

LP 27 – Machines thermiques

Manon LECONTE - ENS de Lyon

Dernière mise à jour : 1^{er} juin 2020

Merci à Bénédicte Grebille, Lucile Bridou, Thibault Clarté et Joachim Galiana pour leur précieuse aide.

Mots-clé : machine thermique, principe de Carnot, moteur thermique ditherme, récepteur thermique ditherme, diagramme de Raveau, cycle de Carnot, machine frigorifique, pompe à chaleur.

Niveau : BCPST 1

Pré-requis :

- 1^{er} et 2nd principes pour les systèmes fermés [BCPST 1]
- Notion de réversibilité [BCPST 1]
- Les différents types de transferts thermiques [BCPST 1]
- Changement d'état, diagramme de Clapeyron [BCPST 1]

Bibliographie :

- Bresson, *Physique-chimie BCPST 1^{re} année*, chap. 24 [Niveau : ★]
- Taillet, *Dictionnaire de physique* [Niveau : ★]
- Salamito, *Physique tout-en-un PCSI* [Niveau : ★★]

Plan proposé

I - Etude thermodynamique	1
A/ Sources d'énergie thermique	1
B/ Les différents types de machines thermiques	1
C/ Bilans énergétique et entropique	2
II - Moteurs dithermes	3
A/ Présentation des moteurs	4
B/ Cycle de Carnot	4
III - Machines réceptrices dithermes	5
A/ Machine frigorifique	5
B/ Pompe à chaleur	6

Introduction pédagogique

Ce cours permet d'appliquer les différentes notions qui ont été vues en thermodynamique en BCPST 1. Il conclut ainsi cette séquence pédagogique.

Difficultés :

- Déterminer dans quel sens se font les transferts ;
- Bien définir le système.

Exemples de TD : calculer le rendement d'un moteur ou l'efficacité d'une machine thermique réceptrice.

Exemples de TP : étude d'une pompe à chaleur, du moteur de Stirling.

Introduction

Définition – Machine thermique : dispositif permettant de produire un travail ou d'échanger de la chaleur en faisant subir un cycle thermodynamique à un fluide.

Les machines thermiques constituent des objets du quotidien pour nous : réfrigérateur, pompe à chaleur, climatiseur, ... On doit la première machine thermique à Watt, qui mit au point une machine à vapeur en 1769, avant même que les grands principes de la thermodynamique ne soient découverts. Le travail produit par le moteur provient de la rotation d'une turbine, permis par la vaporisation de l'eau dans une chaudière.

Objectifs – Comprendre le fonctionnement d'une machine thermique.
Calculer son efficacité ou son rendement.

I - Etude thermodynamique

A/ Sources d'énergie thermique

Définition – Source idéale : dispositif susceptible d'échanger de l'énergie thermique sans que sa température ne varie.

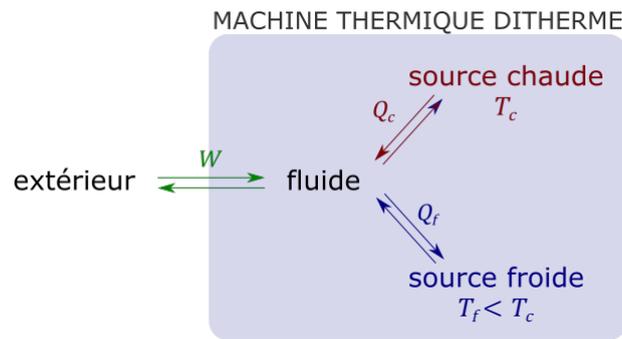
On parle aussi de **thermostat**. Généralement, pour qu'une source soit idéale, il faut qu'elle soit de très grande taille pour que la variation de température soit négligée. Un système en contact avec un thermostat subit une transformation **monotherme**.

Définition – Source réelle : dispositif susceptible d'échanger de l'énergie thermique, ce qui entraîne une variation de sa température.

Par la suite, on ne considère que des sources idéales d'énergie thermique et des machines thermiques **dithermes**, c'est-à-dire possédant deux sources de chaleur, considérées comme des thermostats.

B/ Les différents types de machines thermiques

On peut représenter une machine thermique ditherme par le schéma ci-dessous :



Définition – Moteur thermique : dispositif convertissant de l'énergie thermique en énergie mécanique.

Le fluide reçoit donc un travail négatif de l'extérieur ($W < 0$). On peut représenter le fonctionnement d'un moteur sur un diagramme (P, V) ou (T, S) . Il s'agit d'une courbe fermée circulant dans le sens **horaire**.

