

Chapitre 3

Introduction à l'étude des machines thermiques

Objectifs

A la fin du chapitre, l'étudiant doit être capable de

- connaître les différents types de machines thermiques
- définir une machine de Carnot
- déterminer les performances d'une machine thermique

I. Machines thermiques: cycle ditherme

1. Définitions

1.1. Source de Chaleur

On appelle source de chaleur, un objet en contact avec le système et susceptible de n'échanger avec lui que de la chaleur. Si on a deux sources, celles-ci sont distinguées en source froide et source chaude par leurs températures relatives.

1.2. Machine thermique

On appelle machine thermique, un dispositif permettant de transformer une énergie sous forme de chaleur en une énergie sous forme de travail et réciproquement. Pratiquement, une machine thermique fonctionne à l'aide d'un agent thermique (qui constitue le système) subissant une transformation cyclique et échangeant avec l'extérieur du travail et de la chaleur.

On peut notamment distinguer les machines les plus simples où les échanges de chaleur se font avec un nombre réduit de sources de chaleur. Ainsi, une machine ditherme, est une machine n'échangeant de la chaleur qu'avec deux sources de chaleur.

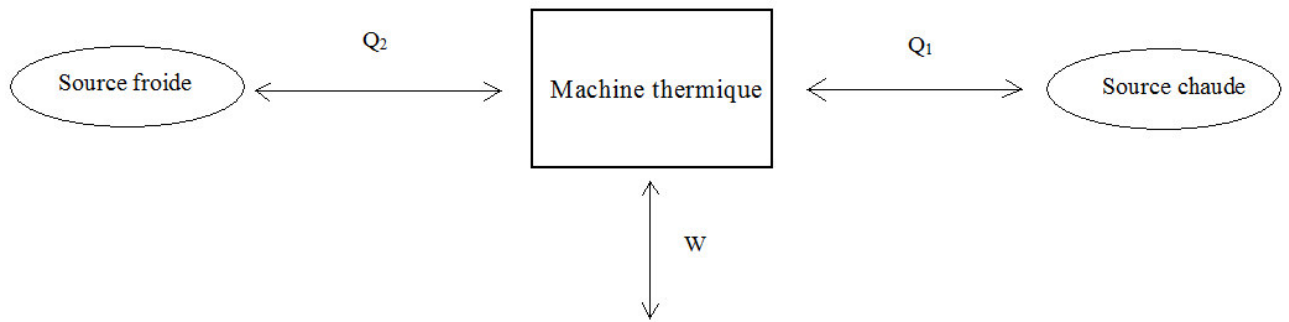


Figure 11: Machine ditherme

2. Différents types de machines thermiques

On distingue deux types de machines thermiques:

2.1. Moteur thermique

On définit un moteur thermique (figure 3.2) comme une machine qui transforme la chaleur en travail: $W < 0$ et $Q_f + Q_c > 0$.

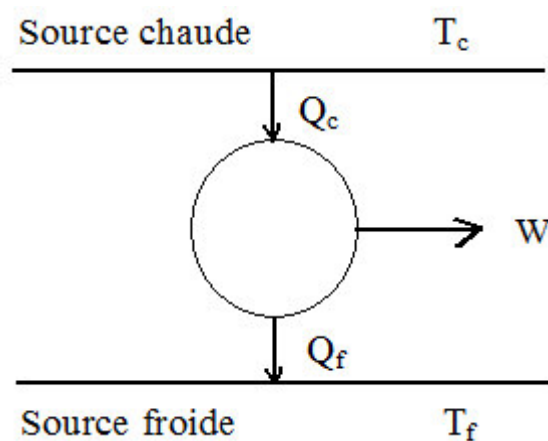


Figure 12: Moteur thermique

2.2. Machine frigorifique et pompe à chaleur

Transforme le travail en chaleur, donc $w > 0$ et $Q_c + Q_f < 0$ (voir figure 3.3).

