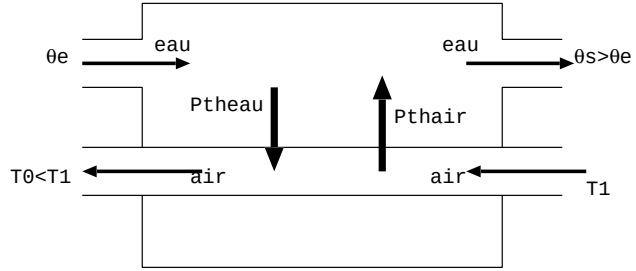


TD premier principe industriel

I. Réfrigérant

L'eau et l'air peuvent échanger de la chaleur, la chaleur se propage des fortes vers les faibles températures donc ici l'eau froide (qui entre à la température $\theta_e = 12^\circ C$) permet de refroidir l'air chaud (qui entre à la température $T_1 = 500 K$). La température de l'eau à la sortie est donc plus élevée que sa température à l'entrée et la température de l'air à la sortie est plus faible que sa température à l'entrée.



Réfléchissons un peu: L'idée est d'appliquer le premier principe industriel. On peut l'appliquer à trois systèmes différents: l'eau, l'air ou le système eau+air.

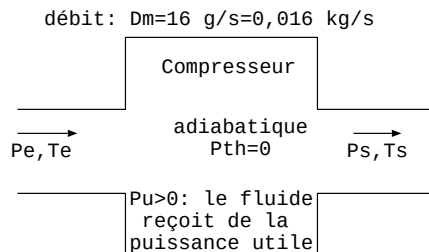
Le premier principe industriel appliqué à l'eau s'écrit: $d_e(h_{s,eau} - h_{e,eau}) = d_e c(\theta_s - \theta_e) = P_{th,eau}$ (la puissance utile est nulle car il n'y a pas de pièces mobiles).

Le premier principe industriel appliqué à l'air s'écrit: $d_a(h_{s,air} - h_{e,air}) = d_a c_p(T_1 - T_0) = P_{th,air}$ (la puissance utile est nulle car il n'y a pas de pièces mobiles).

Le premier principe industriel appliqué au système air+eau s'écrit: $d_a(h_{s,air} - h_{e,air}) + d_e(h_{s,eau} - h_{e,eau}) = d_e c(\theta_s - \theta_e) + d_a c_p(T_1 - T_0) = 0$ (en effet il n'y a pas de puissance thermique car le système air+eau est adiabatique). Remarque: l'équation obtenue avec le premier principe industriel appliqué à l'eau+l'air est en fait la somme des deux équations obtenues en appliquant le premier principe industriel, à l'air puis à l'eau seule. En effet $P_{th,eau} = -P_{th,air}$ car la puissance thermique perdue par l'air est reçue par l'eau, l'ensemble étant adiabatique.

Donc concrètement, quand on résout cet exercice on n'applique que le premier principe industriel appliqué au système air+eau soit: $d_a(h_{s,air} - h_{e,air}) + d_e(h_{s,eau} - h_{e,eau}) = d_e c(\theta_s - \theta_e) + d_a c_p(T_1 - T_0) = 0$. On en déduit θ_s par $\theta_s = \theta_e - \frac{d_a c_p(T_1 - T_0)}{d_e c} = 288 K$ (faire l'AN avec les températures en Kelvin).

II. Compresseur



1. On applique le premier principe industriel au fluide dans le compresseur, l'énoncé de donne aucune vitesse et aucune hauteur donc on néglige les variations d'énergie cinétique et d'énergie potentielle.

