

Moteurs à Combustion Interne

SOMMAIRE

	Page
Chapitre 1 : Généralités sur les moteurs à combustion interne	
1-1. Introduction	1
1-2. Vue globale du Moteur Volumétrique à piston à quatre temps	3
1-3. Principales différences entre le moteur à essence et le moteur diesel	13
1-4. Cycle théorique pour les moteurs diesel rapides	15
1-5. Caractéristiques du moteur à combustion interne	16
Bibliographie	

1-1. Introduction

Le moteur à combustion interne est une machine motrice qui sert à convertir de l'énergie emmagasinée dans un carburant (**Pouvoir Calorifique**) en une énergie thermique (**Chaleur, Enthalpie, Energie Calorifique**), puis en une énergie mécanique (**Travail Mécanique, Couple**). Dans les moteurs à combustion interne, la production de l'énergie thermique se fait dans un volume fermé (**Chambre de Combustion, cylindre moteur**) confiné par la culasse, les soupapes fermées, la tête du piston et la chemise. La détente des gaz produits par la combustion du carburant actionne des organes actifs (**Piston-Bielle-Manivelle**) qui récupèrent cette énergie pour la convertir en travail utile (**Arbre moteur**).

D : diamètre d'alésage.

S : course du piston.

r : rayon de la manivelle.

L_b : Longueur de la bielle.

θ : Angle Vilebrequin.

V_c : Volume chambre de combustion

PMH : Point Mort Haut.

PMB : Point Mort Bas.

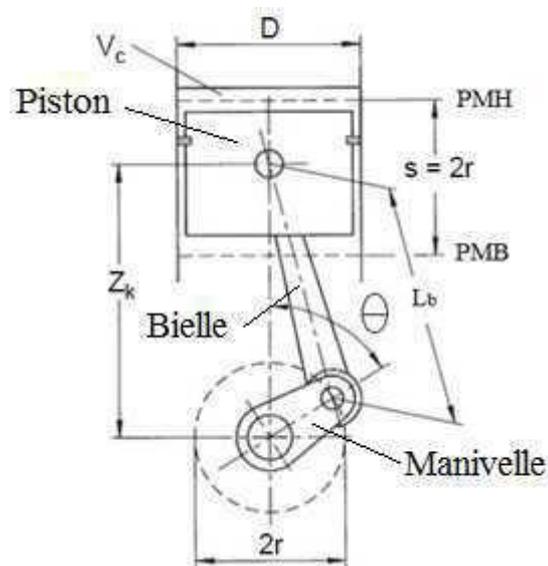


Figure 1-1. Schéma synoptique du système Piston-Bielle-Manivelle.

D'un point de vue purement académique, le moteur à combustion interne et la combustion constituent deux interfaces de recherche touchant aussi bien le domaine expérimental que théorique. En effet, l'industrie liée au design et à l'architecture du moteur, ainsi que la combustion regroupent des motoristes, des ingénieurs en construction mécanique, des énergéticiens, des métallurgistes en plus des chimistes et des physiciens. Beaucoup de spécialités telles que l'électronique, la commande et le contrôle ainsi que l'informatique industrielle se sont immiscées dans l'industrie de l'automobile et du moteur à combustion avec l'apparition de l'injection électronique et des calculateurs. Ceci grâce à la gestion électronique du moteur par BUS-CAN proposée par BOSCH vers 1980, appliquée sur des moteurs Mercedes en 1982 et généralisée dans toute l'Europe en 2000.

Depuis son apparition, le moteur à combustion interne n'a cessé d'évoluer. Cependant, cette évolution peut être regroupée en trois grandes phases conjoncturelles :

Phase 1 Augmentation du rendement thermique, de couple et de la puissance du moteur

Apparition du moteur à explosion et prolifération de son usage dans le transport et l'industrie. Puis, apparition du moteur diesel. Cette phase s'est focalisée sur l'amélioration des performances du moteur à combustion interne.

Phase 2 Diminution de la consommation en carburant

Tarissement des ressources énergétiques dans le monde ainsi que les fameuses crises pétrolières couplées aux très fortes demandes hydrocarbures et en carburants. Ceci a conduit tous les motoristes à se concentrer sur la réduction de la consommation spécifique en carburant du moteur.

Phase 3 Diminution des nuisances du moteur

Limitation des émissions polluantes émanant des moteurs montés sur les véhicules du trafic routier. Ainsi, avec les seuils de pollution de plus en plus sévères ont engagés les motoristes à concevoir des moteurs plus propres. Désormais, le cahier de charges soumis aux constructeurs automobiles et aux motoristes dans le monde doit veiller à garantir la production de moteurs puissants qui ont une consommation acceptable en carburant tout en restant propres.

D'une manière générale, les motoristes s'occupent à dresser des bilans thermiques en mesurant ou en calculant le couple moteur, la puissance, le rendement et consommation spécifique en carburant. Un fonctionnement correct du moteur est lié à la qualité du mélange comburant-carburant introduit dans le moteur à combustion interne.

Pour les physiciens c'est la nature de flamme qui constitue la pierre angulaire du travail. Ainsi, le moteur à explosion est siège d'une flamme de pré-mélange alors que dans un moteur diesel la flamme est une succession de flammes de pré-mélange et de diffusion rapide puis lente. La flamme étant une entité physique, elle possède une forme (plane, cylindrique ou sphérique) et une vitesse. Elle peut être aussi laminaire, turbulente ou adiabatique.

