

« La science de la thermodynamique a commencé avec une analyse, faite par le grand ingénieur Sadi Carnot, du problème de la conception de la machine la meilleure et la plus efficace, et ceci constitue un des rares cas notables dans lequel les sciences de l'ingénieur ont contribué fondamentalement à la théorie physique. »

Richard FEYNMAN



Introduction : Sadi Carnot (1796 – 1832), père fondateur de la thermodynamique, souhaitait améliorer l'invention révolutionnaire que l'écossais James Watt (1736 – 1819) proposa en 1764 : la machine à vapeur. Carnot publie ses conclusions en 1824 dans un mémoire appelé « Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance ». Ce texte passe totalement inaperçu avant qu'Émile Clapeyron (1799 – 1864) le sorte de l'oubli et le transcrive en termes concrets. Ces idées ne seront vraiment acceptées que lorsque William Thomson (futur Lord Kelvin) (1824 – 1907) et Rudolf Clausius (1822 – 1888) établiront, vers 1850, l'équivalence entre la chaleur et l'énergie, toujours dans le but d'améliorer la machine à vapeur. Ceci permettra, entre autres, une des plus importantes avancées technologiques : la révolution industrielle du XIX<sup>e</sup> siècle.

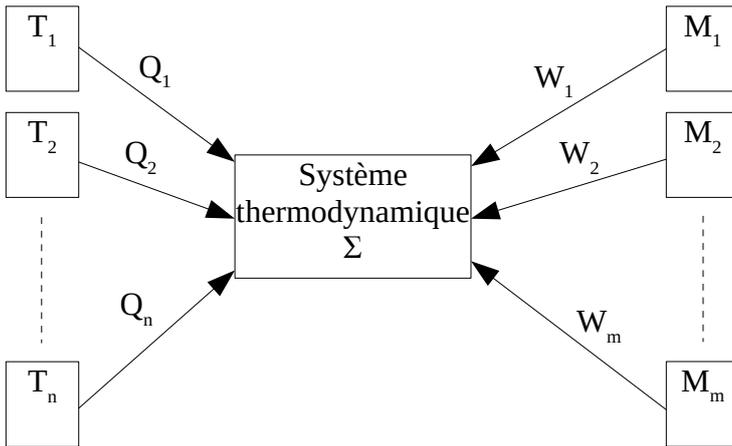
Ce chapitre a pour but l'application du premier et du deuxième principe de la thermodynamique, vus au deux chapitres précédents, à l'étude des machines thermiques. Ce problème est évidemment toujours d'actualité. On peut citer le moteur à explosion, les réfrigérateurs, les centrales nucléaires, ... etc comme applications contemporaines de ce chapitre. Il faut néanmoins être conscient qu'historiquement, c'est l'étude des machines thermiques qui a donné les fondements de la thermodynamique.

# I. Présentation générale des machines thermiques

## 1. Caractéristiques

On appelle machine thermique tout dispositif dans lequel un fluide subit une transformation cyclique qui permet une conversion d'énergie.

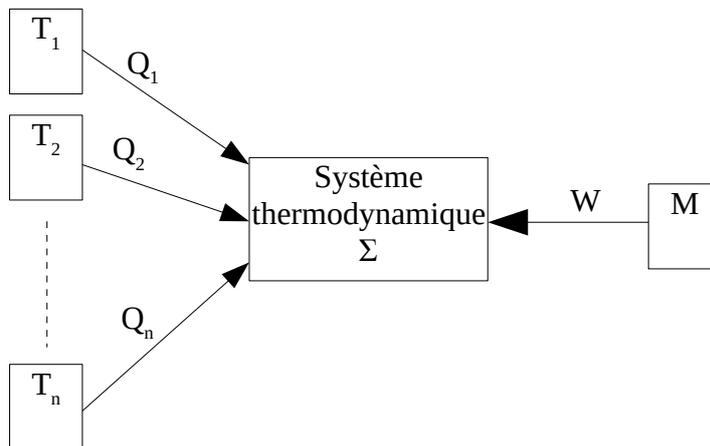
Ce fluide est le système thermodynamique étudié, noté  $\Sigma$ , il échange de l'énergie thermique avec les sources de chaleur (ou thermostats) de température  $T_i$  et du travail avec les systèmes mécaniques (notés  $M_i$ ) en contact avec lui. On modélise alors l'ensemble de la machine thermique par le schéma suivant où les conventions algébriques d'échanges sont celles énoncées au chapitre 0 :



*Les échanges d'énergie sont positifs s'ils sont reçus par le système thermodynamique et négatifs s'ils sont fournis par le système thermodynamique.*

Exemples : Le moteur à explosion où de l'énergie thermique est convertie en travail ainsi que la pompe à chaleur où du travail est converti en énergie thermique.

