

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la recherche scientifique

Université Abderrahmane Mira Bejaia

Faculté de Technologie

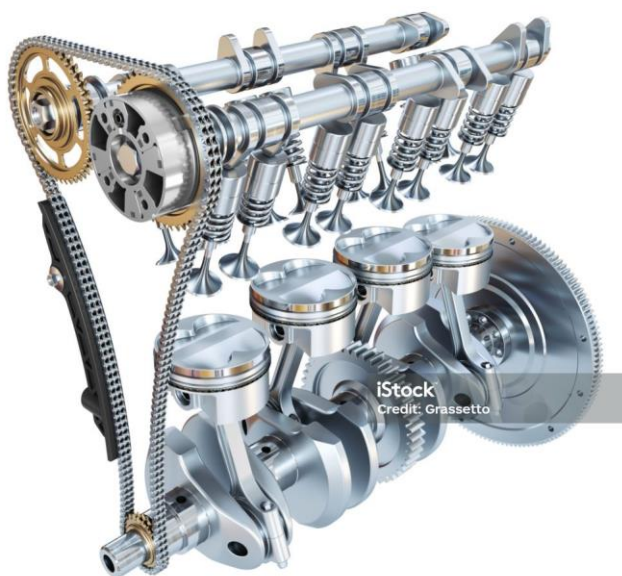
Département de Génie Mécanique

# MOTEUR A COMBUSTION INTERNE

## COURS

Unité d'enseignement : UEM 3.2

Pour les troisième année Licence Académique LMD, S2, Spécialité Construction Mécanique



**Rédigé par :**

Dr. Massinissa ADNANI

Email : massinissa.adnani@univ-bejaia.dz

## Préface

Ce cours de moteurs à combustion interne est destiné pour les étudiants de troisième année licence en construction mécanique, filière génie mécanique, deuxième semestre. Dans ce module, nous explorerons les principes fondamentaux, le fonctionnement et les applications des moteurs à combustion interne, qui constituent l'épine dorsale de nombreuses industries et technologies modernes. A cet effet, pour la réussite de ce cours, l'étudiant doit avoir des connaissances de base en thermodynamique des systèmes ouverts, en mécanique rationnelle et dessins industrielle. Des notions de base dans le domaine des matériaux sont aussi fortement souhaitables.

Les moteurs à combustion interne ont révolutionné le monde du transport et de la production d'énergie en offrant une source de puissance efficace et polyvalente. Comprendre leur fonctionnement est essentiel pour quiconque souhaite travailler dans les domaines de l'ingénierie mécanique, de l'automobile, de l'aérospatiale, de l'énergie ou de tout autre secteur connexe.

Au cours de ce semestre, nous aborderons les principes de base de la combustion, les cycles thermodynamiques, les composants clés des moteurs à combustion interne, ainsi que les technologies émergentes et les défis actuels dans ce domaine. Nous examinerons également les différentes configurations de moteurs, leurs avantages et inconvénients, ainsi que leurs applications spécifiques.

À la fin de ce cours, vous aurez acquis une compréhension approfondie des moteurs à combustion interne, vous permettant d'analyser, de concevoir et de résoudre des problèmes liés à ces systèmes complexes.

## Table des matières

I.	Chapitre 1 : Généralités .....	1
I.1	Introduction .....	1
I.2	Classification des moteurs thermique.....	1
I.2.1	Classification selon le mode de fonctionnement .....	2
I.2.2	Classification selon le cycle thermodynamique .....	2
I.2.3	Classification selon l'application.....	2
I.2.4	Classification selon le carburant utilisé.....	3
I.3	Vue globale d'un Moteur à combustion interne alternatif.....	3
I.3.1	Les organes mobiles .....	4
I.3.2	Les organes fixes .....	8
I.4	Principe de fonctionnement du moteur à 4 temps .....	10
I.4.1	Moteur à allumage commandé (Essence).....	10
I.4.2	Moteur à allumage par compression (Diesel).....	12
I.5	Caractéristiques du moteur à combustion interne.....	13
I.6	Carburants des moteurs à combustion interne.....	16
II.	Chapitre 2 : La thermodynamique des cycles moteurs.....	19
II.1	Introduction .....	19
II.2	Principaux cycles théoriques du moteur à combustion interne .....	19
II.2.1	Cycle de Beau de Rochas (Essence).....	19
II.2.2	Cycle Diesel .....	21
II.2.3	Cycle de Sabathé (Mixte) .....	23
II.3	Diagramme réel d'un moteur Diesel rapide .....	25
II.3.1	Les phases de distribution .....	27
II.3.2	Diagramme indiqué .....	28
II.4	Système d'allumage pour les moteurs à essence .....	28
II.4.1	Nécessité d'un système d'allumage.....	28
II.4.2	Présentation du système d'allumage classique.....	29
II.5	La combustion .....	30
II.5.1	La combustion dans le moteur Diesel.....	30
II.5.2	La combustion dans les moteurs à essence.....	31
III.	Chapitre 3 : Cycle réel d'un moteur à combustion interne de type Diesel .....	33

---

III.1	Introduction .....	33
III.2	Présentation des diagrammes du cycle réel .....	34
III.2.1	Cycle réel dans le diagramme (P, V).....	34
III.3	Paramètres indiqués du cycle réel .....	35
III.3.1	Diagramme d'indication.....	35
III.3.1.1	Pression moyenne indiquée (p <sub>mi</sub> ) .....	36
III.3.1.2	Puissance moyenne indiquée (P <sub>i</sub> ) .....	37
III.3.1.3	Puissance effective (P <sub>e</sub> ).....	37
III.3.1.4	Consommation spécifique indiquée (b <sub>i</sub> ).....	38
III.3.1.5	Rendement indiqué ( $\eta_i$ ) .....	39
III.3.1.6	Consommation spécifique effective (b <sub>e</sub> ) .....	39
III.3.1.7	Rendement effectif ( $\eta_e$ ).....	40
IV.	Chapitre 4 : Dynamiques des moteurs alternatifs .....	41
IV.1	Introduction .....	41
IV.2	Définition.....	41
IV.2.1	Définition des repères.....	41
IV.2.2	Passage des repères et définition des paramètres .....	43
IV.3	Cinématique du système bielle manivelle .....	45
IV.3.1	Cinématique du point A.....	45
IV.3.2	Cinématique du point B.....	45
IV.4	La dynamique du système bielle-manivelle .....	47
IV.5	Système de distribution .....	49
IV.5.1	Le principe de fonctionnement .....	50
IV.5.2	Le rôle de la distribution.....	50
IV.5.3	Les principaux organes de la distribution.....	51
IV.6	Équilibrage .....	52
IV.6.1	Équilibrage théorique .....	52
IV.6.2	Cas de deux cylindres moteur en ligne.....	54
IV.6.2.1	Équilibrage par deux masses .....	55

## Liste des figures

Figure I-1 Vue globale du moteur volumétrique [1].	3
Figure I-2 Vue globale des Organes mobiles du moteur diesel [1].	4
Figure I-3 Piston d'un moteur à combustion interne	4
Figure I-4 La bielle.	5
Figure I-5 Arbre à cames.	6
Figure I-6 Mécanisme de Soupape [1].	7
Figure I-7 Vilebrequin.	7
Figure I-8 Vue en coupe de la culasse d'un moteur à essence [1].	8
Figure I-9 Bloc Cylindre non chemisé d'un moteur thermique.	9
Figure I-10 Le carter d'huile.	10
Figure I-11 Cycle à 4 temps dans un moteur à essence [1].	11
Figure I-12 Cycle à 4 temps dans un moteur diesel [3].	12
Figure I-13 Disposition des cylindres [1].	14
Figure II-1 Cycle Beau de Rochas.	19
Figure II-2 Cycle Diesel [2]	22
Figure II-3 Cycle de Sabathé	24
Figure II-4 Cycle réel d'un moteur à allumage par compression [3]	26
Figure II-5 Diagramme de distribution [3].	27
Figure II-6 diagramme indiqué, la variation de la pression en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin, (a) moteur Diesel, (b) moteur à essence [3].	28
Figure II-7 Système d'allumage classique [3].	30
Figure III-1 Diagramme $P=f(V)$ pour le cycle réel [3].	35
Figure III-2 Diagramme (PV) du cycle réel d'un moteur à combustion interne [1].	36
Figure III-3 Représentation du cycle moteur avec la pression moyenne indiquée [1].	36
II. Figure IV-1 piston-bielle-manivelle	41
Figure IV-2 Transformation mécanique de la poussée des gaz en couple moteur par le système bielle manivelle	47
Figure IV-3 chaîne de distribution d'un moteur à combustion interne [3].	49
Figure IV-4 Les caractéristiques d'une came	51

Figure IV-5 Équilibrage théorique .....	52
Figure IV-6 Equilibrage d'une masse.....	54
Figure IV-7 Equilibrage de deux masses.....	54
Figure IV-8 Deux cylindres en ligne monté sur un vilebrequin. ....	55
Figure IV-9 Equilibrage par deux masses. ....	55

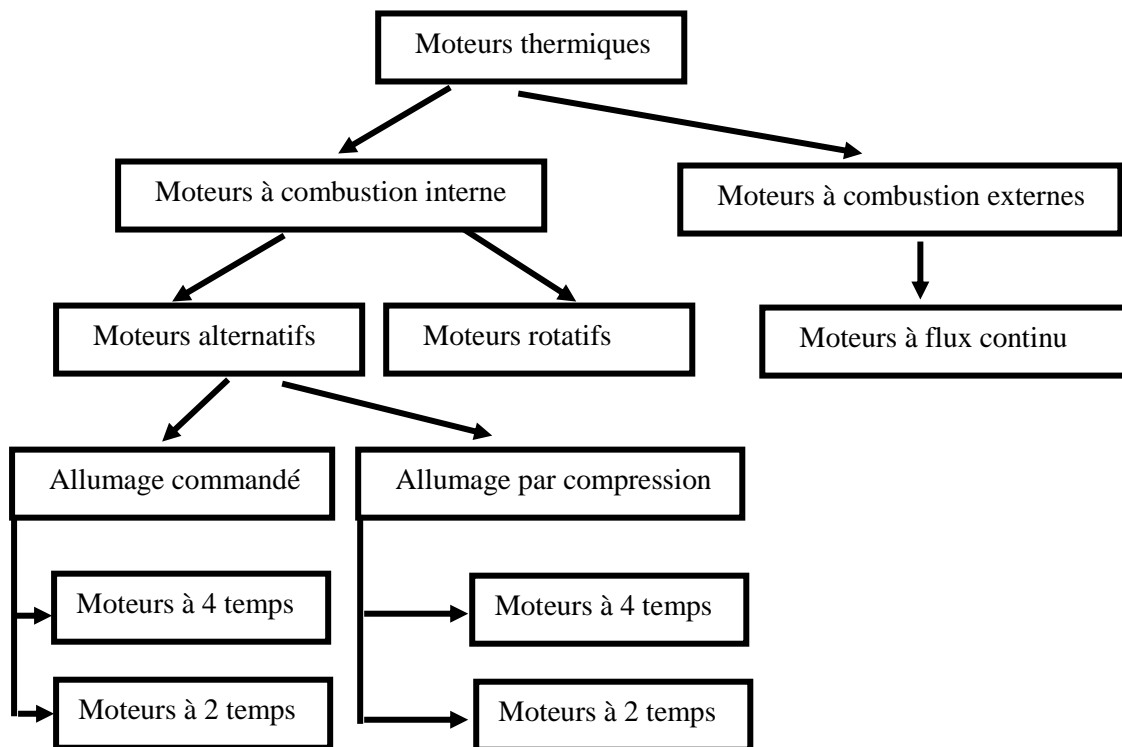
## Chapitre 1 : Généralités

### I.1 Introduction

Un moteur à combustion interne est une machine qui transforme de l'énergie thermique, produite lors d'une combustion (carburante + comburante), en énergie mécanique motrice. Si la combustion se fait à l'intérieure, alors le moteur est dit à combustion interne (ex. moteurs automobiles), sinon, si l'énergie produite lors d'une combustion est transportée par un fluide caloporteur à l'extérieure de celui-ci, le moteur est dit à combustion externe (ex. centrales thermiques).

