

Moteur à combustion interne (MCI)

Le moteur à combustion interne (MCI) désigne tout système thermique qui convertit l'énergie chimique d'un carburant en énergie mécanique.

L'énergie chimique du carburant est d'abord convertie en énergie thermique au moyen d'une combustion ou d'une oxydation avec de l'air à l'intérieur du moteur (dans la chambre de combustion). Cette énergie thermique élève la température et par suite, la pression des gaz à l'intérieur du moteur, puis le gaz à haute pression se dilate contre les mécanismes mécaniques du moteur. Cette expansion est convertie par les liaisons mécaniques du moteur en un mouvement rotatif de vilebrequin rotatif, qui est la sortie du moteur. Le vilebrequin, à son tour, est relié à une transmission et/ou un groupe motopropulseur pour transmettre l'énergie mécanique de rotation à l'utilisation finale souhaitée.

La plupart des moteurs à combustion interne, à allumage commandé et à allumage par compression, fonctionnent soit selon un cycle à quatre temps, soit selon un cycle à deux temps.

1.1 Moteurs à quatre temps

- 1 **Première course (admission) :** Le piston se déplace du PMH (Point Mort Haut) au PMB (Point Mort Bas) avec la soupape d'admission ouverte et la soupape d'échappement fermée. Cela crée un volume croissant dans la chambre de combustion, qui à son tour crée un vide.

La différence de pression résultante à travers le système d'admission entre la pression atmosphérique à l'extérieur et le vide à l'intérieur provoque, l'introduction d'air dans le cylindre.

- 2 **Deuxième course (compression et combustions) :**

- **Moteur SI :** Lorsque le piston atteint le PMB, la soupape d'admission se ferme et le piston revient au PMH avec toutes les soupapes fermées. Cela comprime le mélange air-carburant, en augmentant à la fois la pression et la température dans le cylindre.

La **combustion** du mélange air-carburant se produit dans un temps très court. Elle commence vers la fin de la course de compression légèrement au PMH (c'est-à-dire une combustion à volume presque constant). La combustion change la composition du mélange gazeux en celle des produits d'échappement et augmente la température dans le cylindre jusqu'à une valeur de crête très élevée. Ceci, à son tour, augmente la pression dans le cylindre à une valeur de crête très élevée.

- **Moteur CI :** Le même que dans un moteur SI sauf que seul l'air est comprimé et la compression est à des pressions et des températures plus élevées. Vers la fin de la course de compression, le carburant est injecté directement dans la chambre de combustion, où il se mélange à l'air très chaud. Cela provoque l'évaporation et l'auto-inflammation du carburant, provoquant le démarrage de la combustion.

- 3 **Troisième course (Détente):** la haute pression créée par le processus de combustion éloigne le piston du PMH. C'est la course qui produit le travail de sortie du cycle moteur. Au fur et à mesure que le piston se déplace du PMH au PMB, le volume du cylindre augmente, provoquant une chute de pression et de température.

- 4 **Quatrième course (échappement)** : La course d'échappement est la phase finale d'un moteur à quatre temps. Dans cette phase, le piston se déplace vers le haut, repoussant les gaz qui ont été créés au cours de la course de combustion. Les gaz sont sortis du cylindre à travers une soupape d'échappement au sommet du cylindre.

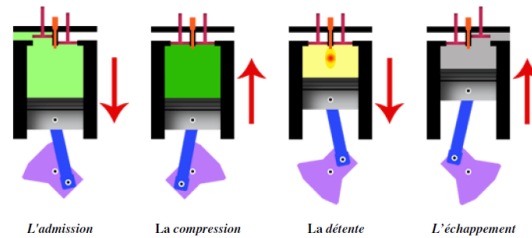


Fig.1 : Cycle à 4 temps dans un moteur diesel

1.2 Moteurs à deux temps

Dans un moteur à 2 temps, les cinq fonctions du cycle sont achevées en seulement deux coups de piston (ou un tour de vilebrequin). Aucune soupape d'admission ou d'échappement n'est utilisée, de petits trous appelés orifices de balayage dans la paroi du cylindre sont utilisés pour aspirer l'air et expulser l'échappement.