Pour les chimistes la combustion dans le moteur est une réaction d'oxydation rapide. Elle est gouvernée par la cinétique et l'équilibre chimique. Chaque réaction possède une vitesse de progression liée aux espèces mises-en jeu. L'oxydation peut être interprétée par des mécanismes réactionnels détaillés, réduits ou généralisés, regroupant en fonction de leurs ordres respectifs des réactions globales, des réactions élémentaires et des réactions de dissociations.

1-2. Vue globale du Moteur Volumétrique à piston à quatre temps

La structure du moteur volumétrique à piston qu'il soit à essence ou diesel se constitue généralement d'une culasse, d'un bloc moteur et d'un carter d'huile. Les principaux organes mobiles dans le moteur sont le piston, la bielle et le vilebrequin qui représentent l'embellage où la conversion d'énergie est assurée. Le moteur peut entraîner directement (pignon, chaîne de distribution) ou indirectement (courroie de transmission) plusieurs organes mobiles telles que l'arbre à cames, la pompe à eau, la pompe à l'huile de lubrification, la pompe à vide, la pompe de direction, la pompe d'alimentation en carburant le climatiseur et l'alternateur.

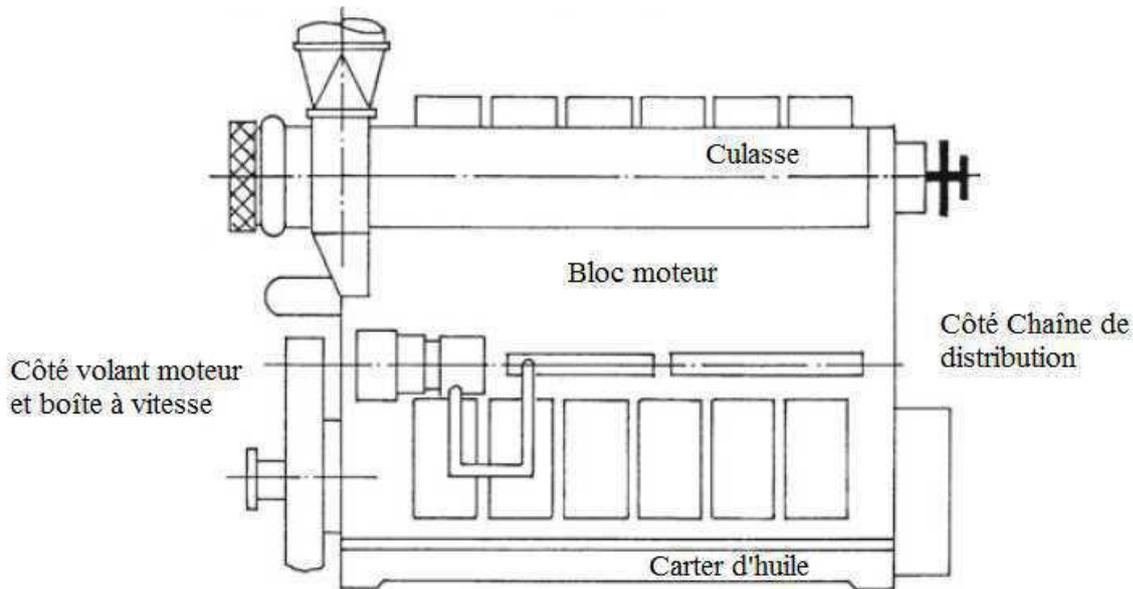


Figure 1-2. Vue globale du moteur volumétrique.

Vu de profil, le moteur possède un côté chaîne de distribution et un côté volant moteur. Les organes annexes au moteur sont multiples tels que le système de refroidissement, le système de graissage, la suralimentation, la filtration, la transmission, les systèmes d'embrayage et de freinage, la climatisation, l'alternateur et la pompe d'alimentation en carburant. Des normes doivent être utilisées pour situer et nommer les différents points du moteur. Pour cela, l'observateur se place face au côté avant (chaîne) du moteur pour situer les cylindres et tout organe moteur (paliers). Afin de situer le sens de rotation moteur, l'observateur se place face au volant moteur. Le bloc moteur et la culasse représentent le noyau de tout moteur thermique. En effet, c'est la culasse qui rassemble les éléments et pièces destinés à la distribution telles que l'arbre à cames, les soupapes et les culbuteurs. Le bloc moteur regroupe les éléments mobiles de la ligne d'arbre, soient, les pistons, les chemises, les bielles et le vilebrequin. Le bloc moteur est une pièce maîtresse du moteur car il protège le vilebrequin qui assure l'absorption du travail mécanique et la transmission du mouvement rotatif vers l'extérieur. Si le bloc moteur, la culasse ou bien un des éléments mobiles tels que le piston, la bielle, l'arbre à came ou la chemise se

détériorées sévèrement, l'arrêt du moteur est quasiment instantané. Un long travail de dépose du moteur dans un atelier et de remplacement des pièces endommagées sont impératifs afin de recouvrer un fonctionnement correct.

