

Machines thermiques

QUESTIONS DE COURS

- ↪ Pourquoi une machine monotherme est nécessairement réceptrice ?
- ↪ Qu'est-ce-que l'inégalité de Clausius ? Dans quel cas a-t-on une égalité ?
- ↪ Donner le sens des échanges énergétiques pour un moteur thermique ditherme (donner le signe de Q_c , Q_f et W). Donner un exemple de source chaude et de source froide pour un moteur thermique ditherme. Définir le rendement d'un moteur ditherme. Établir l'expression du rendement en fonction des transferts thermiques Q_c et Q_f . Quelle est l'expression de la valeur maximale du rendement d'un moteur en fonction de T_f et T_c ?
- ↪ Définir l'efficacité d'une pompe à chaleur et établir l'expression en fonction des transferts thermiques. Quelle est l'expression de la valeur maximale de l'efficacité d'une PAC en fonction de T_f et T_c ?
- ↪ Définir l'efficacité d'une machine frigorifique et établir l'expression en fonction des transferts thermiques. Quelle est l'expression de la valeur maximale de l'efficacité en fonction de T_f et T_c ?
- ↪ Citer quelques ordres de grandeur des rendements (ou efficacités) des machines thermiques réelles actuelles.
- ↪ Donner les étapes suivies dans un cycle de Carnot et discuter de la pertinence d'un tel modèle.

L'INCONTOURNABLE

Ces exercices sont typiques des exercices de machines thermiques.

Exercice 1 : Cycle Diesel

Un moteur Diesel (Rudolf Diesel était un ingénieur allemand) est un moteur à quatre temps, dont la modélisation est la suivante :

- ▷ premier temps : admission isobare A_0A_1 de l'air seul ;
- ▷ deuxième temps : compression adiabatique réversible A_1A_2 de l'air ;
- ▷ troisième temps : introduction du combustible avec combustion isobare A_2A_3 de telle manière que cette étape soit un échauffement isobare, puis détente adiabatique réversible A_3A_4 ;
- ▷ quatrième temps : refroidissement isochore A_4A_1 , suivi d'un refoulement A_1A_0 .

L'air est assimilé à un gaz parfait diatomique ($\gamma = 1,4$) de constante $r = \frac{R}{M} = 290 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$. On note P_i , T_i et V_i les pressions, température et volume à l'état A_i . On donne $P_1 = 10^5 \text{ Pa}$, $T_1 = 300 \text{ K}$, $T_2 = 1020 \text{ K}$, $V_1 = 2,5 \text{ L}$ et $V_3 = 0,25 \text{ L}$. L'entropie d'un gaz parfait s'écrit :

$$S = m \frac{r}{\gamma - 1} \ln T + mr \ln V + \text{cste} = m \frac{\gamma r}{\gamma - 1} \ln T - mr \ln P + \text{cste}.$$

- 1/ Tracer l'allure du cycle $A_1A_2A_3A_4$ dans un diagramme de Watt (les étapes A_0A_1 et A_1A_0 sont supposées se compenser). Tracer aussi le cycle en diagramme $T - S$.
- 2/ Identifier les phases de contact avec les sources chaude et froide.
- 3/ Quelle est la masse m d'air dans le cycle ?
- 4/ Calculer P_2 et V_2 puis T_3 .
- 5/ Calculer P_4 et T_4 .
- 6/ Montrer que le transfert thermique avec la source chaude vaut :

$$Q_c = -\frac{\gamma mr}{\gamma - 1}(T_2 - T_3),$$

et le calculer.

- 7/ Calculer numériquement le transfert thermique avec la source froide Q_f et en déduire le travail W .
- 8/ En déduire le rendement η du moteur. Faire l'application numérique.
- 9/ Comparer au rendement η_{Carnot} d'un cycle de Carnot dont les sources sont aux températures T_1 et T_3 .
- 10/ Comparer au rendement $\eta_{\text{BR}} = 1 - \alpha^{1-\gamma}$ d'un cycle Beau de Rochas, où $\alpha = V_{\text{max}}/V_{\text{min}}$.

