

Généralités sur les machines thermiques

□ Exercice 26.1. Performances d'un moteur réel ★

Un moteur réel fonctionnant entre deux sources de chaleur, l'une à $T_{fr} = 400$ K, l'autre à $T_{ch} = 650$ K, produit 500 J par cycle, pour 1500 J de transfert thermique fourni.

1. Comparer son rendement à celui d'une machine de Carnot fonctionnant entre les deux mêmes sources.
2. Calculer l'entropie créée par cycle, notée $S_{créée}$.
3. Montrer que la différence entre le travail fourni par la machine de Carnot et la machine réelle est égale à $T_{fr} \times S_{créée}$, pour une dépense identique.

□ Exercice 26.2. Efficacité d'un réfrigérateur ★

On modélise le fonctionnement d'une machine de réfrigération dans laquelle une masse m de fluide frigorigène subit les transformations suivantes :

- ✓ A → B : compression adiabatique dans le compresseur ;
- ✓ B → D : refroidissement et liquéfaction isobares dans le condenseur ;
- ✓ D → E : détente adiabatique et isenthalpique dans le détendeur ;
- ✓ E → A : vaporisation isobare dans l'évaporateur.

Les sources froides (intérieur de l'enceinte à réfrigérer) et chaude (milieu ambiant) sont assimilées à des thermostats de températures respectives T_f et T_c constantes.

Données :

— $m = 1$ kg, $T_f = 278$ K, $T_c = 293$ K ;

— enthalpies massiques du fluide frigorigène dans les états représentés par les points A, B et D : $h_A = 390$ kJ.kg⁻¹, $h_B = 449$ kJ.kg⁻¹, $h_D = 286$ kJ.kg⁻¹

On désigne par Q_f et Q_c l'énergie reçue par le fluide par transfert thermique, respectivement au contact de la source froide et chaude au cours du cycle décrit ci-dessus.

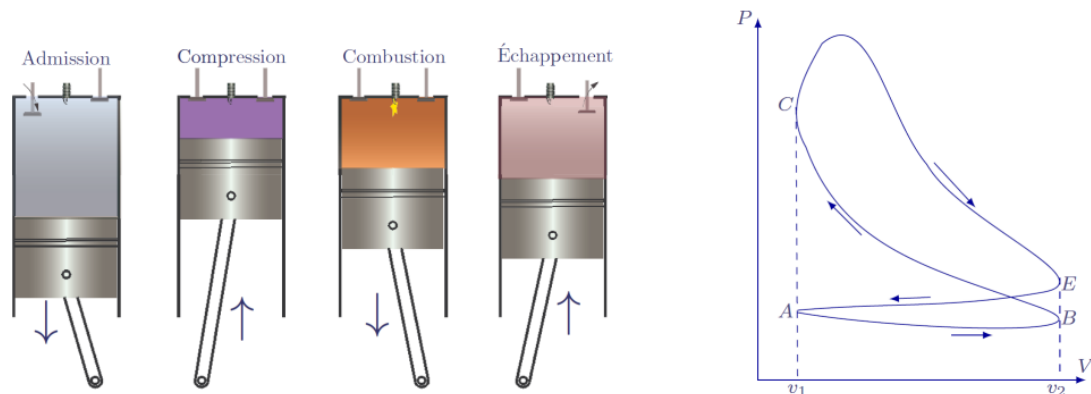
1. Exprimer Q_f et Q_c en fonction des données.
2. Calculer Q_f et Q_c .
3. Exprimer le travail W reçu par le fluide en fonction des données. Calculer W .
4. Exprimer puis calculer l'entropie échangée par le fluide avec les sources froides et chaudes au cours du cycle.
5. Calculer l'entropie créée au cours du cycle. Conclure.
6. Calculer l'efficacité de cette installation et la comparer à celle de Carnot. Conclure.

Machines à pistons

□ Exercice 26.3. Cycle de Beau de Rochas d'un moteur à quatre temps ★★

On étudie le fonctionnement d'un moteur à quatre temps dont le schéma représentatif est donné ci-dessous, de même que la représentation du cycle dans un diagramme de Watt P, V . Le mélange de gaz subissant le cycle sera assimilé à un gaz parfait d'indice adiabatique $\gamma = c_p/c_v$.

