

Machines thermiques

Travaux Dirigés

Méthodologie : Comment travailler les exercices ?

Avant la séance de TD :

- Sur une feuille de brouillon, avec un crayon à la main et le chapitre ouvert sous les yeux.
- Essayer des « trucs » même si cela n'aboutit pas.
- Faire des schémas complets et suffisamment grands.
- Ne rien écrire sur l'énoncé de TD afin de pouvoir refaire les exercices après la correction en classe.
- Réfléchir environ 10 à 15 min sur chaque exercice demandé. Si vous bloquez complètement sur une question/un exercice, passez à la suite au bout de 10 min, et me poser des questions.

Après la séance de TD :

- Refaire les exercices corrigés ensemble, sans regarder le corrigé dans un premier temps.
- Une fois l'exercice terminé ou si vous êtes totalement bloqué, reprendre avec le corrigé.

En autonomie

Cahier d'entraînement : fiche n°20 de 20.13 à 20.16

Savoir-faire

Savoir-faire 1 – Justifier et utiliser le théorème de Carnot pour un moteur.

- Proposer un schéma de principe pour un moteur ditherme.
- Etablir l'expression du rendement de Carnot pour un moteur ditherme.
- Une centrale nucléaire peut être modélisée par une machine thermique fournissant du travail électrique et travaillant avec, comme source chaude, le réacteur et, comme source froide, l'eau d'une rivière. Calculer le rendement de Carnot d'une telle centrale pour les valeurs typiques, $T_c = 600 \text{ K}$ et $T_f = 300 \text{ K}$.
- En réalité, le rendement est compris entre 30 et 40 %. Comment expliquer cette baisse de rendement ?
- Pour pouvoir atteindre le rendement de Carnot, les échanges thermiques avec les deux sources sont alors nécessairement isothermes (pour assurer la réversibilité). Lorsque le fluide n'est pas en contact avec les sources, l'évolution est forcément adiabatique réversible (et donc isentropique). Représenter le cycle correspondant, appelé cycle de Carnot, dans un diagramme de Clapeyron.

Savoir-faire 2 – Expliquer le principe de la cogénération.

Un chalet comporte deux installations : une chaudière utilisée pour le chauffage, et un moteur ditherme à combustion externe utilisé pour la production d'électricité. Dans les deux cas, du bois est utilisé comme combustible. Les échanges énergétiques mis en jeu quotidiennement dans les deux installations sont donnés dans le tableau suivant.

Combustible consommé par la chaudière	52 kW.h
Transfert thermique fourni par la chaudière	47 kW.h
Combustible consommé par le moteur dans une enceinte à 400°C	48 kW.h
Travail fourni par le moteur	14 kW.h
Transfert thermique rejeté par le moteur dans l'atmosphère à 10°C	34 kW.h

On suppose dans un premier temps que la chaudière et le moteur sont deux systèmes indépendants.

- Calculer le rendement du moteur ditherme. Le comparer au rendement maximal qu'il pourrait théoriquement atteindre.
- Calculer le rendement de l'ensemble {chauffage + moteur}.

Pour améliorer le rendement global, l'énergie consommée par la chaudière est augmentée, et cette dernière est alors utilisée à la fois pour le chauffage et pour l'alimentation du moteur (principe de la cogénération). Un dispositif permet en outre de récupérer 80 % du transfert thermique rejeté dans l'atmosphère par le moteur pour le réinjecter dans le réseau de chauffage. Les besoins en chauffage et en électricité restent les mêmes que précédemment.

- Quel doit être le transfert thermique quotidien fourni directement par la chaudière au chalet ?
- En déduire l'énergie consommée quotidiennement par la chaudière.
- Calculer le rendement de l'association de cogénération {chauffage + moteur} et commenter le résultat obtenu.
- La combustion du bois libère dans la chaudière un transfert thermique massique égal à 14 MJ.kg^{-1} . Quelle masse de bois doit-on brûler quotidiennement pour faire fonctionner l'association {chaudière + moteur} ?

Savoir-faire 3 – Savoir décrire le fonctionnement d'un récepteur thermique.

- Proposer un schéma de principe pour un réfrigérateur ditherme.
- Etablir l'expression de l'efficacité frigorifique de Carnot pour un réfrigérateur ditherme. Proposer une valeur numérique typique.
- Proposer un schéma de principe pour une pompe à chaleur ditherme.
- Etablir l'expression de l'efficacité thermique de Carnot pour une pompe à chaleur ditherme. Proposer une valeur numérique typique.

Exercices incontournables

Exercice 1 : Climatiseur (★★★)

On souhaite réaliser la climatisation d'un local afin de maintenir sa température à la valeur $T_1 = 300 \text{ K}$ alors que la température extérieure est $T_2 = 315 \text{ K}$.

On utilise une machine thermique, fonctionnant avec n moles d'un fluide assimilable à un gaz parfait, de capacité thermique molaire à pression constante $C_{p,m} = 30,0 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$.

