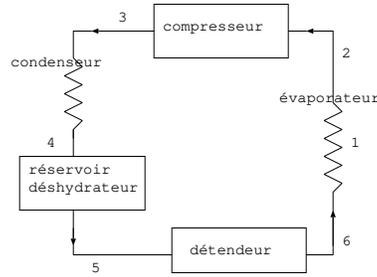


# TD premier principe industriel

## I. Utilisation d'un diagramme enthalpique: climatiseur

Les véhicules équipés de la climatisation en série occupent une place de plus en plus importante sur le marché automobile : en 2005, cet équipement a été présent sur près de 90 % des véhicules neufs en France. Le fluide frigorigène subissant le cycle est de l'hydrofluorocarbure HFC connu sous le code *R134a*. On admet qu'il se conduit à l'état gazeux comme un gaz parfait de coefficient  $\gamma = \frac{C_P}{C_V} = 1,12$ .



Le cycle théorique du *R134a* est donnée ci-contre.

- En (1), dans l'évaporateur, le fluide frigorigène est sur la courbe de rosée :  $P_1 = 3,5 \text{ bar}$  et  $t_1 = 5,0^\circ\text{C}$ . Il subit alors un échauffement isobare jusqu'à l'entrée du compresseur caractérisé par l'état :  $h_2 = 415 \text{ kJ/kg}$ .
- La vapeur surchauffée basse pression est alors comprimée par le compresseur jusqu'à l'état (3). On a  $P_3 = 10 \text{ bar}$ . La compression est supposée adiabatique réversible.
- Entre (3) et (4), la vapeur surchauffée haute pression est refoulée dans le condenseur où elle cède à l'air extérieur une quantité de chaleur sous pression constante. Le fluide frigorigène se condense alors entièrement jusqu'à l'état (4) juste saturant.
- En sortie du condenseur, le fluide liquéfié se sous-refroidit et traverse un réservoir déshydrateur, toujours à pression constante. L'état (5) caractérise ce sous refroidissement.
- Entre (5) et (6), le fluide est acheminé dans un détendeur où il subit une détente isenthalpique, sa pression passe alors de  $10 \text{ bar}$  à  $3,5 \text{ bar}$ . Le fluide se vaporise alors partiellement. L'état (6) est caractérisé par un titre massique en vapeur de 20 %.
- Enfin, il pénètre dans l'évaporateur et absorbe en s'évaporant une certaine quantité de chaleur provenant de l'air pulsé en direction de l'habitacle. L'air arrive rafraîchi dans l'habitacle.

Dans tout le problème, le débit massique du *R134a* a pour valeur :  $D_m = 0,13 \text{ kg/s}$ .

1. Placer, sur le diagramme enthalpique, les 6 points correspondant aux différents états et compléter le tableau.

états	1	2	3	4	5	6
$P \text{ (bar)}$						
$t \text{ (}^\circ\text{C)}$						
$h \text{ (kJ/kg)}$						
$x_v$						
$x_l$						

Quel est selon vous l'intérêt de la transformation 1 – 2? De même pour la transformation 4 – 5?

2. Relever, sur le diagramme, le travail massique utile  $w_u$  que doit fournir le compresseur lors de la compression adiabatique du fluide. En déduire la puissance que doit fournir le compresseur au fluide.
3. Rappeler le schéma de fonctionnement d'un climatiseur. Identifier les transferts thermiques massiques  $q_F$  et  $q_C$  réalisés par le fluide avec les sources chaude et froide. Les calculer.
4. Définir puis calculer l'efficacité de l'installation. La comparer à l'efficacité obtenue pour une machine réversible fonctionnant entre les températures  $t_f = 5^\circ\text{C}$  et  $t_c = 39^\circ\text{C}$ .
5. Calculer la température  $T_3$  attendue pour une compression adiabatique réversible de la vapeur assimilée à un GP de la pression  $P_2 = 3,5 \text{ bar}$  jusqu'à la pression  $P_3 = 10 \text{ bar}$ . Donnée :  $\gamma = 1,12$ .

