

5.1 Optimisation des cycles moteurs

Pour convertir de la chaleur en énergie mécanique, dans la quasi-totalité des cycles utilisés, le fluide thermodynamique est successivement comprimé, puis chauffé, et enfin détendu. Si le cycle est ouvert, le fluide est alors évacué dans l'environnement externe ; s'il est fermé, il est refroidi, puis de nouveau comprimé.

Sadi Carnot a démontré en 1824 que le rendement d'une machine thermique idéale décrivant un cycle entre deux sources de chaleur ne dépend que des températures T_c et T_f des sources chaude et froide avec lesquelles elle est en contact, et est donné par cette formule, où T_c et T_f sont exprimées en degré Celsius.

$$\eta = 1 - \frac{T_f + 273,15}{T_c + 273,15} = \frac{T_c - T_f}{T_c + 273,15}$$

L'expression du rendement de Carnot montre que sa valeur est d'autant plus grande que d'une part T_c est élevée, et d'autre part l'écart ($T_c - T_f$) est important.

L'existence d'une grande diversité de solutions technologiques s'explique essentiellement par la multiplicité des sources de chaleur existantes, les sources froides utilisables en pratique étant relativement peu nombreuses, généralement l'air ambiant, ou bien un fleuve.

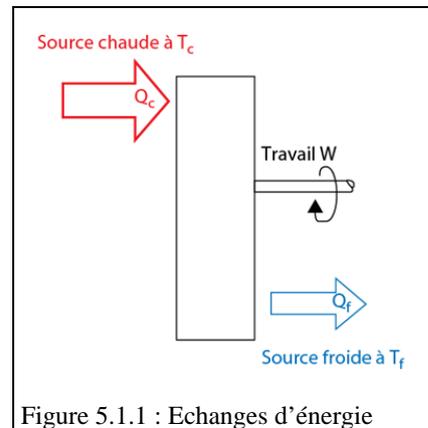
Rappelons que le premier principe de la thermodynamique indique que l'énergie du système se conserve, alors que le théorème de Carnot dit que seule la fraction η de la chaleur fournie par la source chaude est convertie en énergie mécanique.

Ces deux propositions peuvent paraître contradictoires.

Considérons une source chaude disposant d'une quantité de chaleur Q_c à la température T_c (figure 5.1.1).

La conversion de cette chaleur dans une machine parfaite échangeant avec une source froide à la température T_f produit :

- d'une part un travail W égal à ηQ_c , η étant égal au rendement de Carnot ;
- et d'autre part une chaleur Q_f à basse température, égale à $(1 - \eta) Q_c$



Modéliser et simuler les technologies énergétiques (extraits résumés)

Le premier principe est bien respecté, puisque Q_c est égal à $W + Q_f$, et le théorème de Carnot a permis de déterminer η , qui représente la fraction de la chaleur à haute température qui est convertie en travail.

La figure 5.1.2 vous montre la manière dont le rendement de Carnot varie lorsque la température de la source chaude passe de 50 à 1300 °C, la température de la source froide étant égale à 15 °C.

Les valeurs atteintes pour différents types de cycles de conversion de la chaleur en puissance mécanique ou électricité sont indiquées :

