

MACHINES THERMIQUES

1. Pompe à chaleur :

On désire maintenir dans un appartement une température constante $T_1 = 290$ K grâce à une pompe à chaleur utilisant une source froide (lac...) de température $T_0 = 280$ K. La température extérieure est supposée uniformément égale à T_0 . Il faut pour cela dépenser la puissance nécessaire pour compenser les pertes de chaleur.

a) Pour évaluer ces pertes, on arrête le chauffage, la température de l'appartement étant initialement de T_1 . Au bout d'un intervalle de temps $\Delta t = 2$ heures, on mesure une température $T_2 = 285$ K. La chaleur perdue pendant une durée infinitésimale dt s'écrit : $\delta Q = a.C(T - T_0).dt$ C étant la capacité thermique de l'appartement, T la température de l'appartement à l'instant t , et a un coefficient constant. Calculer a .

b) Sachant qu'une efficacité réelle ne représente que 40% de l'efficacité théorique, quelle puissance P faut-il fournir pour maintenir la température T_1 dans l'appartement ? On donne : $C = 10$ J / K.

R : a) bilan thermique sur dt : $CdT + aC(T - T_0)dt = 0$, par intégration sur Δt : $a = 9,63.10^{-5}$ s⁻¹. b) $P = 830$ W.

2. Elévation de la température d'un fleuve par une centrale :

Une centrale nucléaire fournissant une puissance de 1000 MW est installée au bord d'un fleuve dont la température est de $T_f = 300$ K et le débit de 400 m³/s. La température de la source chaude est de $T_c = 700$ K. En admettant que le rendement soit seulement de 60 % du rendement de Carnot, quelle est l'élévation de température ΔT du fleuve résultant du fonctionnement de la centrale ? On donne la capacité thermique massique de l'eau $c = 4,18.10^3$ J.K⁻¹.kg⁻¹

R : Par un bilan de puissance, et avec $r = 0,6$ r_{Carnot} la puissance thermique cédée au fleuve vaut

$$P_{th} = -P_m \left(\left(0,6 \left(1 - \frac{T_f}{T_c} \right) \right)^{-1} - 1 \right). \text{ D'où } \Delta T = P_{th} / (D_m.c) \text{ AN : } \Delta T = 1,1 \text{ K.}$$

3. Chauffage d'une piscine : Un fluide décrit des cycles réversibles dans une pompe à chaleur, entre une source froide monotherme de température $t_0 = 12$ °C et une piscine contenant 50 m³ d'eau, initialement à la même température, de façon à l'amener à une température finale $t_f = 25$ °C. La capacité thermique massique de l'eau vaut $c = 4,18.10^3$ J.K⁻¹.kg⁻¹.

a) Déterminer l'énergie W à apporter au système pour cette opération.

b) Quelle aurait été l'élévation de température si la même énergie avait été fournie directement par une résistance chauffante à l'eau de la piscine ?

R : Ecrire le second principe sur un cycle, considéré comme amenant une variation infinitésimale dT de la température de la piscine. Intégrer et faire le bilan énergétique. $W = mc.(T_f - T_0 - T_0 \ln(T_f / T_0))$.

4. Machine frigorifique à absorption :

Un réfrigérateur à absorption fonctionne avec une solution d'ammoniac pour agent thermique et trois sources de chaleur S_1 , S_2 , S_3 aux températures $T_1 > T_2 > T_3$. Une solution concentrée d'ammoniac est portée à la température T_1 dans le générateur G (source S_1) grâce à la combustion de butane ou par effet Joule (apport Q_1). L'évaporation s'accompagne d'un enrichissement de la vapeur en ammoniac et simultanément, bien sûr, d'un appauvrissement de la solution. La vapeur est envoyée dans le condenseur C tandis que la solution appauvrie en ammoniac est renvoyée dans une chambre d'absorption A où a lieu un transfert thermique Q_A . Dans le condenseur C (source S_2), refroidi par l'air extérieur (échange Q_2), la vapeur riche en ammoniac se condense à la température T_2 puis pénètre dans l'évaporateur E (source S_3). Dans l'évaporateur (source S_3) à la température T_3 , l'ammoniac en se vaporisant met en jeu un transfert thermique Q_3 . Puis il retourne à la chambre d'absorption A où il se dissout dans la solution appauvrie à la température T_A voisine de la température ambiante T_2 . Le cycle peut alors recommencer. Le réfrigérateur comporte aussi une pompe P de faible puissance qui renvoie la solution de l'absorbeur A vers le générateur G. Le travail fourni par cette pompe est négligeable devant les transferts thermiques échangés. La source froide S_3 , c'est à dire l'évaporateur, est placée dans l'enceinte à refroidir.

