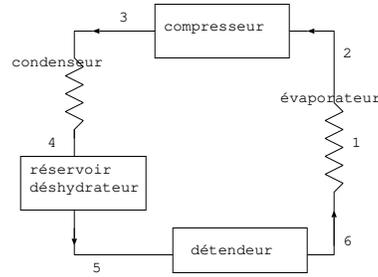


TD premier principe industriel

I. Utilisation d'un diagramme enthalpique

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 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

Une machine frigorifique est utilisée dans un pays chaud pour maintenir à 0°C un local contenant des denrées périssables. Cette machine contient un fluide frigorigène de type Fréon dont le diagramme Température-Entropie massique (s, T) est joint. Sur ce diagramme apparaissent les isobares et les isenthalpiques. Cette machine ditherme, qui fonctionne en régime permanent, échange de la chaleur avec une source chaude à 40°C (atmosphère extérieure) et une source froide à 0°C (local réfrigéré).

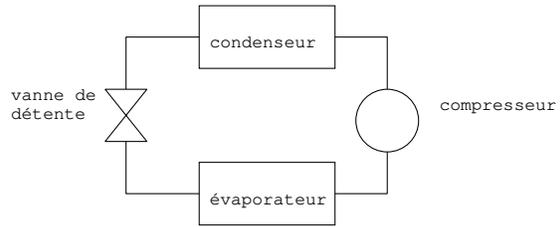
Le cycle décrit par le Fréon présente les caractéristiques suivantes :

- Dans l'état 1, le fréon est de la vapeur saturante à -10°C
- La compression de 1 à 2 est adiabatique et réversible, et amène le fréon à la pression de 15 bars
- La transformation de 2 à 3 est isobare et amène le fréon à l'état de liquide saturant
- Entre 3 et 4, le fréon subit une détente dans une canalisation calorifugée
- La transformation de 4 à 1 est isobare.

1. Tracer le cycle sur le diagramme entropique joint et dresser un tableau en faisant figurer, la température, la pression, l'enthalpie massique, l'entropie massique et la fraction massique de vapeur pour les états 1, 2, 3 et 4.

2. Si l'évolution dans le compresseur était adiabatique mais non réversible, la température finale T'_2 serait-elle supérieure ou inférieure à T_2 ? Justifier votre réponse.

3. Le schéma général de fonctionnement est défini ci-contre. Ajouter sur le schéma le sens de circulation du fluide et les états 1, 2, 3 et 4. Ajouter les sources chaude et froide et le sens des échanges thermiques avec ces deux sources.



4. Justifier le fait que la température de la source froide soit plus élevée que la température du fluide dans l'évaporateur. De même justifier le fait que la température du fluide dans le condenseur est plus élevée que la température de la source chaude.

5. Définir et calculer l'efficacité de cette machine. La comparer à l'efficacité de Carnot.

6. On donne le débit massique du fréon $D_m = 12 \text{ g.s}^{-1}$. Calculer la puissance du compresseur et la puissance frigorifique de cette machine.

7. Déterminer la fraction massique en vapeur dans l'état 4 avec le théorème de moments et vérifier la cohérence avec les courbes isotitres.

8. On suppose que lors de la compression de 1 à 2, le gaz se comporte comme un gaz parfait de coefficient $\gamma = 1,23$. Calculer la température T_2 obtenue dans l'hypothèse du GP et la comparer à T_2 lue sur le diagramme. Commenter le résultat.

Réponses: 2- $T'_2 > T_2$ 5- $e = 2,4$ et $e_c = 6,8$ 6- $P_{comp} = 420 \text{ W}$ et $P_f = 1 \text{ kW}$ 8- lois de Laplace $T_2 = 380 \text{ K}$

III. 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 $T_1 = 333 \text{ K}$

IV. Compresseur

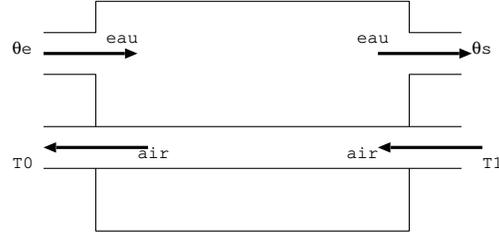
On étudie un compresseur au travers duquel de l'air (assimilé à un gaz parfait diatomique) dans son état gazeux est en écoulement stationnaire avec un débit massique $D_m = 16 \text{ g.s}^{-1}$. Le compresseur est calorifugé. On mesure en entrée ($P_e = 1 \text{ bar}, T_e = 298 \text{ K}$) et en sortie ($P_s = 7 \text{ bar}, T_s = 540 \text{ K}$). 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 $P_{u,rev} = 3,6 \text{ kW}$

V. 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 θ_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 θ_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.

