

Machines thermiques cycliques

Table des matières

1	Description des machines thermiques cycliques	1
2	Machines dithermes	2
2.1	Moteur ditherme	3
2.2	Machine frigorifique ditherme	3
2.3	Pompe à chaleur ditherme	5
2.4	Cycle de CARNOT	5
3	Technologie des moteurs à pistons	6
3.1	Moteur à deux temps	6
3.2	Moteur essence à quatre temps	7
3.3	Moteur diesel à quatre temps	9

1 Description des machines thermiques cycliques

L'intérêt d'une machine thermique est qu'elle permet une **conversion d'énergie**. Pour permettre un fonctionnement en continu en régime permanent, une machine thermique **effectue des cycles**. Pour la plupart des machines, un fluide (eau, air, fréon...) circule entre les différents organes. Les transformations que subit le fluide permettent les échanges énergétiques entre la machine et le milieu extérieur.

La machine thermique est un **moteur** si elle **fournit du travail**. Cela revient à dire que le travail total échangé par la machine avec le milieu extérieur au cours d'un cycle est négatif. Par opposition, un **récepteur** est une machine qui **reçoit du travail**. Les récepteurs usuels sont les machines frigorifiques et les pompes à chaleur.

Considérons une machine thermique en contact avec une source de travail et des sources de chaleurs. Lors d'un cycle de fonctionnement, cette machine échange :

- Un travail W avec le milieu extérieur
- Une quantité de chaleur Q_i avec les différentes sources i de température T_i .

Pour un cycle complet de la machine, comme U est une fonction d'état on a $\Delta U = 0$, l'application du premier principe nous donne donc :

$$W + \sum_i Q_i = 0$$

Appliquons le deuxième principe à l'ensemble machines + milieu extérieur. $\Delta S_{total} \geq 0$ puisque cet ensemble peut être considéré comme isolé, et :

$$\Delta S_{total} = \Delta S_{sources\ de\ chaleur} + \Delta S_{source\ de\ travail} + \Delta S \geq 0$$

avec

$$\Delta S_{sources\ de\ chaleur} = - \sum_i \frac{Q_i}{T_i}$$

et

$$\Delta S_{source\ de\ travail} = 0$$

puisque la source de travail n'échange pas de chaleur avec la machine par définition. De plus

$$\Delta S = 0$$

puisque le fonctionnement de la machine est cyclique et que S est une fonction d'état. On en déduit l'inégalité de CLAUSIUS :

$$\sum_i \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$$

L'égalité concerne le cas de la machine réversible.

2 Machines dithermes

Une machine ditherme échange de la chaleur avec deux sources de chaleur de températures respectives T_1 et T_2 . Nous supposons $T_1 > T_2$ et nous désignerons ces deux sources par source chaude (T_1) et source froide (T_2). La plupart des machines usuelles sont dithermes.

Le premier principe s'écrit :

$$W = -Q_1 - Q_2$$

Le second principe s'écrit :

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

2.1 Moteur ditherme

Le rendement ρ du moteur est le rapport entre le travail fourni par le moteur et la chaleur reçue de la source chaude. La chaleur cédée à la source froide est considérée comme un effet secondaire sans utilité et sans coût. Schéma de principe des échanges :

Le rendement s'écrit donc :

$$\rho = \frac{|W|}{Q_1} = -\frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1} = 1 + \frac{Q_2}{Q_1}$$

D'après le bilan entropique :

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

Le rendement du moteur ditherme est donc inférieur à une limite fonction de la température des sources :

$$\rho \leq 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Le rendement maximal serait obtenu pour le cas limite du moteur réversible. Il s'agit d'une limite théorique imposée par les deux principes de la thermodynamique. Les diverses causes d'irréversibilité font que le rendement effectif d'un moteur lui est toujours inférieur. On remarque que la source froide étant donnée, la rendement maximal théorique est une fonction croissante de la température de la source chaude.

2.2 Machine frigorifique ditherme

Du point de vue du travail échangé avec l'extérieur, une machine frigorifique est un récepteur ($W > 0$). Du point de vue de la chaleur échangée avec l'extérieur, une machine frigorifique doit recevoir de la chaleur

de la source froide. Elle est donc définie par $Q_2 > 0$, nous en déduisons $Q_1 = -W - Q_2 < 0$.