$D_m(h_s - h_e) D_m c_p(T_s - T_e) = P_u$ (la puissance thermique est nulle car le compresseur est adiabatique). AN: $P_u = 3,9 kW$

2. Dans le compresseur, l'air est assimilé à un GP en transformation adiabatique réversible donc on peut lui appliquer les lois de Laplace: $P_e V_e^\gamma = P_s V_s^\gamma$ donne (avec $V = \frac{nRT}{P}$) $P_e^{1-\gamma} T_e^\gamma = P_s^{1-\gamma} T_s^\gamma$ d'où $T_s = T_e \left(\frac{P_e}{P_s}\right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} = 520 K$.

On applique le premier principe industriel comme précédemment avec $T_s = 520 K$, on obtient $P_u = 3,6 kW$.

III. Utilisation d'un tableau de données

1. L'état 1 est sur la courbe d'ébullition à $P = 25 \text{ bar}$.

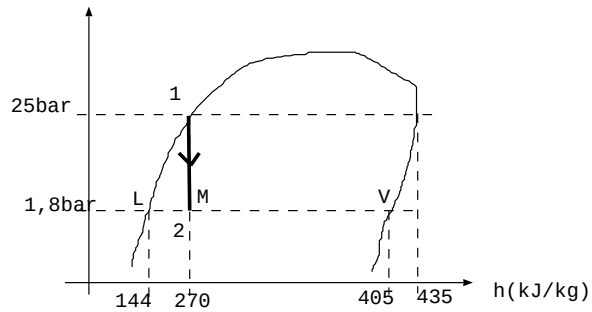
la détente est irréversible car les particules vont des fortes vers les faibles pressions.

La détente de Joule Thomson est isenthalpique.

On applique le théorème des moments: $x_v = \frac{LM}{LV} = \frac{270 - 144}{405 - 144} = 0,48$

On a $s_1 = s_l(24 \text{ bar}) = 1,22 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
et $s_2 = x_v s_v(1,8 \text{ bar}) + (1 - x_v) s_l(1,8 \text{ bar}) = 1,32 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

On applique le second principe de la thermo au fluide: la détente de Joule Thomson est adiabatique donc $s_e = 0$ d'où $s_c = s_2 - s_1 = 0,10 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1} > 0$:

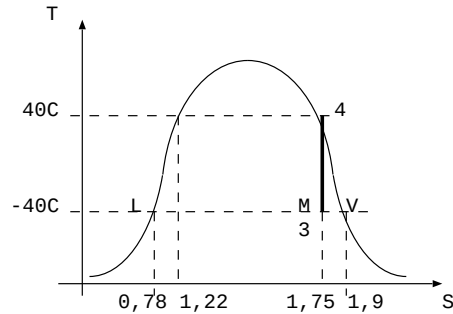


2. La compression est adiabatique réversible soit isentropique.

On applique le théorème des moments: $x'_v = \frac{LM}{LV} = \frac{1,75 - 0,78}{1,9 - 0,78} = 0,87$

On a $h_4 = s_v(24 \text{ bar}) = 435 \text{ kJ.kg}^{-1}$ et $h_3 = x'_v h_v(1,8 \text{ bar}) + (1 - x'_v) h_l(1,8 \text{ bar}) = 371 \text{ kJ.kg}^{-1}$

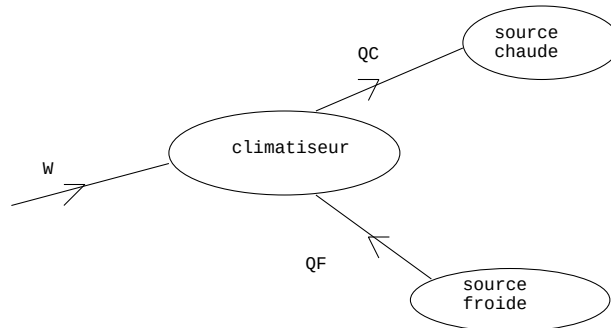
On applique le premier principe industriel au fluide: la compression est adiabatique donc $w_u = h_4 - h_3 = 64 \text{ kJ.kg}^{-1} > 0$: le fluide reçoit du travail.