Dans toute la suite de ce chapitre, on se limite à l'étude des machines thermiques qui n'échangent du travail qu'avec un seul système mécanique  $M$  :



## 2. Conséquences du premier et du second principe sur un cycle

Lors d'un cycle, les états d'équilibres initial et final du système  $\Sigma$  sont identiques donc sur **un cycle quelconque** :  $\Delta U = 0$  pour l'énergie interne et  $\Delta S = 0$  pour l'entropie du système.

Soient  $W$  le travail échangé entre le système et le système mécanique au cours d'un cycle et  $Q_i$  le transfert thermique échangé entre le système et la source de chaleur  $T_i$  au cours d'un cycle.

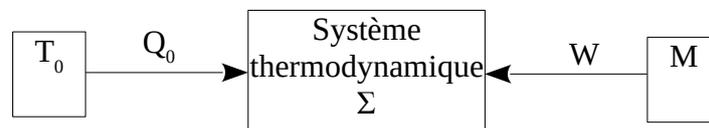
Les premier et deuxième principes de la thermodynamique appliqués au système  $\Sigma$  sur un cycle donnent alors :

- **Premier principe :**
  
- **Deuxième principe :**

## II. Étude d'une machine monotherme

### 1. Présentation

Si le système  $\Sigma$  ne peut échanger de l'énergie thermique qu'avec **une seule source de chaleur** de température  $T_0$ , on parle de **machine monotherme** :



### 2. Énoncé de Thomson (ou de Lord Kelvin)

Dans le cas d'une machine monotherme :

- L'inégalité de Clausius donne :
  
- Le premier principe donne :

Ainsi, le système thermodynamique  $\Sigma$  subissant une transformation cyclique ne peut que céder de l'énergie thermique à la source de chaleur et ne peut que recevoir du travail de la part du système mécanique :

**Le moteur cyclique monotherme n'existe pas !**

Remarques :

1. Ceci constitue l'énoncé historique de Kelvin (Thomson) du deuxième principe (1852).
2. Une machine monotherme est donc forcément en fonctionnement récepteur ( $W \geq 0$ ).
3.  $Q_0 = 0$  et  $W = 0$  uniquement pour une transformation réversible.

### III. Étude générale des machines dithermes

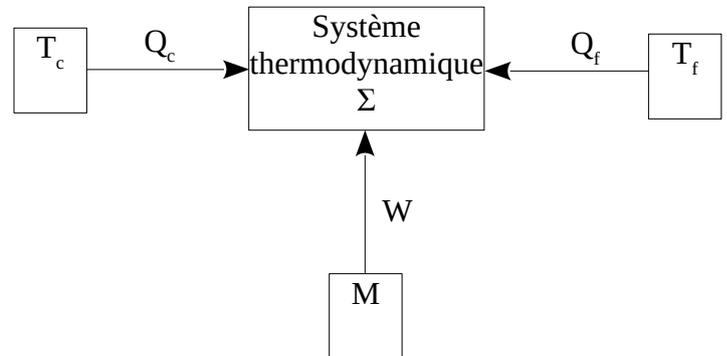
On vient de montrer que les machines monothermes sont extrêmement limitées : elles ne permettent pas la réalisation d'un moteur thermique ( $W < 0$ ). On considère donc ici des machines dithermes qui sont les machines thermiques les plus simples permettant la réalisation de moteurs thermiques.

#### 1. Présentation

On parle de machines thermiques **dithermes** lorsque le système  $\Sigma$  peut échanger de l'énergie thermique avec une **source de chaleur « chaude » de température  $T_c$**  et une **source de chaleur « froide » de température  $T_f$**  telles que  $T_c > T_f$ . On note  $Q_c$  et  $Q_f$  les transferts thermiques réalisés entre le système et, respectivement, la source chaude et la source froide (cf schéma ci-contre).

Les premier et deuxième principes donnent :

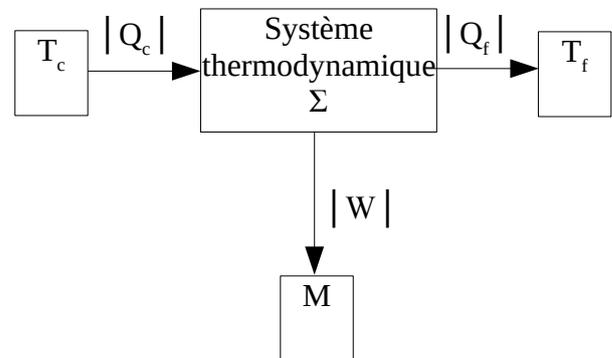
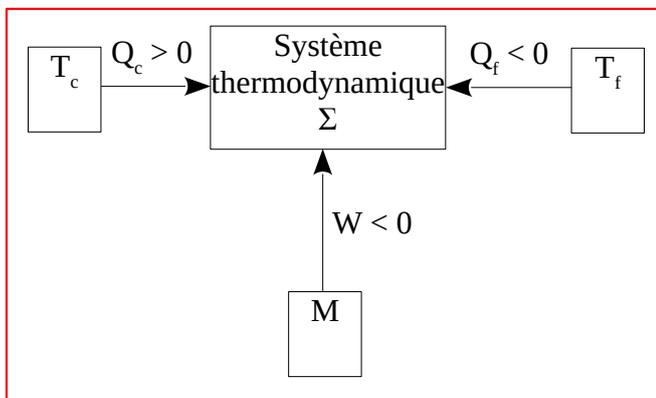
- 
- 



