilon$  en fonction de  $Q_1$  et  $\mathcal{W}$ . Calculer sa valeur.
  - 5.2. Justifier le choix de cette définition.

**RAPPELS :**

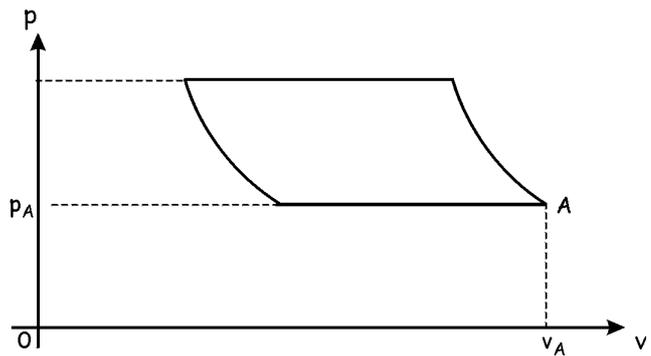
Pour un gaz parfait subissant une transformation adiabatique réversible d'un état A ( $p_A, V_A, T_A$ ) à un état B ( $p_B, V_B, T_B$ ), on peut écrire :

$$p_A V_A^\gamma = p_B V_B^\gamma$$

$$T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$$

avec  $\gamma = \frac{C_p}{C_V}$

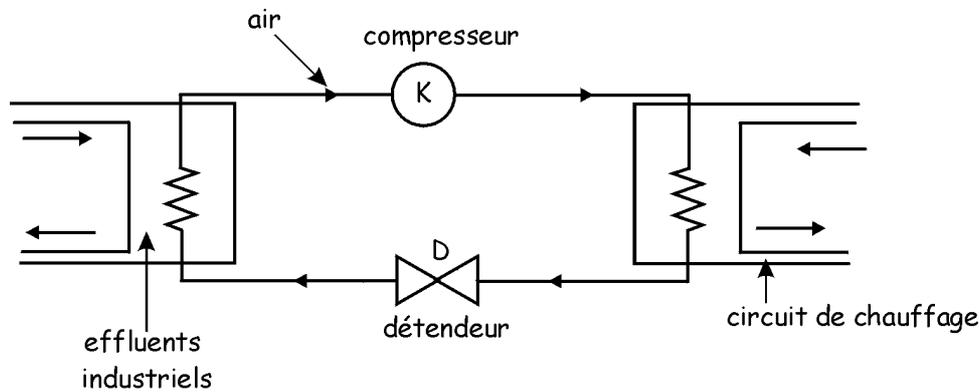
Document -réponse



**BTS Maintenance Industrielle: 1996, Métropole**

On s'intéresse à une pompe à chaleur qui participe au chauffage de locaux, en prélevant de la chaleur aux effluents liquides à température élevée d'une installation industrielle, avant leur rejet dans une rivière qui recevra des effluents à température plus faible.

L'installation représentée ci-dessous comporte : un compresseur, un détendeur et deux serpentins qui sont le siège des échanges thermiques, avec les effluents d'une part, et avec l'eau d'un circuit de chauffage d'autre part.



Le fluide frigorigène est de l'air, assimilé à un gaz parfait.

On étudie les transformations réversibles de 1 kg d'air qui décrit le cycle suivant :

1-2 : dans le compresseur : compression adiabatique, la pression passant de  $p_1 = 10^5$  Pa à  $p_2 = 2 \times 10^5$  Pa et la température passant de  $T_1 = 310$  K à  $T_2$ .

2-3 : dans le serpentin au contact du circuit de chauffage ( $V_3 < V_2$ ) : refroidissement isobare, la température passant de  $T_2$  à  $T_3 = 330$  K.

3-4 : dans le détendeur : détente adiabatique, la pression passant de  $p_3 = p_2$  à  $p_4 = p_1$ . la température passant de  $T_3$  à  $T_4 = 271$  K.

4-1 : dans un serpentin plongé dans les effluents industriels : échauffement isobare jusqu'à la température  $T_1$ .

