

Machines thermiques réelles

Niveau : CPGE/L1

Prérequis : principes de la thermodynamique, transformations thermodynamiques, gaz parfait, loi de Laplace, premier principe industriel

Carnot: No heat engine can be more efficient than a Carnot Engine

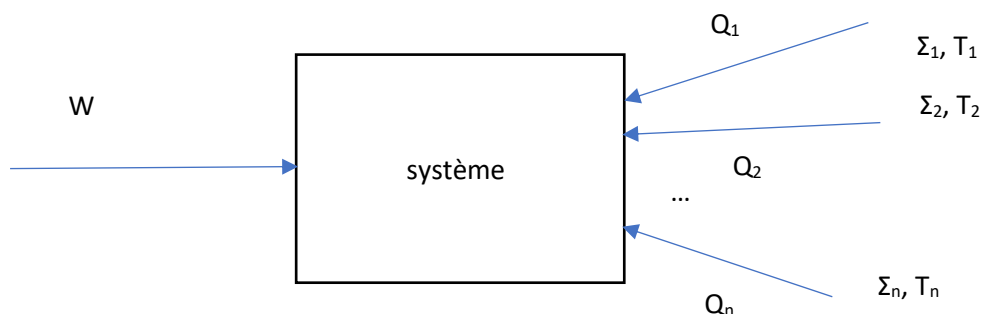


Une machine thermique est constituée d'un système qui décrit des cycles fermés successifs. Ce système échange du transfert thermique avec des thermostats et du travail avec les systèmes mécaniques en contact avec lui. Par exemple, on peut considérer le moteur de Stirling. Si on le place sur une tasse chaude il se met en mouvement, la question c'est pourquoi ? Visiblement, la tasse transfère de l'énergie à l'air compris dans le compartiment, et le piston permet de récupérer du travail.

I Généralités

1) Description

On modélise l'ensemble par le schéma suivant avec la convention habituelle pour W et Q (positifs si reçus par le système) :



Bilan énergétique et entropique :

Les machines thermiques ont des fonctionnements cycliques, de fait :

1^{er} principe : $\Delta U = 0$ donc $W + \sum_i Q_i = 0$

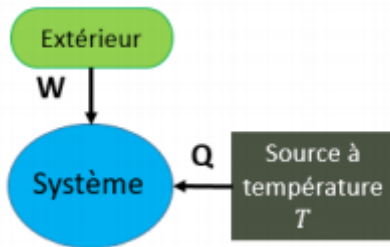
2^e principe : $\Delta S = 0$ donc $S_{éch} + S_{créée} = 0$

Par définition : $S_{éch} = \sum_i \frac{Q_i}{T_i}$

Comme $S_{créée} \geq 0$, on en déduit $S_{éch} \leq 0$

Ainsi : $\sum_i \frac{Q_i}{T_i} \leq 0$ (inégalité de Clausius)

2) Machine monotherme



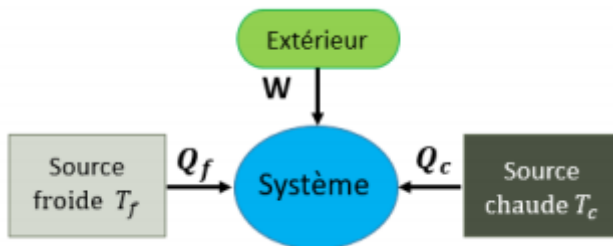
La relation de Clausius s'écrit : $\frac{Q}{T} \leq 0$ donc $Q \leq 0$

Or d'après le premier principe : $\Delta U = W + Q = 0$ donc $W \geq 0 \rightarrow$ le système reçoit du travail

Un cycle monotherme moteur est donc impossible.

Le moteur de Stirling n'est donc pas une machine monotherme. En réalité, il existe une seconde source de chaleur : la pièce, à température ambiante.

3) Machine ditherme



La relation de Clausius s'écrit : $\frac{Q_f}{T_f} + \frac{Q_c}{T_c} \leq 0$

Le premier principe s'écrit : $\Delta U = W + Q_f + Q_c = 0$

On distingue 2 types de machines dithermes :

- moteur thermique : machine thermique qui fournit du travail au milieu extérieur ($W < 0$), qui fournit un transfert thermique à une source froide ($Q_f < 0$) et qui reçoit un transfert thermique d'une source chaude ($Q_c > 0$)
- récepteur thermique : machine thermique qui reçoit du travail du milieu extérieur ($W > 0$), qui reçoit un transfert thermique d'une source froide ($Q_f > 0$) et qui fournit un transfert thermique à une source chaude ($Q_c < 0$)

Pour les moteurs, on définit le rendement : $\eta = \frac{-W}{Q_c}$

Le premier principe et l'inégalité de Clausius permettent d'écrire : $\eta \leq 1 - \frac{T_f}{T_c} = \eta_c$

Si le cycle réversible, alors $\eta = \eta_c$, qui est le rendement de Carnot : rendement maximum que l'on peut avoir.