a) Schématiser le fonctionnement de cette machine.

b) Définir l'efficacité η de ce réfrigérateur. Exprimer η en fonction de T_1 , T_2 et T_3 dans le cas d'un fonctionnement réversible. Le calculer pour $t_1 = 100$ °C, $t_2 = 25$ °C et $t_3 = -5$ °C en considérant que T_2 et T_A sont égales. Comparer la valeur de ce coefficient d'efficacité à celui obtenu pour une machine à compresseur n'utilisant que les sources S_2 et S_3 .

c) Le rendement réel d'un appareil de camping est 60 % du rendement d'un appareil fonctionnant de façon réversible.. Calculer la masse d'eau que l'on peut congeler à l'aide d'une bouteille de butane de 13 kg, sachant que l'enthalpie de combustion du butane vaut $\Delta H_{comb} = 5.10^7$ J/Kg et que l'enthalpie de fusion de l'eau à -5 °C vaut $h_{fus} = 334$ kJ/kg.

R : a) b) 1° princ. : $Q_1 + Q_2 + Q_A + Q_3 = 0$; 2° princ. : $(Q_1 / T_1) + ((Q_2 + Q_A) / T_2) + (Q_3 / T_3) = 0$.

d'où $\eta = Q_3 / Q_1 = 1,8$. Avec le second système, $\eta = Q_3 / W = 8,9$. Système plus avantageux, malgré la présence de pièces mécaniques. (W : travail fourni par le compresseur).

c) $Q_1 = m_{but}.\Delta H_{comb}$; $Q_3 = \eta_{réel}.Q_1$; masse d'eau congelée : $m = 2100$ kg.

5. Moteur fonctionnant entre deux pseudo-sources :

Deux corps identiques, de capacité calorifique C_p constante, sont à des températures initiales respectives T_{10} et T_{20} , avec $T_{10} > T_{20}$. On fait fonctionner un moteur thermique cyclique, en utilisant ces deux corps, qui restent à pression constante et ne subissent pas de changement d'état, comme pseudo-sources de chaleur. Quel est le travail récupérable par l'opérateur faisant fonctionner ce moteur ?

On supposera que la température des sources varie très peu pendant la durée d'un cycle du moteur.

R : Durant le fonctionnement, la température des deux sources évolue jusqu'à la valeur finale : $T_1 = T_2 = T_f \geq (T_{10}.T_{20})^{1/2}$. Le travail maximum récupérable correspond au cas réversible pour lequel : $T_f = (T_{10}.T_{20})^{1/2}$;

$$\text{alors : } W_{\max} = C_p \cdot [T_{1o} + T_{2o} - 2 \cdot (T_{1o} \cdot T_{2o})^{1/2}]$$

6. Rendement d'une turbine à gaz :

Une turbine à gaz fonctionne suivant le cycle théorique de Joule, appelé aussi cycle de Brayton, composé de deux adiabatiques reliées par deux isobares :

- * compression isentropique de l'état A (P_1, V_1, T_1) à l'état B (P_2, V_2, T_2) dans un compresseur.
- * échauffement isobare de l'état B (P_2, V_2, T_2) à l'état C (P_3, V_3, T_3) dans un échangeur thermique (chambre de combustion).
- * détente isentropique de l'état C (P_3, V_3, T_3) à l'état D (P_4, V_4, T_4) dans la turbine à gaz.
- * refroidissement isobare de l'état D (P_4, V_4, T_4) à l'état A (P_1, V_1, T_1) dans un second échangeur thermique.

Le cycle est décrit par n moles de fluide (supposé parfait).

1) Représenter le cycle de Joule dans les diagrammes (P, V) et (T, S).

2) Calculer le rendement théorique du cycle de Joule :

- a- en fonction des températures T_1, T_2, T_3 et T_4 du fluide dans chacun des quatre états envisagés.
- b- en fonction du taux de compression $x = P_2 / P_1$ et du rapport $\gamma = C_p / C_v$ des chaleurs massiques.

3) a- Le rapport T_3 / T_1 des températures a une valeur imposée.

Calculer le taux de compression qui permet d'obtenir un travail maximal.

b- Exprimer alors ce travail maximum en fonction de n, γ, T_1, T_3 .