#### 2. Moteur ditherme

##### a) Présentation

Ce fonctionnement moteur est rendu possible par l'apport d'un transfert thermique de la part de la source chaude  $Q_c$  : une partie de ce transfert thermique est cédée à la source froide et une autre partie est transformée en travail.



*Sens des échanges en valeur absolue*

##### b) Rendement

On définit le rendement  $\eta$  d'un moteur thermique comme le rapport de l'énergie utile fournie par le système  $\Sigma$  au milieu extérieur sur l'énergie coûteuse reçue par  $\Sigma$  de la part du milieu extérieur :

$$\eta = \left| \frac{\text{énergie utile échangée par } \Sigma}{\text{énergie coûteuse échangée par } \Sigma} \right|$$

Pour un moteur, l'énergie utile échangée par  $\Sigma$  avec le milieu extérieur est le travail et l'énergie coûteuse échangée par  $\Sigma$  avec le milieu extérieur est le transfert thermique de la source chaude. Avec  $W \leq 0$  et  $Q_c \geq 0$  :

Remarque : l'énergie thermique fournie à la source froide ne présente aucun intérêt, c'est pourquoi elle n'apparaît pas explicitement dans la définition du rendement. On peut même se rendre compte dès à présent qu'elle représente une certaine « perte » pour le moteur : une partie de l'énergie fournie par la source chaude est donnée à la source froide au lieu d'être transformée en travail utile. Il faut alors garder à l'esprit que cette perte est « nécessaire » pour un moteur thermique car on a déjà mis en évidence que les moteurs monothermes n'existent pas ! Ainsi, le rendement d'un moteur sera toujours inférieur à l'unité. La démonstration est effectuée dans le paragraphe suivant.

### c) Majoration du rendement (démon à connaître)

- Expression du rendement en fonction de  $Q_c$  et  $Q_f$  (premier principe) :
- Majoration du rendement en fonction de  $T_c$  et  $T_f$  (second principe) :

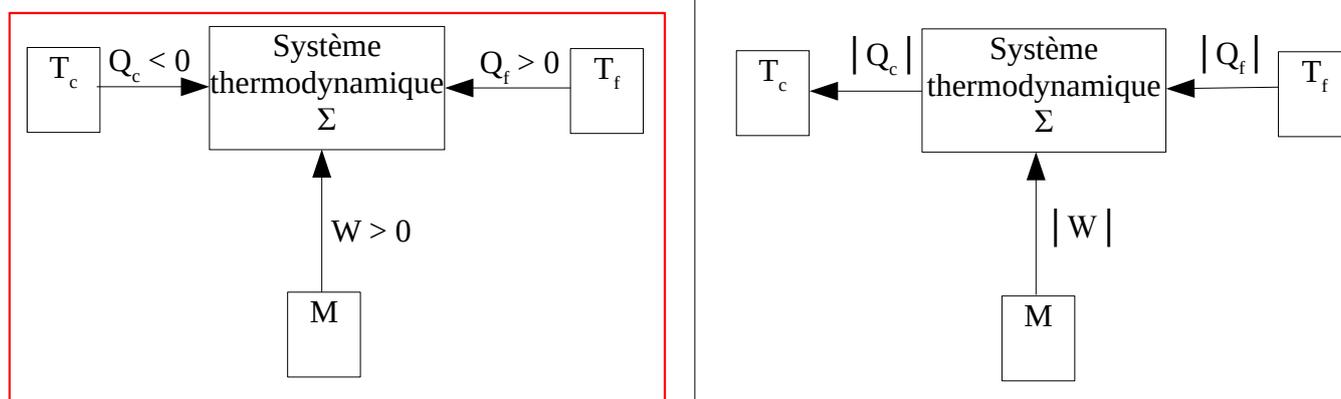
**Conclusion** : pour avoir le rendement le plus élevé possible, il faut les températures des deux sources de chaleur les plus éloignées possibles ainsi qu'un cycle proche de la réversibilité.

