Chapitre 21

Machines thermiques

Dans ce chapitre, nous allons appliquer les principes de la thermodynamique aux machines thermiques. Une machine thermique décrit n'importe quel système thermodynamique qui subit une transformation cyclique en échangeant du travail et de la chaleur avec le milieu extérieur.

1 Exemples de machines thermiques

1.a Le moteur à vapeur

Un moteur à vapeur est une machine qui a pour objectif de convertir une énergie thermique produite dans une chaudière en travail. Le travail fourni pouvait servir autrefois à faire avancer des trains, aujourd'hui il sert principalement à produire de l'électricité.

Le principe de fonctionnement est le suivant :

— De l'eau liquide est chauffée dans la chaudière pour produire de la vapeur sous pression ;

— la vapeur produite fait tourner une turbine qui fournit au milieu extérieur (générateur électrique) un travail mécanique ;

— la vapeur est liquéfiée dans un condenseur ;

— l'eau liquide est renvoyée vers la chaudière pour démarrer un nouveau cycle.

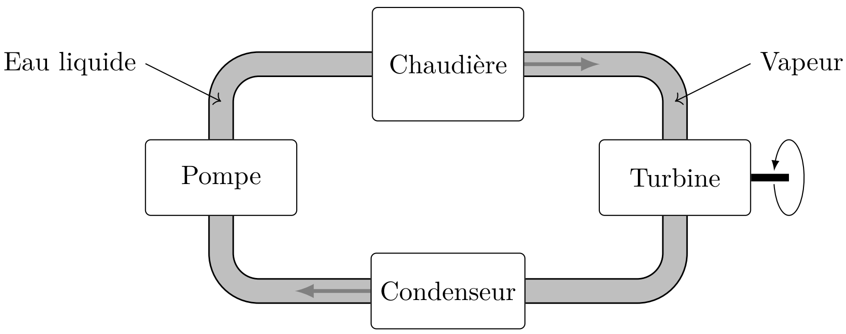

Figure 21.1 – Principe d'un moteur à vapeur

Nous modéliserons le système de la manière suivante :

— Le système thermodynamique Σ est une mass m d'eau ;

— La chaudière est la **source chaude** à la température T_c qui fournit une quantité de chaleur $Q_c > 0$ au système ;

— Le condenseur est la **source froide** à la température T_f qui fournit une quantité de chaleur $Q_f < 0$ au système ;

— La pompe fournit un travail $W_p > 0$ au système ;

— La turbine fournit un travail $W_t < 0$ au système (c'est le système qui lui fournit du travail).

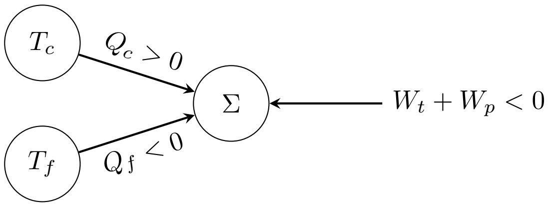

Figure 21.2 – Modélisation de la machine à vapeur

La machine à vapeur est un **moteur ditherme**, c'est un moteur (fournit du travail au milieu extérieur) qui fonctionne en échangeant de la chaleur avec deux thermostats.

1.b Le réfrigérateur

Un réfrigérateur est une machine dont l'objectif est de refroidir. En pratique, on procède de la manière suivante :

- Un **compresseur** comprime un fluide sous forme de gaz, lors de la compression, le gaz s'échauffe au dessus de la température ambiante ;
- le gaz chauffe circule dans un **condenseur** extérieur où il se refroidit et finit liquéfié à température ambiante ;
- le liquide passe à travers un **détendeur** qui diminue sa pression, ce qui a pour effet de le refroidir ;
- le liquide froid circule dans **l'évaporateur** situé à l'intérieur du frigo. Il se réchauffe et se transforme à nouveau en gaz avant de retourner dans le compresseur.

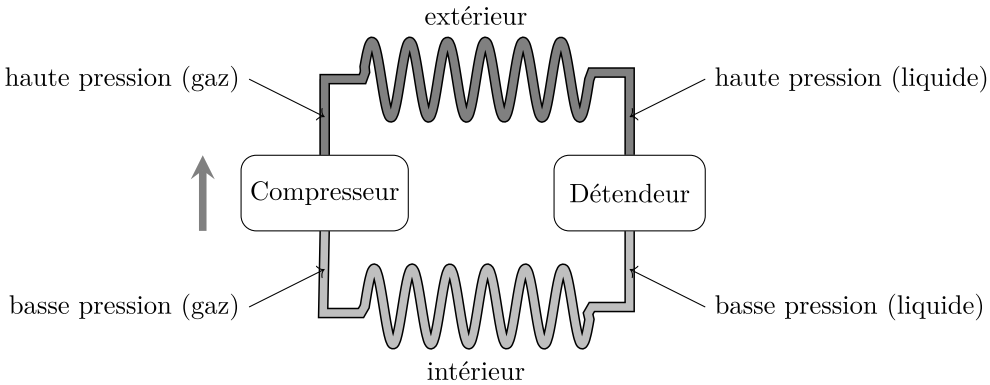

FIGURE 21.3 – Principe de fonctionnement d'un réfrigérateur.

Nous modéliserons le système de la manière suivante :

- Le système thermodynamique étudié est une masse m de fluide frigorifique ;
- le milieu extérieur est une source chaude à la température T_c qui fournit une chaleur $Q_c < 0$ au système (c'est le fluide qui réchauffe l'extérieur) ;
- le milieu intérieur est une source froide à la température T_f qui fournit une chaleur $Q_f > 0$ au système ;
- le compresseur fournit un travail $W > 0$ au système.