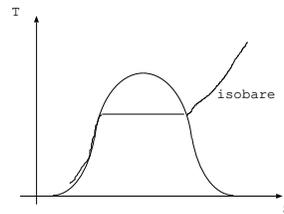
Réponse: $\theta_s = 15^\circ\text{C}$

VI. Congélateur

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

θ ($^\circ\text{C}$)	P_{sat} (bar)	h_l (kJ.kg^{-1})	h_v (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

1. Le diagramme entropique est un diagramme qui comprend la température en ordonnée et l'entropie en abscisse. On donne l'allure du diagramme et d'une isobare. Reproduire le diagramme entropique en ajoutant les domaines du liquide, de la vapeur et du mélange liquide-vapeur, et en traçant les isobares de pression 1,8 bar et 25 bar.



2. On réalise la compression isentropique 1 – 2 du fluide R410A. En début de compression, le fluide est à la pression $P_1 = 1,8 \text{ bar}$. Il est constitué d'un mélange diphasé de fraction massique en vapeur x_1 . En fin de compression, le fluide est à $\theta_2 = 40^\circ\text{C}$ sur la courbe de rosée. Placer les points 1 et 2 sur le diagramme entropique et déterminer x_1 par application du théorème des moments. En déduire h_1 .

3. Le fluide subit une transformation 2 – 3 qui l'amène à l'état de liquide saturant, puis une détente 3 – 4 dans un détendeur calorifugé et enfin une évaporation 4 – 1. Ce cycle de transformations en fait une machine ditherme utilisée comme congélateur. Représenter le cycle dans le diagramme entropique. On note que la détente 3 – 4 est adiabatique et non réversible, préciser le signe de Δs_{34} et en déduire la position approximative du point 4.

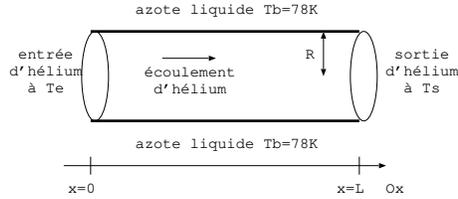
4. Montrer que la détente 3 – 4 est isenthalpique et déterminer la fraction massique x_4 en vapeur à la fin de la détente.

5. Déterminer l'efficacité de ce congélateur. L'intérieur du congélateur est à la température $\theta_F = -18^\circ\text{C}$. Est-ce cohérent avec le cycle décrit par le fluide?

Réponses : $x_1 = 0,86$, $x_4 = 0,48$ et $e = 1,6$

VII. Echangeur thermique

Un tube de rayon $R = 5 \text{ cm}$ est parcouru par de l'hélium avec un débit massique $D_m = 5.10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$. Le tube traverse un bain thermostaté d'azote liquide à la température $T_b = 78 \text{ K}$. Le tube a pour longueur $L = 1 \text{ m}$ et la température de l'hélium à l'entrée du tube est $T_e = T(x = 0) = 300 \text{ K}$. La capacité thermique massique de l'hélium est $c_p = 5,0 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1}$. La puissance thermique **surfaccique** échangée entre l'hélium et l'azote liquide est de la forme $p_{th} = h(T_b - T(x))$ en $W.m^{-2}$. On note $T_s = T(x = L)$ la température de l'hélium à la sortie du tube.



1. Donner la valeur minimale de la température T_s .
2. Appliquer le premier principe industriel au système compris entre les sections x et $x + dx$ et montrer que $T(x)$ vérifie une équation de la forme $\frac{dT}{dx} + \frac{T}{\delta} = \frac{T_b}{\delta}$. Exprimer δ et résoudre l'équation pour exprimer $T(x)$. Calculer δ et $T_s = T(x = L)$ pour $h = 13,2 \text{ SI}$. Donnée: la surface latérale d'un cylindre ('rouleau de papier sopalin') de rayon R et de longueur L est $2\pi RL$.
3. Exprimer la puissance thermique fournie au bain thermostaté par l'hélium contenu dans la portion de tube comprise entre les abscisses x et $x + dx$ et en déduire la puissance thermique P_{th} reçue par le bain thermostaté sur toute la longueur du tube.
4. Quelle doit être la longueur minimale du tube pour que T_s soit égale à la température minimale possible.

Réponses: $\delta = \frac{D_m c_p}{h 2\pi R}$, $\delta = 60 \text{ cm}$, $T_s = 120 \text{ K}$, $P_{th} = 450 \text{ W}$