On donne :

- constante du gaz parfait :  $R = 8,32 \text{ J mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- capacité thermique massique de l'air à pression constante :  $C_p = 1000 \text{ J mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- rapport des capacités thermiques massiques de l'air, à pression constante et à volume constant :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V}$$

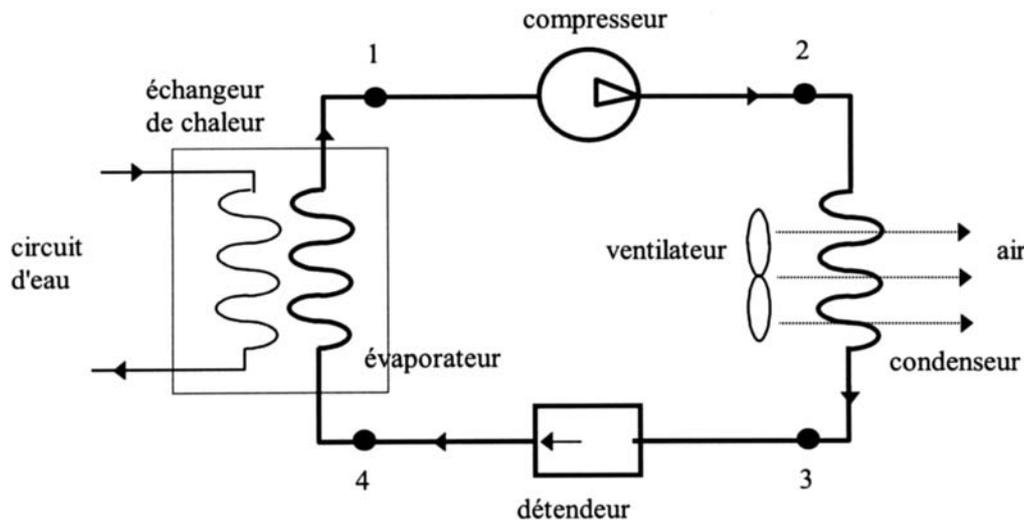
- On rappelle que lors de la transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait :  $pV^\gamma = \text{constante}$ .

1. Représenter l'allure du cycle décrit par l'air sur un diagramme de Clapeyron ( $p, V$ ). Indiquer par des flèches le sens des transformations.
2. Montrer que  $T_2 = 378$  K.
3. Calculer les quantités de chaleur échangées par une masse de 1 kg d'air au cours de chacune des 4 transformations.
4. Quelle est la variation de l'énergie interne de l'air qui décrit le cycle ? Enoncer le premier principe de la thermodynamique pour un cycle.
5. En déduire le travail  $W$  reçu par la masse de 1 kilogramme d'air, au cours du cycle.

6. On désigne par  $e$  l'efficacité de la pompe à chaleur, c'est-à-dire le rapport de la quantité de chaleur reçue par la source chaude et du travail reçu par l'air, au cours d'un cycle. Calculer  $e$ .

### BTS Maintenance Industrielle 1998, Métropole

On effectue l'étude d'un système destiné à réfrigérer de l'eau. Le schéma de principe est donné à la figure ci-dessous. Le fluide subissant le cycle thermodynamique est du fréon. Le circuit est représenté en trait épais. 1, 2, 3, 4 sont les points du circuit correspondants aux entrées et sorties de chaque élément. Un ventilateur soufflant de l'air sur le condenseur assure le refroidissement du dispositif. L'évaporateur et le circuit d'eau sont mis en contact thermique par un échangeur de chaleur, représenté en pointillé. Le circuit d'eau est représenté en trait fin :



La vapeur de fréon sera considérée comme un gaz parfait. On désigne respectivement par  $p$  et  $T$  sa pression et sa température.

