

# CM – Thermodynamique et Transferts Thermiques

## Chapitre 6 – Machines thermiques



### **I- Introduction :**

Durant l'Histoire de l'être humain, différents types de machines ont pu être construites et utilisées. Les premières utilisaient la force animale pour fonctionner et étaient directes. Par la suite, des outils et des machines mécaniques ont vu le jour et, à un certain temps, la chaleur a été utilisée pour animer ces différents objets.

La machine à vapeur a vu le jour au XIX<sup>ème</sup> siècle et son utilisation était aussi pratique que diverse (extraction de minerai, pompage d'eau, transport, fabrication, etc...). Ensuite vient la découverte du pétrole qui a permis d'obtenir, à suite d'évolutions, les véhicules modernes. Celle du transistor a permis de créer des machines informatiques de plus en plus complexes. Pour finir, celle de l'uranium a permis de créer les centrales nucléaires permettant de générer le plus d'électricité actuellement.

## **II- Généralités sur les machines thermiques :**

### **1) Définition :**

Une machine thermique est un système thermodynamique qui fonctionne généralement en suivant un cycle et qui échange de la chaleur et du travail avec le milieu extérieur. Il est souvent alimenté par des réservoirs de chaleur (ou « thermostats ») et des réservoirs de travail (ou « pressostats »).

Plusieurs types de machines existent : celles qui fournissent un travail, aussi appelées « moteurs », et celles permettant d'extraire de la chaleur d'une source froide vers une source chaude, aussi appelées « systèmes réfrigérants » (comme les réfrigérateurs et les pompes à chaleur).

Le système est souvent un gaz ou un fluide circulant dans ces machines, connecté aux thermostats et pressostats. Pour fonctionner, une machine thermique doit vérifier les deux premiers principes de la Thermodynamique ( $\Delta U = W + Q$  et  $\Delta S_{total} \geq 0$ ).

### **2) Inégalité de Clausius pour les machines thermiques :**

La variation totale d'entropie  $\Delta S_{total}$  d'une machine thermique vaut la somme des variations d'entropie du système  $\Delta S_{système}$ , de ses thermostats  $\Delta S_{therm}$  et de ses pressostats  $\Delta S_{press}$ . Cela permet d'écrire à partir du Second principe de la Thermodynamique :

$$\Delta S_{total} = \Delta S_{système} + \sum_{i=1}^n \Delta S_{therm,i} + \sum_{i=1}^n \Delta S_{press,i} \geq 0$$
$$\Leftrightarrow \Delta S_{système} - \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \geq 0$$

$$\Leftrightarrow \Delta S_{\text{systeme}} \geq \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i}$$

Dans le cas d'un cycle, on part d'un état initial pour revenir à ce même état à la fin de la transformation, donc la variation d'entropie du système est nulle ( $\Delta S_{\text{systeme}} = 0$ ) et cela permet d'écrire :

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

On retombe sur l'inégalité de Clausius. Il faut donc qu'une machine thermique la vérifie aussi pour pouvoir fonctionner.

### **III- Second principe et machines thermiques :**

#### **1) Énoncé de Kelvin :**

On considère un système thermodynamique relié à une source de chaleur qui lui en donne afin de fournir un travail à un réservoir mécanique. L'énoncé de Kelvin exprime qu'une machine ne peut pas produire de travail, donc être un moteur, en ne recevant de la chaleur provenant que d'une seule source. On dit aussi qu'il n'existe pas de moteur « monotherme ». C'est l'énoncé de Kelvin.