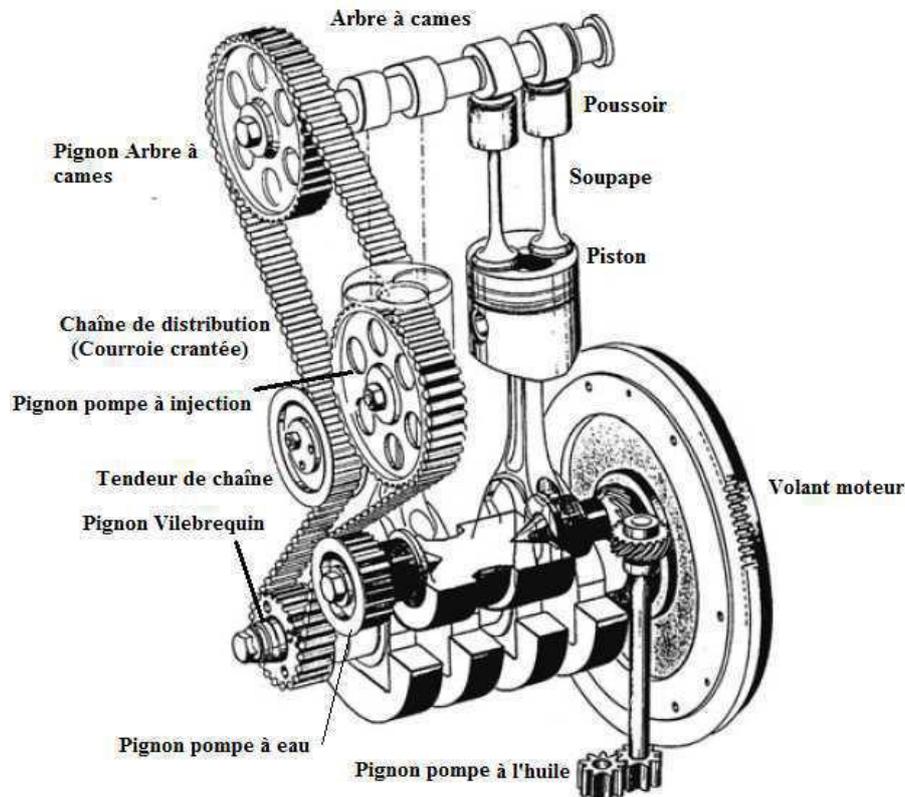


Figure 1-3. Vue globale des Organes mobiles du moteur diesel.

La culasse

La culasse assure la fermeture des cylindres dans leur partie supérieure, constituant ainsi la chambre de combustion. Elle permet l'arrivée et l'évacuation des gaz, la mise en position des éléments de la distribution et de l'allumage, l'évacuation rapide de la chaleur. La culasse est obtenue par le moulage puis par usinage de la fonte ou d'alliage en aluminium. Les contraintes mécaniques étant moins importantes dans une culasse par rapport au bloc-moteur, les constructeurs ont quasiment abandonné la fonte au profit de l'aluminium, en raison de sa légèreté et sa très bonne conductivité thermique. Un réseau de conduits d'eau et d'huile est pratiqué dans la culasse, l'étanchéité bloc-culasse est assurée par le joint de culasse.

1. Chambre de combustion
2. Cheminée de bougie
3. Chapelle
4. Canalisations de refroidissement
5. Guide soupape
6. Rondelle d'appui du ressort
7. Communication avec le bloc
8. Siège de soupape
9. Plan de joint de culasse

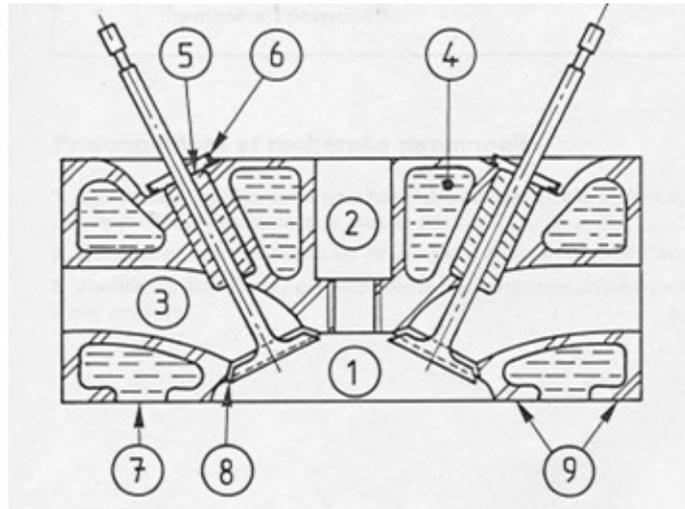


Figure 1-4. Vue en coupe de la culasse d'un moteur à essence.

Le bloc moteur

Le bloc est réalisé par moulage puis par usinage de la fonte ou d'alliage en aluminium moulé. Il constitue le bâti du moteur dont la partie intérieure est usinée pour former les cylindres où les logements de chemises s'il s'agit d'un moteur à chemises rapportées. L'eau de refroidissement circule librement à l'intérieur du carter-moteur. Sa partie supérieure est dressée pour former le plan de joint. La culasse vient s'appuyer sur le plan de joint supérieur pour coiffer les cylindres.

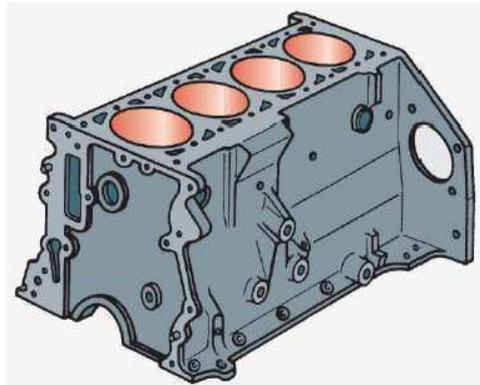


Figure 1-5. Bloc Cylindre non chemisé d'un moteur thermique.

Le carter d'huile

C'est une cuvette en tôle emboutie qui abrite le vilebrequin et les têtes de bielle et qui contient la réserve d'huile de graissage. Il peut être en alliage léger moulé avec des nervures à l'extérieur pour assurer un bon refroidissement de l'huile échauffée par son passage dans le moteur. L'étanchéité entre le carter-moteur et le carter inférieur doit être parfaite. Elle est assurée par un joint plat en liège ou bien par un joint cylindrique, en caoutchouc synthétique ou en silicone, logé dans une gorge.