7. Centrale électrique nucléaire - Diagramme de Mollier :

La centrale nucléaire produit de l'électricité par l'intermédiaire d'un alternateur couplé aux turbines à vapeur T_1 et T_2 . Le fluide caloporteur est de l'eau. A la sortie des turbines l'eau se refroidit dans le condenseur (l'échange d'énergie thermique peut se faire avec l'eau pompée dans une rivière).

Dans l'évaporateur E' les échanges thermiques peuvent s'effectuer avec un circuit primaire d'eau qui récupère l'énergie thermique libérée au coeur du réacteur par la fission de l'uranium enrichi.

L'eau du circuit secondaire décrit le cycle représenté sur la figure 2.

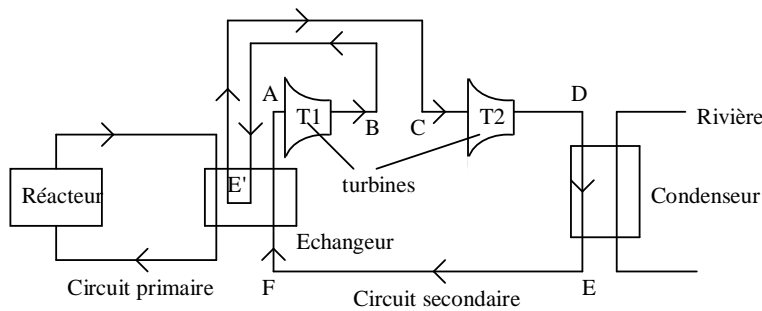


Figure 1

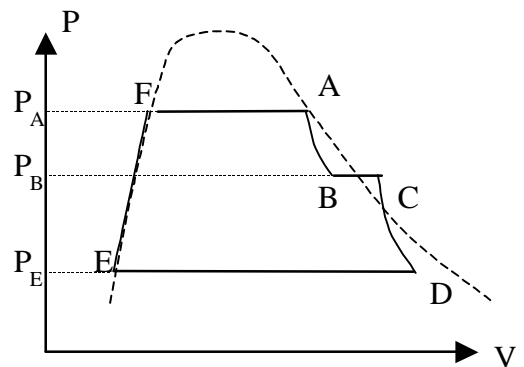


Figure 2

- Les transformations A → B et C → D sont supposées adiabatiques réversibles et correspondent au passage dans les turbines haute pression (T_1) et basse pression (T_2).
- Entre les deux turbines l'eau subit une surchauffe B → C en repassant dans l'échangeur E'.

On note T, P, x, température, pression et titre en vapeur (soit $x = \frac{m_{\text{vap}}}{m_{\text{totale}}}$). On désigne de plus par h et s les

enthalpie et entropie massiques du fluide.

On prendra h = 0 et s = 0 pour le liquide dans l'état $P_0 = 1$ bar et $T_0 = 273$ K (0 degré celsius). On négligera les variations de volume de l'eau liquide avec la température et la pression. On donne :

$$\theta_A = 287^\circ \text{ C et } P_A = 70 \text{ bar} \quad (\theta : \text{température Celsius}).$$

$$P_B = 10 \text{ atm} ; \theta_C = 270^\circ \text{ C} ; P_D = 0,05 \text{ bar}.$$

$$C_1 = 4,18 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1} \text{ (capacité thermique de l'eau liquide, supposée constante).}$$

1) Déterminer les expressions de h_E, h_F, s_E et s_F en fonction de C_1, T_E, T_F et T_0 .

Donner les valeurs numériques de h_F et s_F .

2) Dresser un tableau où figurent les valeurs de h, s, θ, P (atm) et x pour les différents points A, B, C, D, E, F. A cet effet on s'aidera du diagramme de Mollier présenté en fin d'énoncé (h est exprimé en kJ.kg^{-1} et en $\text{kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

3) Comment lire, sur le diagramme de Mollier, les énergies thermiques Q_{FA}, Q_{BC} et Q_{DE} "reçues" par le fluide.

Donner les valeurs numériques de Q_{FA}, Q_{BC} et Q_{DE} ainsi que celle de Q_{EF} .

En déduire :

- le travail W_1 par unité de masse fourni par la centrale au cours d'un cycle.
- l'énergie thermique Q_1 fournie par la source chaude pour 1 kg de fluide.

$$\text{Calculer le rendement thermique } \eta = \frac{W_1}{Q_1}.$$

4) Exprimer le travail utile W_u produit par les turbines lorsqu'elles sont traversées par 1 kg de fluide. Comparer W_u et W_1 .

5) La puissance électrique de la centrale est $P = 1300$ MW. Quel doit être la valeur du débit massique de fluide dans le circuit secondaire ?

On utilisera le diagramme fourni en document annexe.