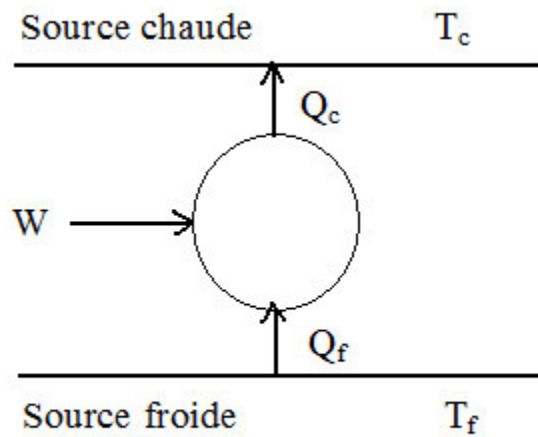


Figure 13: Machine frigorifique et pompe à chaleur

Cette machine présente un double intérêt:

- Extraire de la chaleur de la source froide, c'est-à-dire production de froid et on a une machine frigorifique
- Fournir de la chaleur à la source chaude, production de chaleur et on a une pompe à chaleur.

2.3. Convention de signe

- si le cycle est décrit dans le sens des aiguilles d'une montre, alors le travail est négatif ($W < 0$) et le cycle est dit moteur (figure 3.4).

- si le cycle est décrit dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, alors le travail est positif ($W > 0$) et le cycle est dit cycle récepteur (figure 3.5).

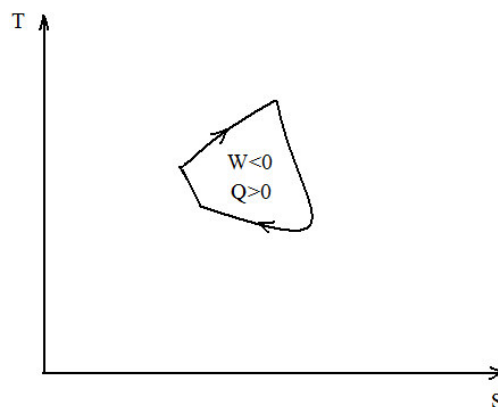


Figure 14: Cycle moteur

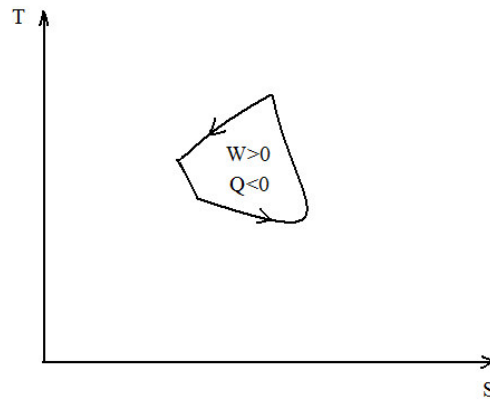


Figure 15: Cycle récepteur

3. Rendement

On appelle rendement $\eta > 0$ d'une machine thermique le rapport d'énergie utile à l'énergie consommée (dépensée) pour la faire fonctionner.

$$\eta = \frac{\text{Energie utile}}{\text{Energie consommée}}$$

II. Machine de Carnot/Cycle de Carnot

On appelle cycle de Carnot, le cycle réversible décrit par une machine thermique idéale. Il est constitué de deux portions d'isothermes (à la température des sources froides T_f et chaude T_c) et de deux portions adiabatiques séparant les deux isothermes.

1. Moteur de Carnot

Un moteur thermique ($W < 0$) fonctionnant suivant le cycle de Carnot entre deux sources de chaleur (de températures respectives T_1 et $T_2 < T_1$) et décrivant le cycle ABCD correspondant aux quatre transformations réversibles suivantes:

- Transformation AB: détente isotherme à la température T_1 pendant laquelle le système fluide reçoit de la chaleur Q_c de la source chaude T_1 .
- Transformation BC: détente adiabatique ($Q=0$)
- Transformation CD: compression isotherme à température T_2 pendant laquelle le système fluide fournit de la chaleur Q_f à la source froide T_2
- Transformation DA: compression adiabatique ($Q=0$)

le cycle de Carnot, pour un gaz parfait, est représenté respectivement dans le diagramme de Clapeyron PV (figure 3.6) et le diagramme entropique TS (figure 3.7).