Figure 1-6. Le carter d'huile.

Le Piston

Le piston est l'organe qui, en se déplaçant dans le cylindre ou la chemise, transmet la poussée des gaz au vilebrequin par l'intermédiaire de la bielle. Il est en général moulé dans un matériau léger et d'une bonne conductivité thermique comme les alliages d'aluminium. La tête et le support d'axe, devant transmettre l'énergie mécanique, sont particulièrement renforcés. Le piston se compose d'une tête ou culot dont le diamètre doit être inférieur à l'alésage du cylindre (dilatation thermique incluse). L'étanchéité est assurée par des segments situés dans des gorges pratiquées sur le pourtour du piston. La partie inférieure ou jupe du piston doit assurer le guidage à froid comme à chaud avec un minimum de frottement.



Figure 1-7. Piston d'un moteur diesel avec cavité en forme oméga.

Afin de limiter la turbulence dans un moteur à allumage commandé et empêcher ainsi l'extinction de l'étincelle, la tête du piston est de forme plane. Cependant, la turbulence doit être assez importante dans un moteur à allumage par compression car elle favorise l'évaporation et la préparation du mélange homogène après l'injection du carburant liquide en réduisant les délais. Pour se faire, la tête du piston peut contenir différentes formes de cavités telles que représentées sur la figure (1-8).

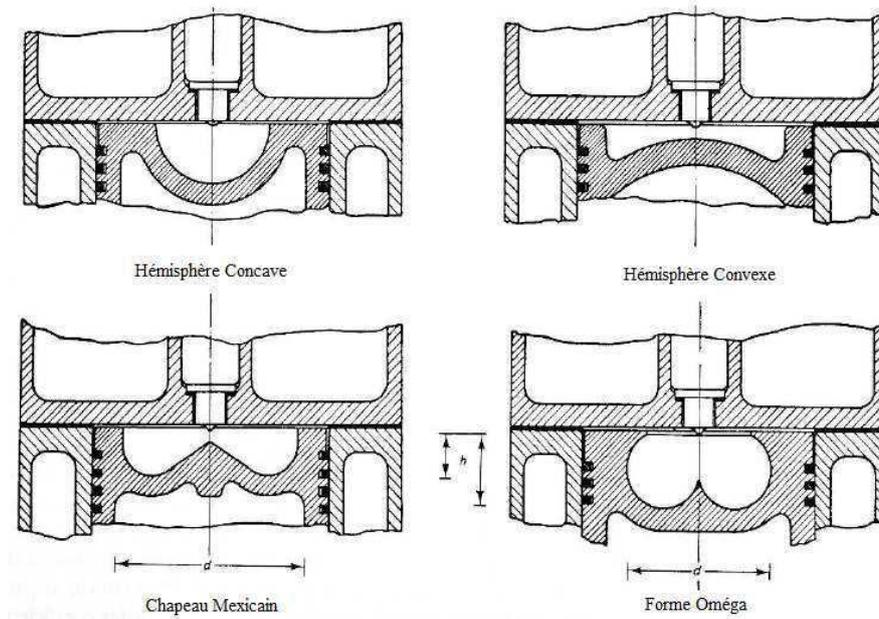


Figure 1-8. Forme de têtes de pistons utilisées dans les moteurs diesel.

Segments de piston

Les segments sont des anneaux brisés, de section carrée ou parallélépipédique. Ils doivent assurer des pressions radiales uniformes sur les parois du cylindre. Les segments pour moteur à 4 temps sont en général au nombre de trois :

Segment coup de feu : en plasma-céramique il doit réaliser la première étanchéité et résister aux températures et pressions élevées.

Segment d'étanchéité : en fonte spéciale, il assure l'étanchéité inférieure de la chambre de combustion en évitant à l'huile de remonter.

Segment racleur : en alliage de fonte, il évite les remontées d'huile tout en laissant un film d'huile permettant la lubrification.

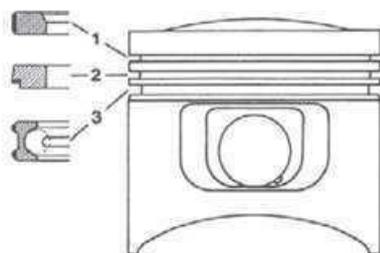


Figure 1-9. Segmentation du piston.

Axe de piston

L'axe de piston est une pièce cylindrique qui lie le piston à la bielle. Il permet le mouvement oscillatoire piston-bielle pendant la rotation du moteur. L'axe transmet à la bielle la force de pression que reçoit le piston pendant la phase d'expansion des gaz brûlés.

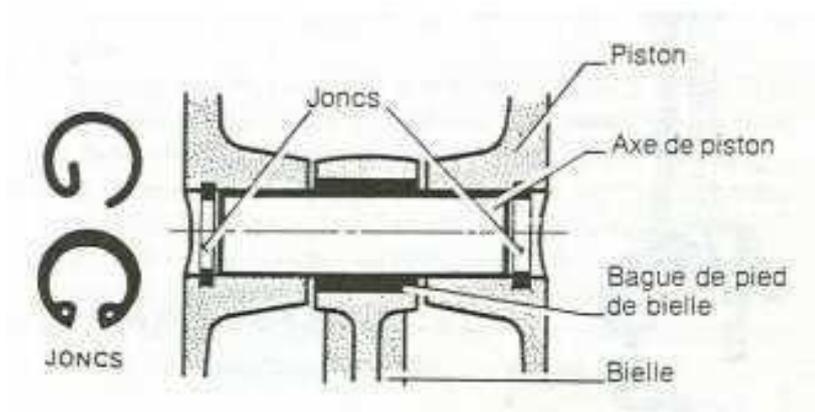


Figure 1-10. Axe de piston.