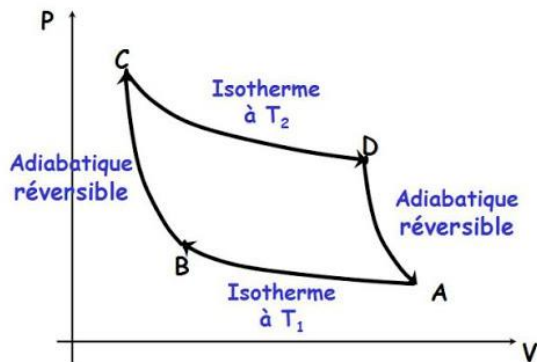
L'ordre de grandeur du rendement est de 40%.

Pour les récepteurs, on définit l'efficacité : $e = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie consommée}}$

Ex : pour une machine frigorifique, $e \leq \frac{T_f}{T_c - T_f} = e_c$

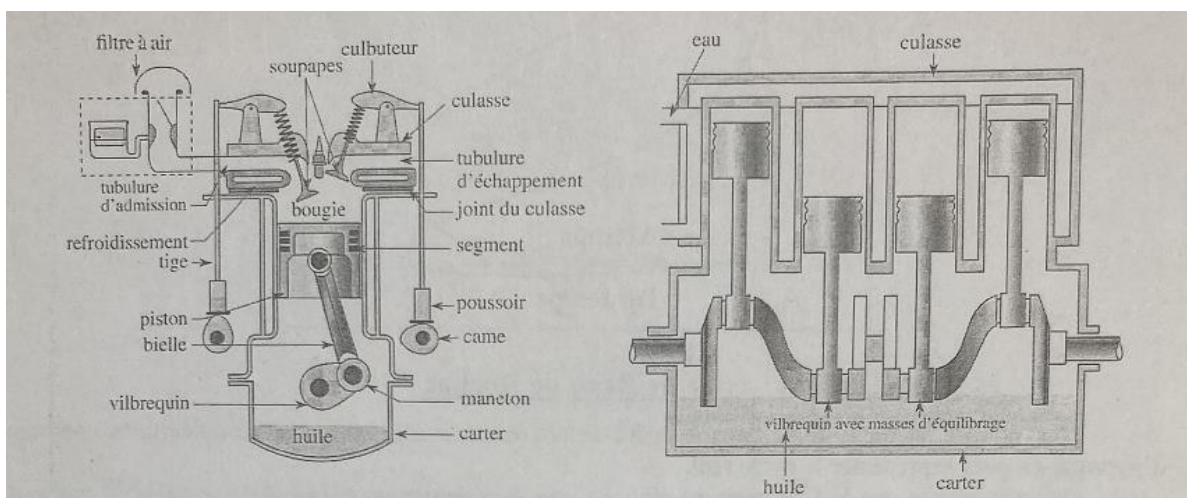
Pour une pompe à chaleur, $e \leq \frac{T_c}{T_c - T_f} = e_c$

Le cycle de Carnot est un cycle réversible. Il peut être moteur ou récepteur selon le sens de parcours : moteur dans le sens des aiguilles d'une montre, récepteur dans le sens trigonométrique.



II Différentes machines thermiques dithermes

1) Moteur à essence



Le cycle du moteur à essence peut être modélisé par un cycle de Beau de Rochas. Il se produit au niveau du cylindre d'un moteur à essence, qui en comporte généralement quatre.

