

CHAPITRE II : LA THERMODYNAMIQUE DES CYCLES MOTEURS



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf Mila

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

2^{eme} Année Master Génie Mécanique : Energétique

A.U 2020/2021, Semestre 1

Module : **MCIA**

Responsable du module : **Dr. A. M. BOUCHOUCHA**

Chapitre II. La thermodynamique des cycles moteurs:

- ✓ Le cycle de BEAU DE ROCHAS-Otto.
- ✓ Le cycle Diesel.
- ✓ Le cycle de Sabathé.

II.1. Le cycle de Beau de Rochas

Dans son brevet déposé en 1862, l'ingénieur français Beau de Rochas (1815-1908), avait proposé le moteur à explosion à gaz, et proposé d'appliquer le processus décrit ci-dessous à une masse gazeuse emprisonnée dans un moteur à piston. Il établit le cycle thermodynamique idéal des moteurs à explosion à quatre temps. En 1876, l'idée a été appliquée et développée par l'ingénieur Otto, qu'il a inventé le premier moteur à combustion interne à 4 temps et à allumage par bougie.

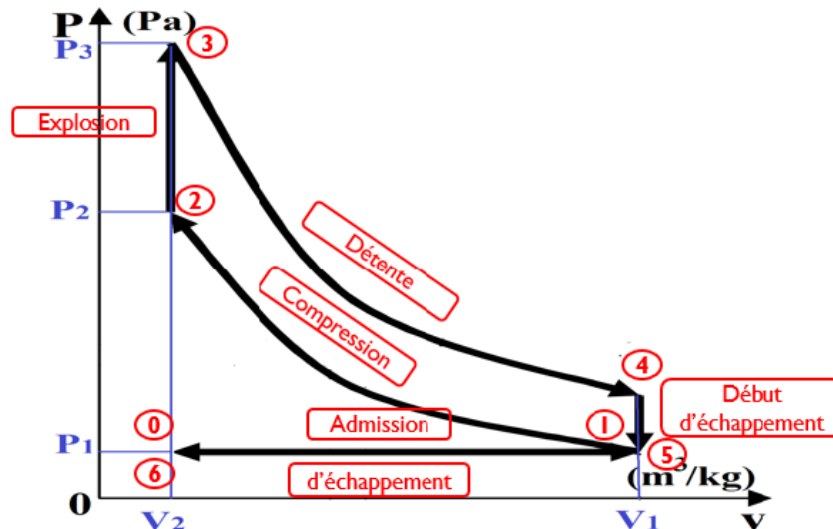


Figure II.1. Cycle d'Otto (diagramme PV).

Quatre étapes du cycle de Carnot sont présentées à savoir :

0 à 1 : Admission des gaz carburés (air + carburant) ($m_a + m_c$).

$$V_1 = V_U + V_0 \text{ et } V_2 = V_0.$$

a. 1 à 2 : *Compression adiabatique 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 ;

La transformation est adiabatique réversible:

$$P \cdot V^\gamma = Cte,$$

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma \Rightarrow \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma = \left(\frac{V_U + V_0}{V_0}\right)^\gamma = \varepsilon^\gamma$$

$$T \cdot V^{\gamma-1} = Cte$$

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_U + V_0}{V_0}\right)^{\gamma-1} = \varepsilon^{\gamma-1}$$

C.-à-d. soit

$$\frac{P_2}{P_1} = \varepsilon^\gamma \text{ ou } \frac{T_2}{T_1} = \varepsilon^{\gamma-1}$$

b. 2 à 3 : *Combustion à volume constant (explosion).*

Apport de chaleur par combustion de m_c en présence de l'oxygène de m_a .

$$Q_1 = (m_a + m_c) C_v (T_3 - T_2) = m_c \cdot PCI$$

CHAPITRE II : LA THERMODYNAMIQUE DES CYCLES MOTEURS

m_a : Masse de l'air.

m_c : Masse du carburant.