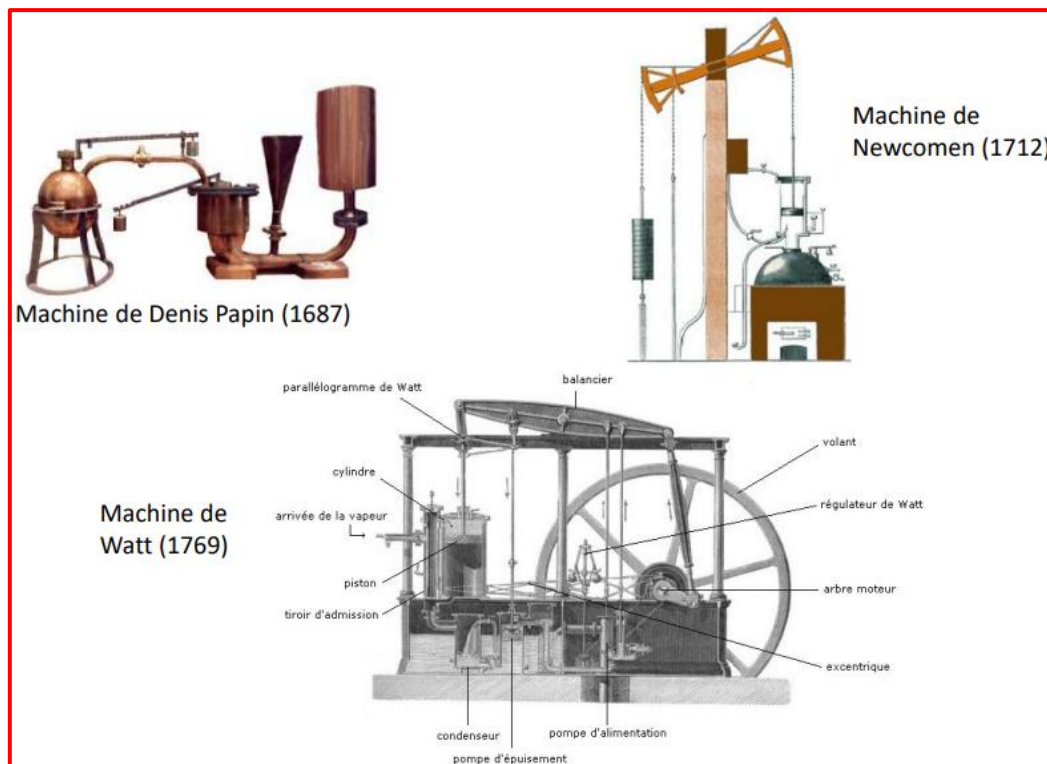
#### **2) Énoncé de Clausius :**

On considère un système thermodynamique relié à deux sources de chaleur, une chaude et une froide. Dans le cas classique, du fait du Principe zéro de la Thermodynamique, la source chaude va donner de la chaleur au système, puis à la source froide, ce qui résulte en l'inutilité du système puisque cela se serait produit sans intermédiaire. De même, il est impossible de donner de la chaleur de la source froide à la source chaude. C'est l'énoncé de Clausius.

## IV- Proposition de Carnot – Les machines thermiques :

### 1) Petit retour au XVII<sup>ème</sup>, XVIII<sup>ème</sup> et XIX<sup>ème</sup> siècle :

Différentes machines furent créées afin d'utiliser la puissance de la chaleur pour créer un travail, comme celles de Denis Papin (1647 – 1713), de Thomas Newcomen (1663 – 1729) ou de James Watt.



**Figure 1 - Différentes machines thermiques**

Cependant, c'est Sadi Carnot dans son ouvrage *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* de 1824 qu'il expliquera qu'une machine thermique doit comporter deux sources de chaleur, une chaude et une froide. Il écrira : « *La production de la puissance motrice est donc due, dans les machines à vapeur, non à une consommation réelle du calorique, mais à son transport d'un corps chaud à un corps froid, c'est-à-dire à son rétablissement d'équilibre, équilibre supposé rompu par quelque cause que ce soit, par une action chimique, telle que la combustion, ou par tout autre. [...] D'après ce principe, il ne suffit pas, pour donner naissance à la puissance motrice, de produire de la chaleur : il faut encore se procurer du froid ; sans lui la chaleur serait inutile.* ».

## 2) Les moteurs dithermes :

On considère un système thermodynamique relié à deux sources de chaleur, une chaude de température  $T_1$  et une froide de température  $T_2$ , les deux échangeant une chaleur  $Q_1$  positive et  $Q_2$  négative avec le système, ce dernier aussi relié à une source de travail  $W$ . Le but est de fournir du travail à la source correspondante ( $W < 0$ ).