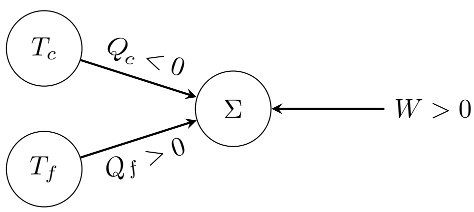

FIGURE 21.4 – Modélisation du réfrigérateur.

C'est un **récepteur ditherme**, il reçoit du travail du milieu extérieur et échange de la chaleur avec deux thermostats.

2 Résultats théoriques, théorème de Carnot

2.a Moteur ditherme

On étudie le moteur ditherme suivant sur un cycle. L'état final du système Σ est identique à son état initial.

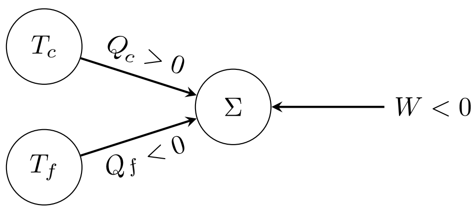

FIGURE 21.5 – Moteur ditherme.

Nous allons chercher à déterminer le rendement η de ce moteur, défini comme

$$\eta = \frac{\text{travail fourni}}{\text{énergie consommée}} = \frac{-W}{Q_c} \tag{21.1}$$

L'énergie consommée est Q_c car dans un moteur ditherme c'est toujours l'énergie prise à la source chaude qui *coûte*, elle coûte par exemple du charbon pour faire avancer une locomotive, de l'uranium pour faire fonctionner une centrale nucléaire...

L'application du premier principe sur un cycle donne

$$\Delta U = 0 = W + Q = W + Q_c + Q_f \tag{21.2}$$

L'application du second principe sur un cycle donne

$$\Delta S = 0 = S_{\text{créée}} + S_{\text{éch.}} = \underbrace{S_{\text{créée}}}_{\geq 0} + \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \geq \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \tag{21.3}$$

On en déduit l'inégalité de Clausius :

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \tag{21.4}$$

Il y a égalité dans le cas d'une transformation réversible. On peut donc écrire le rendement du moteur comme

$$\eta = \frac{-W}{Q_c} = \frac{Q_c + Q_f}{Q_c} = 1 + \frac{Q_f}{Q_c} \tag{21.5}$$

Or,

$$\frac{Q_f}{T_f} \leq \frac{Q_c}{T_c} \quad \Leftrightarrow \quad \frac{Q_f}{Q_c} \leq \frac{-T_f}{T_c} \tag{21.6}$$

Et on en déduit le théorème de Carnot qui donne le rendement théorique maximum pour un moteur ditherme

Théorème de Carnot

Le rendement maximum d'un moteur ditherme est

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_f}{T_c}\,, \tag{21.7}$$

et il est atteint lorsque les transformations sont réversibles.

On en déduit que tous les moteurs dithermes réversibles ont exactement le même rendement.

Application

Dans une centrale nucléaire, le générateur de vapeur a une température $T_c = 300\,°\mathrm{C}$, la source froide est à la température $T_f = 25\,°\mathrm{C}$. D'après le théorème de Carnot, le rendement maximum de la centrale est

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{T_f}{T_c} \approx 49\,\% \tag{21.8}$$

En pratique, les centrales nucléaires ont un rendement de l'ordre de 30 %

Le rendement d'un moteur à essence est de l'ordre de 30 % et le rendement d'un moteur diesel de l'ordre de 50 %.

2.b Réfrigérateur

La modélisation du frigo est la même que celle du moteur ditherme, seuls les signes des échanges d'énergie changent.

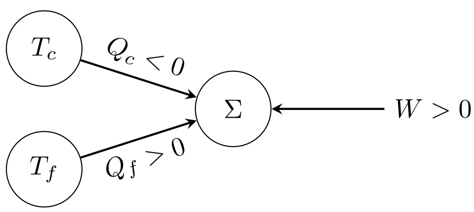

FIGURE 21.6 – Modélisation du réfrigérateur.

Cette fois, on définit l' **efficacité** du frigo comme
$$e = \frac{Q_f}{W} \tag{21.9}$$
L'application du premier principe donne comme dans le cas précédent
$$\Delta U = 0 = W + Q_c + Q_f \Leftrightarrow W = -(Q_c + Q_f)\,. \tag{21.10}$$
Le second principe donne à nouveau l'inégalité de Clausius
$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} \leq 0 \tag{21.11}$$
donc
$$e = -\frac{Q_f}{Q_c + Q_f} = -\frac{1}{1 + \frac{Q_c}{Q_f}} \tag{21.12}$$
or
$$\frac{Q_c}{T_c} \leq -\frac{Q_f}{T_f} \Leftrightarrow \frac{Q_c}{Q_f} \leq -\frac{T_c}{T_f} \Leftrightarrow \frac{T_c}{T_f} - 1 \leq -1 - \frac{Q_c}{Q_f} \tag{21.13}$$
et on en déduit finalement que
$$\boxed{\eta \leq \frac{1}{\frac{T_c}{T_f} - 1}} \tag{21.14}$$
Et à nouveau, l'efficacité maximum est atteinte lorsque le frigo fonctionne de manière réversible.

Pour un frigo réel, avec $T_c = 20\,°\mathrm{C}$ et $T_f = 0\,°\mathrm{C}$, on trouve $e_{\max} \approx 14$. En pratique, l'efficacité d'un frigo réel est de l'ordre de 3.