PCI : Pouvoir calorifique du carburant.

c. 3 à 4 : *Détente adiabatique des gaz. (Temps moteur).*

Les gaz chauds à une pression de 40 à 60 bars repoussent le piston, vers le point mort bas (PMB) initiant le mouvement :

$$T \cdot V^{\gamma-1} = Cte$$
$$T_4 V_4^{\gamma-1} = T_3 V_3^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = \varepsilon^{\gamma-1} \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \varepsilon^{\gamma-1}$$

d. 4 à 1 : *Echappement des gaz brûlés à volume constant.*

Remontée du piston vers le point mort haut (PMH) en chassant les gaz brûlés détendus dans le collecteur d'échappement avec dégagement de chaleur Q_2 .

Avec :

$$Q_2 = (m_a + m_c)C_v(T_4 - T_1)$$

Rendement théorique du cycle de Beau de Rochas

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{(m_a + m_c)C_v(T_4 - T_1)}{(m_a + m_c)C_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

Avec

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

Donc

$$\eta_{th} = 1 - \frac{\frac{T_1 T_3}{T_2} - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1 T_3 - T_1 T_2}{T_2(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1(T_3 - T_2)}{T_2(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$
$$\eta_{th} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$$

II.2. Le cycle Diesel

Comme le cycle de Beau de Rochas et Otto, Rudolf Diesel cherche à appliquer le même principe dans les moteurs à combustion interne à allumage commandé avec une technique plus simple, petite et accessible, permettant l'usage de n'importe quel carburant. En 1892, il dépose un brevet avec ce principe, dans lequel, la combustion est déclenchée par la forte compression dans la chambre de combustion, et non par allumage par bougie.

Comme dans les cycles de Carnot et d'Otto, le moteur avec le cycle diesel fonctionne avec l'air entre deux sources thermiques, une à une température élevée (chaude) et l'autre à une température plus basse (froide). Quatre étapes du cycle de diesel sont proposées :

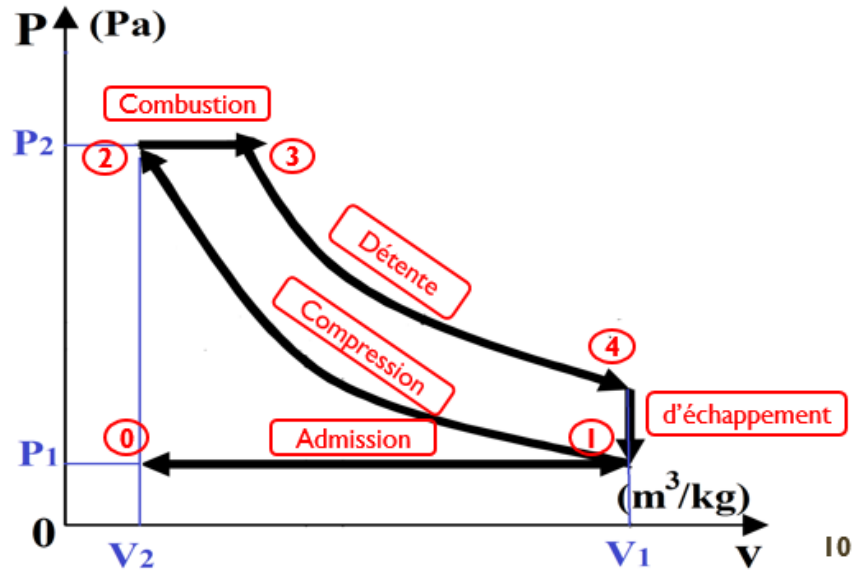


Figure II.2. Cycle Diesel (diagramme PV).

0 à 1 : Admission des gaz carburés (air + carburant) ($m_a + m_c$).

a. 1 à 2 : Compression adiabatique du mélange.

Transformation adiabatique d'un gaz parfait:

$$\begin{aligned}
 P \cdot V^\gamma &= Cte, \\
 \frac{P_2}{P_1} &= \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma = \left(\frac{V_U + V_0}{V_0}\right)^\gamma = \varepsilon^\gamma \\
 T \cdot V^{\gamma-1} &= Cte \\
 \frac{T_2}{T_1} &= \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_U + V_0}{V_0}\right)^{\gamma-1} = \varepsilon^{\gamma-1}
 \end{aligned}$$

C.-à-d. soit

$$\frac{P_2}{P_1} = \varepsilon^\gamma \text{ ou } \frac{T_2}{T_1} = \varepsilon^{\gamma-1}$$

b. 2 à 3 : Combustion à pression constante.