1. **Course de compression** : L'orifice d'admission s'ouvre, le mélange air-carburant pénètre dans la chambre et le piston se déplace vers le haut en comprimant ce mélange.
2. **Course de puissance** : Le gaz chauffé exerce une pression élevée sur le piston, le piston se déplace vers le bas (**expansion**), la chaleur perdue est évacuée.

2. Classifications des moteurs à combustion interne

Les moteurs à combustion interne peuvent être classés de différentes manières :

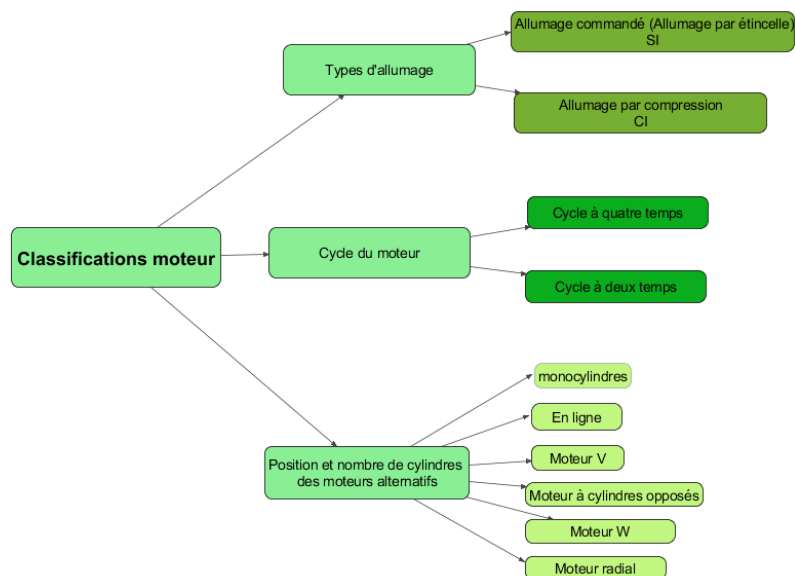


Fig.2 : Classifications des moteurs

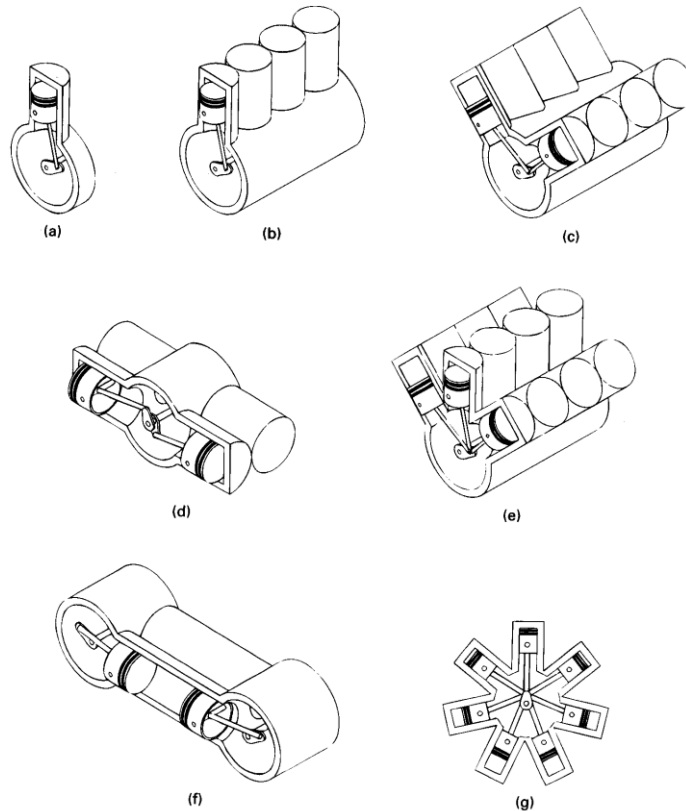


Fig.3 : Classification du moteur par position des cylindres, (a) monocylindre, (b) en ligne ou droit, (c) moteur en V, (d) cylindre opposé, (e) moteur en W, (f) piston opposé, (g) radial.

