

# Machines Thermiques

## Tester le cours

Rappeler la définition d'un thermostat.	Dispositif qui soumet l'extérieur du système à une température constante. Il n'échange que du transfert thermique avec le système d'étude (donc pas de travail). Il possède une capacité thermique infinie (il est donc de taille infinie).
Enoncer l'inégalité de Clausius-Carnot pour une transformation cyclique	$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_{Si}} \leq 0$
Enoncer le principe de Carnot.	Une machine thermique cyclique monotherme ne peut pas être motrice.
Que vaut le rendement ou l'efficacité d'une machine thermique ?	$r \text{ (ou } e) = \frac{ \text{ce qui est intéressant} }{ \text{ce qui coûte} }$
Qu'est ce qu'un cycle de Carnot ?	Deux adiabatiques réversibles et deux isothermes réversibles.
Quels sont les échanges énergétiques dans : — un moteur cyclique ditherme ? — une réfrigérateur cyclique ditherme ? — une pompe à chaleur cyclique ditherme ?	<ul style="list-style-type: none"> <li>— il cède du travail mécanique (<math>W &lt; 0</math>), refroidit la source chaude (<math>Q_c &gt; 0</math>) et réchauffe la source froide (<math>Q_f &lt; 0</math>),</li> <li>— il reçoit du travail électrique (<math>W &gt; 0</math>), réchauffe la source chaude (<math>Q_c &lt; 0</math>) et refroidit la source froide (<math>Q_f &gt; 0</math>),</li> <li>— il reçoit du travail électrique (<math>W &gt; 0</math>), réchauffe la source chaude (<math>Q_c &lt; 0</math>) et refroidit la source froide (<math>Q_f &gt; 0</math>).</li> </ul>
Identifier la nature de la source (ou du récepteur) de travail, de la source chaude et de la source froide dans : — un moteur cyclique ditherme ? — une réfrigérateur cyclique ditherme ? — une pompe à chaleur cyclique ditherme ?	<ul style="list-style-type: none"> <li>— Piston, mélange air-combustible, air ambiant.</li> <li>— EDF, l'air de la cuisine, les aliments.</li> <li>— EDF, la maison ou la piscine, le sol (ou la patinoire).</li> </ul>

## Tester les bases

### TLB<sub>MtE</sub> 1 Radiateur

Un radiateur électrique consomme une puissance électrique moyenne  $P = 2 \text{ kW}$ . Quel transfert thermique peut-il communiquer à la pièce pendant une heure ?

### TLB<sub>MtE</sub> 2 Moteur à explosion

1. Pour un moteur à explosion, expliquer ce qui joue le rôle de source chaude (modélisation)
2. Quelle est la source froide ?

**TLB<sub>MtE</sub> 3** Cycle de Carnot

On considère un fluide décrivant un cycle de Carnot. Ce cycle est moteur. Le fluide échange de la chaleur avec une source chaude à la température  $T_1$  et une source froide à la température  $T_2$ .

1. Représenter le cycle dans le diagramme de Clapeyron.
2. En faisant un bilan entropique du cycle, trouver l'expression du rendement.

**TLB<sub>MtE</sub> 4** Cycle

Un congélateur est placé dans une pièce à la température de  $20\text{ }^\circ\text{C}$  (supposée constante). Pour maintenir l'intérieur de ce congélateur à la température constante de  $-19\text{ }^\circ\text{C}$ , il est nécessaire d'en extraire, par transfert thermique,  $400\text{ kJ}$  par heure. Cette opération est supposée être réalisée de manière réversible.

1. Calculer le transfert thermique fourni à la pièce en une heure par le fluide caloporteur.
2. Calculer le travail électrique reçu par le congélateur en une heure et en déduire la puissance à fournir.
3. Définir puis calculer l'efficacité de cette machine frigorifique.

**Exercices incontournables****Ex 1** Cycle de Stirling

Un gaz supposé parfait (avec  $C_v$  constant) décrit un cycle moteur composé de deux isothermes (source chaude de température  $T_1$  et source froide de température  $T_2$ ) et de deux isochores.

1. Tracer l'allure du cycle dans un diagramme  $(P, v)$ .
2. Montrer que les quantités de chaleur au cours des évolutions isochores sont opposées.
3. On admet que ces échanges de chaleur se font avec un régénérateur interne à la machine et que seuls les échanges thermiques avec l'extérieur ont lieu pendant les phases isothermes. Déterminer le rendement du cycle. Commenter le résultat.

**Ex 2** Centrale thermique

On étudie le fonctionnement d'une centrale thermique entre une source chaude obtenue par combustion du charbon, fuel ou gaz à  $T_1 = 813\text{ K}$  et une source froide constituée par un fleuve à  $T_2 = 300\text{ K}$ . Cette centrale ne fonctionne pas de façon réversible, son rendement n'est que 70% du rendement du cycle de Carnot. Elle fournit une puissance de  $900\text{ MW}$ . Or le fleuve a un débit de  $500\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Calculer l'élévation de température du fleuve. Données : chaleur massique de l'eau liquide :  $c = 4,18\text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  $\rho_{\text{eau}} = 1000\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

**TLB<sub>MtE</sub> 5** Moteur

Une mole de gaz parfait ( $\gamma = 1,4$ ) décrit le cycle réversible suivant :

- ◇  $A \rightarrow B$  : détente isochoire ;
- ◇  $B \rightarrow C$  : détente isotherme à  $T_2 = 400\text{ K}$  ;
- ◇  $C \rightarrow D$  : compression isochoire ;
- ◇  $D \rightarrow A$  : compression isotherme à  $T_1 = 300\text{ K}$ .

