CHAPITRE 3 (partie 2)
Cycles thermodynamiques

Présenté par: Dr. Hatem ELAMINE

Définition du Cycle

Ensemble de transformations après lesquelles le fluide moteur retourne à son état initial.

- sur un cycle la variation totale d'énergie interne comme la variation totale d'entropie est nulle.
- dans un diagramme PV l'aire du cycle correspond au travail fournit par le cycle.

S'il est parcourut dans le sens des aiguilles d'une montre le cycle fournit du travail vers l'extérieure.

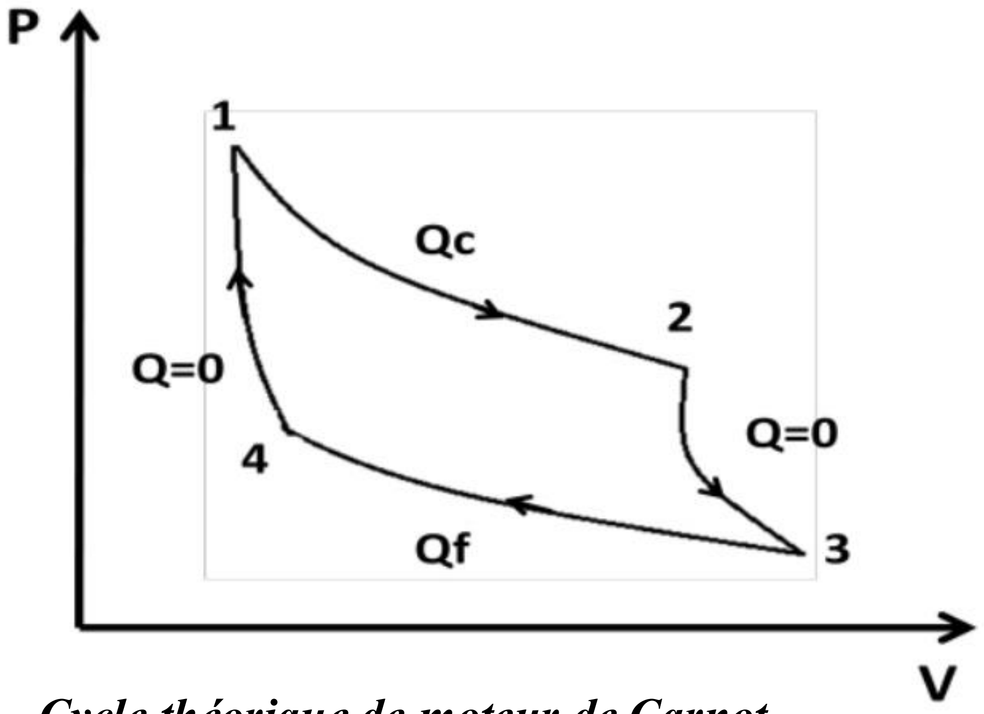
Cycle idéalises

Cycles qui approximent le processus réel (Approche pratique pour analyser les performances des systèmes moteurs).

Cycle de Carnot

C’est un cycle réversible de rendement maximal et le plus efficace (cycle théorique). L'efficacité des autres cycles et des machines réelles est toujours comparée à celle du cycle de Carnot, constitué de quatre processus réversibles (Figure):

1→2: Détente isotherme (avec apport de chaleur).
2→3: Détente adiabatique.
3→4: Compression isotherme (avec refroidissement).
4→1: Compression adiabatique.



Cycle théorique de moteur de Carnot

Rendement du cycle de Carnot

Généralement le rendement est donné par : $\eta = \dfrac{Enetgie\ sortée}{Enetgie\ entrée}$

Pour un cycle et d'après le 1er principe :

$$\Delta U = 0 = W_{Cycle} + Q_{Cycle}$$
$$= W_{Cycle} + Q_{Chaud} + Q_{Froid} \quad \Rightarrow \quad W_{Cycle} = -(Q_{Chaud} + Q_{Froid})$$

Avec : Q_{Froid} est la quantité de chaleur perdue à la source froide de température T_f.

Q_{Chaud} est la quantité de chaleur de la source chaude de température T_C.

