

## MACHINES THERMIQUES

### Introduction

Les machines thermiques fonctionnent généralement grâce à un fluide auquel on fait subir des transformations cycliques au cours desquelles il y a échange d'énergie avec le milieu extérieur: le système reçoit (algébriquement) du travail et de la chaleur.

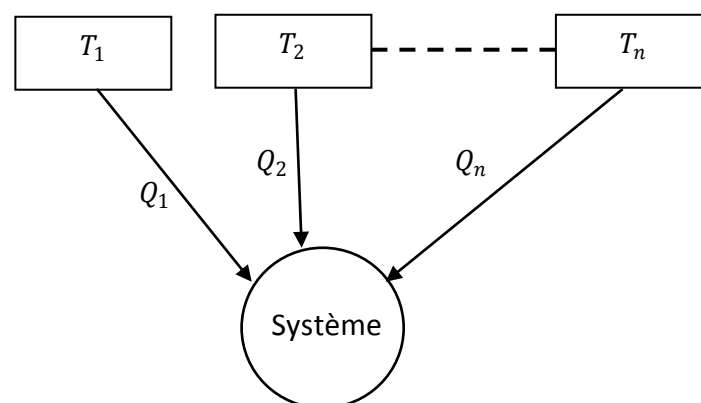
Les machines thermiques permettent de produire du froid (réfrigérateur), du chaud (pompe à chaleur) ou du travail (moteur thermique) à partir de sources de chaleur uniquement (c'est l'application du 1er principe de la thermodynamique).

Le premier but est alors de fournir du travail au milieu extérieur ( $W < 0$ ) et de comprendre comment optimiser cette production. D'autres dispositifs, comme les réfrigérateurs ou les pompes à chaleur, fonctionnent comme des récepteurs et consomment du travail ( $W > 0$ ). Les machines thermiques sont ainsi caractérisées par leur rendement ou leur efficacité selon que l'on considère un moteur ou un réfrigérateur ou une pompe à chaleur en fonction du cycle qu'elles décrivent. En pratique, le fonctionnement de ces systèmes repose sur le contrôle des échanges de chaleur avec une ou plusieurs (souvent deux) sources. On doit donc faire appel à l'étude des transformations monothermes, puis dithermes, en s'intéressant plus particulièrement à des transformations cycliques (qui permettent à la machine de fonctionner plusieurs fois). On distingue trois types de machines thermiques:

- Moteur
- Réfrigérateur, climatiseur
- Pompe à chaleur

### 1. Inégalité de Clausius

Prenons un système qui est en contact avec plusieurs sources de chaleurs  $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$  à la température  $T_1, T_2, \dots, T_n$  (un cycle polythermes).



L'inégalité de Clausius s'écrit

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

**Remarque;** dans le cas d'un cycle réversible, cette inégalité devient une égalité

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} = 0$$

### 1.1. Cas d'un cycle monotherme

Le schéma de l'expérience est ci-contre:

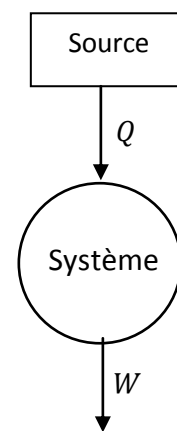
On note  $W$  et  $Q$ , le travail et la chaleur reçus par le système (ces quantités sont algébriques).  $T_s$  est la température de la source.