Moteur à allumage commandé SI : un moteur SI démarre le processus de combustion à chaque cycle à l'aide d'une bougie d'allumage.

Moteur à allumage par compression CI : le processus de combustion dans un moteur CI démarre lorsque le mélange air-carburant s'auto-enflamme en raison d'une température élevée dans la chambre de combustion causée par une compression élevée.

Moteur à quatre temps : un cycle à quatre temps subit quatre mouvements de piston sur deux tours du vilebrequin pour chaque cycle (720° , 180° pour chaque temps).

Moteur à deux temps : un cycle à deux temps a deux mouvements de piston sur un tour de vilebrequin (360°) pour chaque cycle.

Moteur monocylindres : le moteur a un cylindre et un piston reliés au vilebrequin.

Moteur en ligne : Les cylindres sont positionnés en ligne droite, l'un derrière l'autre le long du vilebrequin. Ils peuvent être constitués de 2 à 11 cylindres ou éventuellement plus. Les moteurs à quatre cylindres en ligne sont très courants pour les applications automobiles et autres.

Moteur en V : Deux rangées de cylindres à un angle l'un avec l'autre le long d'un seul vilebrequin. L'angle entre les rangées de cylindres peut être n'importe où de 15° à 120°, 60°-90° étant communs. Les moteurs en V ont un nombre pair de cylindres de 2 à 20 ou plus.

Moteur à cylindres opposés : Deux rangées de cylindres en vis-à-vis sur un seul vilebrequin (un moteur en V avec un angle de 180° V). Ceux-ci sont courants sur les petits avions et certaines automobiles avec un nombre pair de cylindres de deux à huit ou plus.

Moteur en W : Identique à un moteur en V sauf avec trois rangées de cylindres sur le même vilebrequin.

Moteur radial : Moteur à pistons positionnés dans un plan circulaire autour du vilebrequin central. Les bielles des pistons sont reliées à une bielle maîtresse qui, à son tour, est reliée au vilebrequin

3. Caractéristiques géométriques et paramètres du moteur

D : diamètre d'alésage.

S : course du piston, $S = 2r$

r : rayon de la manivelle.

L_b : Longueur de la bielle.

θ : Angle de rotation de vilebrequin.

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}; \quad \omega = \frac{2\pi N}{60}$$

N : la vitesse du moteur (vitesse de rotation de vilebrequin)

U_p : Vitesse du piston, $U_p = 2SN$

V_{cc} : Volume de la chambre de combustion

V_d = V_{PMB} - V_{PMH}

PMH : Point Mort Haut.

PMB : Point Mort Bas.

$$V_d = \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) S$$

pour un moteur à z cylindres (la cylindrée totale)

$$V_{tot} = z * V_d$$

$$\varepsilon : \text{taux de compression, } \varepsilon = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_{PMB}}{V_{PMH}} = \frac{V_{cc} + V_d}{V_{cc}}$$

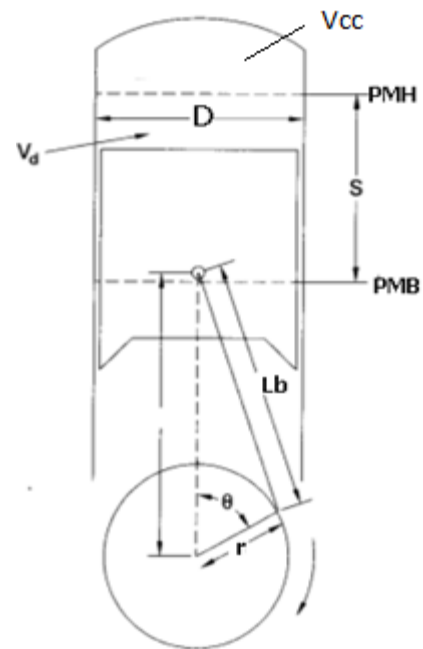


Fig.4 : Schéma synoptique du système Piston-Bielle-Manivelle.