Donc le rendement s'ecrit :

$$\eta = \frac{|W|}{Q_{Chaud}} = \frac{Q_{Chaud} + Q_{Froid}}{Q_{Chaud}}$$
$$= 1 + \frac{Q_{Froid}}{Q_{Chaud}}$$

$$\Rightarrow \quad \eta = 1 - \frac{|Q_{Froid}|}{Q_{Chaud}}$$

Rendement en fonction de T_{Chaud} et T_{Froid}

D'après la deuxième loi de la thermodynamique : $\Delta S_{cycle} = 0 = \int \frac{\delta Q}{T}$

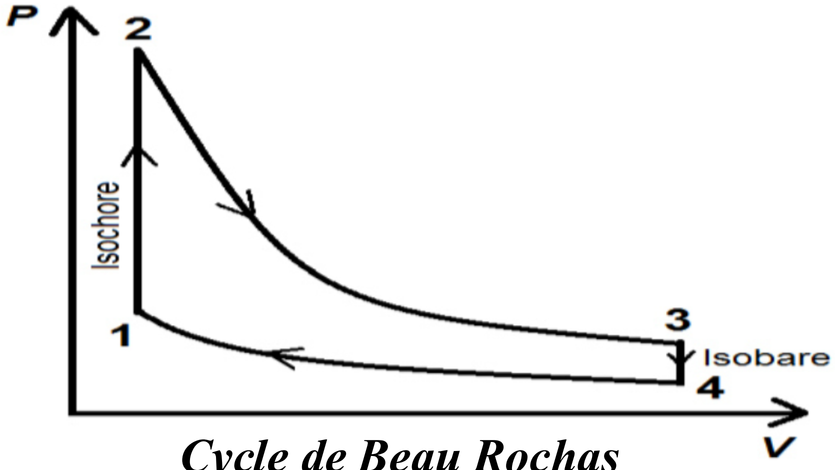
$$\int \frac{\delta Q_{Chaud}}{T_{Chaud}} + \int \frac{\delta Q_{Froid}}{T_{Froid}} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{Q_{Froid}}{Q_{Chaud}} = -\frac{T_{Froid}}{T_{Chaud}}$$

Donc : $\eta = 1 - \frac{T_{Froid}}{T_{Chaud}}$

Cycle de Beau Rochas (OTTO)

C'est un cycle théorique des moteurs à combustion interne à allumage commandé. Exemple : Moteur à essence.
Ce cycle est composé des transformations suivantes :

1→2 : Compression adiabatique du mélange (air-carburant).
2→3 : Combustion isochore.
3→4 : Détente adiabatique.
4→1 : Refroidissement isochore.



Cycle de Beau Rochas

Le long de 1-2 il y a échauffement à volume constant de T_1 à T_2, et entre 3 et 4 il y a refroidissement isochore de T_3 à T_4.

Les quantités de chaleur échangées:

$$Q_C = mc_v(T_2 - T_1) > 0$$

$$Q_F = mc_v(T_4 - T_3) < 0$$

Rendement du cycle d'Otto

Pour le cycle de Beau Rochas, le rendement énergétique est défini par :

$$\eta = \frac{Travail\ fourni}{Chaleur\ reçue} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} \quad \Rightarrow \eta = 1 - \frac{T_3 - T_4}{T_2 - T_1}$$

Sachant que:

$$\frac{T_1}{T_4} = \left(\frac{V_1}{V_4}\right)^{1-\gamma} \text{ , } \frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{V_2}{V_3}\right)^{1-\gamma} \quad \textbf{\textit{Avec}} \quad V_1 = V_2 \quad \textbf{\textit{et}} \quad V_3 = V_4$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_3 - T_4}{T_2 - T_1}$$

Donc le rendement s'écrit :

$$\eta = 1 - \frac{T_4}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_2} = 1 - \left(\frac{V_4}{V_1}\right)^{1-\gamma}$$

On peut écrire aussi : $\eta = 1 - a^{1-\gamma}$

Avec $a = \frac{V_4}{V_1} = \frac{V_4}{V_2}$ rapport de compression volumétrique.

Cycle de Diesel

Le moteur Diesel est un moteur à combustion interne dont l'allumage est spontané. Le cycle théorique du moteur Diesel est composé de quatre transformations réversibles représenté dans le diagramme de Clapeyron ci-dessous :

1→2 : compression adiabatique qui s'effectue seulement sur l'air.

• En point 2, le carburant est injecté

2→3 : combustion du carburant isobare.

3→4 : détente adiabatique.

4→1 : mise à l'atmosphère par échappement (refroidissement) isochore.

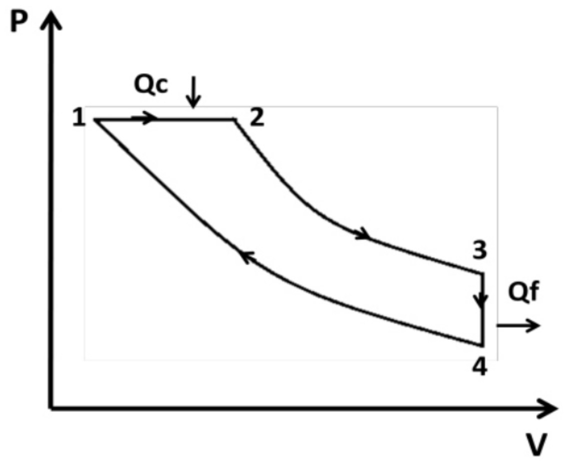


Figure III-3 : Cycle de moteur de Diésel

Le long de 1-2 il y a échauffement à pression constante de T_1 à T_2, et entre 3 et 4 il y a refroidissement isochore de T_3 à T_4.