Au cours du cycle, le fluide reçoit les transferts thermiques $Q_1 > 0$ de la source froide (local) et $Q_2 < 0$ de la source chaude (extérieur) ainsi que le travail $W > 0$.

Dans un premier temps, on considère que le cycle est un cycle de Carnot défini comme suit. Le fluide passe par les états d'équilibre A, B, C, D par la succession de transformations :

- $A \rightarrow B$: compression adiabatique réversible de la température T_1 à la température T_2 ;
- $B \rightarrow C$: compression isotherme réversible à la température T_2 ;
- $C \rightarrow D$: détente adiabatique réversible de la température T_2 à la température T_1 ;
- $D \rightarrow A$: détente isotherme réversible à la température T_1 .

- Représenter l'allure de ce cycle dans le diagramme de Clapeyron (P, V).
- Définir, puis établir l'expression de l'efficacité frigorifique e_c de la machine en fonction de T_1 et T_2 . Calculer e_c .

En réalité, le fluide ne décrit pas le cycle de Carnot de la question 1 mais le cycle suivant :

- $A \rightarrow B$: compression adiabatique réversible de la température T_1 à la température $T'_1 = 350 \text{ K}$;
- $B \rightarrow C$: refroidissement isobare de la température T'_1 à la température T_2 ;
- $C \rightarrow D$: détente adiabatique réversible de la température T_2 à la température T'_2 ;
- $D \rightarrow A$: échauffement isobare de la température T'_2 à la température T_1 .

- Représenter l'allure de ce cycle dans le diagramme de Clapeyron (P, V).
- Exprimer les variations d'entropie du fluide (n mol) au cours de chacune des transformations qu'il subit en fonction de n , $C_{p,m}$, T_1 , T_2 , T'_1 et T'_2 . En déduire l'expression de la variation d'entropie du fluide au cours du cycle. En déduire une relation simple entre les différentes températures et calculer T'_2 .

- Q5.** Etablir l'expression du transfert thermique Q'_2 reçu par le fluide au cours de la transformation $B \rightarrow C$ en fonction de n , $C_{p,m}$ et certaines températures.
- Q6.** Etablir l'expression du transfert thermique Q'_1 reçu par le fluide au cours de la transformation $D \rightarrow A$ en fonction de n , $C_{p,m}$ et certaines températures.
- Q7.** En déduire l'expression du travail W' reçu par le fluide au cours du cycle.
- Q8.** Exprimer puis calculer la nouvelle efficacité frigorifique e' de la machine. Comparer à e_c . La conclusion était-elle prévisible et pourquoi ?

Exercice 2 : Moteur Diesel (★★★)

Le moteur conçu par Rudolph Diesel dans les années 1890 est différent du moteur à essence de Beau de Rochas, car l'air seul est comprimé à une température au-delà du point d'inflammation avant que ne soit injecté, dans la chambre de combustion, le carburant qui s'auto-enflamme alors (sans l'aide des bougies). Le problème du contrôle de la détonation ne se pose pas, ce qui donne lieu à deux avantages : les taux de compressions atteints (le rapport du volume maximal sur le volume minimal lors de la course du piston) peuvent être plus élevés ce qui autorise des rendements plus importants, et les combustibles utilisés peuvent être moins raffinés. On considère donc un moteur diatherme fonctionnant selon le cycle de Diesel. Le fonctionnement réel du moteur est évidemment compliqué, et nous utilisons ici une description idéale du cycle :

- On considère n moles de gaz dans le moteur, qui circule en système fermé, modélisé comme un gaz parfait avec $\gamma = 1.4$ l'exposant adiabatique (supposé indépendant de la température). On prendra les valeurs $c_p = 1,005 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $c_v = 0,718 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.
- Lors de l'étape $1 \rightarrow 2$ le gaz est comprimé par la remontée du piston. Cette étape est modélisée comme une compression adiabatique et réversible.
- Lors de l'étape $2 \rightarrow 3$, le gaz s'échauffe grâce à la combustion du carburant. Le gaz se détend alors à pression constante. Il reçoit un transfert thermique que l'on notera Q_c . Si m est la masse de gaz, on définit $q_c = Q_c/m$ le transfert thermique massique. Cette étape d'échauffement du gaz est modélisée comme étant isobare.
- Lors de l'étape $3 \rightarrow 4$, le gaz se détend (le piston redescend). Ceci est modélisé comme une détente adiabatique et réversible.
- Lors de l'étape $4 \rightarrow 1$ le gaz se refroidit en évacuant sa chaleur vers l'extérieur. Il reçoit un transfert thermique que l'on notera Q_f et qui est négatif. Si m est la masse de gaz, on définit $q_f = Q_f/m$ le transfert thermique massique. Cette étape de refroidissement du gaz est modélisée comme étant isochore (piston au point mort bas).

Q1. Tracer l'allure du cycle dans le diagramme (P, V) .