Les caractéristiques thermodynamiques du fréon sont les suivantes :

- Masse molaire du fréon :  $M = 121 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ .
- Chaleur latente massique de vaporisation du fréon :  $L = 130 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  à  $310 \text{ K}$ .
- Capacité thermique molaire à pression constante du fréon gazeux :  $C_p = 49,9 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- Rapport des capacités thermiques molaires à pression constante et à volume constant du fréon :

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = 1,2$$

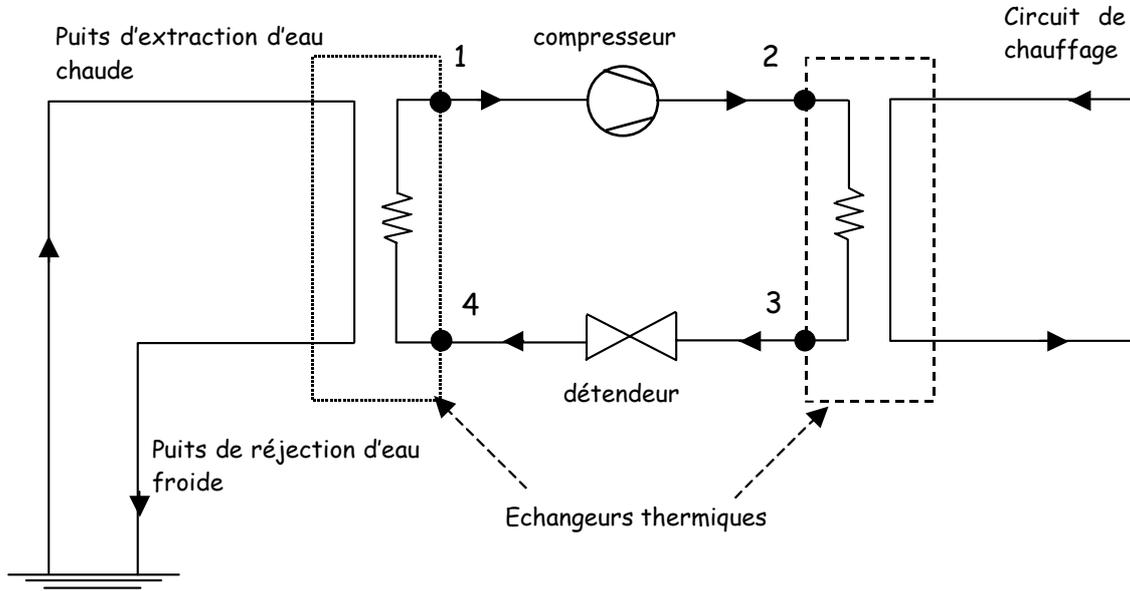
- Constante d'état des gaz parfaits :  $R = 8,32 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .
  - Au point 1 le fréon est totalement gazeux :  $p_1 = 1,9 \times 10^5 \text{ Pa}$  ;  $T_1 = 272 \text{ K}$ .
  - Au point 2 le fréon est totalement gazeux :  $p_2 = 8,5 \times 10^5 \text{ Pa}$  ;  $T_2$ .
  - Au point 3 le fréon est totalement liquide :  $p_3 = p_2$  ;  $T_3 = 310 \text{ K}$ .
  - Au point 4 le fréon est partiellement gazeux :  $p_4 = p_1$  ;  $T_4$ .

1. La masse de fréon circulant en un point du circuit en une minute est  $m = 2,25 \text{ kg}$ .
  - 1.1. En déduire que le nombre de moles de fréon passant en un point du circuit en une minute est  $n = 18,6$ .
  - 1.2. Quel volume  $V_1$  ces  $n$  moles de fréon occupent-elles à l'état gazeux sous la pression  $p_1 = 1,9 \times 10^5 \text{ Pa}$  et à la température de  $T_1 = 272 \text{ K}$  ? On exprimera le résultat en litres.
2. On suppose que la transformation réalisée dans le compresseur est adiabatique et réversible. Calculer, en litres, le volume  $V_2$  occupé par ces  $n$  moles de fréon à la pression  $p_2$ . En déduire que  $T_2$  est égale à  $349 \text{ K}$ .  
On rappelle que pour une transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait :  $p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma$
3. Dans le condenseur, le fréon subit un refroidissement à l'état gazeux de  $T_2$  à  $T_3$ , puis une liquéfaction à la température  $T_3$ .
  - 3.1. Calculer la quantité de chaleur  $Q_a$  échangée par le fréon gazeux, en une minute, lors de son refroidissement de  $T_2$  à  $T_3$ . (Préciser le signe de  $Q_a$ )
  - 3.2. Calculer la quantité de chaleur  $Q_b$  échangée par le fréon, en une minute lors de sa liquéfaction totale (Préciser le signe de  $Q_b$ )
  - 3.3. On rappelle que la chaleur latente massique de vaporisation du fréon est  $L = 130 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  à  $310 \text{ K}$ .
    - 3.3.1. En déduire la quantité de chaleur  $Q_{23}$  échangée par le fréon, en une minute, dans le condenseur pour son refroidissement et sa liquéfaction.
    - 3.3.2. Quel est le signe de  $Q_{23}$  ? Que représente ce signe ?

