

# Chapitre 1 : Les cycles thermodynamiques moteurs 1<sup>ère</sup> séance

---

## Un peu d'histoire !

Le pionnier de l'utilisation de la vapeur pour accomplir un travail est le Français **Denis PAPIN** (1647-1714). En 1681, Papin invente l'**autocuiseur** : les aliments y sont cuits dans la vapeur sous pression. Il invente la **chaudière**, récipient résistant dans laquelle l'eau est amenée à ébullition, et la combinaison cylindre-piston qui permet d'utiliser la pression de vapeur pour accomplir un travail mécanique. En 1698, l'Anglais **Thomas SAVERY** (1650-1715) brevète une **pompe à eau** actionnée par la vapeur sous pression. La machine de Savery fut progressivement remplacée par celle de **Thomas NEWCOMEN** (1663-1729) achevée en 1712, basée sur le système cylindre-piston de Papin. Le perfectionnement de la machine de Newcomen fut l'œuvre de l'Écossais **James WATT** (1736- 1819). Watt a l'idée de s'éparer complètement la fonction refroidissement du cylindre : il invente le **condenseur** vers lequel la vapeur est évacuée à chaque cycle et dans lequel elle est refroidie. Il propose un mécanisme à double action : la vapeur pousse le piston dans les deux sens. Il invente aussi le système bielle-manivelle pour convertir le mouvement alternatif du piston en mouvement circulaire ainsi qu'un dispositif de régulation de l'entrée de la vapeur. Watt brevète la machine à double action en 1780. Dans le souci d'optimiser la **machine à vapeur**, il découvre avec **Joseph Black** la chaleur latente, c'est-à-dire la chaleur nécessaire pour faire passer l'eau de l'état liquide à l'état de vapeur, sans changement de température. Watt produit un diagramme donnant la pression de la vapeur en fonction de la température (l'**indicateur de Watt**), diagramme qui restera un secret industriel jusqu'au début du XIXe siècle. La machine de Watt trouva de nombreuses applications dans les transports : véhicule automobile, navire à vapeur, locomotive sur rail... A partir du XIXe siècle, les chemins de fer apparaissent dans tous les pays développés et les navires à voile sont progressivement remplacés par les **navires à vapeur**.

Au début du XIXe siècle, les **machines à vapeur** étaient assez répandues mais les principes physiques fondamentaux régissant leur fonctionnement restaient obscurs. Plusieurs chercheurs se cassèrent les dents sur le problème de l'efficacité des machines à vapeur. Une grande avancée sera due aux travaux du physicien Français **Sadi CARNOT** (1796-1832). En 1824, il publie le livre "Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance". Les idées d'enveloppées par Carnot sont le fondement de la thermodynamique, mais basées sur une prémisse erronée : Carnot est convaincu de l'existence du calorique. Il conçoit une machine idéale, la plus efficace possible, réversible, fonctionnant avec un gaz parfait et dont l'efficacité ne dépend que des températures des sources chaude et froide (selon ce qu'on appellera le **cycle de Carnot**). Le cycle de Carnot est composé de deux courbes isothermes réversibles et de deux courbes adiabatiques réversibles. Le livre de Carnot passe inaperçu. Ce n'est que dix ans plus tard qu'**Emile CLAPEYRON** (1799-1864) en trouve une copie et en fait la publicité.

## 1. Introduction

Une **machine** est un produit fini mécanique (mécanisme) capable d'utiliser une source d'énergie communément disponible pour effectuer par elle-même, sous la conduite ou non d'un opérateur, une ou plusieurs tâches spécifiques.