### I.2 Classification des moteurs thermique

Les moteurs thermiques sont généralement classés en fonction de divers critères, notamment leur mode de fonctionnement, leur cycle thermodynamique, leur application ou leur carburant utilisé. Les moteurs thermiques peuvent être représentées par le synoptique ci-après :



Classification des moteurs thermiques.

### **I.2.1 Classification selon le mode de fonctionnement**

- Moteurs à combustion interne : Ces moteurs brûlent le carburant à l'intérieur de la chambre de combustion.
  1. Moteurs à allumage commandé (ou moteurs à essence) : Fonctionnent avec un mélange air-essence allumé par une étincelle fournie par une bougie d'allumage.
  2. Moteurs à allumage par compression (ou moteurs Diesel) : Le mélange air-combustible est comprimé dans la chambre de combustion jusqu'à ce qu'il s'enflamme spontanément sous l'effet de la compression.
- Moteurs à combustion externe : Ces moteurs utilisent un fluide de travail pour transférer la chaleur d'une source externe (généralement une combustion) vers un fluide de travail (généralement de l'eau) qui produit ensuite du travail mécanique.
  1. Moteurs Stirling : Utilisent un gaz tel que l'hydrogène ou l'hélium dans un cycle thermodynamique fermé.
  2. Moteurs à vapeur : Utilisent de la vapeur d'eau pour produire du travail mécanique.

### **I.2.2 Classification selon le cycle thermodynamique**

- Moteurs à quatre temps : Cycle constitué de quatre phases distinctes : admission, compression, combustion/expansion, échappement.
- Moteurs à deux temps : Cycle plus simple où l'admission et l'échappement se font en même temps que la compression et la combustion/expansion.

### **I.2.3 Classification selon l'application**

- Moteurs automobiles : Utilisés dans les voitures, les camions, les motos, etc.
- Moteurs marins : Utilisés dans les bateaux et navires.
- Moteurs aéronautiques : Utilisés dans les avions et les hélicoptères
- Moteurs industriels : Utilisés dans diverses applications industrielles, telles que les générateurs électriques, les pompes, etc.



### I.2.4 Classification selon le carburant utilisé

- Moteurs à essence : Utilisent de l'essence comme carburant principal.
- Moteurs Diesel : Utilisent du diesel comme carburant principal.
- Moteurs à gaz : Utilisent du gaz naturel, du propane ou d'autres gaz comme carburant.
- Moteurs bi-carburant ou flex-fuel : Capables de fonctionner avec plusieurs types de carburants, tels que l'essence et l'éthanol.

### I.3 Vue globale d'un Moteur à combustion interne alternatif

Le mécanisme d'un moteur à combustion interne, Diesel ou essence, est constitué globalement d'une culasse, d'un bloc moteur et d'un carter d'huile, Figure I-1. Dans le moteur, on distingue des organes mobiles à savoir, le piston, la bielle et le vilebrequin qui représentent l'embellage du moteur dont le rôle est d'assurer la conversion d'énergie. La chaîne de distribution ou/et le pignon assurent l'entraînement directe du moteur. En revanche, un entraînement indirecte d'un moteur est assuré par plusieurs organes mobiles, via une courroie de transmission, à savoir, l'alternateur, les pompes (à l'huile de lubrification, à eau, à vide, de direction, d'alimentation) et l'arbre à came.

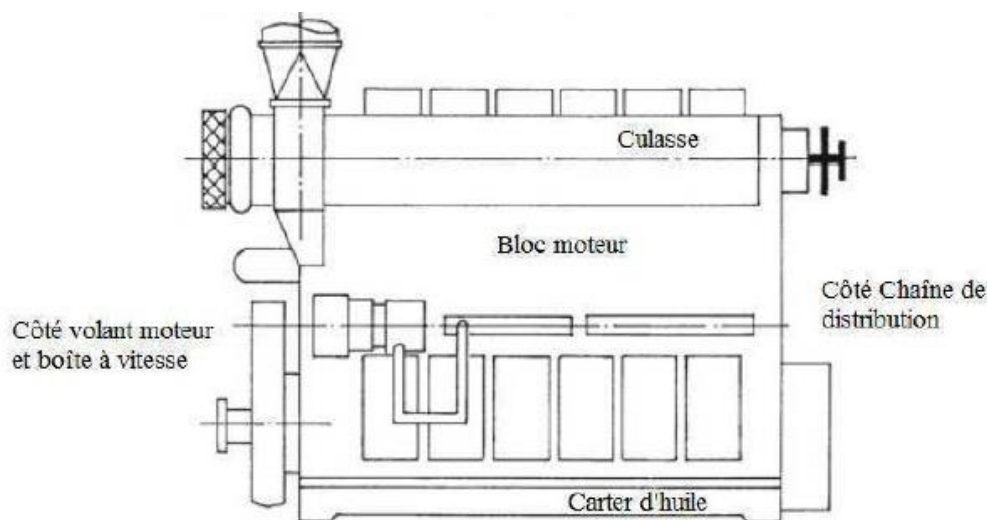


Figure I-1 Vue globale du moteur volumétrique [1].

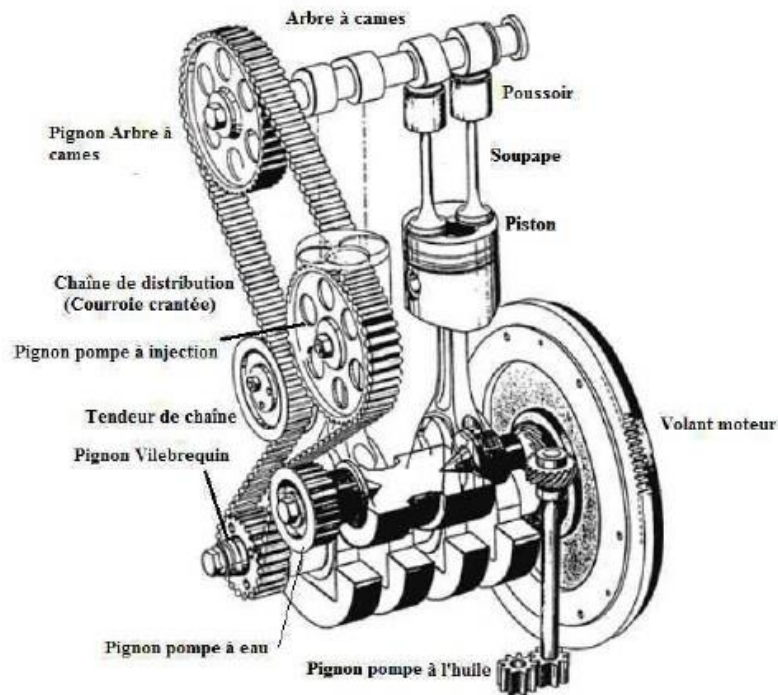


Figure I-2 Vue globale des Organes mobiles du moteur diesel [1].

### I.3.1 Les organes mobiles

#### ➤ Le Piston

Un piston est un élément mobile à l'intérieur d'un cylindre dans un moteur à combustion interne. Son rôle principal est de comprimer le mélange air-carburant dans le cylindre lors de la phase de compression du cycle de combustion, puis de transférer l'énergie produite par la combustion vers la bielle lors de la phase d'expansion. En résumé, le piston transforme l'énergie chimique contenue dans le carburant en énergie mécanique, qui est ensuite utilisée pour faire fonctionner le moteur.



Figure I-3 Piston d'un moteur à combustion interne

Les pistons sont généralement fabriqués en alliages d'aluminium, de fonte ou d'acier pour assurer à la fois légèreté, résistance et durabilité. Les pistons sont conçus avec une forme spécifique pour s'adapter au cylindre du moteur et pour maximiser l'efficacité de combustion. Les dimensions, telles que le diamètre, la hauteur et la couronne du piston, sont également importantes pour assurer un ajustement précis et une compression adéquate du mélange air-carburant. Les pistons sont équipés de segments qui assurent l'étanchéité entre le piston et la paroi du cylindre, empêchant ainsi la fuite de gaz de combustion. Ces segments comprennent généralement des segments de compression et des segments de racleur d'huile.

### ➤ La Bielle

La bielle est une pièce mécanique essentielle dans un moteur à combustion interne. Elle joue un rôle essentiel dans la transformation du mouvement alternatif du piston en mouvement rotatif du vilebrequin, ce qui permet de convertir l'énergie générée par la combustion en mouvement mécanique utile pour propulser le véhicule. La bielle est généralement constituée d'un bras long et mince avec des extrémités articulées. L'une des extrémités est connectée au piston, tandis que l'autre est reliée au vilebrequin. Les bielles sont souvent fabriquées à partir d'acier allié ou d'aluminium pour assurer à la fois légèreté et résistance. La forme de la bielle est conçue pour résister aux forces importantes générées par le mouvement alternatif du piston. Elle est généralement conçue de manière à répartir efficacement ces forces et à minimiser les déformations. Comme d'autres composants du moteur, la bielle nécessite une lubrification adéquate pour réduire les frottements et l'usure. Elle est souvent équipée de paliers lisses ou de bagues de palier pour faciliter son mouvement. Dans les moteurs à plusieurs cylindres, il est crucial que les bielles soient équilibrées pour assurer un fonctionnement harmonieux du moteur et minimiser les vibrations indésirables [2].



Figure I-4 La bielle.

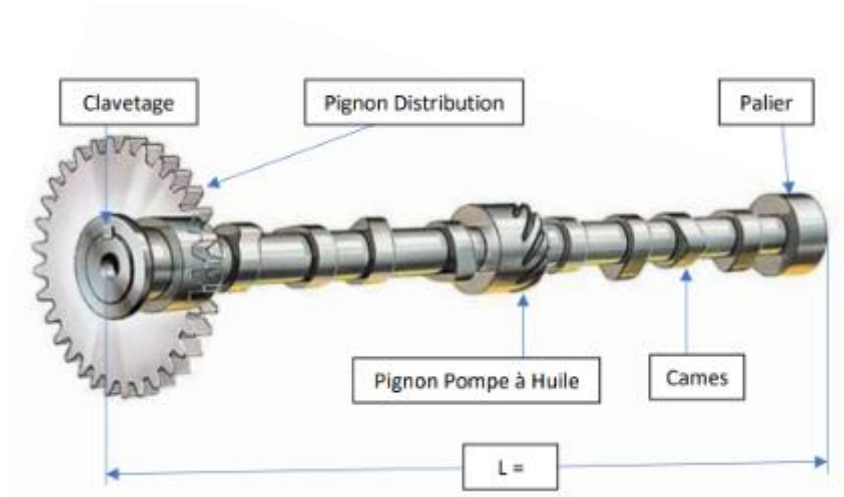


Figure I-5 Arbre à cames.

### ➤ L'arbre à cames

L'arbre à cames est une composante essentielle dans le système de distribution d'un moteur à combustion interne. Elle permet de contrôler le mouvement des soupapes dans un moteur à combustion interne, permettant ainsi le flux d'air et de carburant dans les cylindres et l'évacuation des gaz d'échappement. L'arbre à cames est situé dans le bloc moteur, généralement au-dessus des cylindres, et est entraîné par le vilebrequin via une courroie ou une chaîne de distribution. Il tourne à la moitié de la vitesse du vilebrequin dans un moteur à quatre temps, car il accomplit un cycle complet (deux rotations) pour chaque cycle moteur (quatre mouvements du piston). Sur certains moteurs, l'arbre à cames peut être réglable pour modifier le timing des soupapes et ainsi optimiser les performances du moteur à différents régimes et charges.