- 1 - Identifier les différentes transformations du cycle réel sur le diagramme P, V .



- 3 - Modéliser le cycle réel par un cycle théorique comprenant six transformations, en utilisant des transformations isochores, isobares et adiabatiques réversibles. On introduira une étape fictive E-B. Déterminer les équations $P = f(V)$ correspondant à chaque transformation dans le diagramme.

- 4 - Définir le rendement thermodynamique du moteur. L'exprimer, pour le cycle théorique établi question précédemment, en fonction des chaleurs reçues aux cours des phases isochores.
- 5 - Calculer le rendement du cycle théorique. L'exprimer d'abord en fonction des températures aux différents points du cycle, puis en fonction du rapport de compression $\alpha = V_2/V_1$ et de γ . Comment choisir α pour optimiser le rendement ?

□ Exercice 26.4. Moteur de Stirling ★★

Le moteur de Stirling, schématisé figure 1, est constitué de deux chambres, une chaude et une froide, reliées par un régénérateur de volume constant. Le mouvement des deux pistons est synchronisé par un dispositif adéquat. L'intérêt de ce moteur est qu'il utilise une source de chaleur *externe*, qui peut être la chaleur fatale d'un processus industriel, la combustion de biomasse, le rayonnement solaire, etc. Il est particulièrement utilisé pour la **cogénération**, une technique d'optimisation énergétique visant à produire simultanément chaleur et électricité à partir d'une seule source d'énergie, ce qui permet de maximiser le taux d'utilisation des ressources.

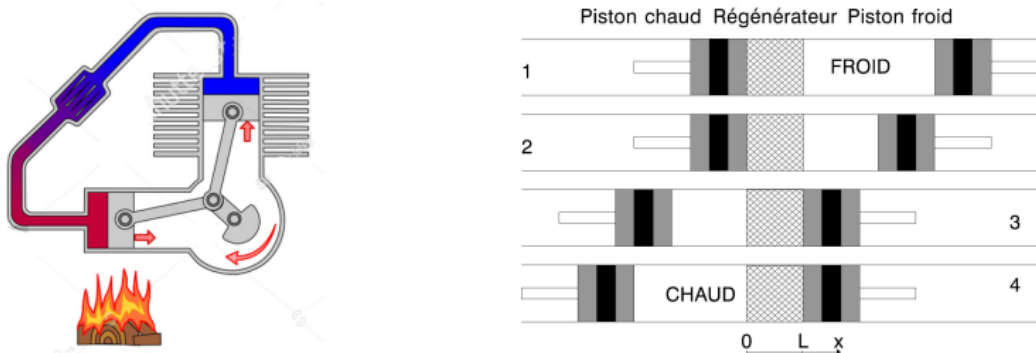


Figure 1 – Fonctionnement du moteur de Stirling. Gauche : schéma de principe d'un moteur de Stirling de type α . Droite : représentation équivalente des différentes transformations.

On considérera le cycle parcouru par n mol d'air, considéré comme un gaz parfait de rapport isentropique $\gamma = 1,4$. Dans un premier temps, on néglige le régénérateur, « remplacé » par exemple par un fin tuyau reliant les deux compartiments chaud et froid. Le cycle de Stirling est alors modélisable par la succession de deux isothermes et deux isochores à partir d'un état 1. Il est décrit comme suit :

- ▶ 1 \rightarrow 2 : compression isotherme à $T_f = 300$ K 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 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 - Représenter le cycle dans le diagramme de Watt (P, V). Comment peut-on déterminer sans calcul si ce cycle est moteur ou récepteur ?
- 2 - Exprimer pour chaque étape le travail et le transfert thermique reçus par le gaz. A-t-on bien un cycle moteur ?
- 3 - 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.

Le rôle du régénérateur, base de l'invention de Robert Stirling, est fondamental pour obtenir une bonne efficacité. Il s'agit d'un ensemble de fils métalliques tressés permettant un stockage efficace d'énergie. 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 ... en réutilisant l'énergie qu'il avait préalablement libéré.