Schéma de principe des échanges :

Son **efficacité frigorifique** e_F est le rapport entre l'énergie utile et l'énergie dépensée :

$$e_F = \frac{Q_2}{W}$$

La chaleur Q_1 n'étant ni utile ni dépensée, elle ne figure pas dans le bilan :

$$e_F = \frac{Q_2}{W} = -\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} = \frac{1}{-\frac{Q_1}{Q_2} - 1}$$

D'après le bilan entropique :

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

L'efficacité frigorifique d'une machine frigorifique ditherme est limitée par une valeur qui dépend de la température des sources :

$$e_F \leq \frac{1}{\frac{T_1}{T_2} - 1}$$

L'efficacité est maximale pour le cas limite de la machine réversible. On remarque que la source chaude T_1 étant donnée (milieu extérieur pour la plupart des cas), l'efficacité maximale théorique est une fonction croissante de la température de la source froide T_2 . Elle tend vers 0 lorsque T_2 tend vers 0. Les deux principes de la thermodynamique interdisent donc d'accéder à la température 0, on ne peut que s'en approcher de plus en plus. Contrairement au rendement d'un moteur, l'efficacité peut être supérieure à 1.

2.3 Pompe à chaleur ditherme

Une pompe à chaleur est une machine destinée à fournir de la chaleur à la source chaude. Une machine frigorifique peut être considérée comme une pompe à chaleur si l'utilisateur se place du point de vue de la source chaude. Comme pour la machine frigorifique on a $W > 0$, $Q_1 < 0$ et $Q_2 > 0$. Schéma de principe des échanges :

Son **efficacité thermique** e_T est égale au rapport entre l'énergie utile et l'énergie dépensée :

$$e_T = \frac{|Q_1|}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 + Q_2} = \frac{1}{1 + \frac{Q_2}{Q_1}}$$

D'après le bilan entropique :

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

L'efficacité thermique (ou coefficient d'effet thermique) d'une pompe à chaleur ditherme est limitée par une valeur qui dépend de la température des sources :

$$e_T \leq \frac{1}{1 - \frac{T_2}{T_1}}$$

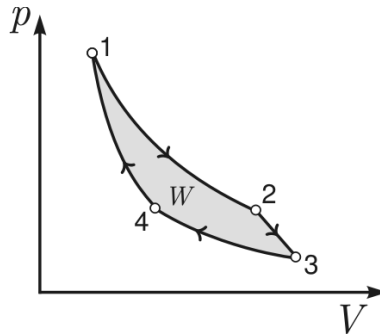
L'efficacité thermique est maximale pour le cas limite de la machine réversible. On remarque que la source froide T_2 étant donnée (milieu extérieur pour la plupart des cas), l'efficacité maximale théorique est une fonction décroissante de la température de la source chaude T_1 .

2.4 Cycle de Carnot

Un cycle ditherme réversible est appelé cycle de CARNOT. Une différence de température entre le système et la source implique l'irréversibilité des échanges thermiques. Au contact des sources, le système est donc en évolution isotherme. Lorsqu'il n'est pas en contact avec les sources, le système est

en évolution adiabatique réversible, c'est-à-dire isentropique. **Un cycle di-therme réversible, ou cycle de Carnot, est donc constitué par deux isothermes reliées par deux isentropiques.**

Bien que de tels cycles atteignent les limites de performances théoriques, les machines correspondantes sont difficiles à mettre en oeuvre techniquement, c'est pourquoi les machines usuelles fonctionnent suivant des cycles différents.



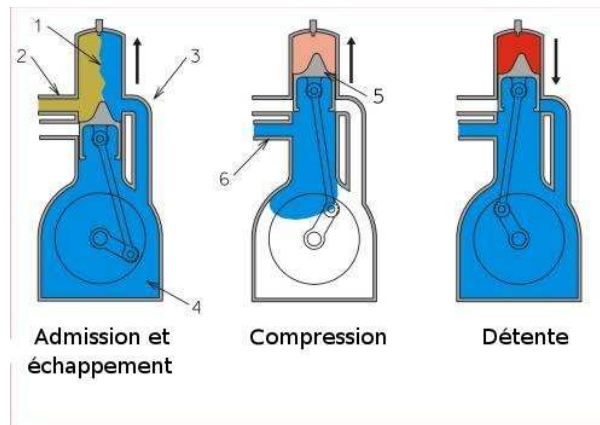
3 Technologie des moteurs à pistons

3.1 Moteur à deux temps

Le cycle à deux temps d'un moteur est un cycle de seulement deux mouvements linéaires du piston au lieu de quatre pour le moteur à quatre temps, bien que les mêmes quatre opérations (admission, compression, combustion/détente et échappement) soient toujours effectuées. Nous avons ainsi un cycle moteur par tour au lieu d'un tous les deux tours pour le moteur à quatre temps.

Le cycle se décompose ainsi :

1. compression, combustion, détente puis échappement avec transfert du mélange combustible frais par la fenêtre de transfert.
2. admission, aspiration puis compression du mélange dans la partie basse du moteur.