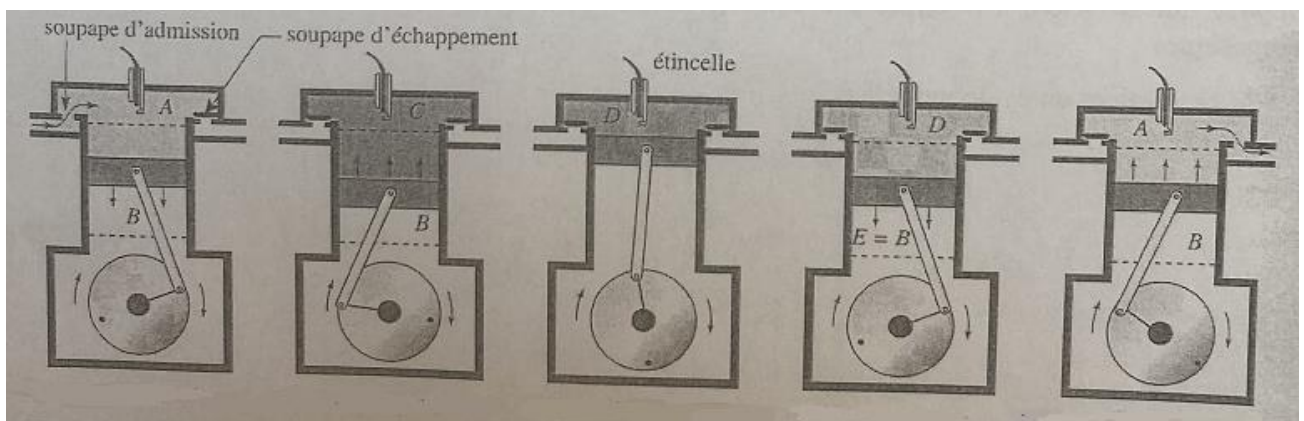
Le cycle d'un cylindre est parcouru en 4 temps (un « temps » correspondant à une course totale du piston) et nécessite deux tours de vilebrequin.

1^{er} temps : admission : la soupape d'admission s'ouvre et la soupape d'échappement est fermée. Le piston entraîné par le vilebrequin descend et aspire le mélange détonant venant du carburateur. La température du mélange est de l'ordre de 60°C à 80°C et sa pression est de l'ordre du bar.

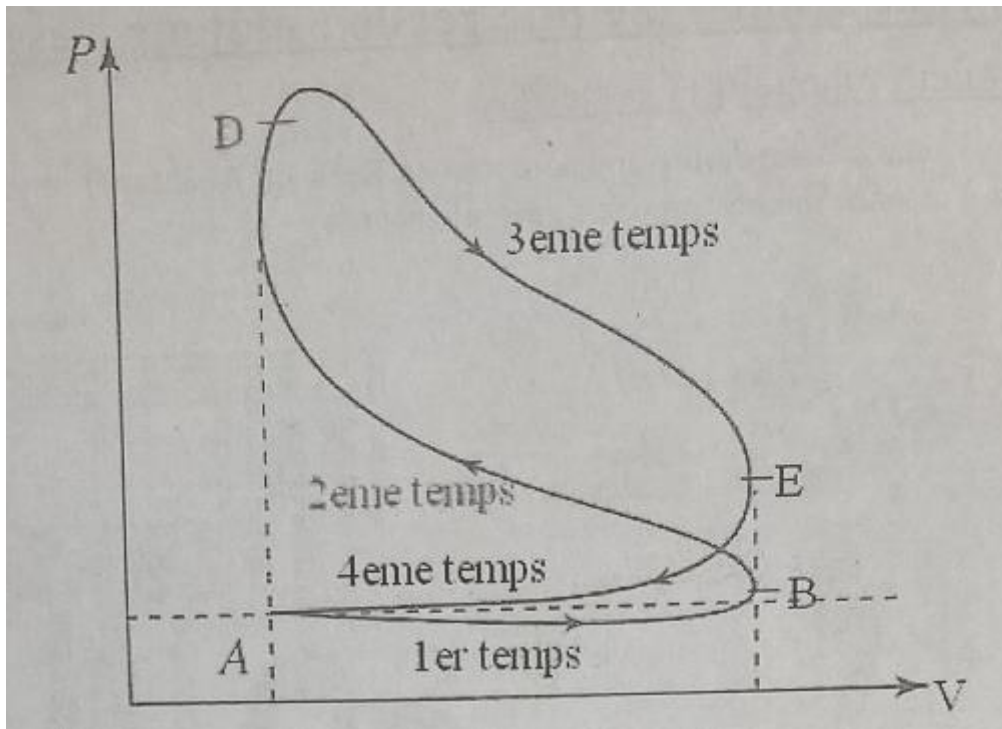
2^e temps : compression et combustion : les deux soupapes sont fermées et le piston comprime le mélange détonant en remontant. Le volume du mélange est réduit de 8 à 10 fois. Une étincelle électrique jaillit de la bougie. La combustion du mélange détonant élève la température entre 900°C et 1000°C, et la pression est de l'ordre de 60 à 80 bars.

3^e temps : détente : le piston est repoussé violemment vers le bas et le gaz de combustion se détend. C'est le seul temps qui fournit du travail.