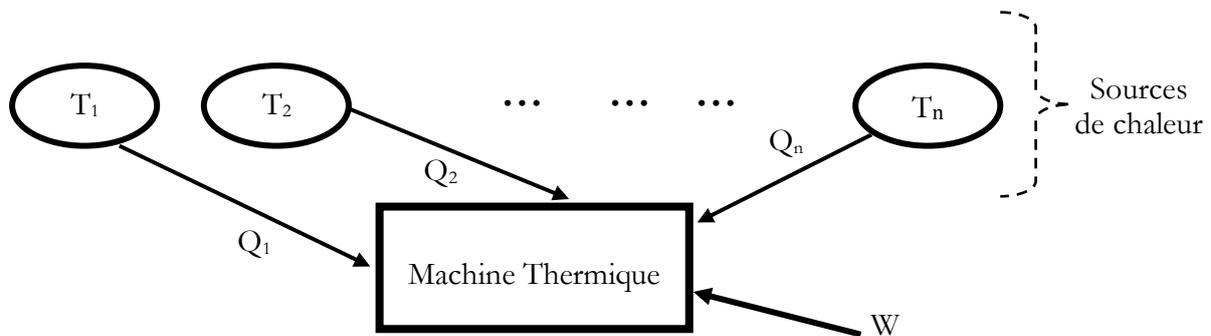
Une **machine thermique (thermodynamique)** est un dispositif fonctionnant en cycle et échangeant de l'énergie par transfert thermique et par travail avec l'extérieur.

- Une telle définition peut surprendre car elle semble ne rien dire a priori puisque n'importe quel système échange de l'énergie par transfert thermique ou par travail avec l'extérieur. En fait, le

point important est qu'**une machine doit fonctionner en cycles** c'est-à-dire elle doit pouvoir fonctionner indéfiniment.

Une **machine thermique** est un système fonctionnant 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 milieu extérieur est constitué de  $n$  sources de chaleurs (idéalement  $n$  thermostats) échangeant de la chaleur avec le fluide, et d'un système mécanique échangeant du travail avec le fluide.



Si  $W > 0$  alors la machine thermique est un récepteur (**machine thermique réceptrice**).\*

Si  $W < 0$ , la machine thermique est un moteur (**machine thermique motrice**).

Une **machine thermique motrice (moteur)** est une machine thermique dont le but est de fournir véritablement de l'énergie par travail à l'extérieur (Conversion de chaleur en travail).

- Il s'agit bien de tout ce qui est moteur ! Sauf les moteurs électriques.

Une **machine thermique réceptrice** est une machine qui reçoit véritablement de l'énergie par travail de la part de l'extérieur.

- Cette énergie est le plus souvent apportée par mouvement d'un moteur électrique.

Une **machine monotherme** est une machine dont le fluide n'est en contact qu'avec une seule source de chaleur (ou thermostat).

Une **machine thermique** est dite **ditherme** lorsqu'elle échange de l'énergie par transfert thermique avec deux thermostats.

### Moteur ditherme vs Récepteur ditherme :

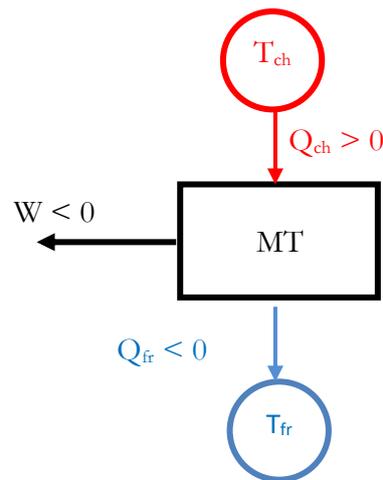
Le **moteur ditherme** reçoit de la chaleur de la source chaude et en fournit à la source froide. On se sert du **transfert naturel de la chaleur** pour récupérer un peu de travail.

La quantité de chaleur échangée avec la source froide est considérée comme perdue (point de vue économique). Thermodynamiquement, elle n'est pas perdue et peut être valorisée.