Les quantités de chaleur échangées:

$$Q_C = mc_P(T_2 - T_2) > 0$$

$$Q_F = mc_V(T_4 - T_3) < 0$$

Rendement du Cycle Diesel

Le rendement théorique du cycle Diesel :

$$\eta = \frac{Travail\ fourni}{Chaleur\,reçue} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} \quad \Rightarrow \eta = 1 - \frac{c_V(T_3 - T_4)}{c_P(T_2 - T_1)}$$

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma}\frac{T_3 - T_4}{T_2 - T_1}$$

Soit ; $a = \dfrac{V_4}{V_1}$ rapport de compression volumétrique.

$b = \dfrac{V_3}{V_2}$ rapport de détente volumétrique, Donc on peut écrire le rendement $\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{b^{-\gamma} - a^{-\gamma}}{b^{-1} - a^{-1}}$

Si on introduit le rapport $c = V_2/V_1$ appelé "rapport d'injection" on obtient l'expression suivante du rendement:

$$\eta = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{1}{a^{\gamma-1}} \frac{c^{\gamma} - 1}{c - 1}$$

Le rendement thermique du moteur Diesel dépend du rapport d'injection et du rapport de compression.

Cycle de Joule

C'est un cycle des turbines à gaz. II est composé de deux adiabatiques reliées par deux isobares :

$1 \rightarrow 2$: compression adiabatique.

$2 \rightarrow 3$: échauffement isobare.

$3 \rightarrow 4$: détente adiabatique.

$4 \rightarrow 1$: refroidissement isobare.

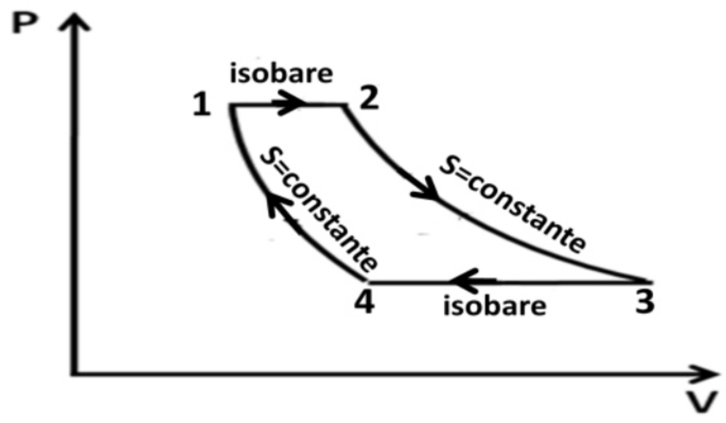


Figure III-4 : Cycle de Joule

Le long de 1-2 il y a échauffement à pression constante de T_1 à T_2, entre 3 et 4 il y a refroidissement isobare de T_3 à T_4.

Les quantités de chaleur échangées:

$$Q_C = mC_P(T_2 - T_2) > 0$$

$$Q_F = mC_P(T_4 - T_3) < 0$$

Rendement du cycle de Joule

$$\eta = 1 + \frac{Q_F}{Q_C} = 1 - \frac{T_3 - T_4}{T_2 - T_1}$$

Sachant que :

$$\frac{T_1}{T_4} = \left(\frac{P_1}{P_4}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad , \quad \frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{P_2}{P_3}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{T_3 - T_4}{T_2 - T_1}$$

Donc le rendement s'écrit:

$$\eta = 1 - \frac{T_4}{T_1} = 1 - \frac{T_3}{T_2} = 1 - \left(\frac{P_4}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

On peut écrire aussi

$$\eta = 1 - \left(\frac{V_4}{V_1}\right)^{\gamma-1} = 1 - a^{\gamma-1}$$

Avec $a = V_4/V_1$ rapport de compression volumétrique

C'est le cycle du moteur à air chaud qui comprend :