IV. Utilisation d'un diagramme enthalpique

1.

états	1	2	3	4	5	6
$P \text{ (bar)}$	3,5	3,5	10	10	10	3,5
$t \text{ (}^\circ\text{C)}$	5	22	39	39	39	5
$h \text{ (kJ/kg)}$	400	415	440	255	245	245
x_v	1	1	1	0	0	0,2
x_l	0	0	0	1	1	0,8



2. Le système reçoit du travail dans le compresseur: on applique le premier principe industriel: $\Delta h_{23} = h_3 - h_2 = w_{u23} + q_{23} = w_{u23}$ car 23 est adiabatique soit $w_{u23} = 25 \text{ kJ/kg}$.

On applique $P_m = D_m w_u = 25.0,13 \text{ kW}$

3. Pour trouver q_C et q_F il y a deux façons de raisonner.

Première façon : on calcule tous les transferts thermiques. Ceux qui sont positifs font partie de q_F et ceux qui sont négatifs font partie de q_C .

$\Delta h_{34} = h_4 - h_3 = w_{u34} + q_{34} = q_{34}$ car la transformation 34 se fait dans un condenseur, c'est un échangeur thermique donc sans parties mobiles d'où $q_{34} = 255 - 440 = -185 \text{ kJ/kg}$.

$\Delta h_{45} = h_5 - h_4 = w_{u45} + q_{45} = q_{45}$ car la transformation 45 se fait dans un échangeur thermique donc sans parties mobiles d'où $q_{45} = 245 - 255 = -10 \text{ kJ/kg} < 0$ le fluide perd du transfert thermique en se refroidissant.

$\Delta h_{56} = 0 = w_{u56} + q_{56}$: cette transformation est isenthalpique soit $q_{56} = 0$ et $w_{u56} = 0$.

$\Delta h_{61} = h_1 - h_6 = w_{u61} + q_{61} = q_{61}$ car la transformation 61 se fait dans un évaporateur, c'est un échangeur thermique donc sans parties mobiles d'où $q_{61} = 400 - 245 = +155 \text{ kJ/kg}$.

$\Delta h_{12} = h_2 - h_1 = w_{u12} + q_{12} = q_{12}$ car la transformation 12 se fait dans un échangeur thermique donc sans parties mobiles d'où $q_{12} = 415 - 400 = +15 \text{ kJ/kg}$.

On a donc $q_F = 155 + 15 = 170 \text{ kJ/kg}$ et $q_C = -185 - 15 = -195 \text{ kJ/kg}$.

On vérifie que l'on a $w_u + q_C + q_F = 0$.

Deuxième façon : on regarde le cycle. Les transformations qui sont aux températures les plus hautes sont 34 et 45, ce sont donc elles qui se font en contact avec la source chaude d'où $q_C = q_{34} + q_{45}$. Les transformations qui sont aux températures les plus basses sont 61 et 12, ce sont donc elles qui se font en contact avec la source froide d'où $q_F = q_{61} + q_{12}$. On calcule ces transferts thermiques avec le principe industriel.

4. On définit l'efficacité par $e = \frac{q_F}{w_u} = 6,8$.

L'efficacité du cycle qui ne comprend que des transformations réversibles est l'efficacité de Carnot soit $e_C = \frac{T_F}{T_C - T_F} = \frac{278}{312 - 278} = 8,2$ (penser à mettre les températures en Kelvin sauf au dénominateur car c'est une différence).

L'efficacité réelle est inférieure à l'efficacité de Carnot car le cycle réel présente des irréversibilités (en l'occurrence ici dans la détente 56).

Remarque importante : L'énoncé demande de calculer l'efficacité de Carnot en prenant les températures extrêmes du cycle mais il faut savoir que:

Lorsque le fluide est en contact avec la source chaude (ici de 3 à 5), le fluide donne de l'énergie à la source chaude, il ne peut le faire que s'il est plus chaud que la source chaude donc en réalité T_C est plus petite que la température pour les transformations 34 et 45.