Animation – Le moteur de Stirling utilise pour source chaude une flamme et pour source froide l'air ambiant, ce qui permet de mettre en mouvement la turbine et de produire de l'électricité.



Figure 1 – Maquette d'un moteur de Stirling (Source : Wikipédia).

Définition – Récepteur thermique : dispositif convertissant de l'énergie mécanique en énergie thermique.

Le fluide reçoit donc un travail positif ($W > 0$). On peut représenter le fonctionnement d'un récepteur sur un diagramme (P, V) ou (T, S) . Il s'agit d'une courbe fermée circulant dans le sens **trigonométrique**.

C/ Bilans énergétique et entropique

On effectue un bilan d'énergie et d'entropie sur le système {fluide} pendant un cycle thermodynamique (l'état initial est le même que l'état final).

— 1^{er} principe sur un cycle :

$$\Delta U = W + Q_c + Q_f = 0 \quad (1)$$

— 2nd principe sur un cycle :

$$\Delta S = S_e + S_c = 0 \tag{2}$$

avec $S_e = \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f}$ et $S_c \geq 0$. Alors, $S_e = -S_c \leq 0$

Définition – Inégalité de Clausius : $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0$.

Elle est généralisable pour N sources :

$$\sum_{i=1}^N \frac{Q_i}{T_i} \leq 0 \tag{3}$$

Pour une machine monotherme, $\Delta U = 0 = W + Q$. Si $\frac{Q}{T} \leq 0$, $Q_e 0 \Rightarrow W = -Q \Rightarrow W > 0$. Une machine monotherme ne peut fournir un travail.

Définition – Principe de Carnot : pour qu'un cycle thermodynamique produise du travail, ie. pour d'une machine thermique ait un fonctionnement moteur, le fluide doit échanger de la chaleur avec au moins deux sources de chaleur différentes.

Pour déterminer si une machine thermique ditherme peut fonctionner, on regarde le **diagramme de Raveau** :

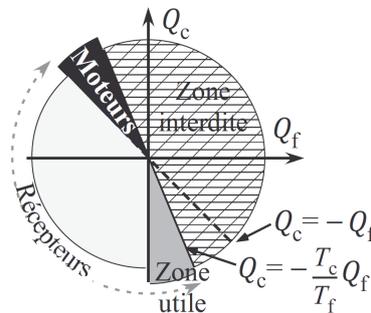


Figure 2 – Diagramme de Raveau (**Source** : Bresson (p. 564)).

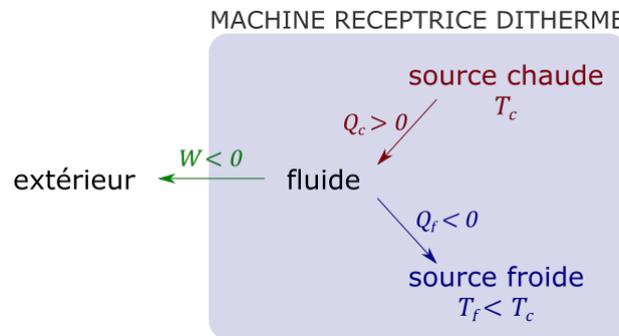
La "zone interdite" correspond à la zone où l'inégalité de Clausius n'est pas satisfaite. La "zone utile" des récepteurs correspond à la zone où la machine thermique reçoit de la chaleur de la source froide ($Q_f > 0$) et fournit un transfert thermique à la source chaude ($Q_c < 0$).

II - Moteurs dithermes

Exemple – Moteur à explosion, moteur de Stirling, machine à vapeur, ...

A/ Présentation des moteurs

Une machine ditherme se trouve dans la **zone moteur** du diagramme de Raveau. Il fournit du travail à l'extérieur et de la chaleur à la source froide, et reçoit de la chaleur de la source chaude. On peut donc le modéliser par le schéma suivant :



On peut comparer des moteurs entre-eux en comparant leurs rendements :

Définition – Rendement : $\eta = \frac{-W}{Q_c} \geq 0$

Un rendement est toujours **inférieur ou égal à 1**.

B/ Cycle de Carnot

Définition – Cycle de Carnot : cycle moteur entièrement réversible ($S_c = 0$).

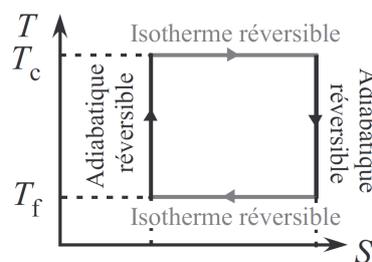


Figure 3 – Diagramme (T, S) pour un cycle de Carnot (**Source** : Bresson (p. 565)).