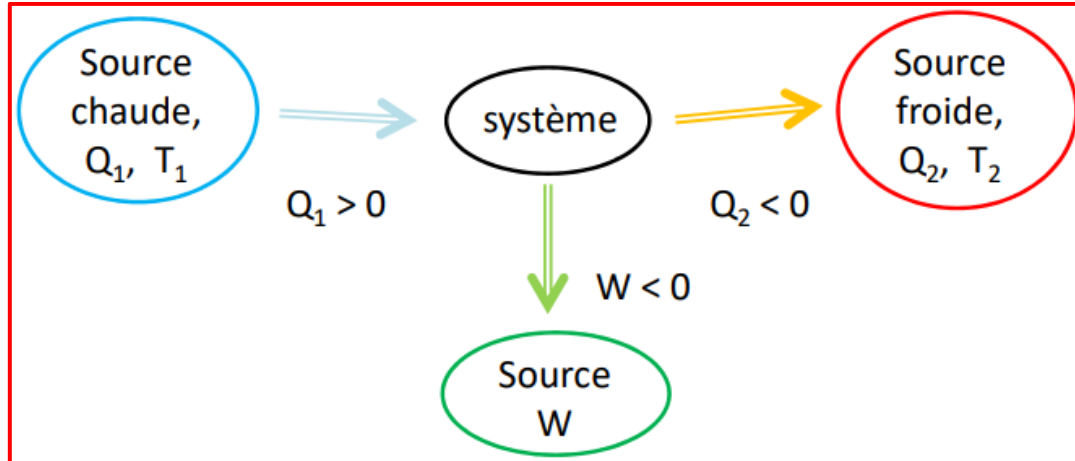


Figure 2 - Schéma de la situation

L'énergie reçue de la source chaude ( $Q_1$ ) est donc fournie par le système en partie sous forme de travail ( $W$ ) à la source correspondante mais aussi sous forme de chaleur ( $Q_2$ ) à la source froide.

Cette machine thermique doit suivre les deux premiers principes de la Thermodynamique. Le premier ( $\Delta U = W + Q$ ) dit que, puisque c'est un cycle, la variation de son énergie interne  $\Delta U$  est nulle (puisque l'état initial et final sont confondus), donc :

$$\Delta U_{cycle} = W + Q_1 + Q_2 = 0 \Leftrightarrow \boxed{W = -(Q_1 + Q_2)}$$

Le second ( $\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$  via l'inégalité de Clausius pour un cycle) dit aussi, par la nature de la transformation qui est cyclique, elle devient une égalité, appelée aussi « égalité de Carnot », et elle permet d'écrire :

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{T_i} = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 \Leftrightarrow \frac{Q_1}{T_1} = -\frac{Q_2}{T_2} \Leftrightarrow \boxed{\frac{Q_1}{Q_2} = -\frac{T_1}{T_2}}$$

On peut alors calculer l'efficacité  $\eta$  (qu'on appelle aussi « efficacité de Carnot ») du moteur en faisant le rapport de l'énergie recherchée par la machine sur l'énergie nécessaire à son fonctionnement.

Dans le cas de ce moteur, son efficacité classique  $\eta_{moteur}$  et son efficacité de Carnot  $\eta_{moteur,Carnot}$  valent respectivement :

$$\eta_{moteur} = \frac{|W|}{Q_1}$$

$$\eta_{moteur,Carnot} = \frac{|W|}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

a) Cycle moteur de Carnot :

Le cycle moteur de Carnot consiste en quatre transformations distinctes, comprises entre quatre états  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  :

- Une détente isotherme à une température  $T_1$  entre  $A$  et  $B$ , fournissant du travail au milieu extérieur ( $W_{AB} < 0$ ) et recevant de la chaleur de la source chaude ( $Q_{AB} = Q_1 > 0$ ).
- Une détente adiabatique d'une température  $T_1$  à une température  $T_2$  entre  $B$  et  $C$ , sans échange de chaleur ( $Q_{BC} = 0$ ) mais qui fournit encore du travail ( $W_{BC} < 0$ ).
- Une compression isotherme à une température  $T_2$  entre  $C$  et  $D$ , recevant du travail au milieu extérieur ( $W_{CD} > 0$ ) et fournissant de la chaleur à la source froide ( $Q_{CD} = Q_2 < 0$ ).
- Une compression adiabatique d'une température  $T_2$  à une température  $T_1$  entre  $D$  et  $A$ , sans échange de chaleur ( $Q_{DA} = 0$ ) mais qui reçoit encore du travail ( $W_{DA} > 0$ ).