Le premier principe s'écrit:

$$\begin{aligned} \Delta U &= Q + W = 0 \text{ (car c'est un cycle)} \\ Q &= -W \end{aligned}$$

L'inégalité de Clausius ;  $\frac{Q}{T_s} \leq 0 \Rightarrow Q \leq 0 \Rightarrow W > 0$

Donc une machine qui décrit un cycle monotherme ne peut jamais fournir du travail (réceptrice)



### 1.2. Cas d'un cycle ditherme

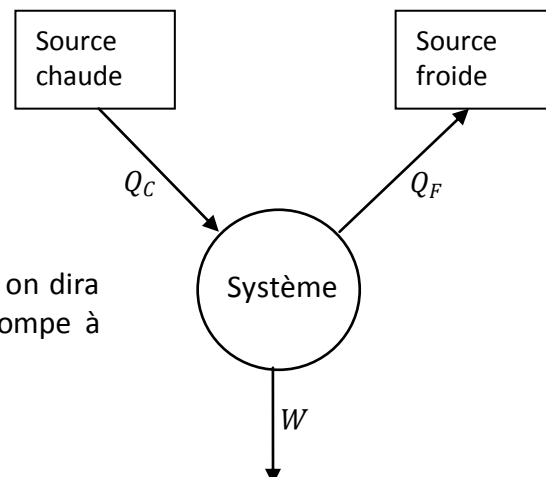
Supposons que le système est successivement en contact avec deux sources de chaleur.  $Q_c$  est la quantité de chaleur de la source chaude échangée avec le système à une température  $T_c$  et  $Q_F$  est la quantité de chaleur de la source froide échangée avec le système à une température  $T_F$ .

Le premier principe s'écrit

$$\Delta U = W + Q_c + Q_F = 0 \text{ (car c'est un cycle)}$$

L'inégalité de Clausius ;  $\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_F}{T_F} \leq 0$

**Note importante;** selon le signe de  $W$ ,  $Q_c$  et  $Q_F$ , on dira s'il s'agit d'un moteur, réfrigérateur ou d'une pompe à chaleur.

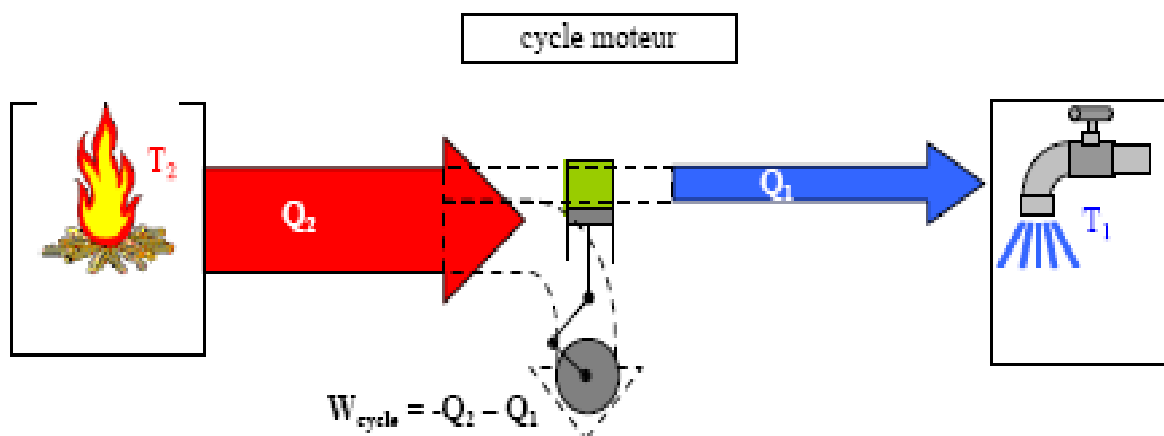
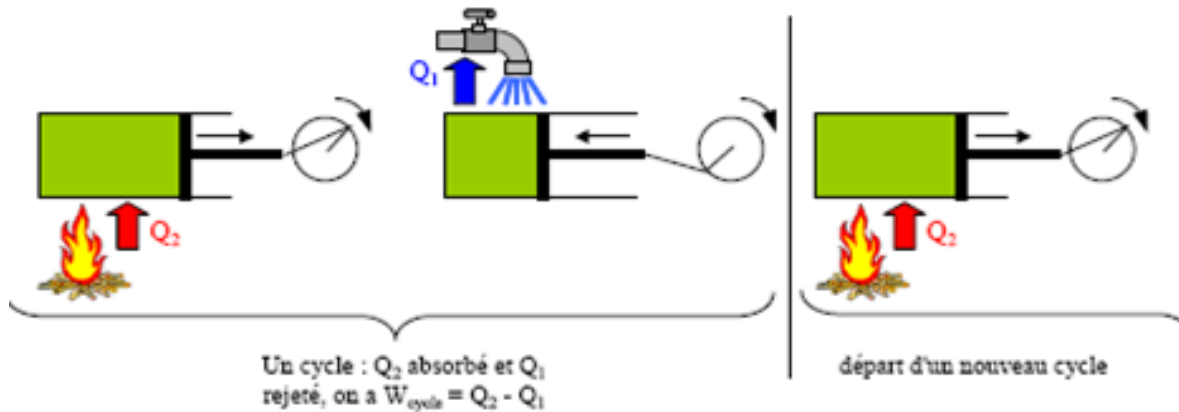