4. Dans l'évaporateur, la valeur algébrique de quantité de chaleur  $Q_{41}$  reçue par le fréon, en une minute, est  $Q_{41} = 240$  kJ. En déduire le débit maximal de l'eau, si l'on veut abaisser la température de celle-ci de  $5,0$  °C. On exprimera ce débit en litres par minute.  
On donne : capacité thermique massique de l'eau:  $c_{\text{eau}} = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

### BTS Maintenance Industrielle 2000 Nouméa

Pour exploiter une nappe géothermique et contribuer au chauffage d'une habitation, on utilise une pompe à chaleur à compresseur (figure).



Les circuits d'eau d'extraction de la nappe géothermique et du circuit de chauffage ne sont pas pris en compte dans ce problème.

Le fluide utilisé dans cette pompe à chaleur est de l'air assimilable à un gaz parfait. Il s'écoule en régime permanent et à vitesse réduite et l'on peut supposer que toutes les transformations sont réversibles.

L'air de la pompe à chaleur décrit le cycle de transformations réversibles suivant :

- Pris initialement à la pression  $p_1 = 1,0 \times 10^5$  Pa et à la température  $T_1 = 303$  K (état 1), l'air est comprimé de manière adiabatique dans un compresseur. A la fin de la compression, la pression de l'air est  $p_2 = 2,5 \times 10^5$  Pa et sa température est  $T_2$  (état 2).
- En passant dans un échangeur thermique, l'air échange sous la pression constante  $p_2$  une quantité de chaleur  $Q_{23}$  avec le circuit de chauffage. A la sortie de l'échangeur thermique, la température de l'air est  $T_3 = 313$  K.
- L'air subit ensuite une détente adiabatique à la fin de laquelle sa pression est  $p_4 = p_1 = 1,0 \times 10^5$  Pa et sa température est  $T_4 = 241$  K.

Enfin, en passant dans un nouvel échangeur thermique, l'air échange sous la pression constante  $p_1$  une quantité de chaleur  $Q_{41}$  avec le circuit d'eau de la nappe géothermique. Ainsi, l'air se retrouve dans son état initial ( $p_1, T_1$ ) à la sortie de cet échangeur thermique.

On effectuera les calculs relatifs à une mole d'air.

1. Placer les états 1, 2, 3 et 4 et flécher le sens de parcours du cycle sur le diagramme de Clapeyron : document-réponse.
2. Calculer les volumes  $V_1$  et  $V_2$  occupés par une mole d'air dans les états 1 et 2 du cycle.
3. Calculer la température  $T_2$ .
4. Calculer les quantités de chaleur  $Q_{23}$  et  $Q_{41}$  échangées par une mole d'air au cours d'un cycle.
5. On note  $W$  le travail échangé par 1 mole d'air au cours d'un cycle.
  - 5.1. Énoncer le premier principe de la thermodynamique pour un cycle.
  - 5.2. En déduire l'expression de  $W$  en fonction de  $Q_{23}$  et  $Q_{41}$  puis calculer sa valeur.
6. L'efficacité  $e$  de la pompe à chaleur est la valeur absolue du rapport de la quantité de chaleur reçue par la source chaude au cours d'un cycle décrit par l'air, et du travail reçu par l'air au cours de ce même cycle. Exprimer  $e$  en fonction de  $Q_{23}$  et  $W$ . Calculer sa valeur.

