

# TD n° 22 de Physique

## Thermodynamique - Machines thermiques

On rappelle que l'on peut utiliser, si besoin, les expressions de l'entropie

$$\text{pour les gaz parfaits : } S(T, P) = C_p \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) - n R \ln \left( \frac{P}{P_0} \right) + S(T_0, P_0)$$

$$\text{pour les phases condensées : } S(T, P) = C \ln \left( \frac{T}{T_0} \right) + S(T_0, P_0)$$

## Applications directes du cours

### 1 Congélateur réversible

Un congélateur, au fonctionnement réversible, est placé dans une pièce à 20 °C. Il est capable de maintenir son contenu à -19 °C, en y retirant 400 kJ par heure.

1. Calculer le transfert thermique fourni par le congélateur à la pièce.
2. En déduire l'efficacité de ce congélateur.
3. Déterminer la puissance mécanique (et donc électrique) à fournir au congélateur.

### 2 Exemple de moteur ditherme

Un moteur fonctionne entre deux sources idéales de chaleur, aux températures  $T_C = 377$  °C et  $T_F = 127$  °C. Il fournit sur un cycle un travail  $W = 500$  J pour une consommation thermique  $Q_C = 1500$  J.

1. Calculer son rendement et le comparer au rendement d'un cycle de Carnot entre les mêmes sources.
2. Calculer l'entropie créée  $S_c$  sur un cycle.
3. À l'aide du deuxième principe appliqué à ce moteur et au moteur de Carnot fonctionnant entre les mêmes sources, montrer que, pour une consommation identique, le moteur de Carnot fournit mécaniquement la quantité  $T_F S_c$  de plus que ce moteur.

## Exercices

### 1 Réfrigérateur à absorption

Un réfrigérateur à absorption est une machine frigorifique tritherme. Dans une telle machine, aucun travail n'est échangé. L'énergie est fournie sous forme thermique à haute température. On dispose ainsi de trois sources : l'intérieur du réfrigérateur à  $T_1 = -8$  °C, l'air ambiant à  $T_2 = 27$  °C et un réchaud à gaz à  $T_3 = 127$  °C. On note  $Q_1$ ,  $Q_2$  et  $Q_3$  les transferts thermiques respectifs, reçus à chaque cycle par le fluide frigorifique.

1. Déterminer les signes des transferts thermiques.
2. Définir l'efficacité maximale de ce réfrigérateur. L'exprimer en fonction des températures et la calculer.
3. La comparer à l'efficacité maximale d'un réfrigérateur classique dans les mêmes conditions d'utilisation. Conclure sur l'utilité d'un tel réfrigérateur.

## 2 Chauffage d'un bassin

Une pompe à chaleur est branchée entre l'atmosphère que l'on suppose à température constante  $T_0 = 280 \text{ K}$  et un bassin d'eau, de volume  $V = 250 \text{ m}^3$ , à la température  $T$ .  $T$  évolue de  $T_1 = 280 \text{ K}$  à  $T_2 = 320 \text{ K}$ . Son fonctionnement est réversible. La capacité thermique du bassin est  $C = 1 \text{ GJ} \cdot \text{K}^{-1}$ .

On note  $Q_0$  et  $Q$  les transferts thermiques sur la durée de fonctionnement de la pompe, respectivement depuis l'atmosphère et depuis le bassin.  $W$  est le travail mécanique consommé par le moteur.

1. Exprimer  $Q_0$ ,  $Q$  et  $W$  en fonction de  $C$  et des températures fixées.  
Calculer les valeurs. On donnera le travail en  $\text{kW} \cdot \text{h}$ .
2. En déduire l'efficacité de la pompe.
3. Quelle aurait été la consommation électrique si on avait chauffé le bassin par un système de résistances électroniques ? Conclure.

## 3 Climatiseur

On désire maintenir une pièce de volume  $V = 100 \text{ m}^3$  à  $T_{\text{int}} = 20^\circ\text{C}$  alors que l'air extérieur est à  $T_{\text{ext}} = 30^\circ\text{C}$ . La pression de l'air (gaz parfait diatomique) est partout égale à  $p = 1 \text{ bar}$ .