Comme d'autres composants du moteur, l'arbre à cames nécessite une lubrification adéquate pour réduire les frottements et l'usure. Il est généralement alimenté en huile par le système de lubrification du moteur [2].

### ➤ Les soupapes

Les soupapes contrôlent le flux d'air et de carburant dans les cylindres et permettent l'évacuation des gaz d'échappement à des moments précis du cycle moteur. Il y a généralement deux types de soupapes dans un moteur : les soupapes d'admission et les soupapes d'échappement.

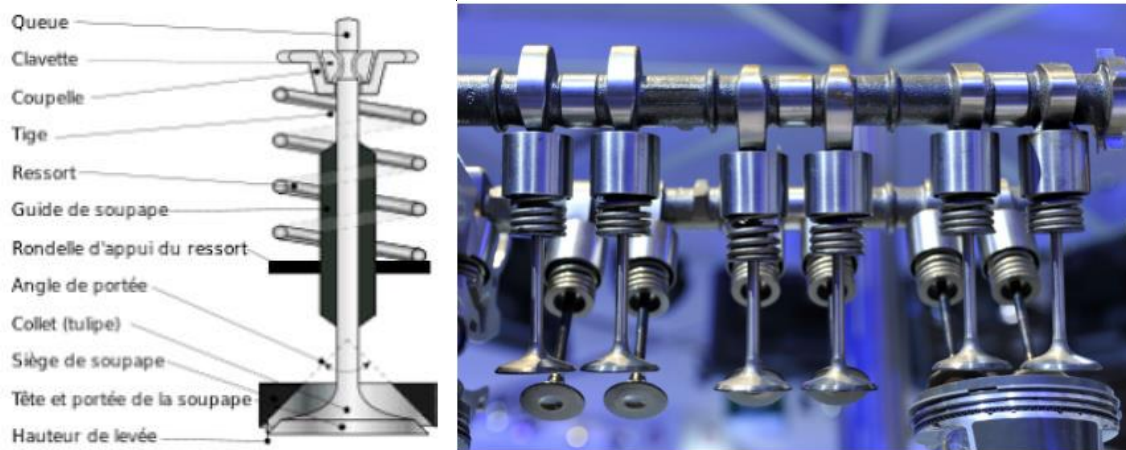


Figure I-6 Mécanisme de Soupape [1].

- Les soupapes d'admission s'ouvrent pour permettre au mélange air-carburant d'entrer dans le cylindre pendant la phase d'admission du cycle moteur.
- Les soupapes d'échappement s'ouvrent pour permettre aux gaz brûlés de sortir du cylindre pendant la phase d'échappement du cycle moteur.

Les soupapes sont actionnées par l'arbre à cames, qui utilise des cames pour pousser les tiges de soupapes, qui à leur tour ouvrent et ferment les soupapes selon un calendrier précis. Pour assurer une étanchéité optimale, les soupapes sont souvent équipées de guides de soupapes et de joints de soupapes. Les soupapes sont généralement fabriquées à partir d'acier allié ou d'autres matériaux résistants à la chaleur et à l'usure, car elles sont soumises à des températures et à des forces élevées pendant le fonctionnement du moteur.

En outre, les soupapes sont refroidies par circulation d'huile ou par passage d'air pour éviter la surchauffe et pour maintenir une température de fonctionnement optimale.



Figure I-7 Vilebrequin.

### ➤ Le vilebrequin

Le vilebrequin est une composante essentielle dans le système de propulsion d'un moteur à combustion interne. Il convertit le mouvement alternatif du piston en mouvement rotatif. En d'autres termes, il transforme l'énergie produite par la combustion du carburant en mouvement circulaire, qui est ensuite transmis à la transmission pour propulser le véhicule. Le vilebrequin est une pièce en forme d'arbre, souvent fabriquée en acier allié ou en fonte ductile pour assurer à la fois résistance et durabilité. Il est composé de plusieurs manetons ou "coudes" auxquels sont fixées les bielles, ainsi que de sections de manivelles qui sont reliées entre elles pour former un arbre continu. Le vilebrequin est situé dans le bloc moteur, généralement sous les cylindres. Il est monté sur des paliers principaux dans le carter moteur et tourne librement sur ceux-ci à l'intérieur du bloc moteur. Comme d'autres composants du moteur, le vilebrequin nécessite une lubrification adéquate pour réduire les frottements et l'usure. Il est généralement alimenté en huile par le système de lubrification du moteur.

### I.3.2 Les organes fixes

#### ➤ La culasse

La culasse ferme le haut des cylindres dans un moteur à combustion interne et abrite généralement les soupapes d'admission et d'échappement, les chambres de combustion et souvent les injecteurs de carburant dans le cas des moteurs à injection directe. La culasse est conçue pour former un joint étanche avec le bloc moteur, assurant ainsi que les gaz de combustion restent confinés dans les cylindres et que le liquide de refroidissement circule de manière efficace pour maintenir la température de fonctionnement du moteur.

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

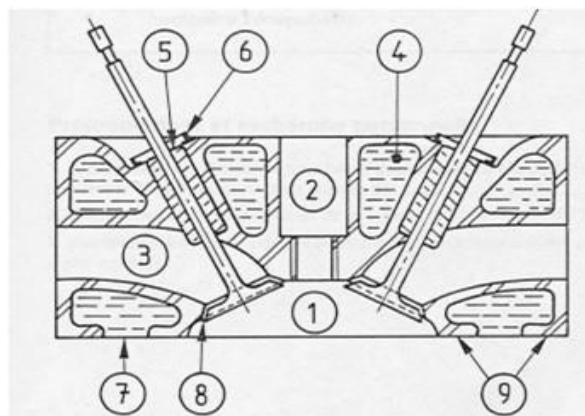


Figure I-8 Vue en coupe de la culasse d'un moteur à essence [1]



Figure I-9 Bloc Cylindre non chemisé d'un moteur thermique.

Les soupapes sont montées dans la culasse et actionnées par l'arbre à cames pour contrôler l'entrée d'air et de carburant dans les cylindres (soupapes d'admission) et l'évacuation des gaz brûlés (soupapes d'échappement). Généralement, les culasses sont fabriquées à partir d'alliages d'aluminium pour assurer à la fois légèreté et résistance, bien que certains moteurs puissent utiliser des culasses en fonte dans certains cas.

#### ➤ **Le bloc moteur**

Le bloc moteur, également connu sous le nom de bloc-cylindres ou carter moteur, est une pièce fondamentale dans un moteur à combustion interne. Il forme la structure de base du moteur à combustion interne. Il abrite les cylindres dans lesquels les pistons se déplacent et où la combustion du carburant a lieu. Et, est conçu pour maintenir une étanchéité adéquate pour les cylindres afin de prévenir les fuites de gaz de combustion et de liquide de refroidissement. Pour ce faire, des joints de culasse sont souvent utilisés pour sceller la jonction entre le bloc moteur et la culasse. Le bloc moteur contient également des passages pour l'huile de lubrification, qui est pompée vers les différentes parties du moteur pour réduire les frottements et l'usure des composants mobiles.



Figure I-10 Le carter d'huile.

### ➤ Le carter d'huile

Le carter d'huile recueille et stocke l'huile de lubrification du moteur. Il constitue le réservoir principal d'huile du moteur et assure sa distribution uniforme vers les différentes parties du moteur nécessitant de la lubrification. Les carters d'huile sont généralement fabriqués en aluminium moulé ou en fonte. Ils sont conçus pour être résistants à la pression et à la chaleur, tout en étant suffisamment légers pour ne pas ajouter de poids excessif au véhicule. En plus de sa fonction de lubrification, l'huile joue également un rôle crucial dans le refroidissement du moteur. Elle absorbe la chaleur des pièces internes du moteur et la transporte vers le carter d'huile, où elle est refroidie par le flux d'air provenant du mouvement du véhicule ou par des radiateurs d'huile externes. L'huile stockée dans le carter d'huile est pompée à travers le moteur par la pompe à huile. Cette huile lubrifie les surfaces mobiles des pièces telles que les pistons, les bielles, les paliers de vilebrequin, les arbres à cames, etc., réduisant ainsi le frottement et l'usure.

## I.4 Principe de fonctionnement du moteur à 4 temps

Le moteur à quatre temps, également connu sous le nom de cycle de quatre temps, est le type de moteur le plus couramment utilisé dans les véhicules à combustion interne, tels que les voitures, les motos et les camions. On distingue généralement les moteurs Diesel et essence.

### I.4.1 Moteur à allumage commandé (Essence)

Un moteur à essence, également connu sous le nom de moteur à essence ou moteur à allumage commandé, est un type de moteur à combustion interne qui utilise de l'essence



comme carburant. Les moteurs à essence fonctionnent selon le cycle à quatre temps, également appelé cycle Otto, comprenant les phases d'admission, de compression, de combustion et d'échappement.

➤ **Admission :**

Pendant cette phase, le piston descend dans le cylindre, créant un vide partiel qui aspire le mélange air-carburant dans le cylindre à travers la soupape d'admission. L'injecteur de carburant pulvérise de l'essence dans l'air aspiré pour former le mélange air-carburant.

➤ **Compression :**

Une fois que le piston atteint le bas de sa course d'admission, il commence à remonter, comprimant le mélange air-carburant dans le cylindre. Les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées pendant cette phase, ce qui comprime efficacement le mélange air-carburant dans un espace plus restreint.

➤ **Combustion :**

Au moment où le piston atteint le sommet de sa course de compression, une étincelle est produite par la bougie d'allumage, enflammant le mélange air-carburant comprimé dans le cylindre. Cette combustion rapide et contrôlée produit une augmentation rapide de la pression dans le cylindre, poussant le piston vers le bas

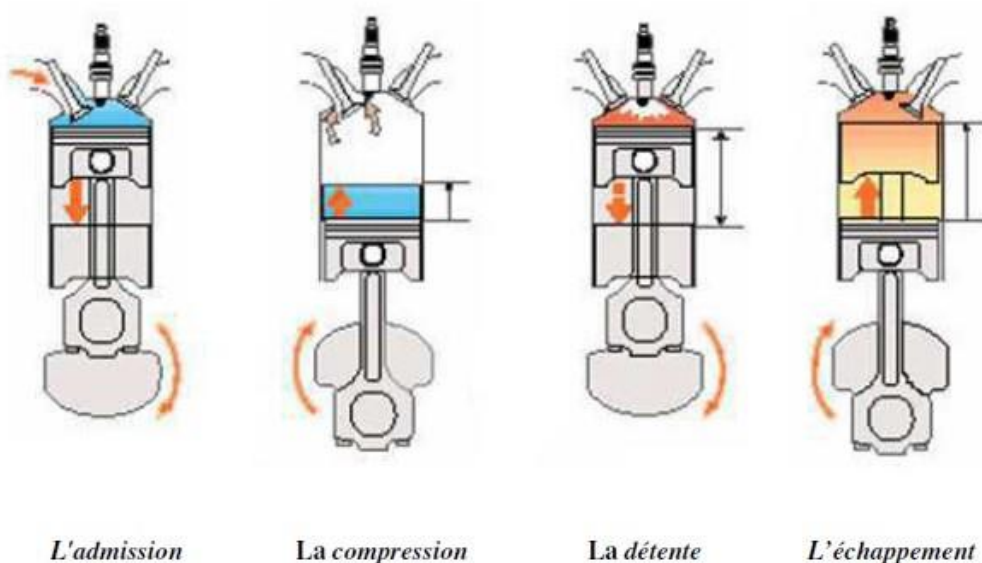


Figure I-11 Cycle à 4 temps dans un moteur à essence [1].

➤ **Echappement :**

Une fois que la combustion est terminée et que le piston atteint le bas de sa course de puissance, la soupape d'échappement s'ouvre et la soupape d'admission se ferme. Le piston remonte alors dans le cylindre, expulsant les gaz d'échappement produits lors de la combustion à travers la soupape d'échappement et dans le système d'échappement.