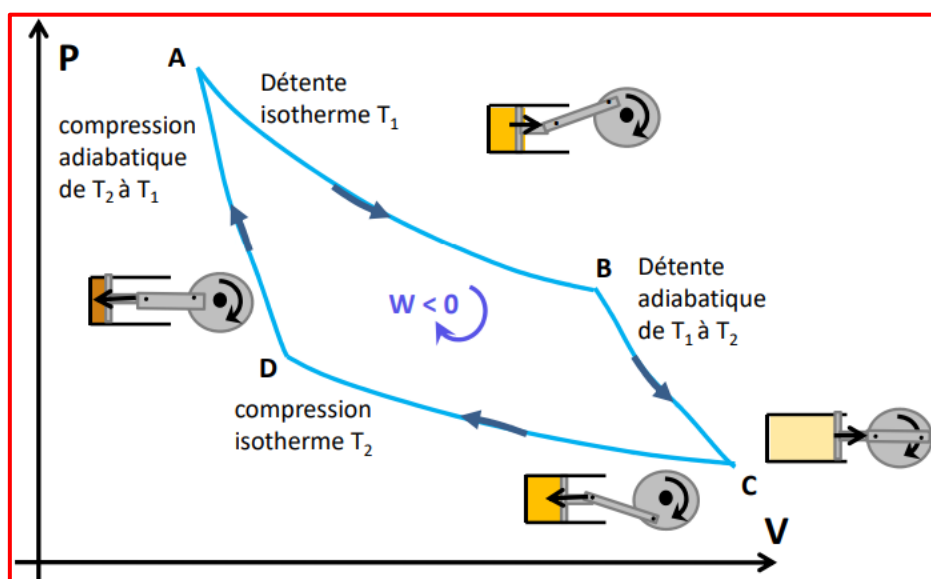


Figure 3 - Diagramme de Clapeyron du cycle du moteur de Carnot et représentation schématique des différentes étapes

Le travail total de la transformation (qui est négatif du fait du sens du cycle) vaut :

$$W = (T_1 - T_2)nR \ln \frac{V_A}{V_B} < 0$$

Son rendement est celui calculé précédemment ( $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ ).

### b) Moteur thermique classique :

Un moteur thermique classiquement utilisé dans voitures modernes est composé d'un piston qui peut se déplacer dans une chambre d'admission, le tout relié à deux tuyaux qui permet de fournir un mélange d'air et de carburant à la machine depuis le carburateur d'une part (pouvant être bloqué par une soupape d'admission) et qui permet de rejeter les gaz de la combustion réalisés d'autre part (pouvant être bloqué par une soupape d'échappement). Une bougie avec des électrodes permet d'enflammer le mélange.

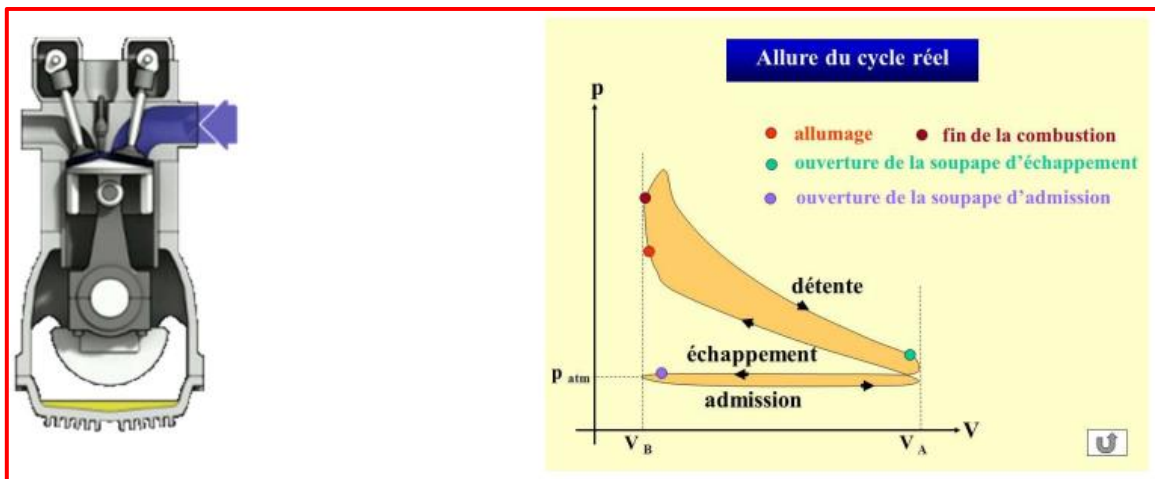


Figure 4 - Moteur thermique classique (à gauche) et représentation de son cycle sur un diagramme de Clapeyron (à droite)