Le rapport de compression est défini comme $\rho = V_{\max}/V_{\min}$. Quels sont les deux volumes qui interviennent ici (parmi V_1 , V_2 , V_3 ou V_4) ? On prendra un rapport $\rho = 18$ dans la suite, typique des moteurs Diesel.

- Q2.** On part d'un état $T_1 = 15^\circ\text{C}$ et $p_1 = 1,0 \text{ bar}$. Déterminer la pression p_2 et la température T_2 atteints dans l'état 2.
- Q3.** On considère ensuite l'étape $2 \rightarrow 3$. Le transfert thermique massique transmis au gaz lors de la combustion est $q_c = 1800 \text{ kJ/kg}$. En déduire l'expression puis la valeur de T_3 , puis de V_3/V_2 .
- Q4.** En considérant l'étape $3 \rightarrow 4$, donner l'expression et la valeur de T_4 .
- Q5.** Donner l'expression puis la valeur du transfert thermique massique $q_f = Q_f/m$ reçu par le gaz lors de l'étape $4 \rightarrow 1$.
- Q6.** Enfin, on souhaite évaluer le rendement du moteur. Quelle est la grandeur coûteuse pour ce moteur ? Quelle est la grandeur utile ? En déduire une expression du rendement du moteur (attention, il n'est pas réversible), puis faire l'application numérique.

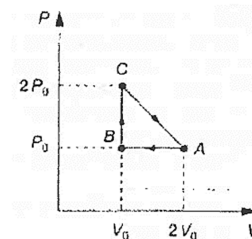
Exercices d'entraînement

Exercice 3 : Analyse d'un cycle (★★★)

Une mole de gaz parfait décrit le cycle moteur ABCA représenté ci-contre par un triangle en coordonnées (P, V) .

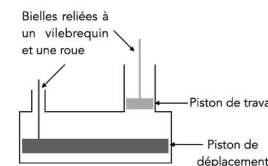
Q1. Ce cycle est-il moteur ou récepteur ?

Q2. Calculer le rendement/l'efficacité du cycle si $C_{V,m} = \frac{3}{2}R$.



Exercice 4 : Moteur Stirling (★★★)

Le moteur Stirling a été développé au 19ème siècle et a rapidement été délaissé au profit des moteurs à combustion interne (essence et diesel) ; il pourrait cependant connaître un essor significatif dans le futur compte-tenu, entre autres, des avantages qu'il présente en matière de protection de l'environnement. Par exemple, le sous-marin civil SAGA développé dans les années 80 et destiné à l'industrie pétrolière offshore est équipé d'un moteur Stirling.



L'air ($n = 3,3 \text{ mmol}$, $\gamma = C_p/C_v = 1,4$) décrit un cycle de Stirling modélisé par les évolutions suivantes à partir de l'état A de volume $V_A = 20 \text{ cm}^3$:

- échauffement isochore au contact thermique de la source chaude jusqu'à l'état B ;
- détente isotherme réversible au contact de la source chaude jusqu'à l'état C, de volume $V_C = 1,2 V_A$: le piston de travail monte, fait tourner la roue qui repousse alors le piston de déplacement vers le bas ;
- refroidissement isochore au contact thermique de la source froide jusqu'à l'état D ;
- compression isotherme réversible au contact de la source froide pour revenir à l'état A : le piston de travail descend, fait tourner la roue qui tire le piston de déplacement vers le haut.

La source chaude est maintenue à température constante $T_c = 373 \text{ K}$ (eau bouillante dans la tasse sous le moteur). La source froide est maintenue à température constante $T_f = 293 \text{ K}$ (air ambiant de la pièce).

- Q1.** Déterminer les expressions littérales puis calculer les valeurs numériques de pression et de volume dans chacun des états. On présentera les résultats dans un tableau.
- Q2.** Représenter l'allure du cycle dans le diagramme de Clapeyron (P, V) .
- Q3.** Pour chaque transformation, déterminer l'expression du travail et du transfert thermique reçus (algébriquement) par l'air. Commenter les signes.

On rappelle que la variation d'entropie d'un gaz parfait est donnée par :

$$\Delta S(T, V) = C_V \ln \left(\frac{T_{\text{finale}}}{T_{\text{initiale}}} \right) + n \cdot R \ln \left(\frac{V_{\text{finale}}}{V_{\text{initiale}}} \right)$$

- Q4.** Bilan entropique de la transformation $A \rightarrow B$: déterminer l'entropie créée au cours de l'échauffement isochore $A \rightarrow B$. Conclure.
- Q5.** Exprimer le travail total W_t fourni par le moteur au cours d'un cycle, en fonction de n , R , T_f et T_c .
- Q6.** Le moteur produit du travail à partir de l'énergie thermique reçue au cours de l'échauffement isochore et de la détente isotherme. Exprimer le rendement η du moteur en fonction de γ , T_f et T_c . Calculer sa valeur.
- Q7.** Calculer le rendement théorique η_c d'un moteur de Carnot fonctionnant au contact des mêmes thermostats que le moteur de Stirling. Comparer au rendement η calculé dans la question précédente et conclure.