Exercice 2 : Cycle de Carnot réfrigérant

On étudie ici le cycle de Carnot idéal pour une machine réfrigérante de type congélateur.

Le fluide réfrigérant est un gaz, que l'on modélisera comme parfait d'indice adiabatique $\gamma = 1,4$, qui suit les étapes idéales suivantes :

- ▷ $1 \rightarrow 2$: compression adiabatique et réversible ;
- ▷ $2 \rightarrow 3$: apport de chaleur au contact de la source chaude, lors de cet apport, le gaz évolue de façon isotherme (sa température reste constante égale à T_c). Il reçoit un transfert Q_c ;
- ▷ $3 \rightarrow 4$: détente adiabatique et réversible ;
- ▷ $4 \rightarrow 1$: évacuation de chaleur isotherme au contact de la source froide, lors de cet apport le gaz évolue de façon isotherme (sa température reste constante égale à T_f). Il reçoit un transfert Q_f .

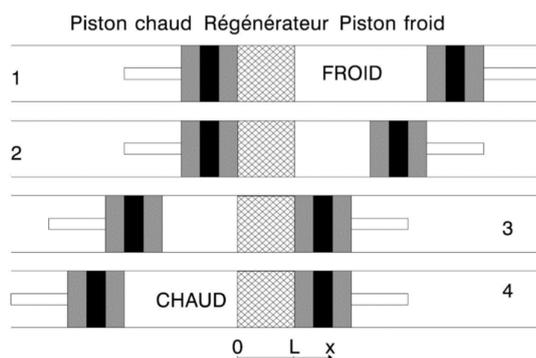
Les échanges de chaleur étant isothermes avec $T = T_{\text{ext}}$, on peut les supposer réversibles. On prendra $T_c = 20^\circ\text{C}$ et $T_f = -15^\circ\text{C}$.

- 1/ Représenter le congélateur sur un diagramme où apparaissent fluide réfrigérant, sources, milieu extérieur, Q_c , Q_f et W . Donner les signes de ces grandeurs. Que sont concrètement la source froide et la source chaude ?
- 2/ Représenter le tracé du cycle dans le diagramme (P, V) , avec les numéros des étapes. Attention au sens.
- 3/ La pression au point 1 est $p_1 = 1,2$ bar. Calculer la pression au point 2.
- 4/ Définir l'efficacité de la machine en fonction de grandeurs parmi Q_c , Q_f et W . Attention aux signes. Puis donner l'expression de cette efficacité en fonction des températures des sources. Faire l'application numérique. Signification : pour extraire $Q_f = 100$ J du compartiment froid, combien de travail faut-il fournir ?
- 5/ Expliquer le désavantage des échanges thermiques envisagés ici (température du fluide égale à la température de la source extérieure).
Expliquer pourquoi l'efficacité réelle sera inférieure à celle calculée. Quel est son ordre de grandeur pour un congélateur ?

POUR S'ENTRAÎNER

Un exercice à chercher car il s'apparente vraiment à un sujet type de machines thermiques.

Exercice 3 : Moteur de Stirling (que vous pouvez rendre en DM)



Le moteur de Stirling est constitué de deux chambres, une chaude et une froide, reliées par un régénérateur de volume constant pouvant être constitué de fils de cuivre tressés. Le gaz, en circuit fermé, reçoit un transfert thermique d'une source chaude (par exemple une chaudière à combustion) et cède un transfert thermique à la source froide (par exemple l'atmosphère). Le rôle du régénérateur, base de l'invention de Robert Stirling, est fondamental pour obtenir une bonne efficacité. Dans son brevet original de 1816, Stirling explique que le gaz chaud entre dans la partie chaude du régénérateur et est progressivement refroidi durant son parcours pour ressortir par l'autre extrémité à une température presque identique à la température de la source froide.