## 2. Moteurs thermiques dithermes

Pour un moteur: le fluide fournit du travail à l'extérieur en recevant une quantité de chaleur de la source chaude et en donnant une quantité de chaleur à la source froide.

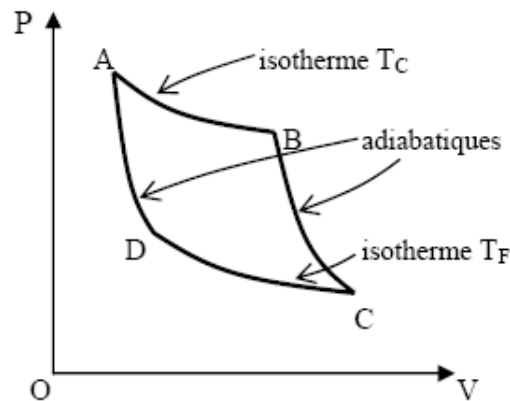
$$\text{On a donc } W < 0 \quad Q_C > 0 \quad Q_F < 0$$

Machines thermiques : cycliques pour qu'elles fonctionnent en continu : la rotation continue d'un moteur thermique en est un exemple concret



### a- Moteur réversible en contact avec 2 sources: cycle de Carnot.

Le seul cycle ditherme réversible possible est le cycle composé de 2 isothermes et de 2 adiabatiques (qui permettent, sans contact avec les sources, de passer de l'isotherme chaude  $T_C$  à l'isotherme froide  $T_F$ ): ce cycle est appelé cycle de Carnot. Les chaleurs échangées lors du cycle  $Q_C$  et  $Q_F$  sont alors forcément échangées sur les isothermes puisque les adiabatiques n'échangent pas de chaleur avec les sources (par définition d'une adiabatique).



- **Le rendement du moteur réversible en contact avec 2 sources (Carnot)**

Le rendement représente le rapport entre l'énergie fournie et l'énergie utilisée.

Le moteur fourni du travail et utilise une quantité de chaleur chaude, donc le rendement s'écrit;