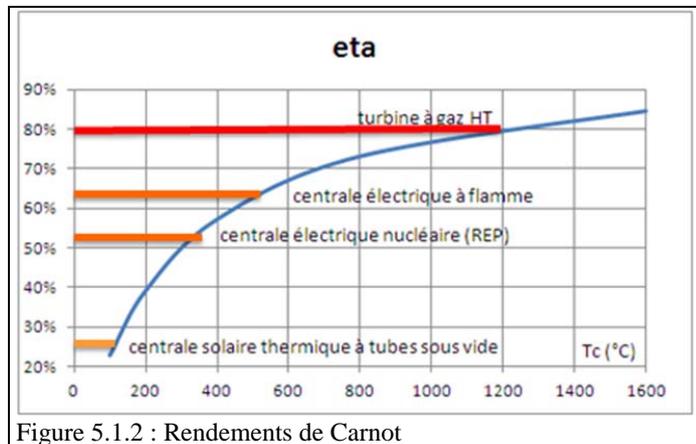


Figure 5.1.2 : Rendements de Carnot

- 80 % pour une turbine à gaz à haute température
- 65 % pour une centrale électrique à flamme
- 50 % pour une centrale électrique nucléaire du type REP
- 20 % pour une centrale solaire thermique à tubes sous vide

En pratique toutefois les rendements réels sont beaucoup plus faibles.

D'une manière générale, l'objectif poursuivi dans la mise au point des cycles moteurs est de produire le plus de puissance mécanique possible à partir de la source de chaleur disponible, et ceci en tenant compte des contraintes technologiques existantes.

En pratique, le rendement effectif est bien inférieur à celui du cycle de Carnot, d'une part parce que les hypothèses qui permettent d'établir cette formule ne sont presque jamais réunies, et d'autre part du fait des imperfections des machines utilisées, qui ont pour effet de baisser leurs performances car elles génèrent ce que l'on appelle des irréversibilités.

Les différences avec le cycle de Carnot proviennent entre autres des points suivants :

- tout d'abord, il faut en pratique qu'il y ait une certaine différence de température entre la machine et les sources chaude et froide
- ensuite, il est exceptionnel que les sources chaude et froide puissent être considérées comme isothermes : le plus souvent il s'agit d'un fluide qui échange de la chaleur entre deux niveaux de température

-
- enfin, lorsque la compression et la détente sont adiabatiques, elles ne sont pas réversibles du fait des irréversibilités mécaniques

Les cycles moteurs réels s'écartent donc sensiblement du cycle de Carnot.

Pour des raisons technologiques diverses, on ne sait pas fabriquer industriellement des composants capables à la fois de transférer de la chaleur et de réaliser une compression ou une détente performante.

C'est pour cela que les compresseurs et les machines de détente sont des machines dans lesquelles les échanges de chaleur avec leur environnement est négligeable, que l'on appelle adiabatiques.

Par ailleurs le travail mis en jeu dans une compression ou une détente adiabatique réversible est, pour un gaz parfait, proportionnel à la température absolue T_a du fluide à l'aspiration de la machine.

Si les indices a et r désignent respectivement l'aspiration et le refoulement de la machine, le travail mis en jeu est donné par cette relation, f étant une fonction croissante du rapport de compression, T_a étant exprimé en Kelvin et non pas en °C.

$$\tau = T_a \cdot f(P_r/P_a) \quad T_a \text{ en K}$$

Cette relation montre que le travail de compression est d'autant plus faible que le fluide est froid.

On a donc toujours intérêt à refroidir un gaz avant de le comprimer, et, si le rapport de compression est élevé et si c'est possible sur le plan technologique, on peut être conduit à fractionner la compression et à refroidir le gaz entre deux corps de compression, grâce à un échangeur de chaleur.

De la même manière, le travail de détente est d'autant plus important que la température du fluide est élevée.

On a donc toujours intérêt à réchauffer un gaz ou une vapeur avant la détente.

C'est pourquoi, si le rapport de détente est élevé et si c'est possible sur le plan technologique, on cherche à fractionner la détente et à réchauffer le gaz entre deux corps de détente.

Nous avons jusqu'ici étudié deux cycles moteurs, celui de la centrale à vapeur et celui de la turbine à gaz. Nous allons maintenant voir comment ils peuvent être améliorés, notre objectif étant de minimiser les irréversibilités.

En pratique, nous verrons que les modifications des cycles portent essentiellement :

- d'une part sur la réduction des écarts de température tant avec l'extérieur du système qu'en interne
- et d'autre part sur le fractionnement des compressions et des détentes