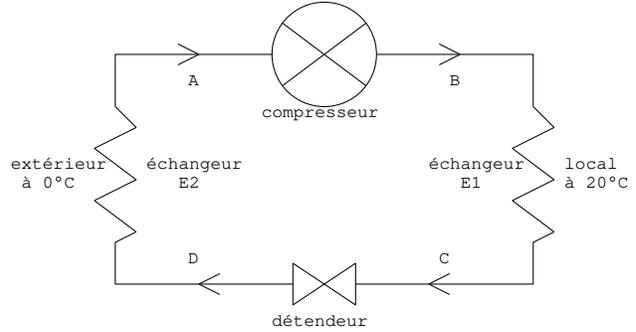
Réponses :  $w_u = 25 \text{ kJ.kg}^{-1}$ ,  $q_c = -200 \text{ kJ.kg}^{-1}$ ,  $q_f = 175 \text{ kJ.kg}^{-1}$

## II. Utilisation d'un diagramme entropique: Etude d'une PAC

La pompe à chaleur étudiée ici a pour rôle de maintenir la température d'un local à  $T_0 = 20^{\circ}\text{C}$  toute l'année. On s'intéresse ici à son fonctionnement en hiver (chauffage), avec  $T_{ext} = 20^{\circ}\text{C}$ , et on considère que le régime permanent est atteint. Le fluide caloporteur est l'ammoniac, son diagramme  $(T, s)$  est fourni en annexe. Le circuit comporte deux transformations isobares: côté local (entre  $B$  et  $C$ ), la pression est égale à la pression de vapeur saturante de l'ammoniac à  $20^{\circ}\text{C}$ . Côté extérieur (entre  $D$  et  $A$ ), la pression est égale à la pression de vapeur saturante de l'ammoniac à  $0^{\circ}\text{C}$ . On néglige les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle de pesanteur.

L'échangeur  $E1$  est un condenseur, l'ammoniac y entre en  $B$  sous forme de vapeur sèche et en sort en  $C$  sous forme de liquide saturant à  $T_0$ .  $E1$  ne présente pas de pièces mécaniques mobiles, on note  $q_1$  le transfert thermique massique reçu par le fluide dans  $E1$ .

L'échangeur  $E2$  est un évaporateur: le mélange liquide-vapeur qui entre en  $D$  se vaporise totalement pour ressortir sous forme de vapeur saturante en  $A$  à  $T_{ext}$ .  $E2$  ne présente pas de pièces mécaniques mobiles. On note  $q_2$  le transfert thermique massique reçu par le fluide dans  $E2$ .



Le compresseur est calorifugé, on considère qu'il fonctionne de façon réversible. Le travail massique reçu par le fluide dans le compresseur est noté  $w_c$ . Le détendeur est calorifugé et ne présente pas de pièces mécaniques mobiles.

1. Sur le diagramme  $(T, s)$  donné, les isenthalpes sont en trait plein et l'enthalpie massique en  $\text{kJ.kg}^{-1}$ , les isobares sont en pointillé et les pressions en bar. Par lecture graphique déterminer les valeurs des pressions de vapeur saturante  $P_{sat}(0^{\circ}\text{C})$  et à  $P_{sat}(20^{\circ}\text{C})$  et tracer les isobares correspondant à ces deux pressions.
2. Par lecture graphique, calculer les enthalpies massiques de vaporisation  $\Delta_{vap}h$  à  $0^{\circ}\text{C}$ .
3. Montrer que  $h_B = h_C$  et que  $s_A = s_B$ .
4. Placer les états  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  sur le diagramme. Déterminer graphiquement  $T_B$  (température de l'ammoniac à la sortie du compresseur). Si l'évolution dans le compresseur était adiabatique mais non réversible, la température finale  $T'_B$  serait-elle supérieure ou inférieure à  $T_B$ ? Justifier votre réponse.
5. En appliquant le premier principe industriel, déterminer  $q_1$ ,  $q_2$  et  $w_c$  à l'aide du diagramme. Existe-t-il une relation simple entre ces trois grandeurs?
6. Définir et calculer numériquement l'efficacité de cette pompe à chaleur. La comparer à l'efficacité de Carnot.
7. Calculer l'entropie créée par unité de masse de fluide dans l'échangeur 1. Commenter.

Réponses: 1- 4 et 8 bars 2-  $\Delta_{vap}h(0^{\circ}\text{C}) = h_v - h_l = 1255 \text{ kJ.kg}^{-1}$  4-  $T_B = 50^{\circ}\text{C}$  5-  $q_2 = +1155 \text{ kJ.kg}^{-1}$ ,  $q_1 = -1260 \text{ kJ.kg}^{-1}$ ,  $w_c = 105 \text{ kJ.kg}^{-1}$  6-  $e = 12$  et  $e_c = 14,7$  7-  $s_{c,BC} = 50 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