Le cycle de Carnot correspond au cycle moteur le plus efficace.

On reprend les bilans énergétique et entropique pour ce cycle :

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0 \Rightarrow Q_f = \frac{-Q_c T_f}{T_c} \quad (4)$$

En outre, d'après le 1^{er} principe,

$$W = -Q_c - Q_f \quad (5)$$

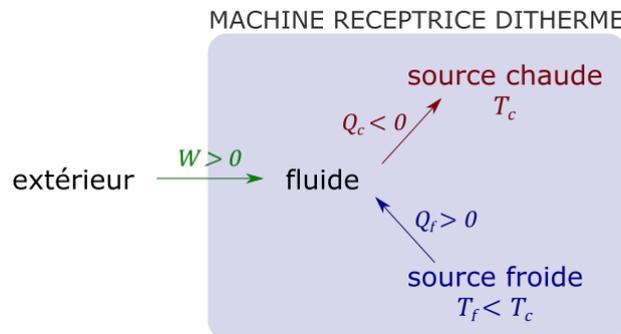
On peut alors exprimer le rendement pour un cycle de Carnot.

Définition – Rendement de Carnot : $\eta_{max} = 1 - \frac{T_f}{T_c} < 1$.

Ordres de grandeur – Pour une voiture fonctionnant avec un moteur à essence, le rendement de Carnot vaut environ 90%, mais le rendement réel est proche de 35%. Les moteurs Diesel sont un peu plus efficace puisque leur rendement vaut environ 45%.

III - Machines réceptrices dithermes

Une machine réceptrice ditherme se trouve dans la **zone utile** du diagramme de Raveau. Elle reçoit du travail de l'extérieur et de la chaleur de la source froide et elle fournit de la chaleur à la source chaude. On peut donc la modéliser par le schéma suivant :



A/ Machine frigorifique

Exemple – Réfrigérateur, climatiseur, ...

Une machine frigorifique permet de refroidir une pièce ou le contenu d'un réfrigérateur, qui jouent le rôle de sources froides, à l'aide d'une source chaude (l'air extérieur) et d'un apport de travail (électricité).

On peut comparer des machines frigorifiques entre elles à l'aide de leurs efficacité :

Définition – Efficacité frigorifique : $e_f = \frac{Q_f}{W} \geq 0$.

A l'aide des bilan énergétique et entropique, on peut déterminer la valeur maximale que peut prendre l'efficacité :

$$e_{f,max} = \frac{T_f}{T_c - T_f} \quad (6)$$

Elle est obtenue pour un cycle réversible ($S_c = 0$), appelé **cycle inverse de Carnot**.

Remarque – L'efficacité, contrairement au rendement, peut être supérieure à 1.

Ordres de grandeur – Pour un réfrigérateur, l'efficacité maximale peut monter jusqu'à 8. Cependant, l'efficacité réelle est plus proche de deux.

L'efficacité maximale d'un congélateur est moins élevée (autour de 5,2) car la température de sa source froide est bien plus faible que celle de sa source chaude, par rapport au réfrigérateur.

B/ Pompe à chaleur

Une pompe à chaleur permet de réchauffer une pièce, qui joue le rôle de source chaude, à l'aide d'une source froide (l'air extérieur) et d'un apport de travail (électricité).

On peut comparer des machines frigorifiques entre elles à l'aide de leurs efficacité :

Définition – Efficacité thermique : $e_c = \frac{-Q_c}{W} \geq 0$.

Dans le cas d'un cycle réversible, ou cycle inverse de Carnot, on peut définir l'efficacité maximale :

$$e_{c,max} = \frac{T_c}{T_c - T_f} \quad (7)$$

L'efficacité diminue si la différence de température entre les sources chaude et froide augmente.

Conclusion

Les machines thermiques permettent de convertir de l'énergie thermique en énergie mécanique (moteur) ou de l'énergie mécanique en énergie thermique (récepteur). On s'est focalisé dans ce cours sur l'étude des machines dithermes qui peut être rationalisée par le diagramme de Raveau.

Pour comparer des machines thermiques, on peut utiliser le rendement (pour les moteurs) ou l'efficacité (pour les récepteurs). Ils s'expriment comme la valeur absolue du rapport de la quantité désirée sur la quantité fournie. Ils sont toujours inférieurs aux rendement ou efficacité définis pour un cycle réversible, appelé cycle de Carnot.