Ces quatre phases se répètent en boucle à chaque rotation du vilebrequin, générant un mouvement alternatif du piston qui est converti en mouvement rotatif par le vilebrequin

#### I.4.2 Moteur à allumage par compression (Diesel)

Conçu par Rudolf Diesel à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, le moteur diesel est un moteur à combustion interne dont l'allumage n'est pas commandé mais spontané par phénomène d'autoallumage (auto inflammation). Les quatre phases d'un cycle Diesel, également connu sous le nom de cycle à compression-détente, sont les suivantes

➤ **Admission :**

Pendant cette phase, le piston descend dans le cylindre, créant un vide partiel qui aspire de l'air dans le cylindre à travers la soupape d'admission. Contrairement au moteur à essence, aucun carburant n'est introduit pendant cette phase.

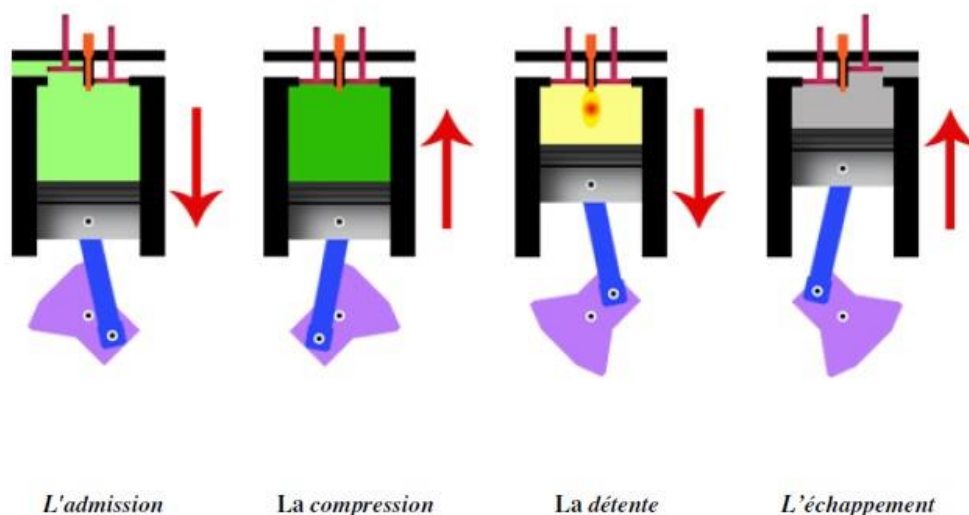


Figure I-12 Cycle à 4 temps dans un moteur diesel [3].

➤ **Compression :**

Une fois que le piston atteint le bas de sa course d'admission, il commence à remonter, comprimant l'air dans le cylindre à des températures très élevées en raison de la compression adiabatique. Cette compression élève considérablement la température de l'air dans le cylindre.

➤ **Combustion (ou auto inflammation) :**

Au moment où le piston atteint le sommet de sa course de compression, du carburant Diesel est injecté directement dans le cylindre sous haute pression à travers l'injecteur de carburant. L'air très comprimé à l'intérieur du cylindre s'échauffe suffisamment pour enflammer spontanément le carburant diesel, provoquant une combustion instantanée. Contrairement au moteur à essence, il n'y a pas de bougie d'allumage dans un moteur Diesel. Cette combustion produit une augmentation rapide de la pression dans le cylindre, poussant le piston vers le bas [4].

➤ **Echappement :**

Une fois que la combustion est terminée et que le piston atteint le bas de sa course de puissance, la soupape d'échappement s'ouvre et la soupape d'admission se ferme. Le piston remonte alors dans le cylindre, expulsant les gaz d'échappement produits lors de la combustion à travers la soupape d'échappement et dans le système d'échappement.

## **I.5 Caractéristiques du moteur à combustion interne**

➤ **Le nombre et la disposition des cylindres Z**

La disposition des cylindres dans un moteur à combustion interne peut varier selon plusieurs facteurs, notamment le type de moteur, la conception et l'application. Figure ci-dessous montre quelques-unes des dispositions les plus courantes.

- **Disposition en ligne :** Dans cette disposition, les cylindres sont alignés dans une ligne droite le long du vilebrequin. Les moteurs à quatre cylindres en ligne sont très courants dans les voitures et les motos. Cette disposition offre une conception compacte et relativement simple.

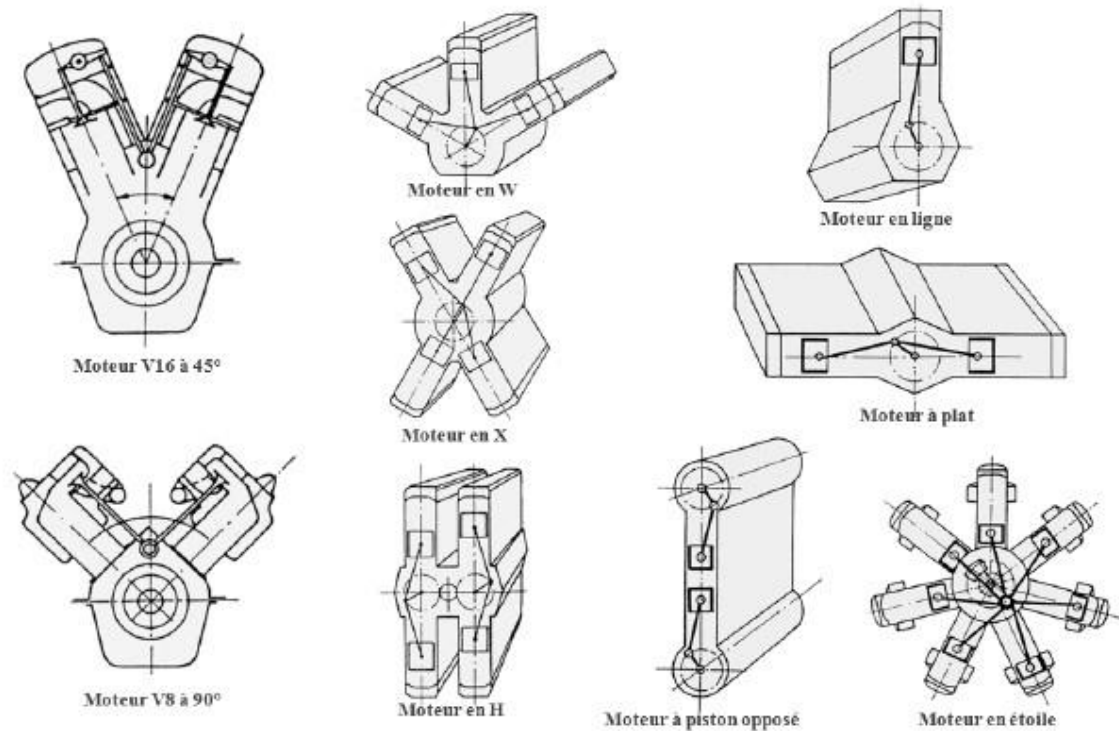


Figure I-13 Disposition des cylindres [1].

- **Disposition en V :** Dans cette configuration, les cylindres sont divisés en deux groupes et inclinés l'un par rapport à l'autre pour former une forme de "V". Cette disposition est couramment utilisée dans les moteurs à six, huit et douze cylindres. Les moteurs en V offrent généralement un meilleur équilibre et une compacité accrue par rapport aux moteurs en ligne.
- **Disposition à plat :** Dans cette configuration, les cylindres sont disposés horizontalement, opposés de chaque côté du vilebrequin. Cette disposition est typique des moteurs de type "boxer" ou "à plat", souvent utilisés dans les voitures de sport et les avions. Elle offre une faible hauteur du moteur, un centre de gravité bas et une excellente stabilité.
- **Disposition radiale :** Dans les moteurs à combustion interne radiaux, les cylindres sont disposés autour d'un axe central, formant une disposition semblable aux rayons d'une roue. Cette configuration était couramment utilisée dans les avions à pistons pendant la Première et la Seconde Guerre mondiale en raison de sa compacité et de sa simplicité de refroidissement.

- **Disposition en étoile :** Dans cette configuration, plusieurs lignes de cylindres convergent vers un point central, formant une disposition en étoile. Cette disposition était également utilisée dans les avions à pistons et dans certains moteurs stationnaires.

- **La charge du moteur**

La "charge moteur" fait référence à la quantité de travail demandée au moteur à un moment donné. Elle peut être mesurée de différentes manières en fonction du type de moteur et de l'application. Dans de nombreux cas, la charge motrice est exprimée en pourcentage de la puissance maximale que le moteur peut produire. Par exemple, si un moteur a une puissance maximale de 100 chevaux, et qu'il est actuellement utilisé pour produire 50 chevaux, la charge du moteur serait de 50%.

- **Le diamètre d'alésage D**

C'est le diamètre du cylindre (centimètre).

- **La course du piston S**

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

- **Alésage (S/D)**

L'alésage du moteur est une mesure importante qui définit le rapport entre la course (S) et le diamètre intérieur (D) de chaque cylindre dans un moteur à combustion interne. Cette mesure est cruciale car elle détermine la taille des pistons qui se déplacent à l'intérieur de ces cylindres. L'alésage est généralement exprimé en millimètres ou en pouces. Dans le cas où le rapport  $S/D$  égal à 1 on dit que le moteur est carré ou à course normale. Les moteurs à essence ont un rapport  $S/D$  qui est inférieure à 1, dans ce cas, le moteur est dit super carré. Dans le cas contraire, des moteurs Diesel, le rapport  $S/D$  est supérieur à 1 et le moteur est dit à course longue. D'une manière générale  $S/D$  se situe entre 1,2 et 2 pour les moteurs à gas 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. Les moteurs à essence ont un rapport  $\lambda = 0.238$  à  $0.275$ . Les moteurs Diesel ont un rapport  $\lambda = 0.222$  à  $0.263$ .

- **La cylindrée unitaire**

C'est le volume balayé par le piston entre le PMH et le PMB (cm<sup>3</sup>) ;

$$V_{cyl} = \frac{\pi D^2}{4} S \quad (1.1)$$

➤ **La cylindrée totale**

C'est le volume de la cylindrée unitaire multiplié par le nombre de cylindres (cm<sup>3</sup>) ;

$$V_{tot} = V_{cyl} Z \quad (1.2)$$

➤ **Le volume maximal au PMB**

C'est la somme du volume, en (cm<sup>3</sup>), de la cylindrée unitaire et du volume de la chambre de combustion ;

$$V_{PMB} = V_{cyl} + V_c \quad (1.3)$$

➤ **Le volume minimal au PMH**

C'est le volume, en (cm<sup>3</sup>), de la chambre de combustion délimité par la culasse, la tête du piston et la chemise du cylindre.

$$V_{PMH} = V_c \quad (1.4)$$

➤ **Le taux de compression volumétrique**

C'est le rapport entre le volume maximal (PMB) du cylindre et le volume minimal (PMH) du cylindre.

$$\varepsilon = \frac{V_{PMB}}{V_{PMH}} = \frac{V_{cyl} + V_c}{V_c} \quad (1.5)$$

## I.6 Carburants des moteurs à combustion interne

Les moteurs à combustion interne utilisent une variété de carburants pour produire de l'énergie mécanique. Les principaux types de carburants utilisés dans ces moteurs comprennent ;

**Essence :**

C'est le carburant le plus couramment utilisé dans les moteurs à essence. Il est composé principalement d'hydrocarbures légers, généralement des alcanes, et contient également des additifs pour améliorer ses performances et sa stabilité

L'essence est constitué principalement de ;

- **Alcanes** : La formule générale pour un alcane est  $C_nH_{2n+2}$ , où  $n$  représente le nombre d'atomes de carbone. Par exemple, l'octane, qui est un composant important de l'essence, a la formule chimique  $C_8H_{18}$ .
- **Cycloalcanes** : Les cycloalcanes sont des hydrocarbures cycliques. Par exemple, le cyclohexane a la formule chimique  $C_6H_{12}$ .
- **Alcènes (par exemple, l'éthylène)** : Les alcènes sont des hydrocarbures insaturés avec une double liaison carbone-carbone. Par exemple, l'éthylène a la formule chimique  $C_2H_4$ .