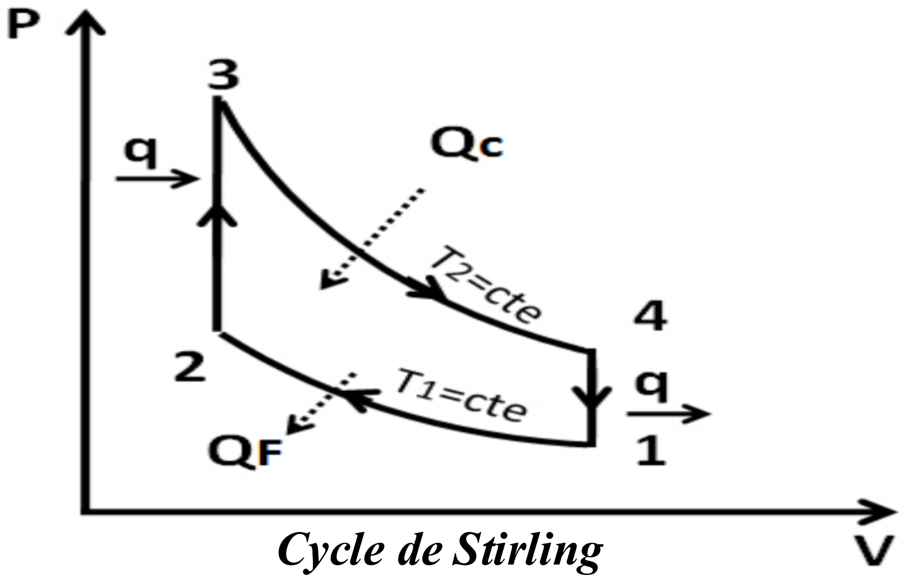
Le cycle est constitué des quatre transformations suivantes :

1→2 Compression isotherme: $W_{12} = -mRT_1 (V_2/V_1) > 0$ et $Q_{12} = -W_{12}$

2→3 Chauffage isochore: $W_{23} = 0$ et $Q_{23} = U_3 - U_2 = mc_v(T_2 - T_1)$

3→4 Détente isotherme: $W_{34} = -mRT_2 \ln(V_4/V_3) < 0$ et $Q_{34} = -W_{34}$

4→1 Refroidissement isochore: $W_{41} = 0$ et $Q_{41} = U_4 - U_1 = mc_v(T_1 - T_2)$



Cycle de Stirling

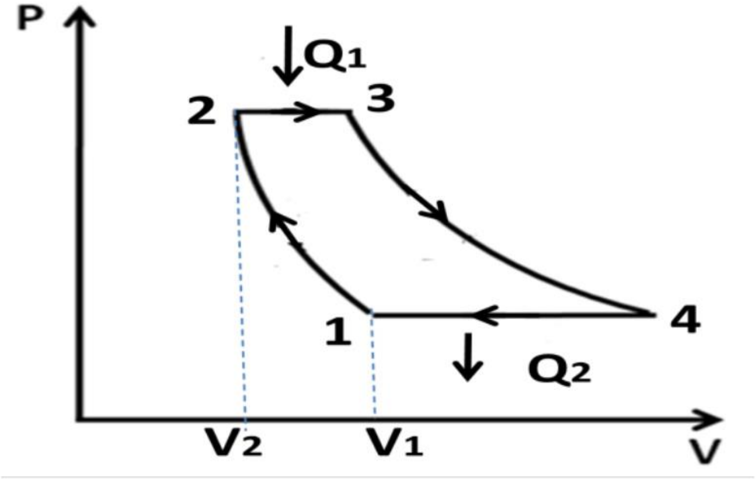
Expression du rendement:

$$\eta = 1 + \frac{Q_C}{Q_F} = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

Ce cycle est intéressant car sont rendement théorique est maximum. Cependant les machines pouvant le réaliser sont complexes et donc peu répandues.

Cycle de Brayton

Le cycle de Brayton est utilisé en général pour les turbines à gaz lorsque la compression et la détente sont réalisées avec des machines tournantes. Le cycle relatif au fonctionnement de la turbine à gaz en coordonnées (P.V) est représenté sur la figure ci-dessous.



Cycle de Baryton sur le diagramme de Clapeyron

- La compression s'effectue entre les points 1 et 2 (diminution du volume, augmentation de la température).
- La combustion de 2 à 3 (elle s'effectue à une pression pratiquement constante mais le volume augmente car il y a injection de combustible et allumage).
- La détente de 3 à 4. L'échappement à l'atmosphère est représenté par une transformation à pression constante, celle-ci étant à peu près la pression atmosphérique.

D'après le 1ere principe

$$\Delta U = W + Q_1 + Q_2$$

Pour un cycle $W + Q_1 + Q_2 = 0$

Pour les compressions et détentes qui sont des adiabatiques réversibles, on a :

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}$$

On définit le rendement énergétique par

$$\eta = 1 - \frac{Q_1}{Q_2} = 1 + \frac{T_1 - T_4}{T_3 - T_2}$$

Rendement énergétique du cycle de Brayton : $\eta = 1 - \dfrac{1}{\left(\dfrac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}}$