Le cycle se décompose en quatre étapes :

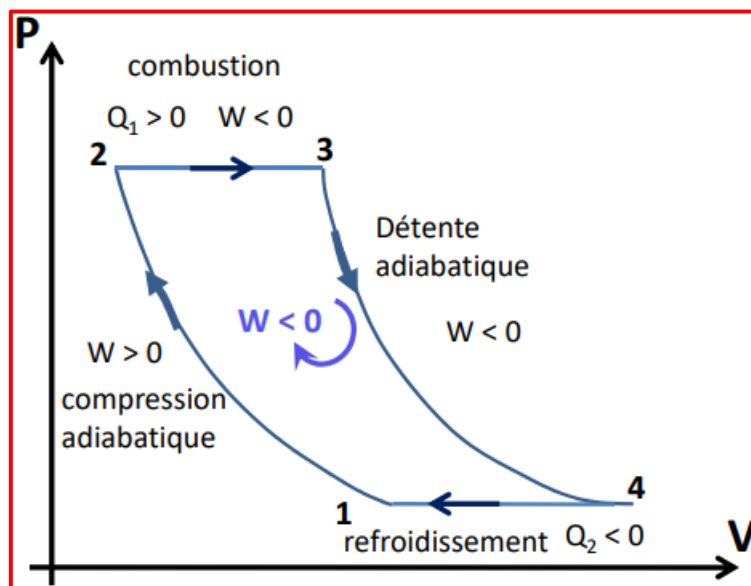
- L'admission : La soupape d'échappement est fermée et la soupape d'admission est ouverte. Le piston descend pour créer une dépression qui aspire le mélange air / carburant venant du carburateur.
- La compression : Les deux soupapes sont fermées et rendent la culasse hermétique. Le piston remonte et comprime le mélange, l'amenant à une température de **300 °C**.
- La détente (ou explosion) : Le piston arrive à son point le plus haut, une étincelle jaillit entre les électrodes de la bougie et provoque l'inflammation des gaz. La pression et la température augmentent, poussant le piston qui redescend à son point le plus bas. Lorsque le piston arrive à ce point, les deux soupapes sont encore fermées.

- L'échappement : La soupape d'échappement s'ouvre et le piston pousse les gaz brûlés en remontant, les laissant s'échapper.

### c) Cycle moteur de Brayton :

Le cycle moteur de Brayton (inventé par John Barber mais développé par George Brayton (1830 – 1892)) est celui utilisé notamment dans les réacteurs d'avion de ligne. Il est composé d'un compresseur qui fait entrer de l'air dans une chambre de combustion avec du combustible (généralement du kérosène). Après transformations, les gaz brûlés traversent une turbine pour délivrer une puissance mécanique (car le système est ouvert et non fermé) avant de les libérer dans le milieu extérieur. La transformation complète est en quatre transformations distinctes comprises entre les états 1, 2, 3 et 4 :

- Une compression adiabatique entre 1 et 2 où le système reçoit du travail ( $W > 0$ ).
- Une combustion isobare entre 2 et 3 où le système reçoit de la chaleur de la source chaude ( $Q_1 > 0$ ) et fournit du travail ( $W < 0$ ).
- Une détente adiabatique entre 3 et 4 où le système fournit du travail ( $W < 0$ ).
- Un refroidissement isobare entre 4 et 1 où le système fournit de la chaleur à la source froide ( $Q_2 < 0$ ).



*Figure 5 - Diagramme de Clapeyron du cycle du moteur de Brayton*

### d) Fonctionnement d'une centrale électrique :

Une centrale électrique fonctionne généralement grâce à la production de chaleur par un combustible (charbon, nucléaire, etc...) dans un premier circuit rempli d'eau, chaleur utilisée pour faire chauffer de l'eau dans un autre circuit relié à une turbine, reliée elle-même à un générateur pour produire de l'électricité.