- 4 - Expliquer l'idée de Stirling, en analysant avec quel système les transferts thermiques ont lieu au cours des différentes étapes.
- 5 - Que vaut le rendement dans ces conditions ?

On montrera dans le cours sur le second principe qu'il s'agit du rendement maximal qui puisse être obtenu avec un moteur : le cycle de Stirling théorique avec régénérateur est donc un cycle parfait.

Machines à écoulement de fluide**□ Exercice 26.5. Machine à vapeur : 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 isenthalpique 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 piston chasse le mélange liquide - vapeur dans le condenseur où il se liquéfie totalement.

1. Représenter le cycle précédent sur le diagramme (P, h) donné 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'irréversibilité?

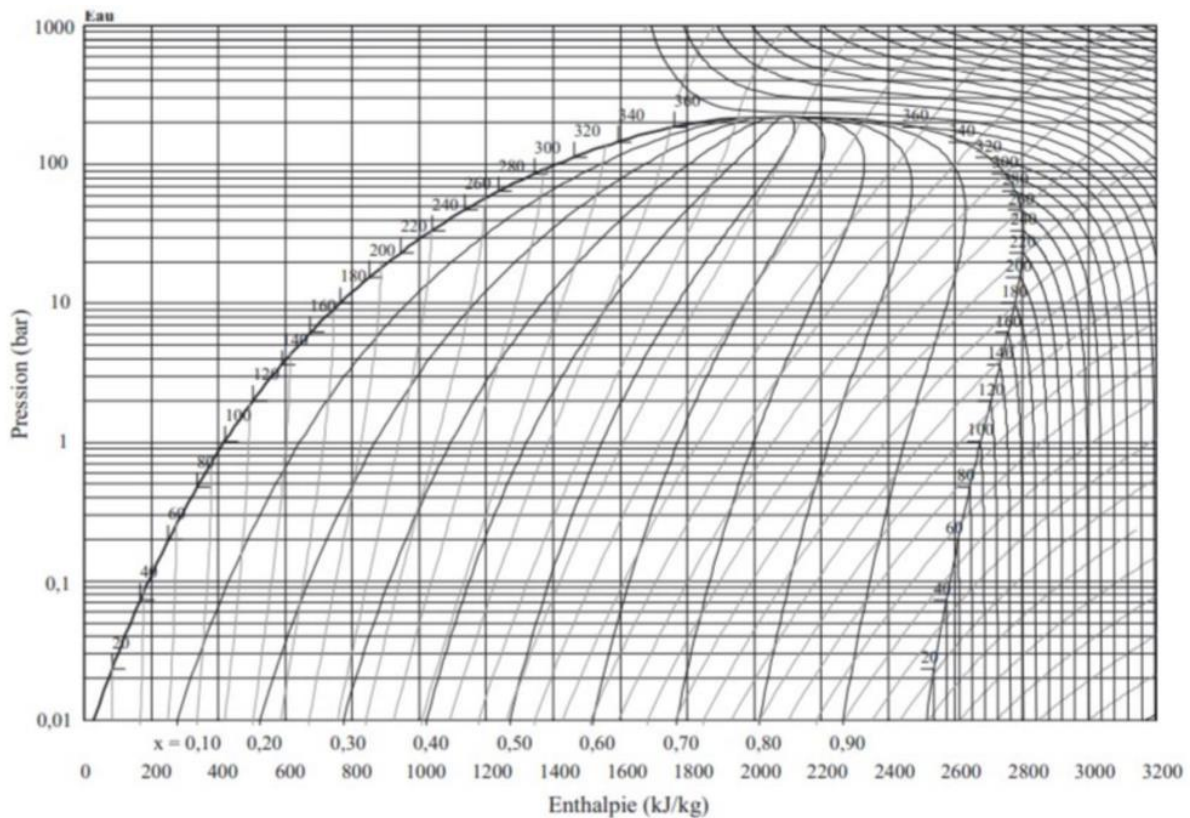
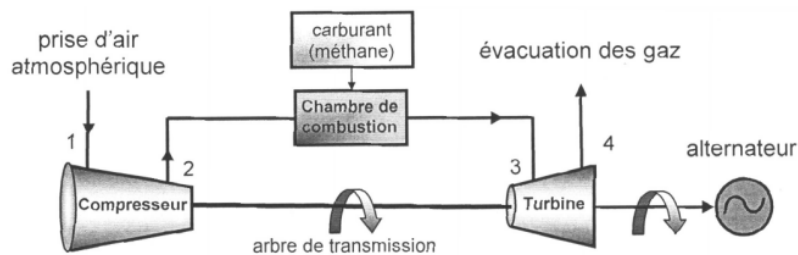