---

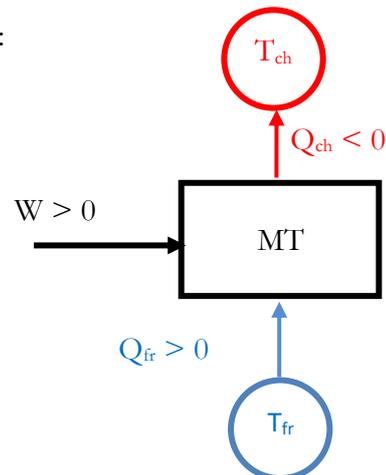
\*  $W$  : Énergie mécanique (Travail) ;  $Q$  : Énergie thermique/Calorifique (Chaleur).

Le schéma de principe du moteur ditherme est le suivant :



Le principe du **récepteur ditherme** est en est d'**inverser le sens naturel de transfert de la chaleur** en fournissant du travail au récepteur. Autrement dit, il y a transfert de la chaleur d'une source froide vers une source chaude.

Le schéma de principe du récepteur ditherme est le suivant :



## 2. Cycle de Carnot des machines thermiques et rendement thermique

Un **cycle thermodynamique** est une suite de transformations où le système thermodynamique part d'un état donné et revient à son état initial à la fin du cycle. On peut alors recommencer le même cycle. Les **machines thermiques (thermodynamiques)** utilisent des cycles.

Au cours du cycle, le système voit sa température, sa pression ou d'autres paramètres d'état varier, tandis qu'il échange du travail et de la chaleur avec l'extérieur.

Le **cycle de Carnot** est un **cycle thermodynamique théorique** pour un **moteur ditherme**, constitué de **quatre évolutions** (processus) **réversibles** :

- Une addition de chaleur à température constante (isotherme).
- Une détente isentropique (adiabatique réversible).
- Une évacuation de chaleur à température constante (isotherme).
- Une compression isentropique (adiabatique réversible).

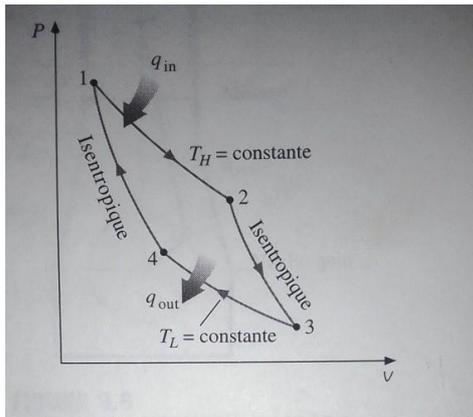


Diagramme (P-v) du cycle de Carnot

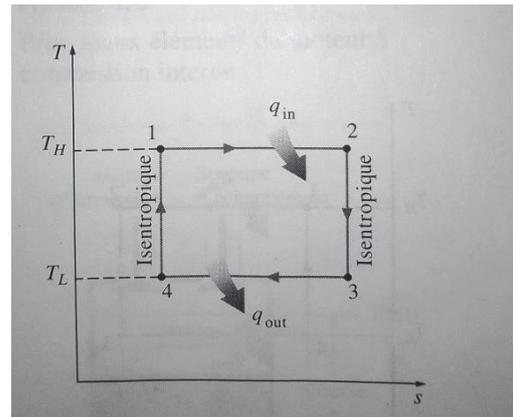


Diagramme (T-s) du cycle de Carnot

Le **cycle de Carnot** est le cycle le plus efficace que peut exécuter une machine fonctionnant entre une source de chaleur à la température  $T_H$  et un puits de chaleur à la température  $T_L$ . Son rendement est :

$$\eta_{\text{th,Carnot}} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

Cependant, transmettre de la chaleur de façon réversible et à température constante est très difficile à réaliser. Pour y arriver, il faudrait disposer d'échangeurs de chaleur immenses et de beaucoup de temps. Or, un moteur réel complète un cycle en une fraction de seconde.

Concevoir et exploiter une machine qui fonctionnerait selon le cycle de Carnot n'est tout simplement pas pratique. Alors à quoi peut bien servir le cycle de Carnot ?

L'intérêt du cycle de Carnot est de servir d'étalon auquel les cycles réels et les cycles théoriques peuvent être comparés.