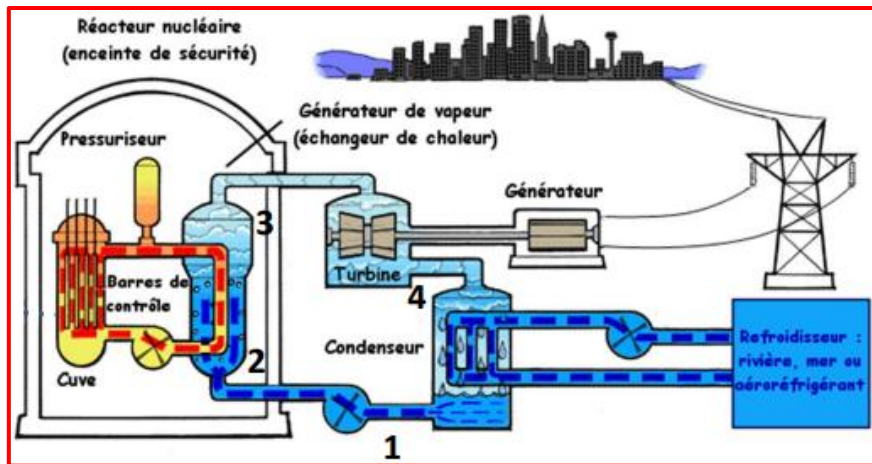


Figure 6 - Schéma d'une centrale nucléaire

On peut simplifier le fonctionnement en prenant un schéma de principe qui garde les étapes les plus importantes.

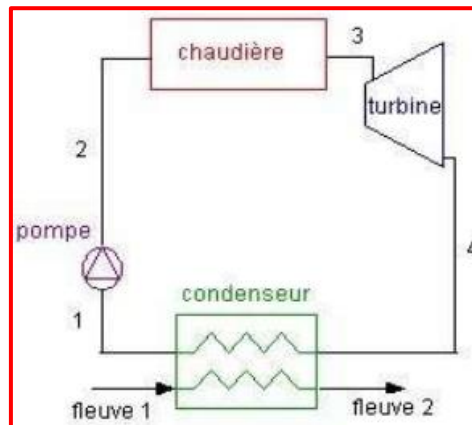


Figure 7 - Schéma de principe d'une centrale électrique

Entre la partie 1 et 2, la pompe permet de donner au système un travail  $W$ . Entre la partie 2 et 3, un échange de chaleur se fait avec la source chaude (chaudière), donnant une chaleur  $Q_1$ . Entre la partie 3 et 4, le système fournit du travail  $W$  à la turbine. Entre la partie 4 et 1, un échange de chaleur se fait avec la source froide (condensateur), fournissant de la chaleur  $Q_2$ .

#### e) Moteur de Stirling :

Le moteur de Stirling (du nom de Robert Stirling (1790 – 1878)) est constitué de deux pistons (déplacement et travail respectivement) qui peuvent se déplacer dans deux chambres différentes (détente et compression respectivement). La chambre de détente est chauffée par une flamme qui sert de source chaude. Son cycle est composé en quatre transformation distinctes (dans l'ordre) : une détente isotherme, un refroidissement isochore, une compression isotherme et un échauffement isochore.

