

Machines thermiques

1 Pompe à chaleur domestique

On veut maintenir la température d'une maison à $T_1 = 20^\circ\text{C}$ alors que la température extérieure est égale à $T_2 = 5^\circ\text{C}$ en utilisant une pompe à chaleur. L'isolation thermique de la maison est telle qu'il faut lui fournir un transfert thermique égal à 200 MJ. par heure.

- 1 - Rappeler le schéma de principe d'une pompe à chaleur ditherme et le sens réel des échanges d'énergie du fluide caloporteur
- 2 - Quel doit être le cycle thermodynamique suivi par le fluide pour que l'efficacité de la pompe à chaleur soit maximale ?
- 3 - Définir et calculer l'efficacité théorique maximale de la pompe dans ces conditions. Montrer qu'elle ne dépend que de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur. Quel est le sens physique de l'efficacité ?
- 4 - En déduire la puissance électrique minimale consommée par la pompe à chaleur.
- 5 - En supposant la température intérieure imposée, pour quelle température extérieure l'efficacité est-elle maximale ? Commenter.

Rép : $e_m = 18$; $P_{\text{elec}} = 3,0\text{kW}$

2 Pompe à chaleur, source à température évolutive 🔑

Une pompe à chaleur dont le fonctionnement est supposé réversible échange de la chaleur avec deux sources : l'une est un lac dont la température est $T_0 = 280\text{ K}$, l'autre est une masse d'eau $M = 10^3\text{ kg}$ thermiquement isolée dont la température, notée T , vaut initialement $T_i = 293\text{ K}$. Au cours d'un cycle, la température de la masse d'eau varie très faiblement. On donne pour l'eau $c = 4,19 \cdot 10^3\text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Calculer, lorsque la masse M d'eau a atteint la température finale $T_f = 333\text{ K}$,

- 1) Les transferts thermiques Q_1 eau-machine de la réserve et Q_2 eau-machine du lac
- 2) Le travail W absorbé par la pompe
- 3) La variation d'entropie de la source froide
- 4) Le coefficient moyen e de performance de la pompe à chaleur.

Rép : $Q_1 = -167\text{ MJ}$; $Q_2 = 150\text{ MJ}$; $W = 17\text{ MJ}$; $\Delta S_{\text{lac}} = -0,53\text{ MJ.K}^{-1}$; $e = 9,8$

3 Cycle de Stirling

Un gramme d'air ($M_{\text{air}} = 29\text{ g.mol}^{-1}$), assimilé à un gaz parfait, est utilisé dans une machine thermique effectuant des cycles réversibles, constitués de deux isothermes ($1 \rightarrow 2$ et $3 \rightarrow 4$) et de deux isochores ($2 \rightarrow 3$ et $4 \rightarrow 1$).

| | P(bar) | V(L) | T(K) |
|---|--------|------|------|
| 1 | 40 | 0.08 | |
| 2 | | | |
| 3 | 1 | | 300 |
| 4 | | | |

- 1) Compléter le tableau
- 2) Tracer le cycle dans le diagramme de Clapeyron. De quel type de machine s'agit-il ?
- 3) Montrer que les transferts thermiques des isochores sont opposés.
- 4) On admet que ces échanges se font à l'intérieur de la machine et que les seuls transferts thermiques avec l'extérieur ont lieu pendant les phases isothermes. Déterminer le rendement du cycle.
- 5) Montrer que le résultat précédent était prévisible sans calcul.

Rép :

| | P(bar) | V(L) | T(K) |
|---|--------|------|------|
| 1 | 40 | 0.08 | 1116 |
| 2 | 3.72 | 0.86 | 1116 |
| 3 | 1 | 0.86 | 300 |
| 4 | 10.75 | 0.08 | 300 |

; $\rho = 0,73$

4 Réfrigérateur à absorption

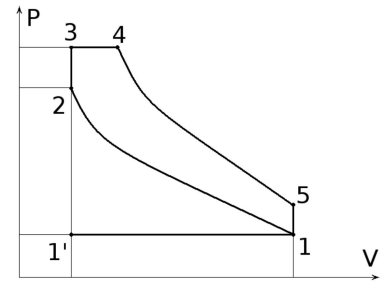
Un réfrigérateur à absorption est une machine frigorifique tritherme sans échange de travail avec l'extérieur. L'énergie est fournie sous forme thermique, et à haute température T_0 , à un bouilleur. L'évaporateur est en contact thermique avec la source froide, de température T_2 . Le condenseur est en contact thermique avec le milieu extérieur, de température T_1 . On a $T_2 < T_1 < T_0$.