1. Dessiner le diagramme de Clapeyron. Le cycle est-il moteur ?
2. Sachant que  $V_{\text{max}} = 2V_{\text{min}}$ , calculer les transferts thermiques sur toutes les étapes.
3. En raison de la technologie du moteur, la seule chaleur réellement dépensée est celle qu'on fournit au fluide sur l'isotherme  $T_2$ . Exprimer et calculer numériquement le rendement du cycle.

**Ex 3** Rafraîchir sa cuisine avec son frigo

Un réfrigérateur est une machine thermique à écoulement, dans laquelle un fluide subit une série de transformations thermodynamiques cycliques. A chaque cycle, le fluide extrait de l'intérieur du frigo un transfert thermique  $|Q_{\text{int}}|$ , cède un transfert thermique  $|Q_{\text{ext}}|$  à la pièce dans laquelle se trouve le frigo et reçoit un travail  $|W|$  fourni par un moteur électrique. On fait l'hypothèse que l'intérieur du frigo et l'air ambiant constituent deux thermostats aux températures respectives  $T_{\text{int}} = 268\text{ K}$  et  $T_{\text{ext}} = 293\text{ K}$  et qu'en dehors des échanges avec ces thermostats les transformations sont adiabatiques.

1. Quel est le signe des transferts thermiques et de  $W$  ?
2. Lorsqu'il fait très chaud en été, est-ce une bonne idée d'ouvrir la porte de son frigo pour refroidir sa cuisine ?
3. Pourquoi cela est-il possible avec un climatiseur ?

**Ex 4** Moteur thermique

On dispose de deux récipients calorifugés contenant chacun une masse  $m = 10^3\text{ kg}$  d'eau liquide. L'un est à la température  $T_{10} = 360\text{ K}$ , l'autre à la température  $T_{20} = 280\text{ K}$ . Chacun de ces récipients sert de « pseudo-source » à un moteur thermique. Au cours d'un cycle de la machine, la variation de température de l'eau des récipients est supposée négligeable. Déterminer le travail maximal que l'on peut espérer retirer de ce dispositif.

**Ex 5 Pompe à chaleur**

On souhaite chauffer l'eau d'une piscine avec une pompe à chaleur. Le volume de la piscine est de  $100 \text{ m}^3$  et sa température est  $\theta_P = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . La température de l'air est  $\theta_a = 18 \text{ }^\circ\text{C}$ . La pompe fonctionne réversiblement entre ces deux sources, de sorte que l'eau se réchauffe lorsque la pompe reçoit un travail  $W$  sous forme d'énergie électrique. Chaleur massique de l'eau :  $c = 4180 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ .

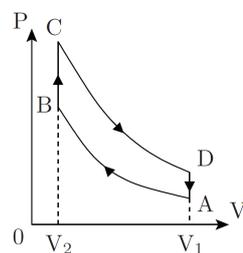
1. Préciser quelles sont les sources chaude (1) et froide (2) et indiquer le signe des quantités de chaleur reçues par le fluide de la pompe à chaleur.
2. Calculer le travail  $W$  fourni à la pompe à chaleur, lorsque l'eau atteint la température  $\theta' = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ .
3. Exprimer le coefficient d'efficacité de la pompe.
4. Quelle est la durée de chauffe pour une pompe à chaleur de puissance  $P = 6 \text{ kW}$
5. Quelle aurait été la durée de chauffe si le propriétaire avait utilisé une résistance chauffante traversée par une intensité de  $50 \text{ A}$  sous  $230 \text{ V}$  ?

**Ex 6 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  $T_1$ . Nous ne décrivons pas les mécanismes physiques qui permettent de faire en sorte que le fluide reçoive de l'énergie par transfert thermique au niveau de l'évaporateur. Définir et exprimer l'efficacité frigorifique maximale en fonction des trois températures  $T_0$ ,  $T_1$  et  $T_2$ .

**Ex 7 Cycle Beau de Rochas**

Une mole d'un gaz parfait de coefficient  $\gamma$  décrit le cycle (ABCD). Les transformations  $A \rightarrow B$  et  $C \rightarrow D$  sont adiabatiques réversibles.



On note  $a = \frac{V_1}{V_2}$  le rapport volumétrique de compression. On donne  $a = 10$  et  $\gamma = 1,4$ .

1. A quel type de machine correspond ce cycle ? Justifier.
2. Définir puis exprimer le rendement  $\eta$  de cette machine en fonction des températures puis uniquement en fonction de  $a$  et  $\gamma$ . Calculer  $\eta$ .