Apport de chaleur par combustion de m_c en présence de l'oxygène de m_a .

$$Q_1 = (m_a + m_c)C_p(T_3 - T_2) = m_c \cdot PCI$$

m_a : Masse de l'air.

m_c : Masse du carburant.

PCI : Pouvoir calorifique du carburant.

c. 3 à 4 : Détente adiabatique des gaz. (Temps moteur).

Les gaz chauds à une pression de 40 à 60 bars repoussent le piston, vers le point mort bas (PMB) initiant le mouvement :

CHAPITRE II : LA THERMODYNAMIQUE DES CYCLES MOTEURS

$$\frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^\gamma = \varepsilon'^\gamma$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^{\gamma-1} = \varepsilon'^{\gamma-1}$$

d. 4 à 1 : Echappement des gaz brûlés à volume constant.

Remontée du piston vers le point mort haut (PMH) en chassant les gaz brûlés détendus dans le collecteur d'échappement avec dégagement de chaleur Q_2 .

Avec :

$$Q_2 = (m_a + m_c)C_v(T_4 - T_1)$$

Rendement théorique du cycle de Diesel

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{(m_a + m_c)C_v(T_4 - T_1)}{(m_a + m_c)C_p(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

Avec l'équation d'état des gaz parfait

$$PV = m.R.T \Rightarrow T = \frac{P.V}{m.R}$$

Donc

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{P_4 \cdot V_4 - P_1 \cdot V_1}{P_3 \cdot V_3 - P_2 \cdot V_2}$$

Avec : $P_2 = P_3$ (transformation isobare), $V_4 = V_1$ (transformation isochore).

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{V_1(P_4 - P_1)}{P_2(V_3 - V_2)} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{\left(\frac{P_4}{P_2} - \frac{P_1}{P_2}\right)}{\left(\frac{V_3}{V_1} - \frac{V_2}{V_1}\right)}$$

Or, on sait que :

$$\frac{P_4}{P_2} = \frac{P_4}{P_3} = \frac{1}{\varepsilon'^\gamma}$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{1}{\varepsilon^\gamma}$$

$$\frac{V_3}{V_1} = \frac{V_3}{V_4} = \frac{1}{\varepsilon'}$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\varepsilon}$$

$$\Rightarrow \eta_{th} = 1 - \frac{1}{\gamma} \left[\frac{\left(\frac{1}{\varepsilon'}\right)^\gamma - \left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^\gamma}{\frac{1}{\varepsilon'} - \frac{1}{\varepsilon}} \right] = 1 - \frac{1}{\gamma} \left[\frac{\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^\gamma \left(\left(\frac{1}{\varepsilon'}\right)^\gamma - 1 \right)}{\left(\frac{1}{\varepsilon}\right) \left(\left(\frac{1}{\varepsilon'}\right) - 1 \right)} \right]$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{\varepsilon}{\varepsilon^\gamma} \left[\frac{\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon'}\right)^\gamma - 1}{\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon'}\right) - 1} \right]$$

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2}, \varepsilon' = \frac{V_4}{V_3} = \frac{V_1}{V_3} \Rightarrow \frac{\varepsilon}{\varepsilon'} = \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{V_3}{V_1} = \frac{V_3}{V_2} = \delta$$

$$\eta_{th} = 1 - \frac{1}{\gamma} \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}} \cdot \left(\frac{\delta^\gamma - 1}{\delta - 1} \right)$$

II.3. Le cycle de Sabathé

$$\eta_{th} = \frac{W_e}{(Q_1 + Q'_1)} = \frac{(Q_1 + Q'_1) - (Q_2 + Q'_2)}{(Q_1 + Q'_1)}$$

$$= \frac{Q_1 \eta_{th1} + Q'_1 \eta_{th2}}{(Q_1 + Q'_1)}$$