Diagramme enthalpique de l'eau (les courbes en gris sont les isentropes).

□ Exercice 26.6. Générateur à gaz suivant le cycle de Brayton ★★

Les générateurs électriques à turbine à gaz sont des installations compactes qui permettent une production d'électricité conséquente. Elles peuvent être utilisées sur de petits sites isolés (usines, villages, etc.) comme sur des installations de production électrique de taille plus importante, par exemple pour l'alimentation électrique d'îles. Leur temps de mise en route très rapide permet également de les utiliser en complément d'une source d'énergie intermittente (photovoltaïque ou éolien). En revanche, la combustion de gaz naturel émet de grandes quantités de CO_2 et a donc un impact fortement négatif sur le réchauffement climatique.

Le fluide caloporteur est de l'air atmosphérique. Après avoir été porté à haute pression par un compresseur isentropique (étape 1-2), il reçoit dans une chambre de combustion isobare un transfert thermique fourni par la réaction de combustion du méthane (étape 2-3). Le gaz subit ensuite une détente isentropique dans la turbine (étape 3-4), jusqu'à retrouver la pression atmosphérique. Le travail mécanique produit permet la mise en rotation de l'alternateur (et donc la production d'énergie électrique), une partie étant également récupérée pour entraîner le compresseur.



Tous les mélanges gazeux sont assimilés à un même gaz parfait de coefficient isentropique $\gamma = 1,4$ et de capacité thermique massique à pression constante $c_p = 1 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. On pose

$$\lambda = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} \quad \text{et} \quad \tau = \frac{T_3}{T_1}.$$

Données : $P_1 = P_4 = 1 \text{ bar}$, $T_1 = 300 \text{ K}$, $P_2 = 10 \text{ bar}$ et $T_3 = 1400 \text{ K}$.

- 1 - Représenter qualitativement la suite de transformations subies par le gaz dans un diagramme de Clapeyron.
- 2 - Établir les expressions de T_2 et T_4 en fonction de λ , τ et T_1 .
- 3 - Exprimer littéralement le travail massique de compression w_c reçu le gaz dans le compresseur, l'énergie thermique massique de combustion q_c reçue par le gaz dans la chambre de combustion et le travail massique w_T fourni à la turbine par le gaz.
- 4 - Le travail w_T est ensuite transmis par la turbine via l'arbre de transmission pour partie à l'alternateur (w_a) et pour partie au compresseur (w_c). Exprimer le travail w_a fourni à l'alternateur.
- 5 - Exprimer en fonction de λ et τ le rapport $\mathcal{R} = w_a/w_c$. Calculer sa valeur numérique, commenter. Sur quel(s) paramètre(s) du cycle peut-on jouer pour l'améliorer ?
- 6 - Définir par une phrase le rendement thermique η du générateur à gaz. L'exprimer en fonction des énergies échangées calculées précédemment, puis du seul paramètre λ . Calculer sa valeur numérique.

Problème ouvert

□ Exercice 26.7. Coût de fonctionnement d'un frigo ★★

Vous achetez six bouteilles de 1 L de jus de fruit que vous rangez dans votre réfrigérateur. Une heure plus tard, elles sont à la température du frigo.

Question : combien vous coûte ce refroidissement ?

Données :

- l'efficacité thermodynamique du réfrigérateur vaut 1,5 ;
- l'isolation imparfaite du réfrigérateur se traduit par des fuites thermiques de puissance 10 W ;
- capacité thermique massique de l'eau liquide : $4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- tarifs EDF : 1 kWh coûte 0,20 €.