



# *Notions sur les machines thermiques*

- **Les machines thermiques** sont des appareils qui transforment la chaleur en travail (moteur thermique, centrale thermique,...) ou inversement le travail en chaleur (climatiseur, réfrigérateur...).

- **Cycle thermodynamique**

Les machines thermiques fonctionnent suivant un cycle. Ainsi ces machines font intervenir un fluide moteur qui décrit un cycle qu'on désigne par cycle thermodynamique.

# *Exemples de cycles thermodynamiques*

- **Réfrigérateur** : Le fluide moteur (**fréon**) décrit un cycle où il passe de l'état liquide à l'état gazeux.
- **Moteur à essence à 4 temps** : Le fluide moteur (**air + essence**) décrit un cycle ouvert.
- **Centrale thermique à vapeur d'eau** : Le fluide moteur (**eau**) décrit un cycle où il passe de l'état liquide (condenseur) à l'état gazeux (chaudière).

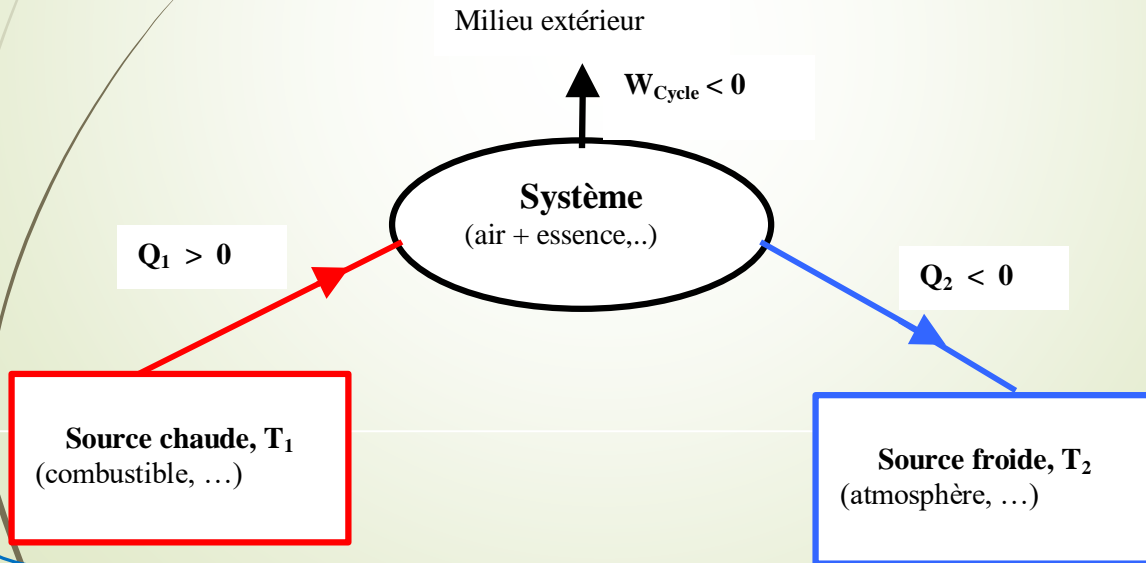
# *Éléments physiques d'un cycle*

1. **Fluide moteur** : Fluide où est emmagasinée ou d'où est extraite la chaleur. **Exemples** : “*Fréon*” dans un réfrigérateur, “*essence+air*” dans un moteur à essence à 4 temps.
2. **Source de chaleur chaude** : Source de chaleur dont la température est la plus élevée et à laquelle le fluide moteur fournit ou extrait de la chaleur.
3. **Source de chaleur froide** : Source de chaleur dont la température est la plus basse et à laquelle le fluide moteur fournit ou extrait de la chaleur.
4. **Engin** : Appareil où le fluide moteur subit ou fait un travail.  
**Exemples** : “compresseur” dans un réfrigérateur, “cylindres” dans un moteur à essence à 4 temps.