La Bielle

La bielle est une pièce mécanique dont une extrémité est liée au piston par l'axe du piston et l'autre extrémité au maneton du vilebrequin. Elle permet la transformation du mouvement rectiligne alternatif du piston en mouvement circulaire continu du vilebrequin. La bielle est en acier très résistant au nickel-chrome, parfois en acier mi-dur au carbone. On utilise également des bielles en alliage d'aluminium sur les moteurs poussés, en raison de sa grande légèreté.



Figure 1-11. La bielle.

La bielle se compose de trois parties :

Le pied relié à l'axe du piston, soit généralement avec une bague en bronze emmanchée à force, soit dans certains cas avec une bague à aiguilles.

Le corps est la partie comprise entre le pied et la tête. Il est de section en forme de "H" ou "I" pour résister aux divers efforts de compression et de traction et pour éviter le flambement. La tête de bielle qui tourne sur le maneton du vilebrequin est coupée dans un plan perpendiculaire à l'axe de la bielle pour permettre la pose des coussinets et son montage sur le maneton du vilebrequin.

La partie inférieure qui vient coiffer le maneton est appelée chapeau. Ce dernier est généralement fixé par des boulons. La coupe peut être droite ou oblique par rapport à l'axe de la bielle. Pour permettre le tourbillonnement sur le vilebrequin on peut utiliser : soit des

roulements à aiguilles; soit des coussinets minces. Dans le premier cas, il faut alors démonter le vilebrequin en plusieurs éléments pour retirer la bielle.

La longueur de la bielle désigne la distance entre l'axe de la tête et l'axe du pied. L'articulation de la tête de bielle avec le maneton de vilebrequin s'effectue par interposition d'un coussinet mince. Les coussinets minces permettent une bonne longévité et une bonne conductivité. Ils se présentent sous la forme d'un support en acier, laminé à froid, roulé en demi-cercle, recouvert d'une fine couche de métal antifriction.

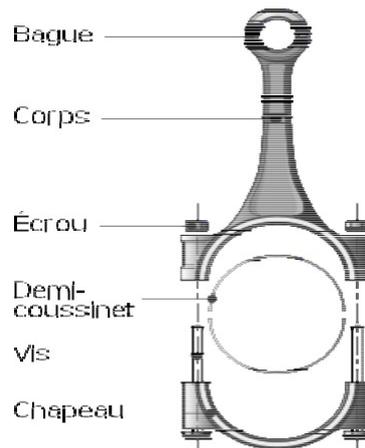


Figure 1-12. Vue éclatée d'une bielle.

L'arbre à cames

Un arbre à cames est un dispositif mécanique permettant de synchroniser plusieurs déplacements. Il s'agit d'un arbre muni de plusieurs cames. Il transforme le mouvement de rotation continu de l'arbre en un mouvement de translation alterné (par exemple d'une soupape), ou bien de rotation alterné (par exemple d'un culbuteur). L'arbre à cames est entraîné par le vilebrequin et est doté de cames qui agissent sur les poussoirs des soupapes pour commander leur ouverture.



Figure 1-13. Arbre à cames.

Les soupapes

La soupape est un bouchon métallique en acier au Nickel, au Chrome ou au Tungstène dont le rôle est d'ouvrir et de fermer les orifices d'admission et d'échappement afin de permettre la compression, la combustion et l'évacuation des gaz brûlés. Elle se compose d'une tige et d'une tête.

La tige : appelée aussi queue de forme cylindrique est raccordée à la tête par un congé à grand rayon pour diminuer les contraintes et renforcer ainsi la section dangereuse. La tige sert à guider la soupape lors de son mouvement rectiligne alternatif dans un guide qui est rapporté soit dans le bloc, soit dans la culasse.

La tête : de forme tronconique, repose par une partie conique sur un siège pour assurer la fermeture et l'étanchéité de l'orifice d'admission ou d'échappement. La tête se caractérise par son angle de siège égal à 30° ou 45° selon les différents types de moteurs et peut être plate ou bombée.

Les soupapes sont fortement sollicitées au plan thermique. Même si elles bénéficient de l'effet refroidissant des gaz admis, une soupape d'admission peut facilement atteindre une température de service de 500°C . Sur une soupape d'échappement, la température peut monter jusqu'à 800°C . Les soupapes d'échappement sont parfois refroidies avec du sodium. Le sodium est incorporé dans la tige creuse et diffuse la chaleur de la tête de soupape vers la tige de soupape. La soupape est composée d'une tête et d'une tige.

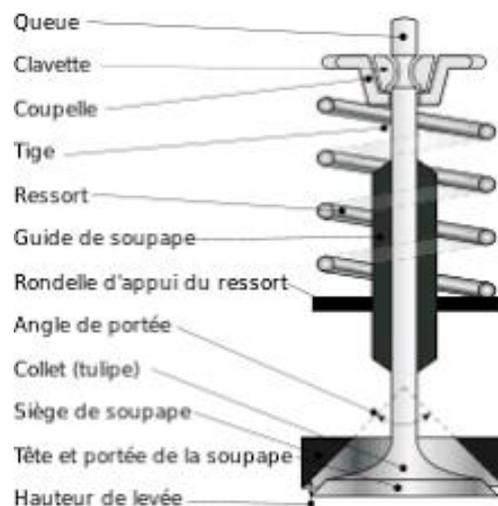


Figure 1-14. Mécanisme de Soupape.