1. Calculer la capacité thermique massique à pression constante  $c_p$  de l'air.
2. On constate qu'en cas de coupure du système de climatisation, la température passe à  $21^\circ\text{C}$  en 15 minutes. Calculer la puissance thermique  $P_{\text{th}}$  des fuites (transfert thermique par unité de temps).
3. Calculer l'efficacité maximale que le climatiseur peut avoir dans les conditions décrites plus haut. En déduire la puissance minimale électrique  $P_e$  requise.
4. La consommation électrique réelle est de  $200 \text{ W}$ . Comment expliquer cet écart surprenant ?

## 4 Moteur thermique avec deux sources non idéales

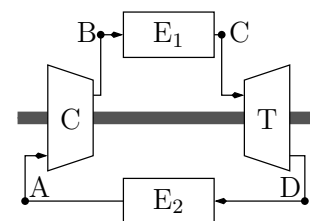
Un moteur thermique réversible fonctionne entre deux sources de même capacité thermique  $C = 500 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ , de température respective  $T_c$  et  $T_f$ . Ces deux températures varient, depuis des valeurs initiales  $T_{c,0} = 373 \text{ K}$  et  $T_{f,0} = 293 \text{ K}$ .

1. Déduire d'un bilan entropique la relation entre les températures  $T_c$ ,  $T_f$ ,  $T_{c,0}$  et  $T_{f,0}$ .
2. Calculer la température  $T_1$  commune aux deux sources, à l'arrêt du moteur.
3. Calculer le travail fourni par le moteur jusqu'à l'arrêt.
4. Calculer l'efficacité  $e$  de ce moteur.
5. Calculer l'efficacité  $e'$  que l'on aurait obtenue si les sources avaient été idéales.

## 5 Turbine à gaz

Une turbine à gaz est une machine qui permet de transformer de l'énergie thermique apportée par une source chaude en énergie mécanique disponible sur l'axe de rotation de la machine. Un gaz y subit les quatre transformations suivantes :

- $A \rightarrow B$  : compression isentropique (compresseur) ;
- $B \rightarrow C$  : échange thermique avec une source chaude (échangeur 1) ;
- $C \rightarrow D$  : détente isentropique (turbine) ;
- $D \rightarrow A$  : échange thermique avec une source froide (échangeur 2).



Les échanges thermiques sont réalisés à pression constante. Le compresseur et la turbine sont calorifugés. Les transformations sont toutes supposées réversibles, le gaz est supposé parfait et diatomique.

1. Représenter le cycle parcouru par le fluide dans le diagramme de Clapeyron.
2. Définir le rendement  $\eta$  du système. L'exprimer en fonction du rapport des capacités thermiques  $\gamma$  et du rapport des pressions  $r = P_B/P_A$ .

3. Tracer l'allure de la courbe  $\eta = f(r)$ , commenter.
4. Exprimer le travail fourni par le système à l'arbre de transmission en fonction de  $r$  et des deux températures extrêmes.
5. Exprimer la valeur de  $r$  pour laquelle le travail reçu sur l'arbre de transmission est maximal en fonction des températures mises en jeu. Pour des températures extrêmes sur un cycle égales à 800 K et 300 K, calculer cette valeur de  $r$  et la valeur du rendement associé.

## 6 Cycle de Rankine

Dans une machine à vapeur, l'eau décrit un cycle de Rankine :

- dans l'état A, l'eau est à l'état de liquide saturant seul, dans les conditions de pression et température  $P_1 = 0,2 \text{ bar}$  et  $T_1 = 60^\circ\text{C}$  ;
  - transformation AB : l'eau est comprimée de façon adiabatique et isentropique dans une pompe, jusqu'à la pression  $P_2 = 15 \text{ bar}$  ;
  - transformation BC : l'eau est injectée dans la chaudière et s'y réchauffe de manière isobare jusqu'à la température  $T_2 = 200^\circ\text{C}$ , telle que  $P_{\text{sat}}(T_2) = P_2$  ;
  - transformation CD : l'eau se vaporise entièrement à la température  $T_2$  ;
  - transformation DE : la vapeur est admise dans le cylindre à  $T_2$  et  $P_2$  et effectue une détente adiabatique et isentropique jusqu'à la température  $T_1$ , on obtient un mélange liquide-vapeur ;
  - transformation EA : le mélange liquide-vapeur est évacué dans le condenseur où il se liquéfie totalement.
1. Représenter le cycle précédent sur le diagramme  $(\log P, h)$  ci-dessous.
  2. Déduire de valeurs lues sur le diagramme le transfert thermique pour chaque transformation du cycle.
  3. Calculer le rendement de ce moteur et le comparer au rendement de Carnot. Quelles sont les causes d'irréversibilités ?