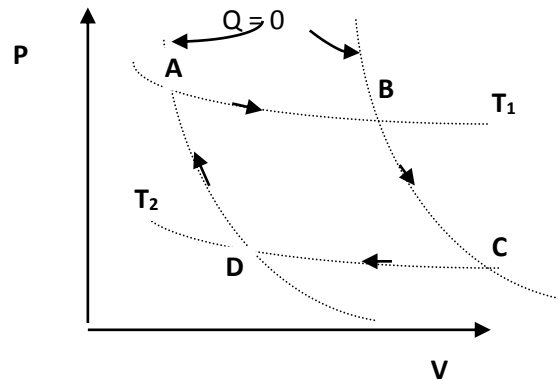


Figure 16: Moteur Carnot et diagramme PV

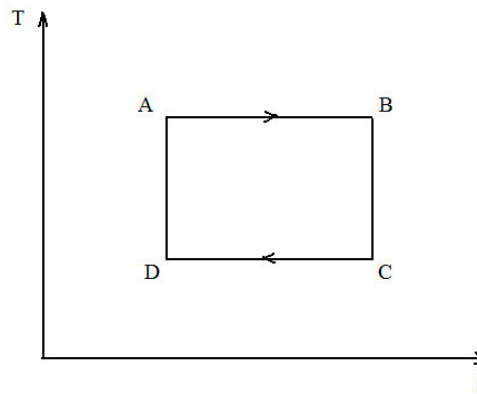


Figure 17: Moteur Carnot et diagramme TS

2. Machine frigorifique de Carnot

La réversibilité du cycle de Carnot autorise l'inversion du sens des transformations, conduisant à une inversion de tous les signes des énergies échangées et constituant une machine frigorifique.

3. Performance d'une machine de Carnot

3.1. Rendement d'un moteur de Carnot

Pour un moteur, le rendement défini précédemment est le rapport entre l'énergie utile (travail fourni par le système) et l'énergie consommée (chaleur Q_c ou Q_1) et il vient:

$$\eta = \frac{|W|}{Q_1} = -\frac{W}{Q_1}$$

D'après le premier principe on a:

$$W+Q_1+Q_2=0 \text{ et on aura } \eta = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

On démontre que le rendement du cycle de Carnot s'écrit:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} < 1$$

3.2. Efficacité d'une machine frigorifique (COP)

Pour une machine frigorifique, la quantité importante est le rapport entre la chaleur prélevée à la source froide Q_2 et le travail nécessaire à cette opération. On définit alors l'efficacité:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{W} = -\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} > 1$$

3.3. Efficacité d'une pompe à chaleur (COP)

Pour une pompe à chaleur, on s'intéresse au rapport entre la chaleur fournie à la source chaude Q_1 et le travail nécessaire à cette opération. On définit alors l'efficacité:

$$\varepsilon = \frac{|Q_1|}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} > 1$$

4. Théorème de Carnot

Le théorème de Carnot stipule que: "aucune machine ditherme ne peut être plus efficace qu'une machine de Carnot fonctionnant entre les deux mêmes sources"

Le théorème de Carnot nous fournit ainsi un rendement (ou une efficacité) théorique maximale (et donc impossible à dépasser)

Autrement dit, pour un moteur fonctionnant entre deux sources données: $\eta < \eta_{\text{Carnot}} = \eta_{\text{max}}$

Et pour une machine frigorifique (ou une pompe à chaleur) $\varepsilon < \varepsilon_{\text{Carnot}} = \varepsilon_{\text{max}}$

Exercices d'application

Exercice 1

Un cycle de Carnot est une succession de transformations réversible aux termes desquelles le système revient dans son état initial. Le cycle de Carnot étudié ci-dessous est la succession d'une compression isotherme CD (à la température T_2) suivie d'une compression adiabatique DA puis d'une détente isotherme AB (à la température T_1) et terminé par une détente adiabatique BC.