# Différents types de machines thermiques

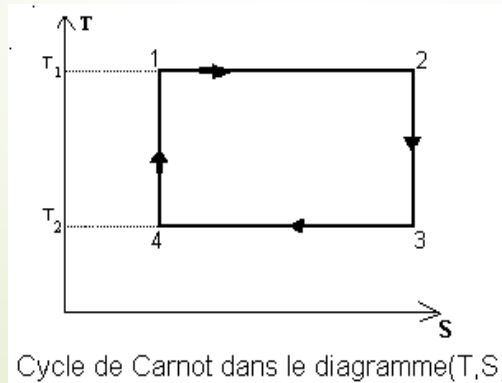
## Moteur thermique

C'est une machine thermique qui fonctionne suivant un cycle moteur (fermé ou ouvert) tel que :  $W_{cycle} < 0$ ,  $Q_1 > 0$  et  $Q_2 < 0$ . Le schéma de principe d'un moteur thermique est le suivant:



# *Différents types de machines thermiques*

Le moteur thermique reçoit ainsi la chaleur  $Q_1$  de la source chaude. Il en fournit une quantité  $Q_2$  à la source froide et avec la différence il produit du travail mécanique  $W_{\text{cycle}}$ . Dans un moteur thermique la source chaude est un combustible (essence, gazoil, kérosène...) dont la combustion fournit la chaleur  $Q_1$  au fluide moteur (air). La source froide est l'air de l'atmosphère auquel les gaz d'échappement fournissent la chaleur  $Q_2$ .



## *Différents types de machines thermiques*

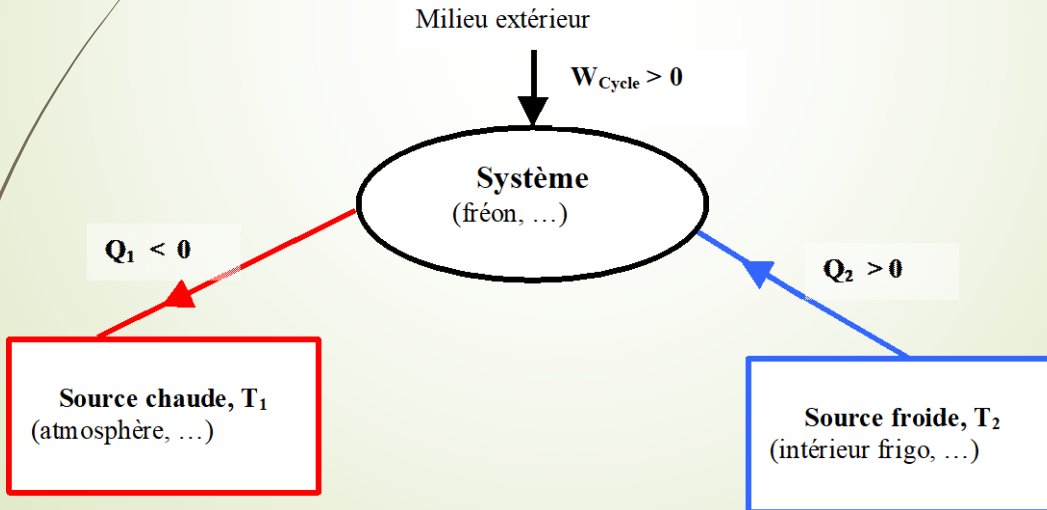
L'intérêt de ce diagramme réside dans le fait suivant :  
l'aire du cycle est égale à la chaleur  $Q_{\text{cycle}}$  convertie en travail. On peut établir aisément que :

$$Q_{\text{cycle}} = -W_{\text{cycle}} = |Q_1| - |Q_2| = (T_1 - T_2) \Delta S_{12}$$

# *Différents types de machines thermiques*

## **Machine frigorifique**

C'est une machine qui fonctionne suivant un cycle récepteur tel que :  $W_{\text{cycle}} > 0$ ,  $Q_1 < 0$  et  $Q_2 > 0$ . Le schéma de principe du fonctionnement d'une machine frigorifique est le suivant :

