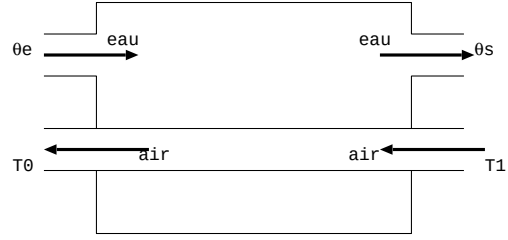


TD premier principe industriel

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

II. Compresseur

On étudie un compresseur au travers duquel de l'air dans son état gazeux, assimilé à un GP, 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). Données : $\gamma = 1,4$ et $C_p = 1 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

1. 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.

2. En déduire la puissance utile fournie au gaz par le compresseur dans ce cas.

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

III. 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 θ .

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

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.

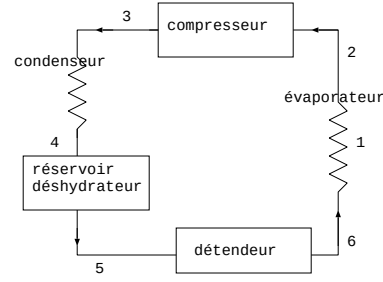
2.b. On réalise la compression isentropique du fluide d'un état 3 vers un état 4. En début de compression, le fluide est à la pression $P_3 = 1,8 \text{ bar}$. Il est constitué d'un mélange diphasé de fraction massique en vapeur x'_v . En fin de compression, le fluide est à $\theta_4 = 40^\circ\text{C}$ 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 $w_u = 64 \text{ kJ.kg}^{-1}$

IV. 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 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						

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

V. Etude d'un turboréacteur (extrait CCINP PC)

Le turboréacteur fonctionne selon le cycle théorique ouvert de Brayton. Les conditions d'étude de ce cycle sont les suivantes :

- l'air est considéré comme un gaz parfait. Sa capacité thermique massique à pression constante c_p est supposée constante, comme le rapport γ entre les capacités thermiques isobare et isochore. On prendra $\gamma = 1,35$ et $c_p = 1,1 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1}$.

- les variations d'énergie potentielle sont négligeables

- l'énergie cinétique est supposée négligeable entre l'entrée du compresseur et la sortie de la turbine soit dans les états 2,3,4 et 5.

En entrée du diffuseur, l'air est à l'état (1) : ($P_1 = 34,5 \text{ kPa}$, $T_1 = 233 \text{ K}$) avec une vitesse $v_1 = 260 \text{ m.s}^{-1}$. On considère que le diffuseur est idéal, ce qui revient à dire que l'énergie cinétique du gaz après traversée du diffuseur est négligeable devant les autres termes énergétiques et que la traversée du diffuseur est adiabatique et réversible.

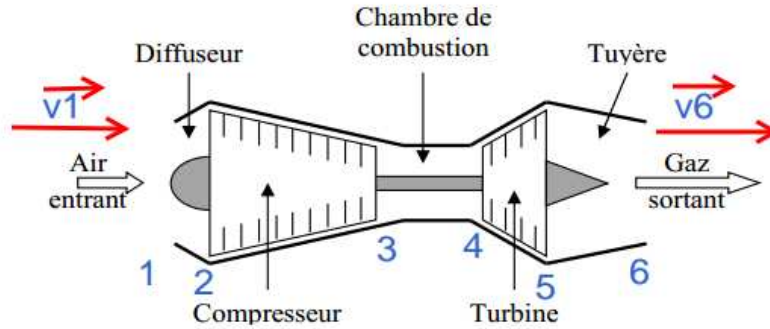
En entrée du compresseur, l'air se trouve à l'état (2) : (P_2, T_2) et est amené à l'état (3) : ($P_3 = 10P_2, T_3$) par une compression adiabatique réversible.

Dans la chambre de combustion, l'air, mélangé au carburant, subit un échauffement isobare réversible jusqu'à l'état (4) : ($P_4, T_4 = 1400 \text{ K}$). Bien que les compositions du gaz à l'entrée et à la sortie de la chambre de combustion soient différentes, pour simplifier la modélisation, on suppose que celle-ci sert uniquement à réchauffer l'air et que les propriétés de l'air ne sont pas modifiées par ce changement de composition.

L'air parvient alors dans la turbine où il subit une détente adiabatique réversible jusqu'à l'état (5) : (P_5, T_5).

Enfin, il se détend de façon adiabatique et réversible dans la tuyère et arrive dans l'état (6) : (P_6, T_6).

L'air entre dans le compresseur avec un débit massique $D_m = 45 \text{ kg.s}^{-1}$.



On rappelle que l'expression du premier principe pour une masse $m = 1 \text{ kg}$ de fluide en écoulement au travers d'une machine est : $\Delta h + \frac{\Delta v^2}{2} + g\Delta z = w_u + q$.

1. Donner la signification de chaque terme de cette équation.
2. Donner l'expression de la température T_2 en fonction de T_1 , v_1 et c_p . Effectuer l'application numérique.
3. Donner l'expression de la pression P_2 en fonction de P_1 , T_1 , T_2 et γ . Effectuer l'application numérique.
4. Établir l'expression du travail massique utile w_{comp} fourni à l'air par le compresseur. En prenant $T_3 = 480 \text{ K}$, calculer la puissance P_{comp} de ce dernier.
5. Sachant que le travail fourni par la détente du gaz dans la turbine est intégralement reçu par le compresseur, déterminer l'expression de la température T_5 en fonction de T_2 , T_3 et T_4 . Calculer la valeur de T_5 . En déduire la valeur de la pression P_5 .
6. Donner l'expression de la vitesse v_6 de sortie du gaz en sortie de tuyère en fonction de T_5 , T_6 et c_p . Calculer la valeur de v_6 sachant que $T_6 = 680 \text{ K}$.

On admet que la puissance liée à la force propulsive est $P_{prop} = D_m(v_6 - v_1)v_1$.

7. Définir et calculer le rendement r du turboréacteur. Donnée: la puissance qui sert à chauffer le gaz dans la chambre de combustion est $P_{chamb} = 45,5 \text{ MW}$.

Réponses: 2- $T_2 = 264 \text{ K}$ 3- $P_2 = 55,8 \text{ kPa}$ 4- $P_{comp} = 1,53 \text{ MW}$ 5- $T_5 = 1184 \text{ K}$ et $P_5 = 292 \text{ kPa}$ 6- $v_6 = 1054 \text{ m.s}^{-1}$ 7- $r = 0,20$

VI. 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- $s_{c,41} = 0,2 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1}$