La tête de soupape assure l'obturation du cylindre en combinaison avec le siège de soupape. La tige de soupape est guidée dans la culasse par un guide de soupape. En haut de la tige de soupape se trouve un joint pour éviter toute infiltration d'huile dans la chambre de combustion. La fermeture de la soupape est assurée par un ressort de soupape. La surface de fermeture doit

être aussi étroite que possible pour obtenir une pression d'assise optimale. Une surface de fermeture trop étroite entraîne la combustion de la tête de soupape parce que la chaleur n'est pas suffisamment évacuée.

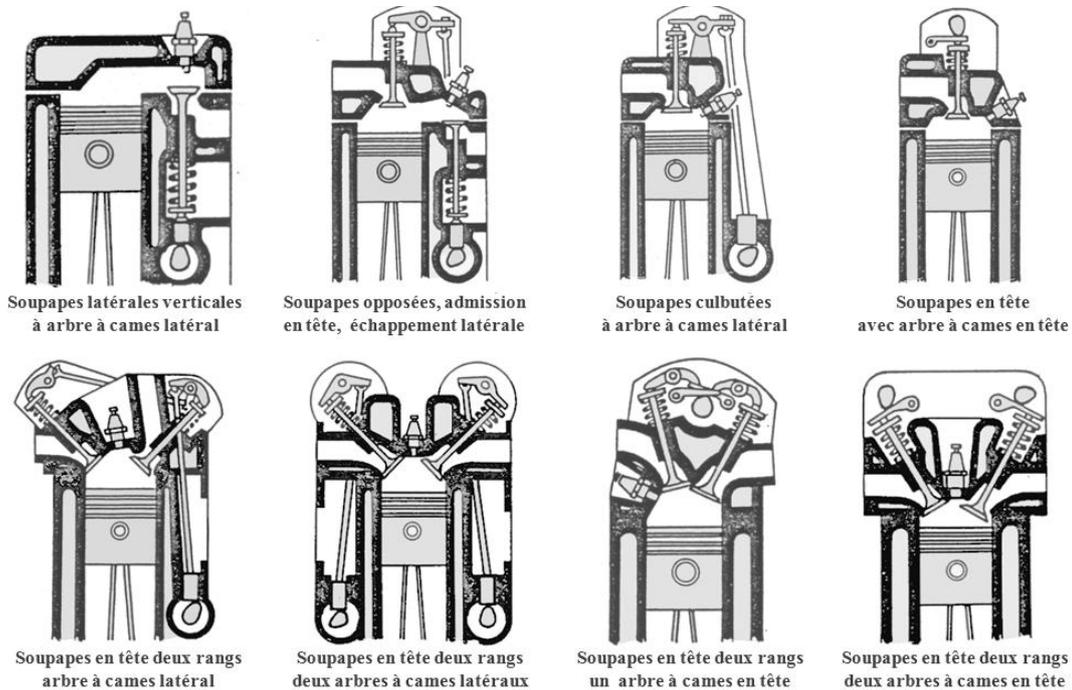


Figure 1-15. Disposition des soupapes et arbres à cames.

Le Vilebrequin

Le vilebrequin est la manivelle qui reçoit la poussée de la bielle et fournit un mouvement rotatif à partir du mouvement alternatif du piston. La force exercée par la bielle applique au vilebrequin un couple qui se retrouve au bout de celui-ci sous forme de couple moteur. A l'une des extrémités du vilebrequin, le couple moteur est utilisé pour entraîner le véhicule. A l'autre extrémité, une fraction du couple disponible est prélevée pour entraîner les auxiliaires du moteur.

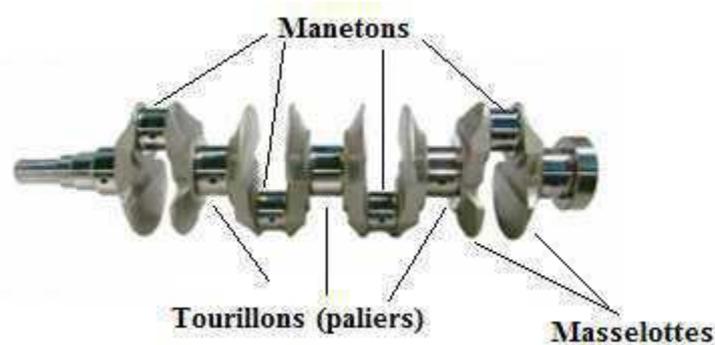


Figure 1-16. Vilebrequin.

1-3. Principales différences entre le moteur à essence et le moteur diesel

On peut distinguer deux types de moteurs, le moteur à allumage commandé et le moteur à allumage par compression. Le moteur à essence et le moteur diesel font partie de la même famille de machines thermiques. Néanmoins, ils ne présentent pas les mêmes caractéristiques. La préparation du mélange carburé dans un moteur à essence est dite quantitative car la masse de charge fraîche introduite dans le cylindre moteur augmente certes quand on accélère, cependant, le rapport entre la masse d'air introduite et la masse de carburant est toujours la même. Autrement dit, le rapport Air/Fuel est constant quel que soit le régime du moteur (soit $A/F \sim 16$). Par contre, la préparation de la charge fraîche dans un moteur diesel est dite qualitative car lorsque la vitesse de rotation augmente seule la quantité de carburant injectée augmente et la masse d'air introduite dans le moteur est théoriquement la même. Ainsi, le rapport Air/Fuel, c'est-à-dire la qualité du mélange carburé, varie avec la variation du régime moteur. En outre, le moteur diesel développe un rendement thermique plus élevé que celui développé par le moteur à essence de même puissance.