On donne : $P_C = 1 \text{ atm}$, $T_2 = 20^\circ\text{C}$, $V_A = 1 \text{ l}$, $P_A = 10 \text{ atm}$, $T_1 = 250^\circ\text{C}$, $\gamma = 1,4$

1. Déterminer la valeur de V_C et les coordonnées des points D et B du cycle.
2. Calculer les quantités de chaleur Q_1 et Q_2 et le travail W reçue par le gaz au cours du cycle. Précisez leur signe. Le système effectue-t-il un travail moteur ou résistant? Comment doit-on mesurer l'efficacité du processus? Donner le coefficient (appelé ici rendement en fonction de W , Q_1 et Q_2). Le calculer en fonction de T_1 et T_2 .

Réponse

1.

	P (atm)	T(°C)	V(l)
A	10	250	1
B	7.6	250	1.315
C	1	20	5.6
D	1.315	20	4.26

Exemple de calcul

$$V_C = \frac{T_2 P_A V_A}{T_1 P_C} = 5.6 \text{ l}$$

$$V_B = V_C \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} = 1.315 \text{ l}$$

2.

Sur l'isotherme T_2 : $Q_2 = nRT_2 \ln(V_C/V_D) = 155.06 \text{ J}$

Sur l'isotherme T_1 : $Q_1 = nRT_1 \ln(V_A/V_B) = -277.13 \text{ J}$ refaire le calcul

Premier principe pour un cycle $W = 122.07 \text{ J}$

Rendement : première méthode: $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 0.44$

$$\text{Deuxième méthode } \eta = -\frac{W}{Q_1} = 0.44$$

Exercice 2

Le fluide réfrigérateur subit une succession de cycles de Carnot. L'intérieur de l'appareil doit être maintenu à la température -5°C et la pièce où il est situé est à la température de 27°C .

1. Précisez quels sont les systèmes constituant respectivement la source chaude et la source froide du cycle. Quels doivent être les signes des quantités de chaleur que le fluide reçoit de ces deux sources? Dans quel sens le cycle de Carnot doit-il être décrit?
2. Calculer le travail W nécessaire pour extraire une quantité de chaleur Q_2 de la source froide.
3. Déduire l'efficacité de la machine

On donne $Q_2=800\text{J}$

Réponse

L'intérieur de l'appareil constitue la source froide et la source froide ($T_2=268\text{K}$) et la pièce où il est situé la source chaude ($T_1=300\text{K}$). Un réfrigérateur extrait de la chaleur de la source froide et en rejette à la source chaude. Il reçoit du travail. Par conséquent $Q_1<0$ et $Q_2>0$ et $W>0$. Le cycle de Carnot doit être décrit dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (sens trigonométrique)

2.

D'après le premier principe de la thermodynamique, $W+Q_1+Q_2=0$

D'après le second principe de la thermodynamique: $Q_1/T_1+Q_2/T_2=0$

On en déduit $W=-(Q_1+Q_2)=Q_2T_1(1/T_2-1/T_1)$

A.N: $W=95.5\text{ J}$

3.

$\varepsilon=Q_2/W=8.37$ (peut aussi être calculée en fonction de la température)

Exercice 3

Machines thermiques

On considère une pompe à chaleur fonctionnant par cycles réversibles courts et servant à chauffer de l'eau. La source chaude est à une température $T_1=320$ K. La source froide est constituée par l'atmosphère de température $T_2=280$ K. Quelle est l'efficacité maximale de cette pompe.

Réponse

$$\varepsilon_{\max}=T_1/(T_1-T_2)=8$$