## III. Compresseur

On étudie un compresseur au travers duquel de l'air (assimilé à un gaz parfait diatomique) dans son état gazeux est en écoulement stationnaire avec un débit massique  $D_m = 16 \text{ g.s}^{-1}$ . Le compresseur est calorifugé. On mesure en entrée ( $P_e = 1 \text{ bar}$ ,  $T_e = 298 \text{ K}$ ) et en sortie ( $P_s = 7 \text{ bar}$ ,  $T_s = 540 \text{ K}$ ). Données :  $\gamma = 1,4$  et  $C_p = 1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

1. Calculer la puissance utile fournie au gaz par le compresseur.
2. On suppose que la compression de l'air traversant le compresseur, de la pression  $P_e$  à la pression  $P_s$ , est réversible. Calculer la température  $T_s$  en sortie du compresseur. En déduire la puissance utile fournie au gaz par le compresseur dans ce cas.

Réponses :  $P_u = 3,9 \text{ kW}$ ,  $T_s = 520 \text{ K}$ , et  $P_{u,rev} = 3,6 \text{ kW}$

## IV. Utilisation d'un diagramme entropique: Centrale électrique

La plupart des centrales électriques fonctionnent avec un circuit dans lequel de l'eau subit des transformations entre l'état liquide et l'état gazeux permettant de transformer un transfert thermique, provenant de la combustion du charbon ou du réacteur nucléaire, en travail mécanique. Ce travail mécanique est ensuite transformé par un alternateur en énergie électrique par induction.

On étudie un cycle typique : le cycle de Rankine. Le fluide circule en régime stationnaire dans la machine et passe par quatre états successifs :

Dans l'état 1, le fluide sort du condenseur à l'état liquide saturant à la température  $T_1$  et la pression  $P_1 = 0,2 \text{ bar}$ .

Le fluide subit une compression adiabatique réversible dans la pompe jusqu'à l'état 2, état liquide de pression  $P_2 > P_1$  à la température voisine de  $T_1$ .

Au cours de la transformation 2-3, le fluide passe dans une chaudière de température  $T_{ch}$  où il reçoit un transfert thermique à pression constante. Il monte en température, est totalement transformé en vapeur et monte encore en température. Dans l'état 3, le fluide est à l'état de vapeur sèche à la température  $T_3 = 613 \text{ K}$  à la pression  $P_3 = 100 \text{ bar}$ .

La transformation 3-4 se fait dans la turbine où le fluide subit une détente adiabatique et réversible jusqu'à l'état 4 où le fluide est à l'état de mélange liquide-vapeur à la pression  $P_4 = P_1$ .

La transformation 4-1 se fait dans le condenseur de température  $T_{fr}$ , la vapeur se condense totalement de manière isobare et isotherme.

On néglige la variation des énergies cinétiques et potentielles à la traversée de chacun des éléments.

1. Dessiner le cycle sur le diagramme entropique de l'eau (les états 1 et 2 sont confondus).
2. Comment peut-on obtenir le titre en vapeur  $x_4$  géométriquement sur le schéma?
3. Calculer le travail utile dans la turbine et les transferts thermiques massiques liés à la source froide et à la source chaude.
4. Définir le rendement du cycle et le calculer. Le comparer au rendement de Carnot calculé en prenant les températures la plus faible et la plus haute du fluide dans le cycle.
5. Calculer l'entropie massique créée au cours de la transformation 4 – 1.

Réponses: 3-  $w_t = h_4 - h_3 = -1390 \text{ kJ.kg}^{-1}$ ,  $q_c = h_3 - h_2 = 3390 \text{ kJ.kg}^{-1}$  et  $q_f = h_1 - h_4 = -2000 \text{ kJ.kg}^{-1}$   
4-  $r = 0,41$  et  $r_c = 0,62$  5-  $s_{c,41} = 0,2 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1}$

## V. Turbine

De l'azote gazeux, décrit par le modèle du gaz parfait diatomique de masse molaire  $M = 28 \text{ g.mol}^{-1}$  avec  $\gamma = 1,4$ , s'écoule en régime permanent dans une turbine avec un débit massique  $D_m = 4 \text{ kg.s}^{-1}$ . Les conditions de l'écoulement sont: à l'entrée: pression  $P_1 = 4 \text{ bar}$  vitesse  $c_1 = 20 \text{ m/s}$  et à la sortie: pression  $P_2 = 2 \text{ bar}$  vitesse  $c_2 = 180 \text{ m/s}$

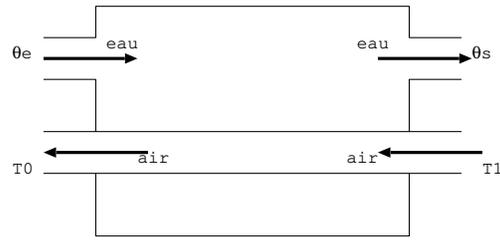
Le fluide qui traverse la turbine fournit au milieu extérieur une puissance  $P = 80 \text{ kW}$ , le gaz sort de la turbine à une température  $T_2$  égale à la température extérieure  $T_2 = T_a = 298 \text{ K}$ . Rappel : la capacité thermique massique d'un GP est  $c_p = \frac{\gamma R}{(\gamma - 1)M}$ .