Il existe également un troisième type de moteurs thermiques qui possède les qualités du moteur à essence et celle du moteur diesel. Il s'agit du moteur à combustion par compression d'une charge homogène communément appelé moteur HCCI. Le concept est proposé par Onishi en 1977, dans lequel le carburant est préalablement mélangé et homogénéisé avec l'air avant d'être introduit dans le cylindre. Cependant la charge homogène s'enflamme spontanément par auto-inflammation comme dans un moteur diesel. Par ailleurs, le carburant préconisé pour ce type de moteurs est Diméthyle Ether. La réussite du concept de combustion HCCI est tributaire de plusieurs paramètres, à savoir, une bonne préparation de la charge homogène, un contrôle correct de la combustion à cause de la flamme froide et l'utilisation d'un fort taux de gaz d'échappement recirculés (EGR) $\sim 70\%$.

Cependant, le concept de la combustion HCCI fût testé avec beaucoup de succès dans les applications 2 temps. Les applications sur des moteurs à 4 temps toujours difficiles à réaliser restent à performer.

1-4. Cycle théorique pour les moteurs diesel rapides

On distingue en pratique trois catégories de moteurs diesel compte tenu de la vitesse linéaire du piston :

Le diesel lent : avec les moteurs marins et les moteurs fixes (de 85tr/min à 300 tr/min). La vitesse moyenne du piston inférieure ou égale à 6 m/s.

Le diesel semi-rapide : avec les moteurs de locomotives, tracteurs, camions et chargeurs (de 600tr/min à 1200 tr/min). La vitesse moyenne du piston entre 6 m/ et 9 m/s.

Le diesel rapide : avec les moteurs automobiles et bus (au-delà de 1200 tr/min). La vitesse moyenne du piston supérieure ou égale à 9 m/s.

Le cycle diesel avec la combustion à pression constante s'accommode avec les moteurs diesel lents et semi-rapides. Les moteurs diesel rapides disposent d'un cycle où la combustion se fait à pression constante et à volume constant communément appelé le cycle de Sabathé ou bien le cycle mixte tel que représenté sur la figure (1-17).

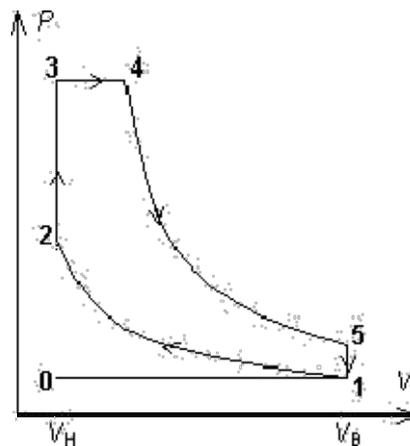


Figure 1-17. Diagramme (PV) du cycle de Sabathé.

1-5. Caractéristiques du moteur à combustion interne

Le nombre de cylindres Z

On dispose de moteurs monocylindriques tels que les moteurs expérimentaux, marins, les moteurs entraînant des génératrices, des pompes ou compresseurs. On trouve aussi des moteurs poly cylindriques avec 2 cylindres jusqu'à 8, 12 ou 24 cylindres avec différentes configurations (en ligne, en V ou bien en W).

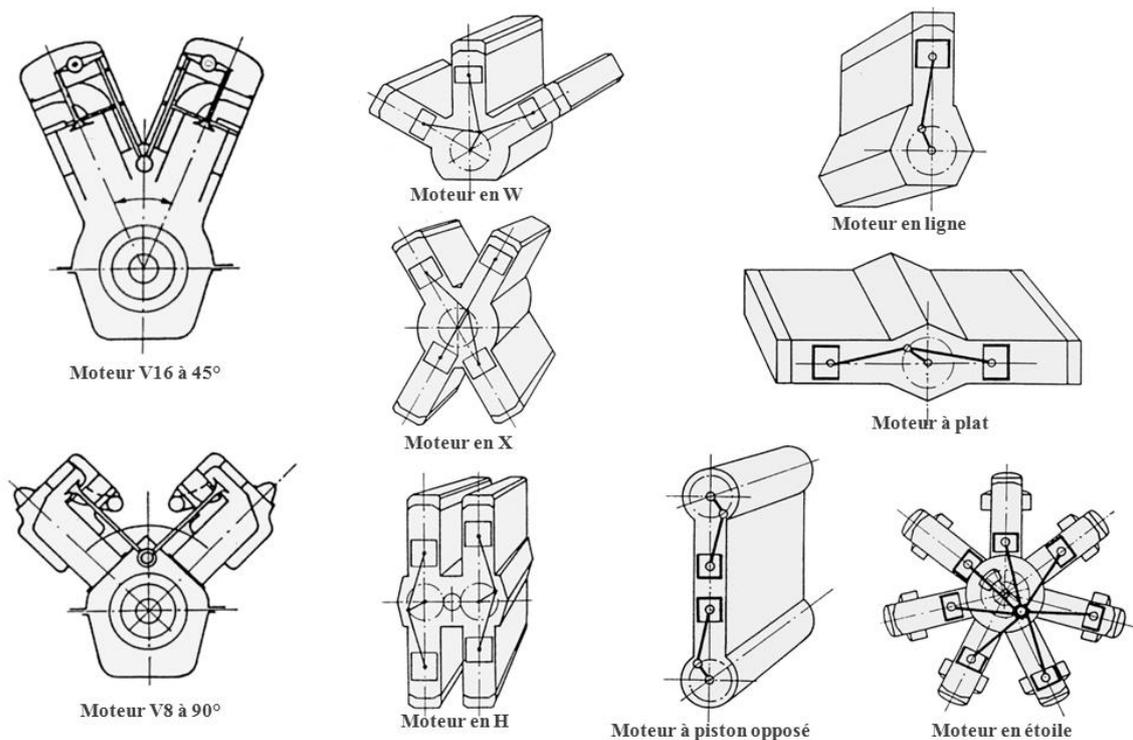


Figure 1-18. Disposition des cylindres.