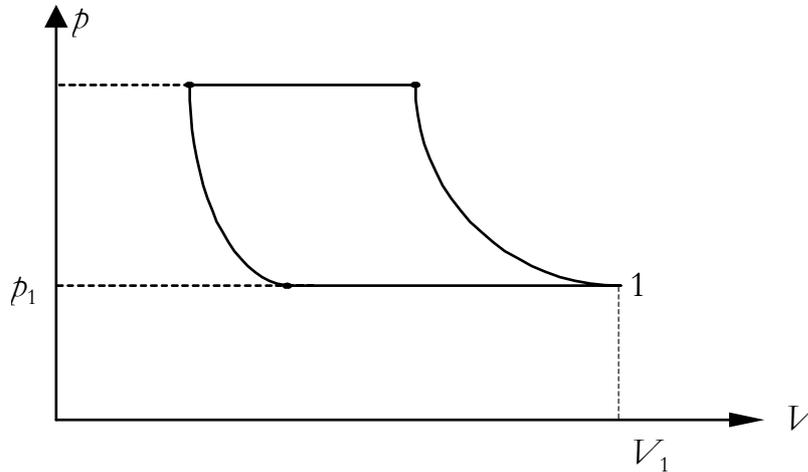
Rappels:

- La constante des gaz parfait vaut :  $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- La capacité thermique molaire de l'air à pression constante est :  $C_P = 29,1 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$

- Le rapport des capacités thermiques molaires à pression constante  $C_p$  et à volume constant  $C_v$  est  $\gamma = \frac{C_p}{C_v} = 1,4$ .
- Pour un gaz parfait subissant une transformation adiabatique réversible d'un état **A** ( $p_A, V_A, T_A$ ) à un état **B** ( $p_B, V_B, T_B$ ), on peut écrire :

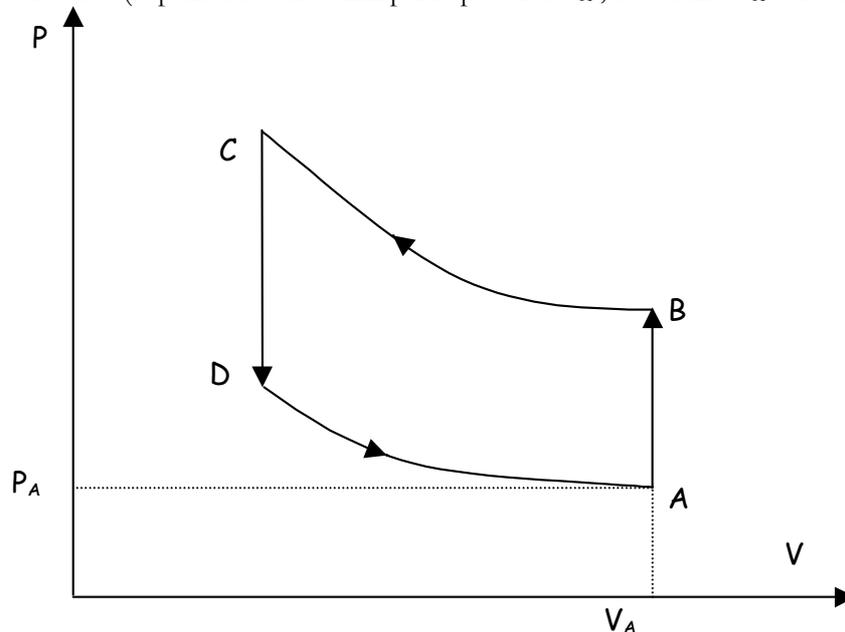
$$p_A \cdot V_A^\gamma = p_B \cdot V_B^\gamma \quad \text{et} \quad T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$$

DOCUMENT REPONSE  
(à rendre avec votre copie)



### BTS Maintenance Industrielle 2001 Nouméa

Soit une pompe à chaleur dans laquelle de l'air (assimilable à un gaz parfait) décrit le cycle ABCDA constitué par les transformations suivantes (le point A étant défini par la pression  $P_A$  ; le volume  $V_A$  et la température  $T_A$ ):



A B : chauffage isochore jusqu'à la température  $T_B$ .

B C : compression isotherme, le volume en C étant  $V_C$ .

C D : refroidissement isochore jusqu'à la température  $T_A$ .

D A : détente isotherme.