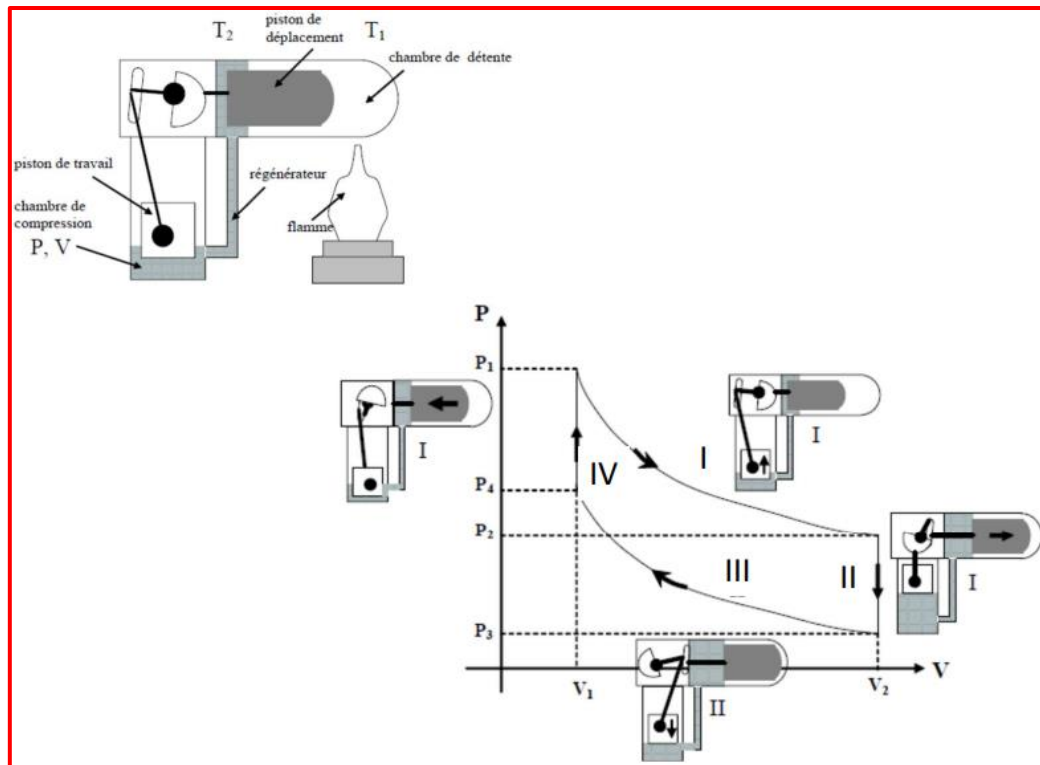


Figure 8 - Schéma du moteur de Stirling et diagramme de Clapeyron équivalent

### 3) Les machines frigorifiques :

On considère un système thermodynamique relié à deux sources de chaleur, une chaude de température  $T_1$  et une froide de température  $T_2$ , les deux échangeant une chaleur  $Q_1$  négative et  $Q_2$  positive avec le système, ce dernier aussi relié à une source de travail  $W$  qui lui en donne ( $W > 0$ ). Le but est de refroidir la source froide en réchauffant la source chaude ( $Q_1 < 0$  et  $Q_2 > 0$ ).

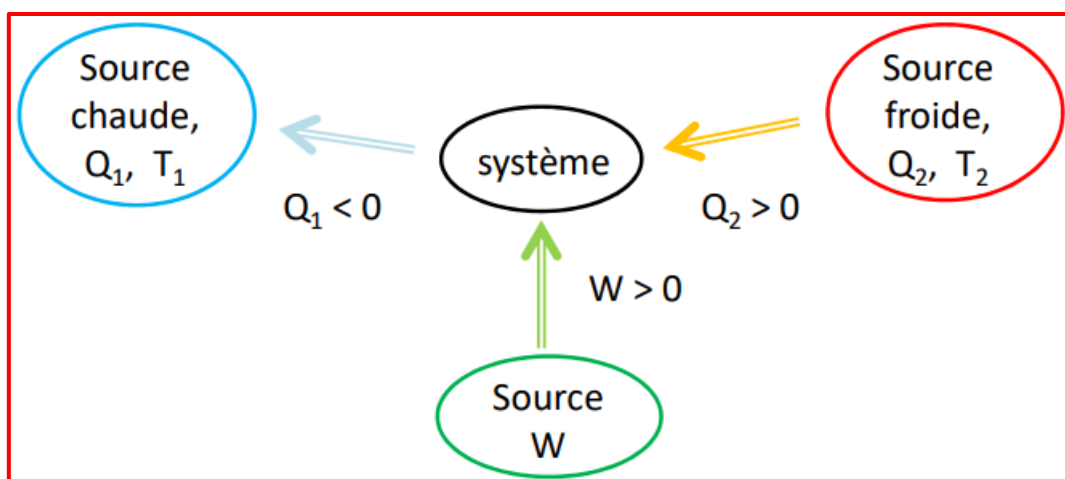


Figure 9 - Schéma de la situation

L'énergie reçue sous forme de travail ( $W$ ) est utilisée pour transférer de la chaleur de la source froide ( $Q_1$ ) vers la source chaude ( $Q_2$ ).