### **Diesel :**

Les moteurs diesel fonctionnent avec du carburant diesel, qui est plus dense et contient des hydrocarbures plus lourds par rapport à l'essence. Le diesel est moins inflammable que l'essence et nécessite une compression plus élevée pour s'auto-enflammer dans le moteur [5].

Le Diesel est constitué principalement de ;

- **L'hexa-décane (famille des alcanes)** : l'hexadécane, un composant majeur du diesel, a la formule chimique  $C_{16}H_{34}$ .
- **Les cyclo-alcanes** : sont des hydrocarbures saturés qui se présentent sous la forme de cycles d'atomes de carbone liés par des liaisons simples. Ces composés sont similaires aux alcanes, mais au lieu d'avoir une structure linéaire, ils forment un anneau ou une structure cyclique.
- **Les alkyl-benzènes** : sont des composés organiques dérivés du benzène dans lesquels un ou plusieurs atomes d'hydrogène ont été remplacés par des groupes alkyles. Les alkyles sont des groupes d'hydrocarbures, tels que les groupes méthyle ( $-CH_3$ ), éthyle ( $-CH_2CH_3$ ), propyle ( $-CH_2CH_2CH_3$ ), etc.

### **Le gaz naturel (GNV) :**

Le gaz naturel est composé principalement de méthane ( $CH_4$ ). Il est utilisé comme carburant dans les moteurs à combustion interne sous forme comprimée (CNG) ou liquéfiée (LNG). Le gaz naturel est considéré comme une alternative plus propre aux carburants liquides conventionnels en raison de ses émissions réduites de polluants[4].

**Mélange Gaz Essence :**

Certains moteurs à combustion interne peuvent également fonctionner avec un mélange de gaz et d'essence, par exemple dans les moteurs à deux temps utilisés dans certaines applications spécifiques.

**Hydrogène :**

L'hydrogène est considéré comme un carburant potentiel pour les moteurs à combustion interne. Lorsqu'il est utilisé dans un moteur à combustion interne, il produit de l'eau comme seul sous-produit, ce qui en fait une option intéressante du point de vue de l'émissions zéro. La formule chimique de l'hydrogène est simplement H<sub>2</sub>. Cela signifie qu'une molécule d'hydrogène est composée de deux atomes d'hydrogène liés ensemble par une liaison covalente.



## Chapitre 2 : La thermodynamique des cycles moteurs

### II.1 Introduction

La thermodynamique des cycles moteurs analyse les différents processus thermodynamiques qui se produisent à l'intérieur du moteur, tels que la compression, la combustion, l'expansion et l'échappement. Ces processus sont décrits en termes de pression, de température, de volume et d'enthalpie

### II.2 Principaux cycles théoriques du moteur à combustion interne

#### II.2.1 Cycle de Beau de Rochas (Essence)

Le cycle de Beau de Rochas ou essence utilise une bougie d'allumage pour enflammer le mélange air-carburant, ce qui le distingue du cycle Diesel. Les moteurs à essence sont couramment utilisés dans les voitures particulières en raison de leur fonctionnement généralement plus silencieux et plus doux par rapport aux moteurs diesel [2].

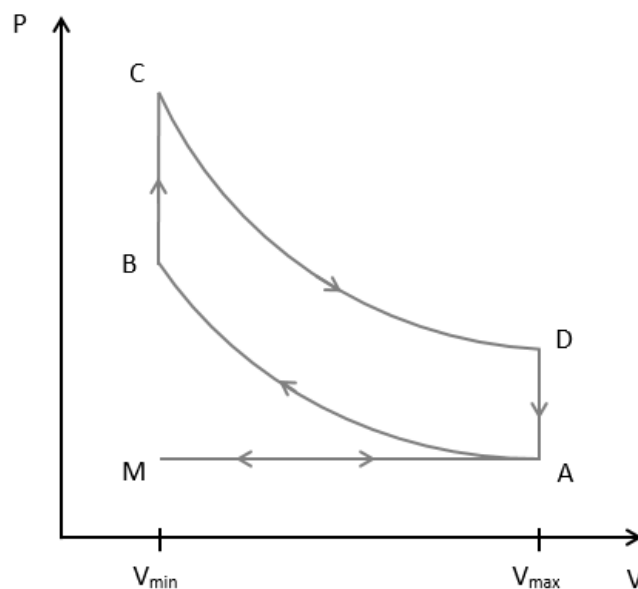


Figure II-1 Cycle Beau de Rochas

Le cycle de fonctionnement se décompose analytiquement en quatre temps ou phases, Figure II-1.

- **M : A** ; Admission des gaz carburés (air + carburant).
- **A : B** ; 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 ;
- **B : C** ; Combustion à volume constant. L'apport de chaleur par combustion de masse du carburant en présence de l'oxygène de masse d'air est donné par ;

$$Q_1 = (m_c + m_a)c_v(T_C - T_B) \quad (2.1)$$

Ou bien ;

$$Q_1 = m_c PCI \quad (2.2)$$

$m_a$  : Masse d'air.

$m_c$  : Masse du carburant.

PCI : Pouvoir calorifique du carburant.

- **C : D** ; 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.

- **D : A** ; Echappement des gaz brûlés, Remontée du piston vers le point mort haut (PMH) en chassant les gaz brûlés détendus dans le collecteur d'échappement avec dégageant de chaleur  $Q_2$  qui est donnée par ;

$$Q_2 = (m_c + m_a)c_v(T_A - T_D) \quad (2.3)$$

### Rendement théorique du cycle de Beau de Rochas

Le rendement thermique du moteur est caractérisé par le rapport de son énergie utile sur l'investissement donné par l'équation (2.4) suivante ;

$$\eta_{essence} = \frac{W_{cycle}}{Q_C} = \frac{\oint Tds}{Q_C} \quad (2.4)$$

$$\eta_{essence} = \frac{\int_A^B TdS + \int_B^C TdS + \int_C^D TdS + \int_D^A TdS}{\int_B^C TdS} \quad (2.5)$$

Considérant les hypothèses suivantes ;

$$S_A=S_B, S_C=S_D, V_B=V_C, V_D=V_A$$

$$\eta_{essence} = 1 - \frac{\int_C^D TdS}{\int_B^A TdS} \quad (2.6)$$

Comme  $TdS = C_V dT + pdV = C_P dT - Vdp$

$$\eta_{essence} = 1 - \frac{(T_D - T_A)}{(T_C - T_B)} = 1 - \frac{T_A \left(\frac{T_D}{T_A} - 1\right)}{T_B \left(\frac{T_C}{T_B} - 1\right)} \quad (2.7)$$

On suppose que le fluide est un gaz parfait ;

$$P_A V_A = rT_A, P_B V_B = rT_B, P_C V_C = rT_C \text{ et } P_D V_D = rT_D \quad (2.8)$$

D'après ces formules, nous pouvons ressortir les formules suivantes ;

$$\frac{T_D}{T_A} = \frac{P_D}{P_A}, \text{ et } \frac{T_C}{T_B} = \frac{P_C}{P_B} \quad (2.9)$$

Dont les processus de compression et de détente sont adiabatique ;

$$P_A V_A^\gamma = P_B V_B^\gamma, \text{ et } P_C V_C^\gamma = P_D V_D^\gamma \text{ (ou } \gamma \text{ est la constante des gaz parfait)}$$

Donc ;

$$\frac{P_D}{P_A} = \frac{P_C}{P_B} \quad (2.10)$$

Ce qui implique alors ;

$$\frac{\left(\frac{T_D}{T_A} - 1\right)}{\left(\frac{T_C}{T_B} - 1\right)} = 1 \quad (2.11)$$

Ainsi ;

$$\frac{T_B}{T_A} = \frac{P_B V_B}{P_A V_A} = \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^\gamma \frac{V_B}{V_A} = \epsilon^{\gamma-1} \quad (2.12)$$

Finalement le rendement du cycle de Beau de Rochas prend la forme suivante ;

$$\eta_{essence} = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\gamma-1}} \quad (2.13)$$

## II.2.2 Cycle Diesel

Le cycle Diesel se distingue par l'absence de bougie d'allumage. Au lieu de cela, la combustion du carburant est initiée par la chaleur résultant de la compression de l'air. Ce

cycle est efficace pour produire de grands couples à bas régime, ce qui en fait un choix populaire pour les moteurs de véhicules utilitaires et industriels.

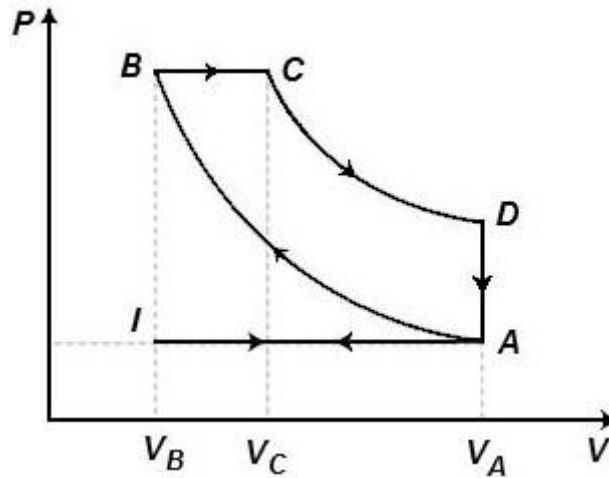


Figure II-2 Cycle Diesel [2]

Le cycle de fonctionnement se décompose analytiquement en quatre temps ou phases, figure

**I : A** ; Admission de l'air.

**A : B** ; Compression adiabatique de l'air

**B : C** ; Combustion isobare, apport de chaleur :

$$Q_1 = c_p(T_B - T_C) \quad (2.14)$$

**C : D** ; Détente adiabatique des gaz.

**I : A** ; Refroidissement isochore des gaz brûlés.

**I : A** ; Echappement des gaz brûlés. La chaleur dégagée est :

$$Q_2 = (m_c + m_a)c_v(T_A - T_D) \quad (2.15)$$

Ou bien

$$Q_2 = m_c PCI \quad (2.16)$$

### Rendement théorique du cycle diesel

Il est donné par :

$$\eta_{Diesel} = \frac{W_{cycle}}{Q_C} = \frac{\oint T ds}{Q_C} \quad (2.17)$$

Considérant les hypothèses suivantes ;

$$S_A=S_B, S_C=S_D, P_B=P_C, V_D=V_A \quad (2.18)$$

$$\eta_{Diesel} = 1 - \frac{\int_B^D TdS}{\int_C^A TdS} \quad (2.19)$$

Comme  $TdS = C_V dT + pdV = C_P dT - Vdp$

$$\Rightarrow \eta_{Diesel} = 1 - \frac{C_V(T_D - T_A)}{C_P(T_C - T_B)} = 1 - \frac{T_A \left(\frac{T_D}{T_A} - 1\right)}{\gamma T_B \left(\frac{T_C}{T_B} - 1\right)} \quad (2.20)$$

Avec ;

$$P_A V_A = rT_A, P_B V_B = rT_B, P_C V_C = rT_C \text{ et } P_D V_D = rT_D$$

Ainsi ;

Dont les processus de compression et de détente sont adiabatique ;

$$P_A V_A^\gamma = P_B V_B^\gamma, \text{ et } P_C V_C^\gamma = P_D V_D^\gamma \text{ (ou } \gamma \text{ est la constante des gaz parfait)}$$

Donc ;

$$\frac{T_C}{T_B} = \frac{V_C}{V_B} = \alpha \quad (2.21)$$

$$\frac{T_D}{T_A} = \frac{P_D}{P_A} = \left(\frac{V_C}{V_B}\right)^\gamma = \alpha^\gamma \quad (2.22)$$

$$\frac{T_B}{T_A} = \frac{P_B V_B}{P_A V_A} = \left(\frac{V_A}{V_B}\right)^\gamma \left(\frac{V_B}{V_A}\right) = \varepsilon^{\gamma-1} \quad (2.23)$$

Finalement le rendement du cycle Diesel prendra la forme suivante ;

$$\eta_{Diesel} = 1 - \frac{\alpha - 1}{\varepsilon^{\gamma-1} (\alpha^\gamma - 1)} \quad (2.24)$$

### II.2.3 Cycle de Sabathé (Mixte)

Le cycle de Sabathé (mixte) est une combinaison des deux cycles, Beau de Rochas et Diesel.