1. Calculer les quantités de chaleur  $Q_{AB}$  ;  $Q_{BC}$  ;  $Q_{CD}$  et  $Q_{DA}$  échangées par l'air au cours des transformations AB ; BC ; CD et DA . Vérifier que  $Q_{AB} = -Q_{CD}$ .

- 1.1. Calculer les travaux  $W_{AB}$  ;  $W_{BC}$  ;  $W_{CD}$  et  $W_{DA}$  échangés par l'air au cours des quatre transformations du cycle.
- 1.2. Calculer le travail total  $W_{cycle}$  échangé par l'air au cours du cycle. Quel est son signe ? En déduire le sens de l'échange du travail entre l'air et le milieu extérieur.
- 1.3.
  - 1.3.1. L'efficacité  $e$  de la pompe à chaleur s'exprime en fonction de la grandeur  $Q_{BC}$  et  $W_{cycle}$ . Préciser l'expression de  $e$  en fonction des températures.
  - 1.3.2. Calculer la valeur numérique de  $e$  avec les données précédentes.

On donne :  $P_A = 1,0 \times 10^5 \text{ Pa}$  ;  $V_A = 1,40 \text{ m}^3$  ;  $T_A = 263 \text{ K}$  ;  $T_B = 293 \text{ K}$  ;  $V_C = 0,38 \text{ m}^3$ .  
 Nombre de moles d'air mises en jeu :  $n = 64$  moles  
 Constante des gaz parfaits  $R = 8,31 \text{ J mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .  
 La capacité thermique molaire à volume constant de l'air,  $C_v$ , est constante et vaut  $20,8 \text{ J mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

Formulaire :

$$\text{Transformation isotherme : } Q_{1 \rightarrow 2} = n R T \ln \frac{V_2}{V_1} ;$$

$$\text{Transformation isochore : } Q_{1 \rightarrow 2} = n C_v (T_2 - T_1).$$

### BTS Techniques Physiques pour l'Industrie et le Laboratoire 1996

Quelques données numériques sont précisées en fin d'énoncé.

1. Un congélateur est placé dans une cuisine. Il fonctionne entre deux sources de chaleur. L'intérieur du congélateur est à  $-18^\circ\text{C}$ , la température moyenne de la pièce est de  $20^\circ\text{C}$ .
  - 1.1. En supposant le congélateur idéal fonctionnant de façon réversible selon un cycle de Carnot, définir son efficacité  $e$  (ou coefficient de performance). L'exprimer en fonction des quantités de chaleur échangées. Montrer qu'elle n'est fonction que des températures des deux sources. Calculer sa valeur numérique.
  - 1.2. Le congélateur étudié n'a qu'une efficacité  $e'$  égale à 3,3.  
 On y introduit 2 litres d'eau à  $20^\circ\text{C}$ , qui sont transformés en glace à  $-18^\circ\text{C}$ . Calculer :
    - la quantité d'énergie fournie au moteur du congélateur pendant cette transformation.
    - la chaleur libérée dans la pièce où est placé ce congélateur.
2. Le fonctionnement du congélateur est représenté par le schéma ci-dessous (figure 1)  
 Le fluide frigorigène (fréon), à l'état de vapeur saturante sèche (état 1), entre à la pression de 123,7 kPa, dans le compresseur où il subit une transformation adiabatique réversible 1-2.  
 Le compresseur refoule le fluide dans le condenseur à la pression de 800 kPa.  
 A la sortie du condenseur il est entièrement liquide, à la pression 800 kPa (état 3).  
 Il se détend ensuite dans un tube capillaire (transformation 3-4) avant de traverser l'évaporateur à pression constante (transformation 4-1).
  - 2.1. Placer les points 1, 2, 3, 4, sur le schéma (figure 1) et le diagramme  $(s, T)$  (figure 2) où  $s$  représente l'entropie massique du fluide.  
 Préciser les états physiques du fluide dans les états 1, 2, 3, 4.
  - 2.2. La détente dans le tube capillaire calorifugé se fait sans variation d'énergie cinétique notable du fluide. Elle se fait à enthalpie constante.  
 En déduire l'enthalpie massique  $h_4$  du fluide dans l'état (4).
  - 2.3. Représenter le cycle de Carnot du congélateur idéal de la question 1. 1. sur le diagramme  $s, T$ .
  - 2.4. Définir le titre en vapeur  $x$  d'un mélange liquide - vapeur. Exprimer l'enthalpie massique  $h$  d'un tel mélange en fonction de  $x$ ,  $h_{vap}$ , et  $h_{liq}$ . En déduire le titre en vapeur du fluide dans l'état (4).
  - 2.5. Calculer la quantité de chaleur échangée par 1 kg de fluide dans l'évaporateur.
  - 2.6. Le congélateur peut extraire 1,5 kJ par seconde au compartiment froid en fonctionnement normal.  
 En déduire le débit massique de fluide dans l'installation.