De même lorsque le fluide est en contact avec la source froide (ici de 6 à 2), le fluide reçoit de l'énergie de la source froide, il ne peut le faire que s'il est plus froid que la source froide donc en réalité T_F est plus grande que la température pour les transformations 61 et 12.

5. On applique les lois de Laplace pour le GP en transformation adiabatique réversible soit: $P_2 V_2^\gamma = P_3 V_3^\gamma$ donne $P_2^{1-\gamma} T_2^\gamma = P_3^{1-\gamma} T_3^\gamma$ d'où $T_3 = T_2 \left(\frac{P_2}{P_3}\right)^{(1-\gamma)/\gamma}$ (mettre les températures en Kelvin!).

V. Correction: turboréacteur

1. $\Delta h = h_s - h_e$ est la variation d'enthalpie massique entre la sortie et l'entrée.

$\frac{\Delta v^2}{2} = \frac{v_s^2 - v_e^2}{2}$ est la variation d'énergie cinétique massique entre la sortie et l'entrée

$+g\Delta z = g(z_s - z_e)$ est la variation d'énergie potentielle massique (pour Oz vertical ascendant).

w_u désigne le travail utile massique mis en jeu par les pièces mobiles.

q désigne le transfert thermique massique échangé.

2. On applique le premier principe industriel à la transformation dans le diffuseur: $\Delta h_{12} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2} = w_{u,12} + q_{12}$.

Dans un diffuseur, il n'y a pas de partie mobile donc pas de travail utile, et le diffuseur est adiabatique donc il n'y a pas de transfert thermique.

D'après l'énoncé $v_2 = 0$.

On a donc $c_p(T_2 - T_1) + \frac{-v_1^2}{2} = 0$ soit $T_2 = T_1 + \frac{v_1^2}{2c_p} = 264 \text{ K}$.

3. On applique les lois de Laplace dans le diffuseur car le gaz est parfait en transformation adiabatique et réversible. On a donc $P_1^{1-\gamma} T_1^\gamma = P_2^{1-\gamma} T_2^\gamma$ soit $P_2 = P_1 \left(\frac{T_1}{T_2}\right)^{\gamma/(1-\gamma)} = 55,8 \text{ kPa}$.

4. On applique le premier principe industriel à la transformation dans le compresseur: $\Delta h_{23} = w_{u,23} + q_{23}$. On néglige les variations d'énergie cinétique et il n'y a pas de transfert thermique car le compresseur est adiabatique.

On a donc $w_{comp} = w_{u,23} = h_3 - h_2 = c_p(T_3 - T_2) = 238 \text{ kJ.kg}^{-1}$.

La puissance P_{comp} du compresseur est $P_{comp} = D_m w_{comp} = 10,7 \text{ MW}$.

5. On applique le premier principe industriel à la transformation adiabatique dans le compresseur: $\Delta h_{23} = w_{u,23} + q_{23} = c_p(T_3 - T_2)$ donne $w_{u,23} = c_p(T_3 - T_2) > 0$: dans un compresseur le fluide reçoit du travail utile.

On applique le premier principe industriel à la transformation adiabatique dans la turbine: $\Delta h_{45} = w_{u,45} + q_{45} = c_p(T_5 - T_4)$ donne $w_{u,45} = c_p(T_5 - T_4) < 0$: dans la turbine le fluide cède du travail au milieu extérieur pour faire tourner la turbine.

Sachant que le travail fourni par la détente du gaz dans la turbine est intégralement reçu par le compresseur, on a $w_{u,23} = -w_{u,45}$ et donc $T_3 - T_2 = -(T_5 - T_4)$ soit $T_5 = T_4 + T_2 - T_3 = 1184 \text{ K}$.