La combustion est à la fois, à pression et à volumes constants, figure suivante ;

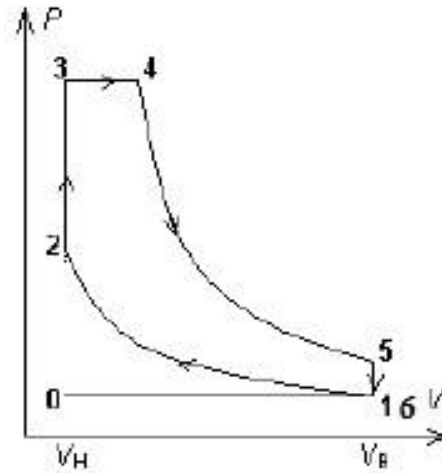


Figure II-3 Cycle de Sabathé

**Rendement théorique du cycle de Sabathé**

Il est donné par :

$$\eta_{mixte} = \frac{W_{cycle}}{Q_C} = \frac{\oint Tds}{Q_C} \tag{2.25}$$

$$\eta_{mixte} = \frac{\int_1^2 Tds + \int_2^3 Tds + \int_3^4 Tds + \int_4^5 Tds + \int_5^1 Tds}{\int_2^3 Tds + \int_3^4 Tds} \tag{2.26}$$

Avec  $S_1=S_2, S_3=S_4, P_3=P_4, V_1=V_5, V_2=V_3$  (2.27)

Et,  $\frac{V_3}{V_4} = \alpha, \frac{P_3}{P_4} = \pi$  et  $\frac{V_2}{V_1} = \varepsilon$  (2.28)

$$\eta_{mixte} = 1 - \frac{\int_1^5 Tds}{\int_2^3 Tds + \int_3^4 Tds} \tag{2.29}$$

**Comme**  $Tds = C_V dT + pdV = C_P dT - Vdp$  (2.30)

$$\eta_{mixte} = 1 - \frac{\int_1^5 C_V dT + \int_1^5 pdV}{\int_2^3 C_V dT + \int_2^3 pdV + \int_3^4 C_P dT - \int_3^4 Vdp} \tag{2.31}$$

$$\eta_{mixte} = 1 - \frac{C_V(T_5 - T_1)}{C_V(T_3 - T_2) + C_p(T_4 - T_3)} \quad (2.32)$$

Le gaz est supposé parfait ;

$$\text{Avec ; } PV_i = rT_i,$$

D'après cette formule, on peut déduire ;

$$\frac{T_5}{T_1} = \frac{P_5}{P_1}, \text{ et } \frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2} = \pi \quad (2.33)$$

Dont les processus de compression et de détente sont adiabatique ;

$$P_1V_1^\gamma = P_2V_2^\gamma, \text{ et } P_4V_4^\gamma = P_5V_5^\gamma \text{ (ou } \gamma \text{ est la constante des gaz parfait)}$$

Il en résulte ;

$$\Rightarrow \frac{T_4}{T_2} = \frac{P_4V_4}{P_2V_2} = \frac{P_3V_4}{P_2V_3} = \alpha\pi \quad (2.34)$$

$$\Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2V_2}{P_1V_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma \frac{V_2}{V_1} = \varepsilon^{\gamma-1} \quad (2.35)$$

$$\frac{P_5}{P_1} \left(\frac{V_5}{V_1}\right)^\gamma = \frac{P_4}{P_2} \left(\frac{V_4}{V_2}\right)^\gamma \quad (2.36)$$

$$\Rightarrow \frac{P_5}{P_1} = \frac{P_3}{P_2} \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^\gamma = \pi\alpha^\gamma$$

Ainsi, le rendement du cycle Diesel est fonction du taux de compression  $\varepsilon$  et du taux d'introduction  $\alpha$ .

$$\eta_{Mixte} = 1 - \frac{(\pi\alpha^\gamma - 1)}{\varepsilon^{\gamma-1}((\pi - 1) + \gamma\pi(\alpha - 1))} \quad (2.37)$$

### II.3 Diagramme réel d'un moteur Diesel rapide

Réellement, le diagramme donnant le cycle moteur est largement différent du cycle théorique, conséquence des imperfections des processus qui se produisent lors du fonctionnement. On constate d'après la Figure II-4 ci-dessous que ;

- À l'admission, du fait de l'aspiration du piston et de l'inertie du gaz non nulle, la pression est inférieure à la pression atmosphérique (dans le cas d'un moteur non suralimenté)

- Au cours de la combustion, la composition chimique et la quantité du carburant sont variables.

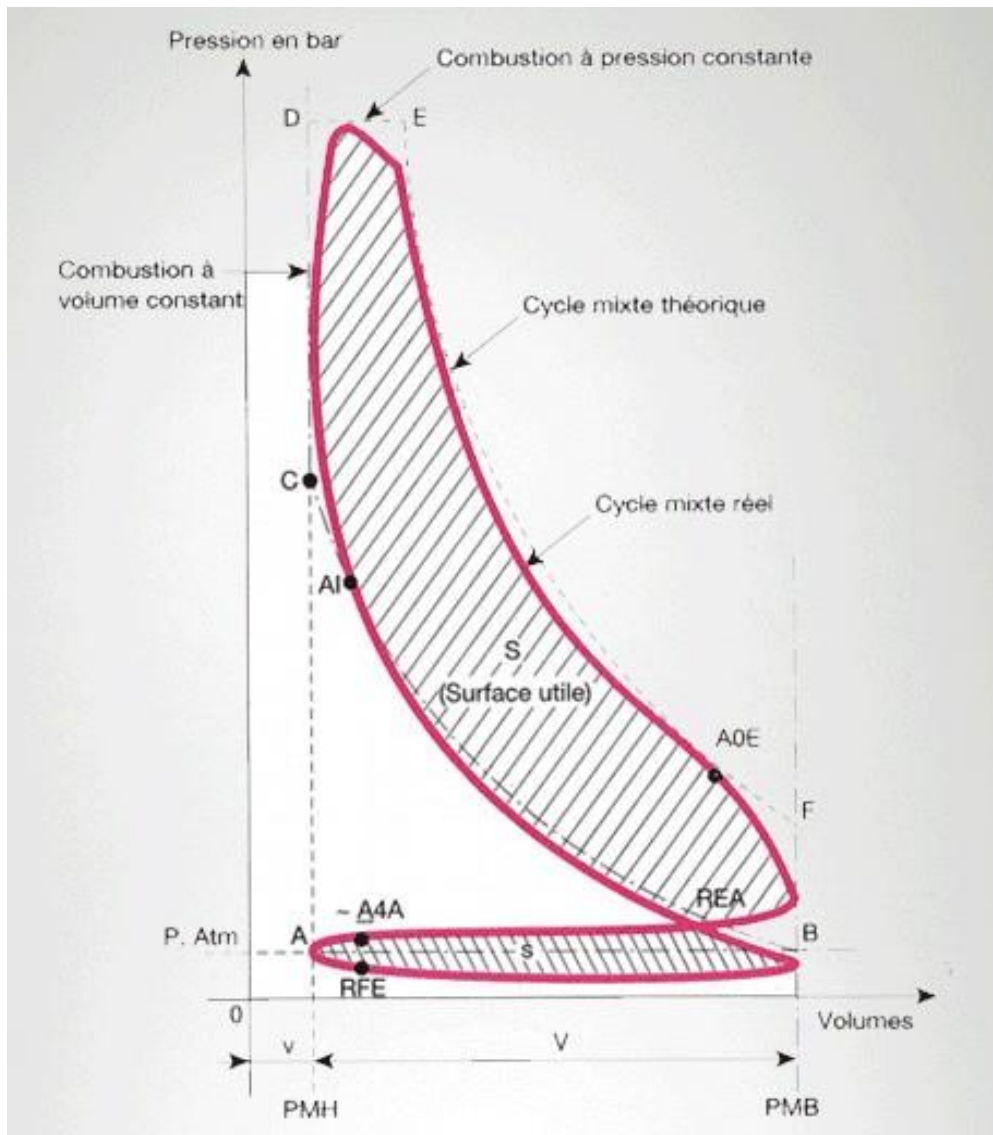


Figure II-4 Cycle réel d'un moteur à allumage par compression [3]

- Les caractéristiques du carburant (chaleur spécifique, etc.) considérés constantes dans le cycle thermodynamique. En revanche, dans le cycle réel, dépendent de la température.
- A cause des échanges de chaleur entre le carburant et les parois du cylindre, les processus de compression et détente ne sont pas adiabatiques, mais polytropiques.



- Le fonctionnement du moteur nécessite l'évacuation des produits de combustion et l'introduction périodique, au début de chaque cycle, de la charge fraîche. Le remplissage du cylindre du moteur dépend considérablement de son nettoyage,
- A cause du remplissage moindre et des échanges de chaleur entre le carburant et les parois du cylindre, durant la compression, la pression finale est inférieure à la pression théorique.

Dans le Diagramme réel en tenant compte les quatre points : (A.4.A), (R.F.A), (A.O.E), (R.F.E).

### Pour les soupapes d'admission

**A.4.A** : Avance à l'ouverture de l'admission (au début de l'ouverture)

**R.F.A** : Retard à la fermeture de l'admission (à la fin de la fermeture)

### Pour les soupapes d'échappement

**A.O.E** : Avance à l'ouverture de l'échappement (au début de l'ouverture)

**R.F.E** : Retard à la fermeture de l'échappement (à la fin de la fermeture)

## II.3.1 Les phases de distribution

Les phases de distribution sont représentées sur le diagramme de distribution suivant. Indiquant les temps entre les moments d'ouverture et de fermeture des soupapes d'admission et d'échappement, qui sont exprimés en angle de rotation du vilebrequin.

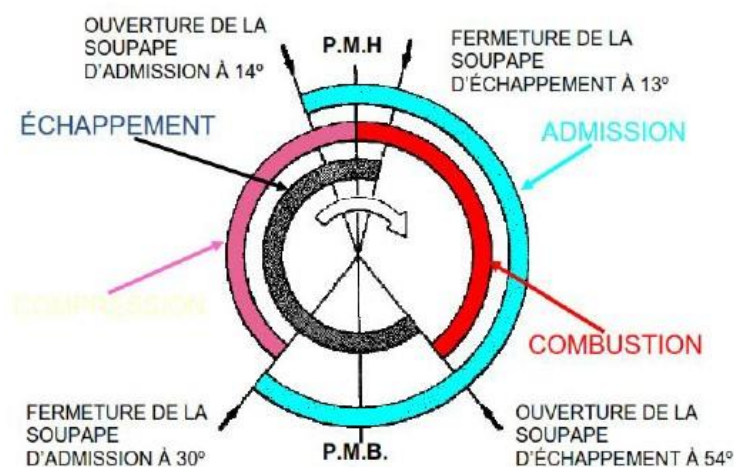


Figure II-5 Diagramme de distribution [3]

La soupape d'admission s'ouvre avec une avance constante par rapport au PMH et se ferme avec un retard constant par rapport au PMB pour obtenir un bon remplissage en charge fraîche. Par conséquent, pour garantir un nettoyage efficace du cylindre des produits de combustion, la soupape d'échappement s'ouvre avec une avance constante par rapport au PMH et se ferme avec un retard constant par rapport au PMH.