$$\rho = \frac{|W|}{Q_c}$$

Le premier principe s'écrit

$$\Delta U = W + Q_c + Q_f = 0 \text{ donc } W = -Q_c - Q_f$$

$$\rho = 1 + \frac{Q_f}{Q_c}$$

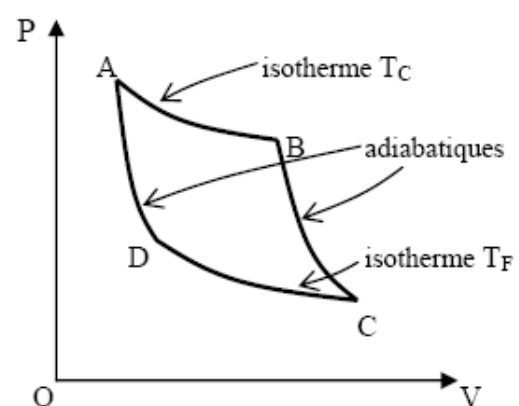
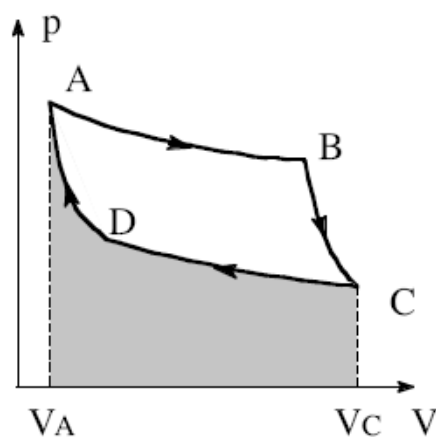
Puisque le cycle est réversible, alors l'égalité de Clausius s'écrit

$$\frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = 0 \Rightarrow \frac{Q_c}{Q_f} = -\frac{T_c}{T_f}$$

Donc

$$\rho = 1 - \frac{T_f}{T_c}$$

- **Bilan pour le cycle de Carnot, cas d'un gaz parfait:**



$$Q_{AB} = nRT_C \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$$

$$Q_{CD} = nRT_F \ln\left(\frac{V_D}{V_C}\right)$$

$$V_C^{\gamma-1} T_F = V_B^{\gamma-1} T_C$$

$$V_D^{\gamma-1} T_F = V_A^{\gamma-1} T_C$$

$$\frac{V_C}{V_D} = \frac{V_B}{V_A}$$

$$Q_{CD} = -nRT_F \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$$

$$W = -Q_{AB} - Q_{CD} = -nR(T_C - T_F) \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right) < 0$$

### b- Réfrigérateurs

Le fluide reçoit du travail (souvent sous forme électrique) et retire, par l'intermédiaire du fluide, de la chaleur à la source froide (air intérieur de l'enceinte frigorifique) soit pour abaisser sa température, soit pour la maintenir à une température inférieure à la température ambiante.

On a donc:

$$W > 0, Q_c < 0, Q_f > 0.$$

- **Efficacité**

Il est noté  $e$  et est égal au rapport de la quantité de chaleur retirée à la source froide au travail consommé par le fluide

$$e = \frac{\text{ce qu'on veut}}{\text{ce qu'on dépense pour l'obtenir}}$$

$$e = \frac{Q_F}{W}$$

$$W = -Q_c - Q_F$$

$$e = -\frac{Q_F}{Q_c + Q_F}$$

S'il s'agit d'une machine frigorifique décrivant un cycle de Carnot, on aura;

$$e_c = \frac{T_F}{T_c + T_F}$$

### c- Pompe à chaleur

Le principe est simple : absorber de l'énergie thermique (chaleur) de l'extérieur de la maison pour la rejeter à l'intérieur de la maison (d'où son nom). Il s'agit donc simplement d'un réfrigérateur ouvert sur l'extérieur et dont la grille arrière est placée dans notre

appartement. La pompe à chaleur absorbe donc la chaleur  $Q_F$  de l'extérieur et c'est la grille chaude du réfrigérateur qui chauffe la pièce. Dans ce cas c'est la chaleur  $Q_C$  restituée à l'air ambiant qui nous intéresse.

On a donc:

$$W > 0 \quad Q_C < 0 \quad Q_F > 0.$$

- **Efficacité**

Représente le rapport de la quantité de chaleur fournie à la source chaude sur le travail consommé par le fluide. Dans ce cas c'est la chaleur  $Q_C$  restituée à l'air ambiant qui nous intéresse.

$$e = \frac{|Q_C|}{W}$$
$$W = -Q_C - Q_F$$

$$e = -\frac{Q_C}{Q_C + Q_F}$$

L'efficacité de Carnot :

$$e_c = \frac{T_C}{T_C - T_F}$$

**Remarque;** les appareils frigorifiques et les pompes à chaleur ne se différencient que par le but recherché. Une climatisation fonctionne en appareil frigorifique et en pompe à chaleur.