On applique les lois de Laplace dans la turbine car le gaz est parfait en transformation adiabatique et réversible. On a donc $P_4^{1-\gamma} T_4^\gamma = P_5^{1-\gamma} T_5^\gamma$ soit $P_5 = P_4 \left(\frac{T_4}{T_5}\right)^{\gamma/(1-\gamma)} = 292 \text{ kPa}$.

6. On applique le premier principe industriel à la transformation adiabatique dans la tuyère: $\Delta h_{56} + \frac{v_6^2}{2} =$

$w_{u,56} + q_{56} = c_p(T_6 - T_5)$ donne $\Delta h_{56} + \frac{v_6^2}{2} = c_p(T_6 - T_5) + \frac{v_6^2}{2} = 0$ car il n'y a pas de pièce mobile dans la tuyère. On a donc $v_6 = \sqrt{2c_p(T_5 - T_6)} = 1052 \text{ m.s}^{-1}$.

7. Le rendement est le rapport de la puissance produite sur la puissance couteuse. La puissance produite est la puissance de propulsion $P_{prop} = D_m(v_6 - v_1)v_1 = 9,3 \text{ MW}$ et la puissance coûteuse est la puissance qui sert à chauffer le gaz dans la chambre de combustion (la machine est un moteur et l'énergie coûteuse est celle liée à la source chaude) d'où $r = \frac{P_{prop}}{P_{chamb}} = \frac{9,3}{45,5} = 0,20$.

VI. Utilisation d'un diagramme entropique: Centrale électrique

1. Voir diagramme.

2. On utilise le théorème des moments: $x_4 = \frac{LM}{LV} = \frac{6,9 - 0,8}{7,9 - 0,8} = 0,86$ (on voit d'ailleurs que le point 4 est entre les isotitres $x = 0,8$ et $x = 0,9$ donc cela correspond).

3. On applique le premier principe industriel à l'étape 3-4 dans la turbine adiabatique (donc $q_{34} = 0$) soit $\Delta h_{34} = w_{u,34} + q_{34}$ donne $w_{u,34} = h_4 - h_3 = 2250 - 3650 = -1400 \text{ kJ.kg}^{-1} < 0$: c'est une détente, le fluide donne du travail au milieu extérieur pour faire tourner la turbine.

Le contact avec la source froide se fait en bas du cycle (à basse température) soit $q_f = q_{41}$. On applique le premier principe industriel à l'étape 4-1 dans le condenseur qui ne comprend pas de pièce mobile soit: $\Delta h_{41} = w_{u41} + q_{41} = q_{41} = h_1 - h_4 = 250 - 2250 = -2000 \text{ kJ.kg}^{-1} < 0$: le fluide donne de la chaleur à la source froide.

Le contact avec la source chaude se fait en haut du cycle (à haute température) soit $q_c = q_{23}$. On applique le premier principe industriel à l'étape 4-1 dans la chaudière qui ne comprend pas de pièce mobile soit: $\Delta h_{23} = w_{u23} + q_{23} = q_{23} = h_3 - h_2 = 3650 - 250 = 3400 \text{ kJ.kg}^{-1} > 0$: le fluide reçoit de la chaleur de la source chaude.

4. La central est un moteur dont le rendement est $r = \frac{-w_{u34}}{q_c} = 0,41$ et le rendement de Carnot est $r_c = 1 - \frac{T_3}{T_1} = 0,62$. Le rendement de Carnot est supérieur au rendement de la machine réelle car dans la machine réelle il y a des irréversibilités.

5. On applique le second principe à la transformation 4-1: $\Delta s_{41} = \frac{q_f}{T_f} + s_{c,41}$ soit $s_{c,41} = s_1 - s_4 - \frac{q_f}{T_f} = 0,8 - 6,9 - \frac{-2000}{273 + 60} = 0,2 \text{ kJ.kg}^{-1}.K^{-1} > 0$: les irréversibilités sont liées à la diffusion thermique, du chaud vers le froid.