Les différentes étapes sont les suivantes ¹ :

- Le piston (5) est au point mort haut. La bougie déclenche la combustion et le piston descend, en comprimant en même temps le mélange présent dans le carter (4), sous le piston. C'est la partie motrice du cycle, le reste du parcours sera dû à l'inertie créée par cette détente. Cette étape est la détente. Lors de cette descente du piston, l'entrée (6) du mélange dans le carter se ferme.
- Arrivé à proximité point mort bas (image Admission et échappement), le piston débouche les lumières d'échappement (2) et d'arrivée de mélange dans le cylindre (3) : le mélange en pénétrant dans le cylindre chasse les gaz de la combustion (zone 1 de l'image). Il s'agit de l'étape d'admission - échappement.
- En remontant (image Compression), le piston comprime le mélange dans le cylindre. Au passage, il rebouche l'échappement (2) et l'entrée de mélange dans le cylindre (3), tout en créant une dépression dans le carter (4) qui va permettre l'arrivée du mélange air-essence par le conduit d'arrivée (6) dont l'entrée a été libérée par la position du piston proche du point mort haut. Cette étape est la compression.
- Une fois arrivé à nouveau au point mort haut, le cycle peut recommencer à partir du premier point.

1. https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_à_deux_temps

3.2 Moteur essence à quatre temps

Le cycle de fonctionnement se décompose de manière analytique en quatre temps ou phases. Le mouvement du piston est initié par la combustion (augmentation rapide de la température et donc de la pression des gaz) d'un mélange de carburant et d'air (comburant) qui a lieu durant le temps moteur. C'est le seul temps produisant de l'énergie ; les trois autres temps en consomment mais le rendent possible. Le piston se déplace pendant le démarrage grâce à une source d'énergie externe (souvent un démarreur ou lanceur : un moteur électrique est couplé temporairement au vilebrequin) jusqu'à ce qu'au moins un temps moteur produise une force capable d'assurer les trois autres temps avant le prochain temps moteur. Le moteur fonctionne dès lors seul et produit un couple sur son arbre de sortie.

Voici une description des cycles successifs d'un moteur à quatre temps ² :

1. Admission d'un mélange d'air et de carburant pulvérisé, préalablement mélangé et préparé par divers composants (carburateur ou système d'injection indirecte) : ouverture de la (des) soupape(s) d'admission et descente du piston, ce dernier aspire ce mélange dans le cylindre.
2. Compression du mélange : fermeture de la soupape d'admission, puis remontée du piston qui comprime le mélange jusqu'à 30 bars et 400 à 500 °C dans la chambre de combustion.
3. Combustion et détente aux environs du point mort haut (PMH) : moment auquel le piston atteint son point culminant et auquel la compression est au maximum ; la bougie d'allumage, connectée à un système d'allumage haute tension, produit une étincelle quelques degrés avant le PMH ; la combustion initiée qui s'ensuit constitue le temps moteur ; les gaz chauds à une pression de 40 à 60 bars repoussent le piston, initiant le mouvement.
4. Échappement : ouverture de la (ou des) soupape(s) d'échappement et remontée du piston qui chasse les gaz brûlés détendus dans le collecteur d'échappement. Et un nouveau cycle commence en 1.

2. <https://www.youtube.com/watch?v=I88C10GQ1e8>

3.3 Moteur diesel à quatre temps

Le fonctionnement repose sur l'auto-inflammation du gazole, fioul lourd ou encore huile végétale brute dans de l'air comprimé à un rapport de compression de plus de 15 du volume du cylindre, dont la température est portée à quelque 600 °C. Sitôt le carburant injecté (pulvérisé) dans l'air comprimé, celui-ci s'enflamme presque instantanément, sans qu'il ne soit nécessaire de recourir à un allumage commandé par bougie.

Le cycle Diesel à quatre temps comporte :

1. Admission d'air par l'ouverture de la (des) soupape(s) d'admission et la descente du piston.
2. Compression de l'air par remontée du piston, la (les) soupape(s) d'admission étant fermée(s).
3. Injection - combustion - détente : peu avant le point mort haut, on introduit, par un injecteur haute pression le carburant pour former un mélange instable avec l'oxygène de l'air comprimé. La combustion rapide qui s'ensuit constitue le temps moteur, les gaz chauds en expansion rapide repoussent le piston, libérant une partie de leur énergie. Celle-ci peut être mesurée par la courbe de puissance moteur.
4. Échappement des gaz brûlés par l'ouverture de la (des) soupape(s) d'échappement, poussés par la remontée du piston.