Les soupapes d'admission et d'échappement restent ouvertes en même temps en fin d'échappement et en début d'admission. Cette position est connue sous le nom de croisement des soupapes. Le croisement des soupapes permet à la fois l'évacuation des produits de combustion du cylindre et l'introduction d'air frais dans la chambre de combustion, ce qui réduit la partie chaude du moteur.

### II.3.2 Diagramme indiqué

Un graphique présentant l'évolution de la pression dans le cylindre en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin, du volume ou de la course du piston est fréquemment utilisé pour illustrer un cycle réel, comme illustré dans la figure ci-dessous.

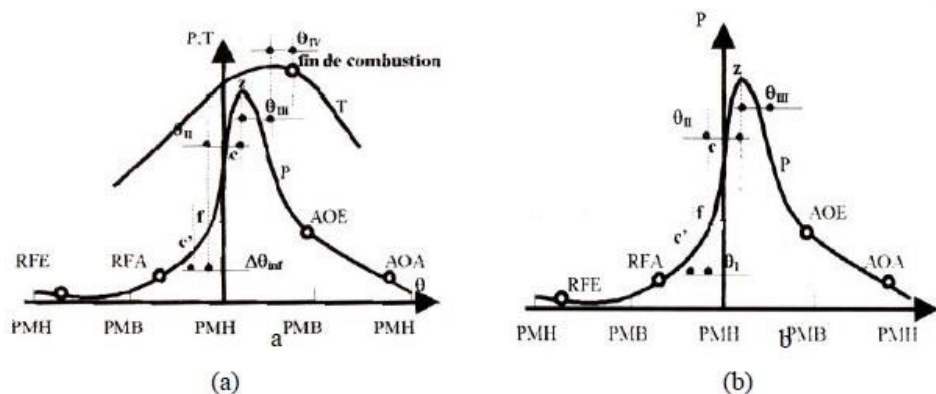


Figure II-6 diagramme indiqué, la variation de la pression en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin, (a) moteur Diesel, (b) moteur à essence [3].

## II.4 Système d'allumage pour les moteurs à essence

### II.4.1 Nécessité d'un système d'allumage

La combustion par détente se produit lors du troisième temps du moteur dans un cycle à quatre temps. L'étape d'allumage de ce moteur entraîne la combustion du mélange comprimé. Par conséquent, le système d'allumage est un système générateur d'arc qui produit suffisamment de chaleur pour provoquer l'inflammation du mélange d'air comprimé et d'essence. La température de la masse gazeuse est augmentée par le mélange enflammé, ce qui augmente la pression dans la chambre de combustion et sur le piston. Cette augmentation importante de la pression exerce une force sur le piston, qui à son tour exerce une force sur la bielle, qui transmet le couple au tourillon du vilebrequin.

Les systèmes d'allumage peuvent être classés en quatre grandes catégories en fonction de leur construction.

- Allumage classique à rupteur, entièrement mécanique.
- Allumage à rupteur transistorisé.
- Allumage à déclenchement statique.
- Allumage électronique intégral (avec une distribution mécanique ou statique).

#### **II.4.2 Présentation du système d'allumage classique**

En fin de compression, le système d'allumage doit créer un arc au sein de chaque cylindre pour enflammer le mélange. Le système d'allumage utilise l'énergie électrique de la batterie pour générer une étincelle dans chaque cylindre à ce stade précis.

Le système fournit trois fonctions :

- Augmenter la tension de la batterie ( $12\text{ V} \rightarrow 10 \text{ à } 15\text{ kV}$ ).
- Distribuer la haute tension dans chaque cylindre (cylindres :  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 2$ ).
- Produire un arc électrique.

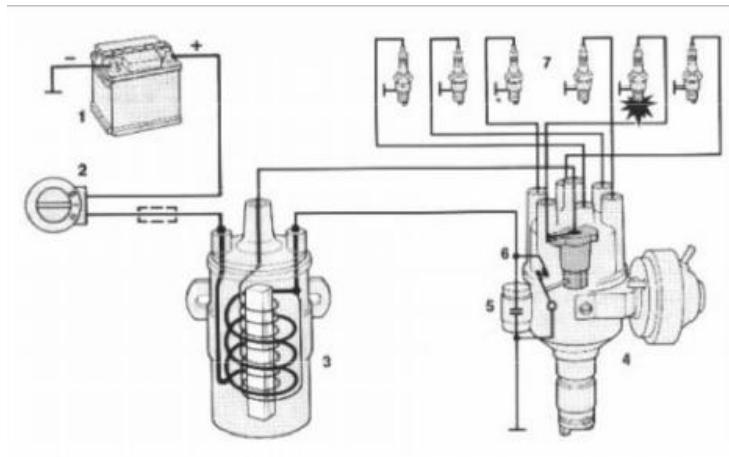


Figure II-7 Système d'allumage classique [3]

La bobine est un transformateur utilisé pour convertir la tension de la batterie. La distribution garantit également le déclenchement des étincelles. Et les bougies assurent la production d'arcs électriques.

## II.5 La combustion

Selon la première loi de la thermodynamique, la chaleur dégagée du milieu de travail augmente l'énergie interne et est utilisée pour produire du travail mécanique.

### II.5.1 La combustion dans le moteur Diesel

Le piston comprime l'air dans le cylindre une fois qu'il est rempli d'air. Le moteur diesel a une compression beaucoup plus élevée que le moteur à essence, ce qui augmente considérablement la température de l'air. Un injecteur diesel injecte du carburant diesel dans la chambre de combustion sous très haute pression juste avant que le piston atteigne le point mort supérieur (PMS) et que la compression atteigne son maximum. Le carburant est pulvérisé dans la chambre de combustion en fines gouttelettes par l'injecteur, qui se mélange à l'air chaud et comprimé. Le carburant diesel est instantanément vaporisé lorsqu'il est injecté dans la chambre de combustion et commence à réagir avec l'oxygène présent dans l'air chaud et comprimé. Contrairement à un moteur à essence, le carburant s'enflamme spontanément sans bougie d'allumage en raison de la température élevée résultant de la compression. La pression à l'intérieur du cylindre augmente soudainement en raison de cette réaction, qui pousse le piston vers le bas.

**Figure II-6-a**, montre le processus de combustion d'un moteur diesel en quatre étapes.

1. **Le délai d'inflammation** ( $\Delta\Theta_{inf}$ ) : Elle commence au même instant que le début de l'injection et se termine au même instant que le début de l'inflammation. Cette étape comprend les étapes suivantes :
  - Atomise, chauffe et vaporise le carburant.
  - Mélange d'air chaud et de vapeurs de carburant.
  - L'initiation d'une réaction chimique de combustion.
2. **L'inflammation rapide** ( $\Delta\Theta_{II}$ ) : La phase commence au début de l'allumage f et se termine au point Z, qui est la valeur maximale de la pression dans le cylindre. La pression au sein du cylindre augmente rapidement.
3. **La combustion rapide** ( $\Delta\Theta_{III}$ ) : Commence au point Z et se termine au point où la température du fluide dans le cylindre est la plus élevée. À ce stade, la pression diminue à mesure que le volume du cylindre augmente du PMH au PMB tout en continuant la combustion.
4. **La post combustion** ( $\Delta\Theta_{IV}$ ) : Commence à la fin de la phase précédente et se termine à la fin de la phase de dégagement de chaleur.

### II.5.2 La combustion dans les moteurs à essence

Une fois que le mélange air-carburant a rempli le cylindre, le piston remonte et comprime le mélange. Contrairement aux moteurs diesel qui ne compriment que l'air, les moteurs à essence compriment le mélange air-carburant avant l'allumage. La bougie d'allumage produit une étincelle à la fin de la course de compression, ce qui entraîne l'inflammation du mélange air-carburant. Cela provoque une flamme qui se propage rapidement dans le mélange, augmentant rapidement la pression dans le cylindre. La pression produite par la combustion fait descendre le piston. Le vilebrequin tourne et produit la puissance nécessaire pour faire fonctionner le véhicule lorsque cette force de poussée est transformée en mouvement linéaire.

Le processus de combustion d'un moteur à essence se déroule en trois étapes, comme indiqué dans la **Figure II-6-b**.

1. **L'inflammation rapide** : Elle commence au point  $c'$ , qui est le point où se produit l'étincelle électrique, et se termine au point  $f$ .
2. **La phase principale** : La phase commence au point  $f$  et se termine au point  $Z$ , où la pression du cylindre est la plus élevée.
3. **La post combustion** : La dernière étape de la combustion commence au point  $Z$  et se termine avec la fin du refroidissement.

## Chapitre 3 : Cycle réel d'un moteur à combustion interne de type Diesel

### III.1 Introduction

**L**e cycle réel d'un moteur à combustion interne est caractérisé par des pertes de chaleur, des inefficacités de combustion, des pertes par frottement et des pertes de pompage, ce qui réduit l'efficacité globale du moteur par rapport à son équivalent théorique idéal. La principale différence entre un cycle réel et un cycle théorique d'un moteur à combustion interne réside dans le fait que le cycle réel tient compte des pertes et des inefficacités qui se produisent réellement lors du fonctionnement du moteur, tandis que le cycle théorique est un modèle idéalisé qui suppose un fonctionnement parfait sans aucune perte.

Le cycle réel diffère du cycle théorique par les considérations suivantes :

#### **Compression et détente adiabatique :**

Le cycle théorique suppose que la compression et la détente se produisent de manière adiabatique, c'est-à-dire sans échange de chaleur avec l'environnement. Dans un moteur réel, cependant, il y a des pertes de chaleur pendant ces processus, ce qui rend la compression et la détente moins efficaces [6].

#### **Combustion parfait :**

Le cycle théorique suppose une combustion parfaite, avec un mélange air-carburant idéal et une combustion complète sans produits de combustion non brûlés. En réalité, la combustion dans un moteur à combustion interne est souvent incomplète en raison de divers facteurs tels que des conditions de mélange non idéales, des retards d'allumage, etc.

#### **Pertes de chaleur :**

Les moteurs réels subissent des pertes de chaleur à divers endroits, notamment à travers les parois des cylindres, les gaz d'échappement et d'autres composants du moteur. Ces pertes de chaleur réduisent l'efficacité du moteur par rapport au modèle théorique.

**Pertes de friction :**

Les frottements internes entre les pièces mobiles du moteur, tels que les pistons, les segments de piston, les soupapes, etc., entraînent des pertes d'énergie sous forme de chaleur, ce qui diminue l'efficacité du moteur.

**Pertes de pompage :**

Les pertes de pompage se produisent lorsque le moteur doit surmonter la résistance au déplacement de l'air à travers les conduits d'admission et d'échappement. Ces pertes réduisent également l'efficacité du moteur par rapport au modèle théorique.

**III.2 Présentation des diagrammes du cycle réel**

Le diagramme indiqué représente le cycle réel. Il est basé sur la variation de la pression  $P$  du cylindre, soit en fonction du volume  $V$  dans le cylindre ou en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin.

**III.2.1 Cycle réel dans le diagramme (P, V)**

Le diagramme (P, V), est relevé directement sur le moteur, il représente la variation de la pression réelle à l'intérieur du cylindre en fonction du volume occupé par les gaz donc de la position du piston, Figure III-1. Ses différences de forme avec le diagramme théorique proviennent de ce que :

- La masse du gaz pendant l'évolution est variable : problèmes d'admission ou d'injection, problèmes de fuite
- Le gaz est incomplet et ses constantes changent au cours du cycle.
- Les lois de fonctionnement réelles diffèrent des changements théoriques.
- Les changements de phase ne se produisent pas immédiatement.
- Les modifications de la régulation nécessaires pour l'inertie des soupapes et des veines fluides
- L'effet de paroi est important.
- Le refroidissement du cylindre est nécessaire pour garantir le graissage intérieur et maintenir la température du métal à une valeur compatible avec la résistance du matériau.