Dans le parcours inverse, le gaz est progressivement réchauffé. Cette astuce technologique permet d'avoir une partie des échanges thermiques internes au moteur. On considérera le cycle parcouru par $n = 40$ mmol d'air, considéré comme un gaz parfait de rapport isentropique $\gamma = 1,4$.

Dans un premier temps, on néglige le régénérateur : les deux chambres ne font qu'une. Le cycle de Stirling est alors modélisable par la succession de deux isothermes et deux isochores à partir d'un état 1 ($P_1 = 1$ bar, $T_1 = 300$ K). Il est décrit comme suit :

- ▷ $1 \rightarrow 2$: compression isotherme réversible à $T_f = T_1$ jusqu'à l'état 2 où $V_2 = V_1/10$;
- ▷ $2 \rightarrow 3$: échauffement isochore au contact de la source chaude à $T_c = 600$ K jusqu'à l'état 3 de température $T_3 = T_c$;
- ▷ $3 \rightarrow 4$: détente isotherme réversible au contact de la source chaude à T_c jusqu'à l'état 4 de volume $V_4 = V_1$;
- ▷ $4 \rightarrow 1$: refroidissement isochore au contact de la source froide jusqu'à revenir à l'état 1.

- 1/ Calculer les valeurs numériques de P , V et T pour chacun des quatre états.
- 2/ Représenter le cycle dans le diagramme de Clapeyron (P, V). Comment peut-on déterminer sans calcul si ce cycle est moteur ou récepteur ?
- 3/ Calculer pour chaque étape le travail et le transfert thermique reçus par le gaz.
- 4/ Commenter ces résultats : a-t-on bien un cycle moteur ?
- 5/ Quel est, sur le plan énergétique, la production de ce système sur un cycle ? Quel est le coût énergétique ? En déduire l'expression et la valeur du rendement.
- 6/ Calculer l'entropie créée au sein du système au cours du cycle. Quel type d'irréversibilité entre en jeu ?

L'invention du régénérateur par Stirling a permis d'améliorer considérablement le rendement de la machine précédente. Son idée est de faire en sorte que le gaz échange du transfert thermique au cours des transformations $2 \rightarrow 3$ et $4 \rightarrow 1$ non pas avec des thermostats mais avec un système, le régénérateur, qui n'échange aucune énergie autrement qu'avec les gaz au cours des transformations $\rightarrow 3$ et $4 \rightarrow 1$.

- 7/ Justifier l'idée de Stirling.
- 8/ Que vaut le rendement dans ces conditions ? Ce rendement peut-il être amélioré sans changer les sources ?

POUR ALLER PLUS LOIN

Cet exercice n'est pas difficile mais l'approche en termes de puissance n'est pas classique.

Exercice 4 : Pompe à chaleur

Soit une pompe à chaleur, dont l'objectif est de fournir une puissance thermique $|\dot{Q}_c| = 5 \text{ kW}$ à l'intérieur de la maison pour maintenir sa température à $T_0 = 20^\circ\text{C}$ (ceci compense les pertes thermiques de la maison, via les murs et les fenêtres). Il faut pour cela fournir une puissance P à la pompe (puissance qui vient du réseau électrique).

Dehors il faut plutôt froid : $T_{ext} = 0^\circ\text{C}$.

- 1/ Faire un schéma de principe de la pompe, sur lequel figurent les échanges thermiques et le travail, tous comptés comme reçus par le fluide circulant dans la pompe.
- 2/ Que faut-il supposer pour que l'efficacité de la pompe soit maximale ? Sous cette hypothèse, calculer son efficacité.
- 3/ En déduire la puissance P consommée par l'utilisateur, ainsi que la puissance thermique \dot{Q}_f extraite au milieu extérieur.
- 4/ Pour quelles valeurs des températures l'efficacité réversible est-elle maximale ? Commentaire ?
- 5/ La pompe à chaleur réelle présente des irréversibilités : la puissance fournie n'est pas exploitée de façon optimale pour atteindre l'objectif. L'efficacité est plutôt de l'ordre de 3. En déduire alors les véritables valeurs de la puissance consommée P et de \dot{Q}_f .