Les premiers principes de la Thermodynamique sont aussi vérifiés par cette machine thermique, donc on retrouve les mêmes résultats que pour le moteur (aux signes des échanges d'énergie près) :

$$W = -(Q_1 + Q_2) ; \quad \frac{Q_1}{Q_2} = -\frac{T_1}{T_2}$$

L'efficacité d'une machine frigorifique se calcule de la même manière, excepté que l'on souhaite avoir un échange de chaleur (pouvant être  $Q_1$  ou  $Q_2$  en fonction de si on veut avoir une machine réfrigérante ou un chauffage) :

$$\eta_{machine \text{ frigo.}} = \frac{|Q_{1,2}|}{W}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \eta_{réfrig} = \frac{|Q_2|}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2} \\ \eta_{chauff} = \frac{|Q_1|}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \end{cases}$$

Un exemple de machine frigorifique est la pompe à chaleur réversible dont le système est le fréon, un fluide très bon pour les échanges de chaleur. On utilise un compresseur et un détendeur afin de modifier la pression du fluide dans la pompe à chaleur et on utilise un évaporateur et un condensateur afin de changer son état.

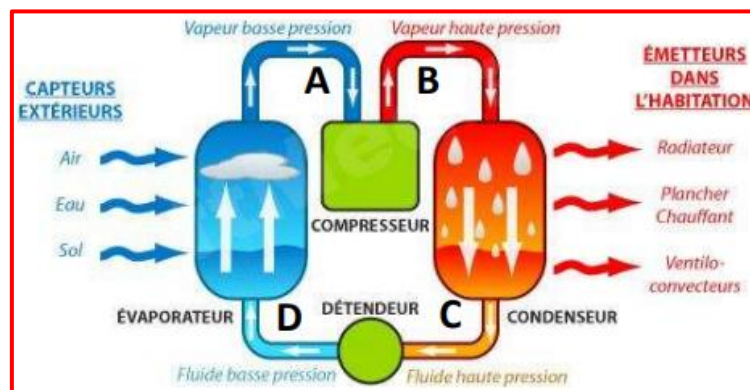


Figure 10 - Schéma de principe d'une pompe à chaleur réversible

Le système subit quatre transformations distinctes entre les états  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$  :

- Une compression adiabatique entre  $A$  et  $B$ .
- Une condensation isobare entre  $B$  et  $C$  où il y a échange de chaleur avec la source chaude.
- Une détente adiabatique entre  $C$  et  $D$ .

- Une évaporation isobare entre  $D$  et  $A$  où il y a échange de chaleur avec la source froide.

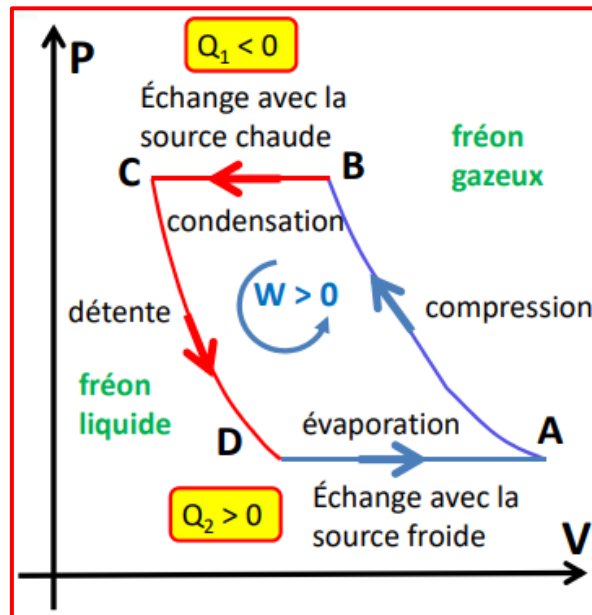


Figure 11 - Diagramme de Clapeyron du cycle d'une pompe à chaleur

Au niveau du rendement  $\eta$ , il dépend de si la machine frigorifique est un réfrigérateur, une climatisation ou un chauffage :

- Si c'est un réfrigérateur, on cherche à refroidir son volume intérieur (source froide) en donnant de la chaleur à la plaque à l'arrière (source chaude).
- Si c'est une climatisation, on cherche à refroidir la pièce qui la contient (source froide) en donnant de la chaleur à l'extérieur de la pièce (source chaude).
- Si c'est un chauffage, on cherche à chauffer la pièce (source chaude) en prenant l'énergie de l'extérieur (source froide).