4^e temps : échappement : la soupape d'admission restant fermée, la soupape d'échappement s'ouvre. Le piston éjecte les gaz brûlés dans l'atmosphère.



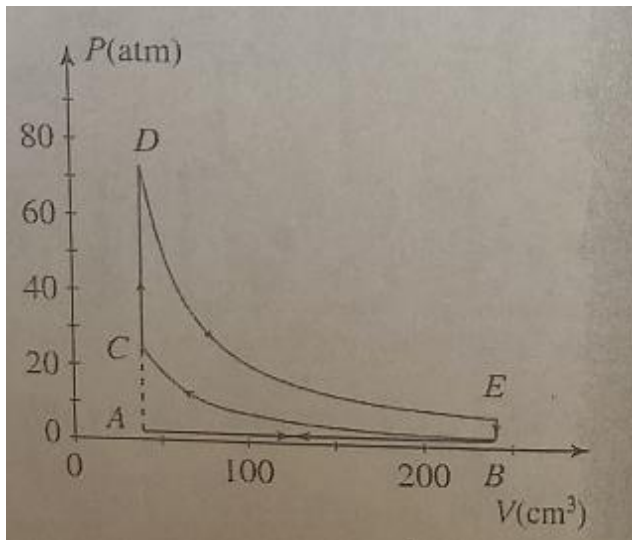
Expérimentalement, on obtient la représentation suivante du cycle dans un diagramme de Clapeyron :



Pour étudier un tel système dans le cadre de nos connaissances, il faut faire un certain nombre d'hypothèses pour représenter le cycle réel. On va supposer que le 1^{er} temps est réalisé à pression constante (étape AB), ce qui n'est pas tout à fait vrai à cause de la viscosité du gaz qui crée une légère dépression. Dans le 2^e temps, on va supposer que la compression est adiabatique (vrai car rapide) et réversible (étape BC). Puis la combustion se fait à volume constant (étape CD). Dans la réalité l'étincelle a lieu avant d'atteindre le volume minimal pour tenir compte de la durée d'étincelle et de combustion. Le 3^e temps est rapide donc adiabatique et on le considèrera réversible (étape DE). Le 4^e temps sera décomposé en deux étapes : une évacuation à volume constant pour équilibrer les pressions (étape EB) puis un échappement à pression constante (étape BA), ce qui n'est pas tout à fait vrai car la soupape d'échappement s'ouvre avant que le piston n'arrive au point bas pour une bonne évacuation des gaz.

Afin de raisonner sur un système fermé et d'éviter les étapes d'admission et de refoulement, on suppose que le retour EA passe par B et que les étapes AB et BA se compensent du point de vue énergétique.

On obtient :



Le rendement théorique (sous les hypothèses précédentes) s'écrit : $\eta = -\frac{W}{Q_{CD}} = 1 + \frac{Q_{EB}}{Q_{CD}}$

On pourrait montrer que $\eta = 1 - \left(\frac{V_{min}}{V_{max}}\right)^{\gamma-1}$

Si on prend $V_{max} = 9 V_{min}$ et $\gamma = 1,4$ (gaz parfait diatomique), on obtient $\eta = 0,58$

Le moteur à essence est une machine ditherme fonctionnant en régime moteur ne faisant pas intervenir de changements d'états. On va maintenant s'intéresser à une machine ditherme fonctionnant en régime récepteur et qui en plus fait intervenir des changements d'état. Nous allons également utiliser un outil permettant de trouver facilement son efficacité.

2) Réfrigérateur

Voir principe du réfrigérateur, voir diagramme des frigoristes (P, h).

- isobares : droites horizontales
- isenthalpiques : droites verticales
- isotitres : x constant
- isothermes
- isentropiques

Échanges d'énergie : étapes AB et DA

AB : compresseur : w

DA : évaporateur : q_f

$$e = \frac{q_f}{w} = 2,5, e_c = \frac{T_f}{T_c - T_f} = 7,5 \quad (T_f = 263 \text{ K et } T_c = 298 \text{ K})$$

En réalité le cycle n'est pas réversible. En fait la compression (AB) n'est pas réversible (donc n'est pas isentropique)

Conclusion

On a réinvesti les connaissances de thermodynamiques vues jusqu'ici pour arriver à décrire des machines qui nous entourent et qui sont très utilisées au quotidien.

Questions

- explication du moteur de Stirling avec la tasse ?
- pourquoi ne démarre-t-il pas seul ?
→ trop de frottements et pas assez de travail récupérer
- autre catégorie que moteurs et récepteurs ?
→ circuits de refroidissement
- caractéristique d'un bon fluide caloporteur ?
→ C_v grand