Le rapport AF (air-carburant) et le rapport FA (carburant-air) sont des paramètres utilisés pour décrire le rapport de mélange :

$$AF = \frac{m_a}{m_f} = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f}$$

m_a : Masse de l'air

m_f : Masse du carburant

$\dot{m}_a$: Débit massique de l'air

$\dot{m}_f$: Débit massique du carburant

$$FA = \frac{1}{AF}$$

4. Rendement du moteur

4.1 Rendement de combustion

$$\eta_c = \frac{Q_{in}}{m_f Pci}$$

Pci : Pouvoir calorifique inférieur du combustible

4.2 Rendement thermique

$$\eta_{th} = \frac{W_{net}}{Q_{in}}$$

W : Travail net d'un cycle ;

Q_{in} : Chaleur fournie pendant la combustion.

4.3 Rendement volumétrique

$$\eta_v = \frac{m_a}{\rho_a V_d} = \frac{n \dot{m}_a}{\rho_a V_d N}$$

ρ_a : Densité d'air ;

n : Nombre de tours par cycle ($n=2$ pour moteur à 4 temps, $n=1$ pour moteur à 2 temps).

N : Vitesse du moteur (vitesse de rotation de vilebrequin) ;

V_d : Volume du cylindre.

5. Cycles moteur

Le cycle Otto

Le rendement du cycle étant le rapport de l'énergie utile sur l'énergie dépensée on donc peut noter :

$$\eta_{otto} = \frac{W_{cycle}}{Q_c} = \frac{Q_{23} - Q_{41}}{Q_{23}} = 1 - \frac{Q_{41}}{Q_{23}}$$

$$Q_{23} = mC_v(T_3 - T_2)$$

$$Q_{41} = mC_v(T_4 - T_1)$$

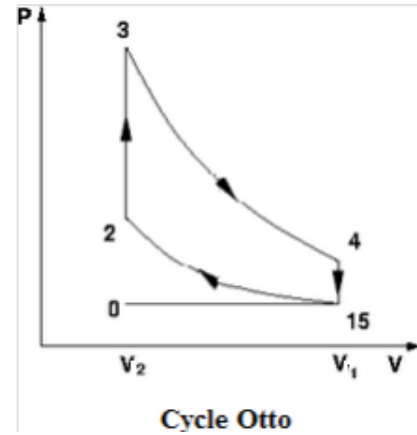
$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$$

$$T_3 V_3^{\gamma-1} = T_4 V_4^{\gamma-1}$$

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

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

$$\eta_{otto} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{\gamma-1}}$$



Le cycle Diesel

$$\eta_{Diesel} = \frac{W_{cycle}}{Q_c} = \frac{Q_{23} - Q_{41}}{Q_{23}} = 1 - \frac{Q_{41}}{Q_{23}}$$

$$Q_{41} = mC_v(T_4 - T_1)$$

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_2 V_2^{\gamma-1}$$

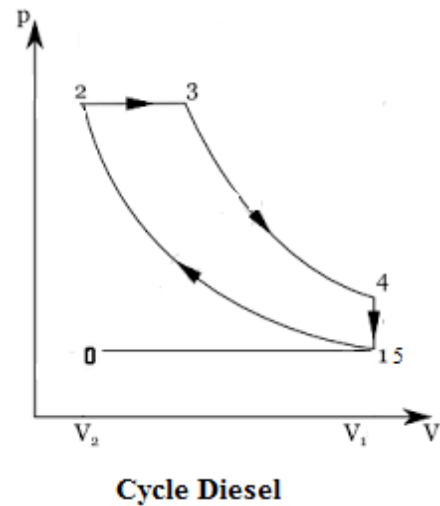
$$T_3 V_3^{\gamma-1} = T_4 V_4^{\gamma-1}$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = \alpha$$

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

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

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



Référence :

- [1] Willard W. Pulkrabek - Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine-Prentice Hall (1997).
- [2] M. BENCHERIF, POLYCOPIE Moteurs à Combustion Interne, Combustion et Eléments de Carburation.
- [3] J. B. Heywood, Internal Combustion Engine Fundamentals, Second Edition, 2018.