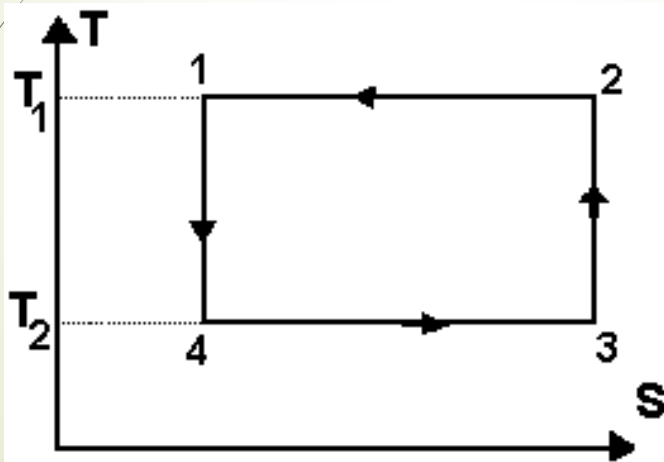




## *Différents types de machines thermiques*

La machine frigorifique, reçoit ainsi du travail  $W_{\text{cycle}}$  pour extraire la chaleur  $Q_2$  de la source froide et fournir  $Q_1$  à la source chaude. Le cycle d'une machine frigorifique est appelé **cycle récepteur**.

Représentation dans un diagramme (T,S) ou entropique :



Cycle de Clapeyron récepteur  
dans le diagramme (T,S)

## *Différents types de machines thermiques*

L'aire du cycle représente la valeur absolue de la chaleur obtenue par une conversion du travail en chaleur. On montre de même que

$$Q_{cycle} = -W_{cycle} = |Q_1| - |Q_2| = (T_1 - T_2)\Delta S_{12}$$

Une machine frigorifique peut servir :

- Soit à refroidir un local (dans ce cas c'est un **réfrigérateur** ou **un climatiseur**),
- Soit à chauffer un local (dans ce cas elle est appelée **thermopompe** ou **pompe à chaleur**).

# *Rendement*

Il s'agit du **rendement thermodynamique** encore appelé **rendement thermique**, qui peut être défini pour une machine thermique quelconque. Nous considérons alors la définition plus générale suivante :

$$\eta = \frac{\textit{énergie recherchée}}{\textit{énergie payée}}$$

## *Rendement d'une machine thermique*

**Moteur thermique** : C'est une machine thermique qui sert à transformer la chaleur provenant de la combustion d'un carburant  $Q_1$  en travail  $W$ . Donc l'énergie recherchée est  $W$  et l'énergie à payer est  $Q_1$ . Le rendement thermique d'un moteur thermique est donc :

$$\eta_{\text{moteur}} = \frac{-W}{Q_1}$$

On met un signe moins car  $W < 0$ ,  $Q_1 > 0$  et  $\eta > 0$ .

## *Rendement d'un Réfrigérateur ou climatiseur*

Ce sont des machines thermiques qui servent à extraire de la chaleur  $Q_2$  de l'intérieur du réfrigérateur ou du local à climatiser, qui est la source froide, et pour cela il faut fournir un travail  $W$  au fluide moteur.

Donc, l'énergie recherchée est  $Q_2$  et l'énergie à payer est  $W$ . Le rendement de ces machines s'exprime donc par le rapport suivant appelé **coefficient de performance ou efficacité** :

$$\beta_{\text{réfrigérateur}} = \frac{Q_2}{W}$$

## *Rende.. d'une Pompe à chaleur ou thermopompe*

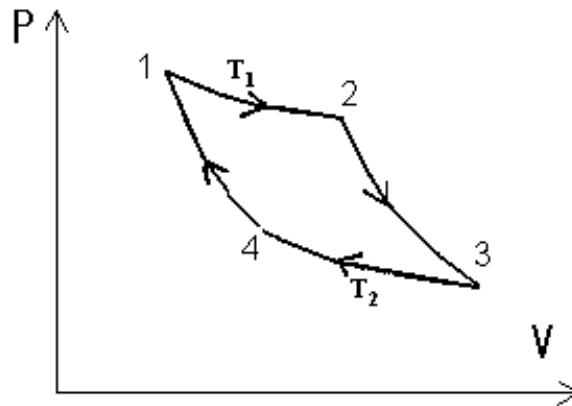
C'est une machine thermique qui sert à chauffer un local en lui fournissant la chaleur  $Q_1$ . Pour cela, le fluide moteur doit recevoir un travail  $W$ . Donc, l'énergie recherchée est  $Q_1$  et l'énergie à payer est  $W$ . Le rendement thermique d'une thermopompe s'exprime donc par le rapport suivant appelé coefficient de performance ou efficacité:

$$\beta_{thermo-pompe} = \frac{-Q_1}{W}$$

On met un signe moins car  $W > 0$ ,  $Q_1 < 0$  et  $\beta > 0$

# *Machine thermique de Carnot*

La machine thermique de Carnot fonctionne selon le cycle de Carnot. C'est un cycle réversible ditherme qui nécessite deux sources de chaleur et qui est constitué de deux isothermes et deux adiabatiques réversibles. La figure ci-dessous est une représentation du cycle de Carnot moteur.



Cycle moteur dans un diagramme de Clapeyron

## *Rendement thermique de la machine de Carnot*

- Le cycle de Carnot représenté est un cycle moteur car il est décrit dans le sens horaire. En effet, le travail d'un cycle est égal à l'aire de ce cycle représenté dans le diagramme de Clapeyron précédée d'un signe moins :
- $W_{cycle} = - \text{aire du cycle dans (P,V)}$ , car  $W_{cycle} < 0$ .
- La machine thermique décrivant ce cycle fournit donc du travail au milieu extérieur. C'est donc un moteur thermique. On a vu en effet, sur le premier principe le lien entre le sens dans lequel est décrit le cycle et le signe du travail effectué au cours de cycle.



# *Rendement thermique de la machine de Carnot*

Le cycle d'un moteur thermique est décrit dans le sens horaire dans le diagramme (P,V). On l'appelle **cycle moteur**. Le cycle d'une machine frigorifique est décrit dans le sens anti-horaire dans le diagramme (P,V). On l'appelle **cycle récepteur**.

Le rendement thermique du cycle de Carnot moteur est par définition:

$$\eta_{\text{moteur}} = \frac{-W_{\text{cycle}}}{Q_1}$$

Le premier principe s'écrit :  $\Delta U_{\text{cycle}} = W_{\text{cycle}} + Q_1 + Q_2 = 0$

d'où,

$$W_{\text{cycle}} = -Q_1 - Q_2$$

soit :

$$\eta_{\text{moteur}} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

# *Rendement thermique de la machine de Carnot*

Le deuxième principe s'écrit, puisque le cycle de Carnot est réversible et que le fluide moteur n'échange de chaleur qu'avec la source chaude à  $T_1$  et la source froide à  $T_2$  :

$$\Delta S_{\text{cycle}} = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = - \frac{T_2}{T_1}$$

$$\eta_{\text{Carnot moteur}} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

On remarque que le rendement thermique du cycle de Carnot ne dépend que des températures des deux sources et qu'il est indépendant de la nature du fluide moteur.

# *Théorème de Carnot*

“Le rendement d’une machine thermique opérant entre deux sources de chaleur suivant le cycle de Carnot est supérieur au rendement de toute autre machine thermique opérant entre les mêmes sources”.

Considérons un moteur thermique ditherme réel fonctionnant avec une source de chaleur chaude, de température  $T_1$ , et une source de chaleur froide, de température  $T_2$ . Pour ce moteur, l’inégalité de Clausius s’écrit :

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} < 0$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} < -\frac{T_2}{T_1}$$

# Théorème de Carnot

Le rendement de ce moteur thermique réel est par définition :

$$\eta' = \frac{-W_{\text{Cycle}}}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

$$\eta' = 1 + \frac{Q_2}{Q_1} < 1 - \frac{T_2}{T_1} = \eta_{\text{Carnot moteur}}$$

Le rendement de Carnot constitue ainsi le rendement maximum que l'on peut espérer obtenir d'un moteur thermique fonctionnant entre deux sources de chaleur.

## Aspects pratiques du cycle de Carnot

Le cycle de Carnot ne peut servir pour réaliser une machine thermique réelle. En effet, l'échange de chaleur pendant la détente et la compression isothermes constitue un problème pratique. Un tel échange réversible, et qui dure donc un temps très long, est impossible à tenter dans une machine réelle fonctionnant à une vitesse raisonnable.