1. Dans l'hypothèse où la transformation subie par l'azote est isotherme, quelle est la puissance thermique  $P_{th}$  reçue par le gaz?
2. On suppose que le gaz subit une transformation adiabatique, quelle est sa température à l'entrée de la turbine?

Réponses :  $P_{th} = 144 \text{ kW}$  et  $T_1 = 333 \text{ K}$

## VI. Réfrigérant

De l'air chaud ( $P_1 = 6 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 500 \text{ K}$ ) est refroidi de façon isobare jusqu'à la température  $T_0 = 300 \text{ K}$  dans un échangeur parfaitement calorifugé. Le fluide réfrigérant est constitué par l'eau de capacité thermique massique  $c = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  qui entre à la température  $\theta_e = 12^\circ\text{C}$  et sort à la température  $\theta_s$ . Le débit d'eau est  $d_e = 100 \text{ g.s}^{-1}$  et celui de l'air  $d_a = 6,5 \text{ g.s}^{-1}$ .



Calculer  $\theta_s$  en appliquant le premier principe industriel à un système judicieusement choisi. On donne  $c_p = 1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  pour l'air.

Réponse:  $\theta_s = 15^\circ\text{C}$

## VII. Utilisation d'un tableau de données

On donne dans le tableau suivant les caractéristiques du fluide R410A utilisé dans le congélateur.

$h_l$  et  $h_v$  sont les enthalpies massiques du liquide saturant et de la vapeur saturante.

$s_l$  et  $s_v$  sont les entropies massiques du liquide saturant et de la vapeur saturante.

$P_{sat}$  est la pression de vapeur saturante à la température  $\theta$ .

$\theta$ ( $^\circ\text{C}$ )	$P_{sat}$ (bar)	$h_l$ ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ )	$h_v$ ( $\text{kJ.kg}^{-1}$ )	$s_v$ ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	$s_l$ ( $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
40	25	270	435	1,75	1,22
-40	1,8	144	405	1,9	0,78

Les questions 1 et 2 sont indépendantes.

**1. 1.a.** Tracer l'allure de la courbe de saturation dans le diagramme enthalpique ( $P$  en fonction de  $h$ ) en plaçant avec précision 4 points sur cette courbe à partir des données du tableau.

**1.b.** On réalise une détente de Joule Thomson de l'état 1 où le fluide est du liquide saturant à la température  $\theta_1 = 40^\circ\text{C}$  jusqu'à l'état 2 de température  $\theta_2 = -40^\circ\text{C}$ . Placer les points sur le graphe. Calculer  $x_v$  la fraction massique de vapeur dans l'état 2 et calculer l'entropie du fluide dans l'état 2.

**1.c.** Déduire du second principe, l'entropie massique créée au cours de cette transformation.

**2. 2.a.** Tracer l'allure de la courbe de saturation dans le diagramme entropique ( $T$  en fonction de  $s$ ) en plaçant avec précision 4 points sur cette courbe à partir des données du tableau.

**2.b.** On réalise la compression isentropique du fluide d'un état 3 vers un état 4. En début de compression, le fluide est à la pression  $P_3 = 1,8 \text{ bar}$ . Il est constitué d'un mélange diphasé de fraction massique en vapeur  $x'_v$ . En fin de compression, le fluide est à  $\theta_4 = 40^\circ\text{C}$  sur la courbe de rosée. Placer les points 3 et 4 sur le diagramme entropique et déterminer  $x'_v$ . En déduire  $h_3$ , l'enthalpie massique dans l'état 3.

**2.c.** La compression est supposée adiabatique, calculer le travail utile mis en jeu au cours de cette transformation 3-4.

Réponses: 1-  $x_v = 0,48$ ,  $s_2 = 1,32 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et  $s_c = 0,10 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  2-  $x'_v = 0,87$ ,  $h_3 = 371 \text{ kJ.kg}^{-1}$  et  $w_u = 64 \text{ kJ.kg}^{-1}$