- 1) Établir le schéma de principe de la machine, préciser le sens/signé réel des échanges thermiques Q_i
- 2) Définir et calculer l'efficacité frigorifique maximale, en fonction de T_0, T_1, T_2

Rép : $e = \frac{Q_2}{Q_0} = \frac{T_2(T_0 - T_1)}{T_0(T_1 - T_2)}$

5 Moteur Diesel à double combustion 🔧

Dans les moteurs Diesel à double combustion, le cycle décrit par le mélange air-carburant est modélisable par celui d'un système fermé représenté en coordonnées de Watt ci-contre. Après la phase d'admission $1' \rightarrow 1$ qui amène le mélange au point 1 du cycle, celui-ci subit une compression adiabatique supposée réversible jusqu'au point 2. Après injection du carburant en 2, la combustion s'effectue d'abord de façon isochore de 2 à 3 puis se poursuit de façon isobare de 3 à 4. La phase de combustion est suivie d'une détente adiabatique à nouveau prise réversible de 4 à 5, puis d'une phase d'échappement isochore $5 \rightarrow 1$ puis isobare $1 \rightarrow 1'$.



Au point 1 du cycle, la pression $p_m = 1,0$ bar et la température $T_m = 293$ K sont minimales. La pression maximale, aux points 3 et 4, est $p_M = 60$ bar et la température maximale, au point 4, vaut $T_M = 2073$ K. Le rapport volumétrique de compression vaut $\beta = V_M/V_m = 17$

On suppose que le mélange air-carburant se comporte exactement comme l'air, c'est-à-dire comme un gaz parfait diatomique de masse molaire $M = 29 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$, et de capacités thermiques respectives C_P et C_V , et on note $\gamma = C_P/C_V = 1,4$

1 - Exprimer les températures T_2, T_3 et T_5 en fonction de $p_m, p_M, T_m, T_M, \gamma$ et β . Calculer les valeurs numériques.

2 - Calculer le transfert thermique massique q_c reçu par l'air au cours de la phase de combustion $2 \rightarrow 4$.

3 - Calculer le transfert thermique massique q_f échangé avec le milieu extérieur entre les points 5 et 1.

4 - En déduire le travail massique w échangé au cours d'un cycle.

5 - Définir et calculer le rendement de ce moteur. Commenter la valeur trouvée.

Rép : $T_2 = 910 \text{ K}$; $T_3 = 1034 \text{ K}$; $T_5 = 890 \text{ K}$; $q_c = \frac{R}{M(\gamma - 1)} [T_3 - T_2 + \gamma(T_4 - T_3)] = 1,13 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; $q_f = -420 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; $w = -710 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; $\rho = 0.63$

6 Turboréacteur

Dans l'état A, l'air est pris dans les conditions atmosphériques (P_0, T_0) et à une vitesse c_A (vitesse de l'air par rapport à l'avion). L'air passe ensuite dans le compresseur, où il est ralenti et comprimé jusqu'à l'état B ($P_B = aP_0, T_B, c_B \simeq 0$). On suppose que l'évolution est adiabatique et réversible. A la sortie du compresseur, il entre dans la chambre de combustion où le carburant est injecté et s'enflamme. Pour simplifier, on considère que la combustion interne est assimilable à un apport d'énergie extérieure par transfert thermique, la composition chimique du fluide étant invariable. La combustion est isobare et amène le gaz dans l'état C, la vitesse étant toujours négligeable. Le gaz se détend dans une tuyère pour retrouver la pression initiale P_0 . Au cours de la détente (supposée adiabatique et réversible), il entraîne une turbine, qui elle-même, entraîne le compresseur. On suppose que toute l'énergie cédée par le gaz à la turbine est récupérée par le compresseur. Il atteint un état D ($P_D = P_0, T_D, \text{vitesse } c_D$). L'air est assimilé à un gaz parfait, dont γ est indépendant de T.

1) Justifier les approximations concernant la combustion interne.

2) Pourquoi peut-on considérer que l'évolution du fluide est cyclique ?

3) Donner l'allure du cycle que parcourt l'air dans le diagramme de Clapeyron, puis dans le diagramme entropique.

On rappelle le premier principe, écrit pour un système en écoulement, en grandeurs massiques (extension de la détente de Joule-Thomson) :

$$\Delta(h + e_c + e_p) = w_u + q$$

- w_u est le travail utile (autre que celui des forces de pression) reçu par le fluide

- q est l'énergie thermique reçue par kg de fluide en écoulement.

4) Définir le rendement thermodynamique ρ du moteur.

5) Exprimer ρ en fonction des enthalpies massiques h_A, h_B, h_C, h_D , puis des températures, puis enfin en fonction du taux de compression a et de γ .

Rép : $\rho = \frac{\Delta e_c}{q_{BC}} = 1 - \frac{T_D - T_A}{T_C - T_B} = 1 - a^{\frac{1-\gamma}{\gamma}}$