**Ex 8 Machine frigorifique à évaporation**

Une machine frigorifique est utilisée pour maintenir une enceinte qui constitue la source froide à la température  $T_F = -5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Elle évacue pour cela la chaleur dans l'atmosphère environnante jouant le rôle de source chaude de température  $T_c = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ . L'agent thermique est le R134a dont le diagramme enthalpie pression est donné page suivante. Il décrit un cycle thermodynamique :

- \* A la sortie de la source froide, l'agent thermique est à l'état gazeux à la température de la source froide et sous la pression  $P_{\min}$ .
- \* Le fluide subit ensuite une compression adiabatique réversible.
- \* Le fluide à  $T_{\max}$  entre dans le condenseur placé au contact de l'atmosphère extérieure. Le fluide circule et subit un refroidissement monobare : la température de l'agent thermique diminue jusqu'à atteindre sa température de liquéfaction. L'agent thermique se liquéfie totalement puis une fois liquide subit à nouveau un refroidissement isobare et atteint la température de la source chaude.
- \* Le liquide arrive alors dans le détendeur qui permet de passer de la pression  $P_{\max}$  à la pression  $P_{\min}$ . Le fluide est partiellement vaporisé et sa température diminue. Cette détente est isenthalpique (la démo sera faite en spé).
- \* Le fluide arrive alors dans l'évaporateur (au contact de la source froide). La source froide cède de la chaleur au fluide qui se vaporise totalement puis le fluide atteint sa température  $T_F$  (étape de surchauffe). Les étapes sont isobares.

Les pression dans le échangeurs thermiques valent  $P_{\min} = 2 \text{ bar}$  et  $P_{\max} = 10 \text{ bar}$ .

1. Dessiner le cycle thermodynamique parcouru par le fluide frigorifique. Déterminer à l'aide de ce tracé :

- ◇ la température maximale  $T_{\max}$  atteinte par le fluide à la sortie du compresseur.
- ◇ la température de liquéfaction  $T_{\min}$  dans le condenseur.
- ◇ la température de vaporisation  $T_{\text{vap}}$  dans l'évaporateur.
- ◇ le titre en vapeur à la sortie du détendeur  $x_E$
- ◇ la surchauffe  $\Delta T$  à la sortie de l'évaporateur.

2. Exprimer l'efficacité de la machine à partir des transferts énergétiques massiques.

3. Déterminer graphiquement ces transferts. En déduire l'efficacité  $e$  et la comparer à l'efficacité de Carnot.



Exercices pour s'entraîner et/ou pour aller plus loin

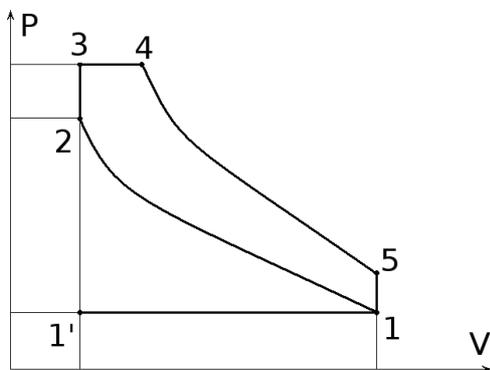
**Ex 9 Moteur irréversible**

Un moteur de nature irréversible reçoit au cours de son fonctionnement de la chaleur d'une source chaude de capacité thermique  $\mu = mc$ , initialement à  $T_{1i}$ , et en restitue une partie à une source froide de capacité thermique  $5\mu$ , initialement à  $T_{2i} < T_{1i}$ . Le moteur s'arrête quand  $T_{2f} = T_{1f} = T_f$ .

1. Trouver un encadrement de  $T_f$  compatible avec les hypothèses.
2. AN :  $T_{1i} = 373 \text{ K}$  et  $T_{2i} = 273 \text{ K}$ .

**Ex 10 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 dans le diagramme de Watt ci-dessous. 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 supposée 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  $P_m = 1,0 \text{ bar}$  et la température  $T_m = 293 \text{ K}$  sont minimales. La pression maximale aux points 3 et 4 est  $P_M = 60 \text{ bar}$  et la température maximale au point 4 vaut  $T_M = 2073 \text{ K}$ . 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  $M$  et de capacités thermiques respectives  $C_p$  et  $C_v$ . On note  $\gamma = 1,4$ .

1. Exprimer les températures  $T_2, T_3$  et  $T_5$  en fonction de  $P_m, P_M, T_m, T_M$  et  $\beta$ . Calculer les valeurs numériques.
2. Exprimer puis calculer le transfert thermique massique  $q_C$  reçu par l'air au cours de la phase de combustion  $2 \rightarrow 4$ . ON exprimera le résultat en fonction des températures  $T_2, T_3$  et  $T_M$ .
3. Exprimer puis calculer le transfert thermique massique  $q_F$  reçu de la part du milieu extérieur entre les points 5 et 1. On exprimera le résultat en fonction des températures  $T_m$  et  $T_5$ .
4. En déduire le travail massique  $w$  reçu au cours du cycle.
5. Définir et calculer le rendement de ce moteur. Commenter la valeur trouvée.