Certaines dispositions correspondent exclusivement aux moteurs industriels tels que les groupes électrogènes et les moteurs marins. Dans les applications motrices de véhicules légers et de transport les configurations usuellement trouvées sont soit en ligne soit en V.

Le régime (vitesse de rotation du moteur) N en tr/min En pratique le régime du ralenti ~ 800 tr/min pour les moteurs à essence et ~ 900 tr/min pour le diesel.

Axe du cylindre

Peut être vertical (4 cylindres en ligne), horizontal ou incliné (moteurs en V). Dans les moteurs d'avions on peut avoir plusieurs cylindres en circonférence sonnant une formation en étoile.

La charge du moteur

Sur un banc d'essai moteur il nous est possible de fixer la vitesse de rotation du moteur en faisant varier le couple résistant. Ainsi le moteur doit développer plus de puissance en brûlant plus de carburant. La charge maximale (**la pleine charge**) du moteur à un régime donné

correspond au couple maximal atteint à cette vitesse de rotation. Le rapport du couple sur le couple maximal est la charge du moteur. Le frein moteur est l'angle d'accélération à partir de laquelle le couple moteur dépasse le couple résistant

Le tableau (1-2) regroupe des valeurs mesurées sur un moteur diesel de marque Renault k9k 766 Dci 80cv-DIN, ayant une cylindrée de 1,5 litres, monté sur banc d'essais AVL (Cellule Moteurs LTE, Ecole Nationale Polytechnique d'Oran-Maurice Audin, Oran, 2017). Les vitesses choisies correspondent au ralenti soit 950tr/min et à 1100 tr/min. A 950 tr/min, le régime du frein moteur correspond à un angle d'accélération de 7% soit un couple minimal de 26 Nm. A 1100 tr/min, le régime du frein moteur correspond à un angle d'accélération de 7,7% soit un couple minimal de 18,5 Nm.

Le rapport Course / Alésage (S/D)

Si le moteur dispose d'une architecture telle que le diamètre d'alésage D est égal à la course S , on dit que le moteur est carré ou à course normale. Dans les moteurs à essence où S/D est inférieure à 1 le moteur est dit super carré. Dans les moteurs diesel S/D est supérieur à 1 le moteur est dit à course longue. D'une manière générale S/D se situe entre 1,2 et 2 pour les moteurs à gaz et les moteurs diesel lents et S/D varie entre 0,7 et 1,3 pour les moteurs diesel rapides.

Le rapport Bielle / Manivelle ($\lambda = r / L_b$)

C'est le rapport de la longueur de la bielle sur le rayon de la manivelle telle que $\lambda = 0.238$ à 0.275 pour les moteurs à essence et $\lambda = 0.222$ à 0.263 pour les moteurs à diesel.

Le diamètre d'alésage D (centimètre) C'est le diamètre du cylindre.

La course du piston S (centimètre) C'est la distance parcourue par le piston entre le Point Mort Haut et le Point Mort Bas.

La cylindrée unitaire (cm^3) C'est le volume balayé par le piston entre le PMH et le PMB

$$V_{\text{cyl}} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} * S$$

La cylindrée totale (cm^3) C'est le volume de la cylindrée unitaire multiplié par le nombre de cylindres

$$V_{\text{tot}} = V_{\text{cyl}} * Z$$

Le volume au PMB (cm^3) C'est la somme du volume de la cylindrée unitaire et du volume de la chambre de combustion.

$$V_{\text{PMB}} = V_{\text{cyl}} + V_c$$

Le volume au PMH (cm^3) C'est le volume de la chambre de combustion délimité par la culasse, la tête du piston et la chemise du cylindre.

$$V_{PMB} = V_c$$

Le taux de compression volumétrique C'est le rapport entre le volume du cylindre quand le piston est au point mort bas et le volume du cylindre quand le piston est au point mort haut.

$$\varepsilon = \frac{V_{PMB}}{V_{PMH}} = \frac{V_{cyl} + V_c}{V_c}$$

Volume chambre de combustion (cm³) Connaissant la valeur du taux de compression volumétrique et la cylindrée unitaire du moteur on peut déduire le volume mort ou le volume de la chambre de combustion comme suit :

$$V_{cc} = \frac{V_{cyl}}{\varepsilon - 1}$$

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **J. B. Heywood**, *"Internal Combustion Engine Fundamentals"*, Mc Graw-Hill, Inc, 1988.
- [2] **J. Schmidt**, *"Thermodynamique générale – TEC 362"*, Editions OPU, 1993.
- [3] **B. E. Milton**, *"Thermodynamics, combustion and engines, 3rd Ed"*, School of Mechanical and Manufacturing Engineering, Springer, 1995.
- [4] **G. Ferrari**, *"Motori A Combustione Interna 2nd Ed"*, Edizioni il capitello, Torino, 2000.
- [5] **B. Vieux**, *"Moteurs Diesel technologie générale "*, Editions FOUCHER, Paris, 2003.
- [6] **K. K. Kuo**, *"Principles of Combustion 2nd Ed"* John Wiley & Sons, Inc, Interscience, 2005.
- [7] **M. J. Moran, H. N. Shapiro**, *"Fundamentals of Engineering Thermodynamics, 5th Ed"*, John Wiley & Sons, Inc, 2006.
- [8] **J. Warnatz · U. Maas · R.W. Dibble**, *"Combustion Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation, 4th Ed"*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [9] **L. Mollenhauer, H. Tschoeke** *"Handbook of Diesel Engines"*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.