Remarque : le cycle proche de la réversibilité est très intéressant pour des raisons économiques et écologiques. Il ne présente toutefois aucun intérêt pratique pour un moteur puisqu'il est forcément décrit de manière quasistatique : un tel moteur fournit donc une puissance qui tend vers zéro (le système parcourt le cycle en un temps infini).

## 3. Récepteur ditherme : machine frigorifique et pompe à chaleur

### a) Présentation

Le système fonctionne en récepteur ( $W > 0$ ). Il reçoit du travail qui permet d'effectuer un transfert thermique contraire à l'échange spontané entre la source chaude et la source froide : le système reçoit de l'énergie thermique de la part de la source froide et en cède à la source chaude.



Sens des échanges en valeur absolue

Si  $T_c$  représente l'atmosphère, on réalise une **machine frigorifique** et  $T_f$  est la chambre froide du réfrigérateur.

Si  $T_f$  représente l'atmosphère, on réalise une **pompe à chaleur** et  $T_c$  est la pièce chauffée.

## b) Coefficient de performance (CoP)

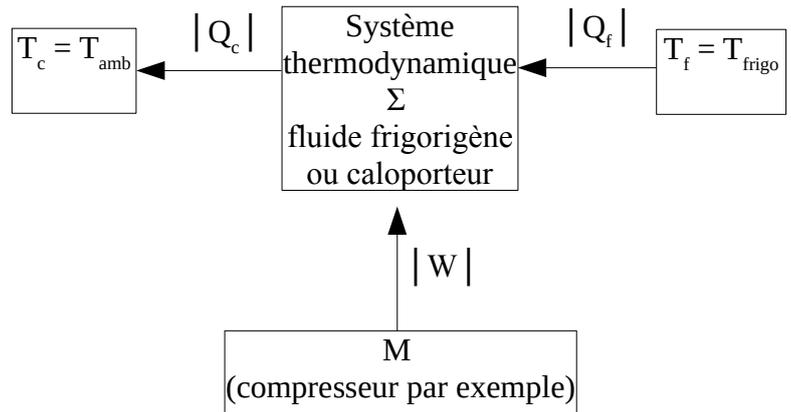
On définit le coefficient de performance CoP d'un récepteur ditherme comme le rapport de l'énergie utile (fournie ou prélevée) par le système  $\Sigma$  au milieu extérieur sur l'énergie coûteuse (travail) reçue par  $\Sigma$  de la part du milieu extérieur :

$$CoP = \left| \frac{\text{énergie utile échangée par } \Sigma}{\text{énergie coûteuse échangée par } \Sigma} \right|$$

*Remarque* : Le coefficient de performance est aux récepteurs dithermes ce que le rendement est aux moteurs dithermes. On préfère pourtant utiliser le nom « CoP » au lieu de « rendement » pour les récepteurs dithermes car celui-ci peut être supérieur à l'unité.

## c) Machine frigorifique

Le but d'une machine frigorifique est de prélever de l'énergie thermique  $Q_f > 0$  à la source froide (le réfrigérateur) grâce à un « fluide frigorigène » (le système) qui reçoit du travail  $W > 0$ . Le coefficient de performance d'une telle machine est donc :



### Majoration du CoP (démon à connaître) :

- Expression du CoP en fonction de  $Q_c$  et  $Q_f$  (premier principe) :
  
- Majoration du CoP en fonction de  $T_c$  et  $T_f$  (second principe) :

**Conclusion** : pour avoir le coefficient de performance le plus élevée possible, il faut que le fluide frigorigène subisse un cycle proche de la réversibilité et que  $T_c$  et  $T_f$  soient proches : plus la pièce accueillant le réfrigérateur est froide, plus il sera facile de refroidir l'intérieur de la chambre froide.

*Remarque* : une climatisation est une machine frigorifique où la chambre froide est la pièce considérée et l'atmosphère constitue la source de chaleur chaude.



Transition vers les chapitres T5 et T6 :

Nous venons d'étudier le comportement d'ensemble des machines thermiques cycliques afin de déterminer le rendement ou le coefficient de performance de la machine mais nous n'avons pas étudié les différents constituants qui la composent.

Par exemple, un réfrigérateur est composé d'au moins 4 constituants nécessaires à son fonctionnement : le compresseur, le détendeur, et 2 échangeur thermiques (un condenseur et un évaporateur).

Pour étudier un des constituants (comprendre son fonctionnement ou savoir quelle puissance de compresseur utiliser), il faudra se placer en système ouvert, ce sera le but du chapitre T6.

De plus, dans les récepteurs dithermes, des changements d'état du système étudié apparaissent (par exemple dans le condenseur et l'évaporateur du réfrigérateur), il faut donc savoir exprimer les variations des grandeurs thermodynamiques lors des changements d'état afin de pouvoir étudier le coefficient de performance d'une telle machine, c'est le but du chapitre T5.