Données :

- chaleur latente de fusion de la glace :  $333 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
- capacité thermique massique de l'eau liquide :  $4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- capacité thermique massique de la glace :  $2100 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Extrait des tables thermodynamiques du fréon :

$\theta_{sat} (^\circ\text{C})$	$p$ (kPa)	$h_{liq}$ (kJ/kg)	$h_{vap}$ (kJ/kg)
-25	123,7	13,315	176,352

32,7	800	67,195	200,452
------	-----	--------	---------

$h_{liq}$  et  $h_{vap}$  sont les enthalpies massiques du liquide saturant et de la vapeur saturante.

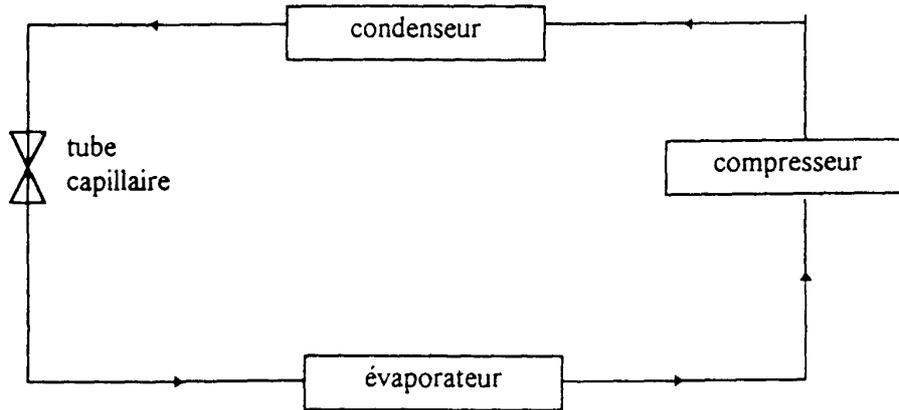


Figure 1

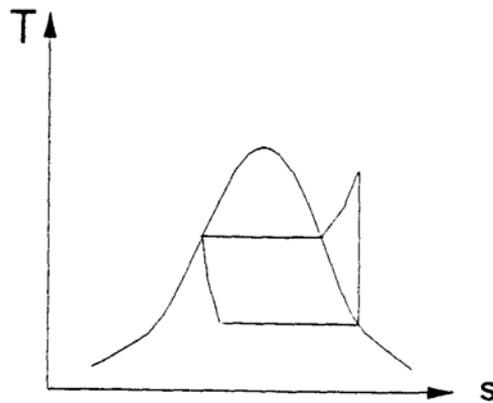


Figure 2

**BTS Techniques Physiques pour l'Industrie et le Laboratoire 1999**

Pour compenser des pertes de chaleur, on envisage d'utiliser une pompe à chaleur fonctionnant entre deux sources de chaleur: l'extérieur (à  $0^{\circ}\text{C}$ ) et l'intérieur de l'habitation (à  $19^{\circ}\text{C}$ ).

1. Calculer l'efficacité maximale d'une pompe à chaleur ditherme fonctionnant entre deux sources de chaleur aux températures  $T_f$  et  $T_c > T_f$ . On fera la démonstration en précisant dans quelles conditions le calcul est valable. Donner la valeur numérique de l'efficacité.
2. L'efficacité de la pompe réelle est de 40% de la pompe idéale. Calculer la puissance que consommerait la pompe réelle pour compenser les pertes thermiques supposées égales à 550 W.