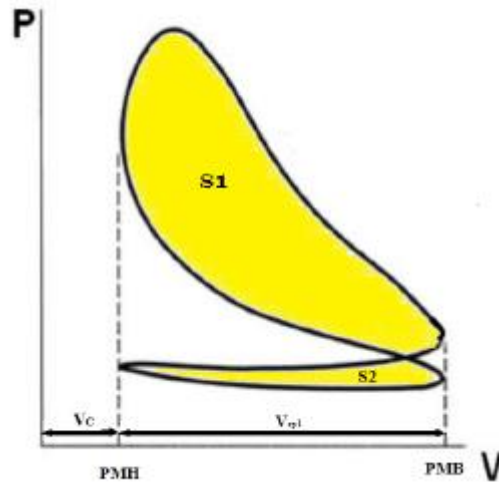


Figure III-2 Diagramme (PV) du cycle réel d'un moteur à combustion interne [1]

### III.3.1.1 Pression moyenne indiquée ( $p_{mi}$ )

La pression équivalente constante supposée délimitée par les courses de compression et de détente est connue sous le nom de pression moyenne du cycle. Où  $S_1$  représente le travail positif effectué au cours du cycle et  $S_2$  représente la somme des travaux négatifs effectués au cours du cycle. Cette valeur est déterminée pour un seul cylindre à l'aide de les formules (3.3) et (3.4) suivantes :

$$S_1 = W_{\text{indiqué}} = \int p dv = p_{mi} V_{\text{cyl}} \quad (3.3)$$

$$W_i = p_{mi} \frac{\pi D^2}{4} \quad (3.4)$$

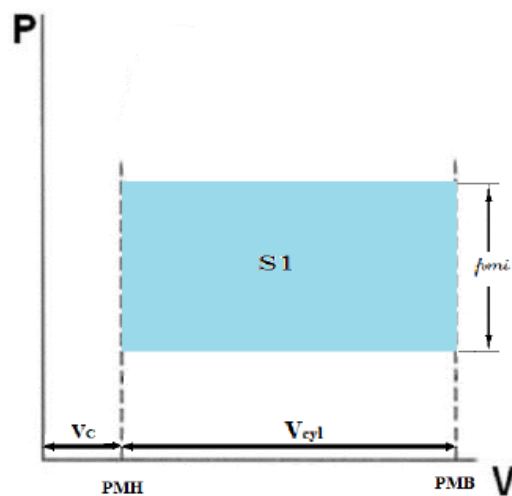


Figure III-3 Représentation du cycle moteur avec la pression moyenne indiquée [1].

La pression moyenne d'un moteur  $Z$  cylindres est indiquée par :

$$p_{mi} = \sum_1^z \frac{p_{mi}}{Z} = \sum_1^z \frac{W_i}{ZV_{cyl}} \quad (3.5)$$

Pour un moteur à allumage commandé, les cycles successifs et les pressions maximales ne sont pas identiques.

Cependant, pour les moteurs diesel, les cycles successifs sont identiques et il est possible d'écrire ainsi :

$$p_{mi} = \frac{W_i}{V_{cyl}} \quad (3.6)$$

### III.3.1.2 Puissance moyenne indiquée ( $P_i$ )

La puissance moyenne indiquée produite par un cylindre unique est donnée par :

$$P_i = \frac{W_i}{\Delta t} \quad (3.7)$$

$$\text{Avec } \Delta t = \frac{60nr}{N} \quad (3.8)$$

$$P_i = \frac{NW_i}{60nr} = \frac{p_{mi}V_{cyl}N}{60nr} \quad (3.9)$$

Si  $nr = 2$ , le moteur est à 4 temps

Si  $nr = 1$ , le moteur est à 2 temps

Ainsi, la puissance moyenne indiquée du moteur est:

$$P_i = \frac{p_{mi}V_{cyl}N}{60nr} Z \quad (3.10)$$

### III.3.1.3 Puissance effective ( $P_e$ )

La quantité de puissance générée au cours du cycle est dite indiquée. Cependant, en raison des irréversibilités, cette puissance ne se transmet pas intégralement au vilebrequin. En effet, en raison des transferts thermiques par les parois et des phénomènes mécaniques par frottements, le travail produit pendant le cycle moteur est supérieur au travail réalisé au niveau de l'arbre moteur. De la même manière, la pression moyenne effective est égale à la puissance moyenne

effective. [7]C'est la pression qui produit le travail utile (effectif) au niveau de l'arbre moteur [6].

$$W_e = P_{me} V_{cyl} \quad (3.11)$$

$$P_i = \frac{NW_e}{60nr} = \frac{P_{me} V_{cyl} N}{60nr} \quad (3.12)$$

Le moteur a une puissance effective de

$$P_e = \frac{P_{me} V_{cyl} N}{60nr} Z \quad (3.13)$$

Le produit algébrique du couple divisé par la vitesse angulaire mesurée au niveau de l'arbre du moteur peut être utilisé pour mesurer la puissance effective du moteur sur un banc d'essai.

$$P_e = C \omega = C \frac{2\pi N}{60} \quad (3.14)$$

Il convient de noter que la puissance effective est toujours inférieure à la puissance indiquée :

$$P_i = P_e + P_{pm} \quad (3.15)$$

La puissance dépensée pour l'entraînement des organes auxiliaires et la puissance dissipée par les pertes mécaniques dues aux frottements entre les éléments du moteur sont connues sous le nom de  $P_{pm}$ .

Le rendement mécanique est le rapport entre la puissance indiquée et la puissance effective.

$$\eta_{mec} = \frac{P_e}{P_i} = \frac{P_i - P_{pm}}{P_i} = 1 - \frac{P_{pm}}{P_i} \quad (3.16)$$

Les pertes mécaniques varient généralement de 5 à 20 %. La performance mécanique est d'environ 80 à 95 %.

#### **III.3.1.4 Consommation spécifique indiquée ( $b_i$ )**

Une quantité de carburant  $m_f$  est nécessaire pour faire fonctionner le moteur. Le débit de carburant  $B$  peut être exprimé en kg/h.

Le  $b_i$  indique la quantité de carburant nécessaire au moteur pour produire une puissance de 1 KWh, c'est-à-dire une puissance de 1 KW pendant une heure.

$$b_i = \frac{B}{P_i} 3600 \quad (3.17)$$

Si B est le débit de carburant en gr/s et  $P_i$  est la puissance exprimée en KW, l'estimation de  $b_i$  est en g/KWh. Le taux de rendement du moteur diesel  $b_i$  est compris entre 170 et 200 g/KWh.

### **III.3.1.5 Rendement indiqué ( $\eta_i$ )**

Le rapport du travail fourni montre la quantité de chaleur produite par la combustion pour accomplir ce travail. On peut calculer le rendement indiqué par la relation suivante pour une durée de travail égale à une heure :

$$\eta_i = \frac{W_i}{PCI \cdot m_f} \quad (3.18)$$

Le pouvoir calorifique du carburant (PCI) est exprimé en KJ/kg, tandis que  $m_f$  est la quantité de carburant en kg. Mais d'une manière plus pratique, nous pouvons calculer plus facilement le rendement indiqué par le débit de carburant et la puissance indiquée par la relation :

$$\eta_i = \frac{P_i}{PCI \cdot B} \quad (3.19)$$

Le pouvoir calorifique du carburant (PCI) est indiqué en KJ/kg, B est le débit de carburant en kg/h et  $P_i$  est la puissance indiquée en KW. Le rendement indiqué est la somme de la chaleur évacuée par les organes d'échappement, des pertes dues à la combustion incomplète et au refroidissement, ainsi que des pertes thermiques à travers les chemises, la tête du piston et la culasse.

Le rendement indiqué du moteur diesel est de l'ordre de 40 à 50 %.

### **III.3.1.6 Consommation spécifique effective ( $b_e$ )**

Obtenu en utilisant une analogie avec la consommation spécifique mentionnée. Les pertes doivent augmenter la consommation effective. Par conséquent, il faut brûler plus de carburant pour obtenir 1 KW au niveau de l'arbre moteur. La quantité excédentaire représente le travail et la puissance perdus par frottements et transfert de chaleur.

$$b_e = \frac{B}{P_e} 3600 \quad (3.20)$$

Si le débit de carburant est  $B$  en gr/s et la puissance effective est  $P_e$  en KW, l'estimation de  $b_e$  est en g/KWh. Pour le moteur diesel  $b_e$  est compris entre 190 et 230 g/KWh.

### III.3.1.7 Rendement effectif ( $\eta_e$ )

Le rendement global est une autre expression pour le rendement effectif. Il est principalement utilisé pour comparer les différents moteurs. On peut calculer le rendement effectif en utilisant la relation, en se basant sur le rendement indiqué :

$$\eta_e = \frac{W_e}{PCI \cdot m_f}$$

La quantité de carburant en kg est  $m_f$ , le travail effectif en KJ est  $W_e$  et le pouvoir calorifique du carburant est PCI. Mais d'une manière plus pratique, calculer le rendement effectif à partir du débit de carburant et de la puissance indiquée à partir de la relation est plus simple :

$$\eta_e = \frac{P_e}{PCI \cdot B} 3600 = \frac{\eta_{th} P_i}{PCI \cdot B} 3600 = \eta_{th} \eta_i$$

Le pouvoir calorifique du carburant (PCI) est exprimé en KJ/kg,  $B$  est le débit de carburant en kg/s et  $P_e$  est la puissance effective en KW. Le rendement du moteur diesel varie entre 37 et 47 %.

Compte tenu de la dernière expression, l'amélioration du rendement global du moteur implique l'amélioration du rendement thermique et du rendement indiqué. Cela réduit les frottements, les chocs et les vibrations et réduit le travail absorbé pour entraîner les organes annexes.

## Chapitre 4 : Dynamiques des moteurs alternatifs

### IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons mettre l'accent sur la dynamique du système bielle-manivelle et le système de distribution. A cet effet, une approche cinématique sera mise en évidence pour expliciter les positions des organes mobiles suivie d'une approche dynamique pour déterminer les vitesses et les accélérations de chaque système. Ce qui suit, est basé une vitesse de rotation du moteur constante.

### IV.2 Définition

La dynamique des moteurs alternatifs concerne l'étude du mouvement des pistons à l'intérieur des cylindres, ainsi que les forces, les vitesses et les accélérations associées dans les moteurs à combustion interne.

#### IV.2.1 Définition des repères

On considère le système piston-bielle-manivelle suivant ;

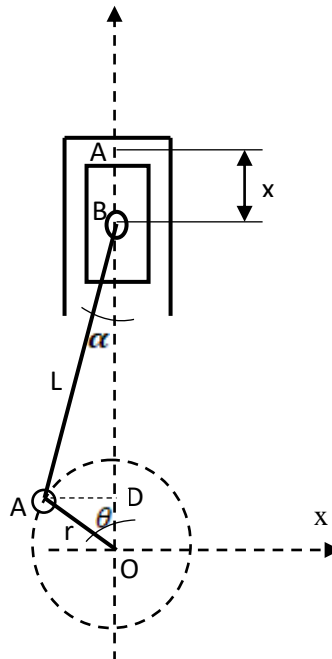


Figure IV-1 piston-bielle-

Les principaux aspects à considérer lors de cette étude sont ;

- Les angles de rotation de la manivelle et du vilebrequin pendant le cycle de fonctionnement du moteur. Ces angles déterminent la position angulaire de la bielle et du piston par rapport à la position de point mort haut (PMH) ou de point mort bas (PMB) du moteur.
- Les vitesses angulaires de la manivelle et de la bielle à différents points du cycle de fonctionnement. Ces vitesses peuvent être utilisées pour évaluer les performances du moteur et la dynamique du système.
- Les accélérations angulaires de la manivelle et de la bielle à différents points du cycle de fonctionnement. Ces accélérations sont importantes pour comprendre les forces en jeu et les charges sur les composants du système.

Le système nécessite la mise en place de trois repères, figure suivante,

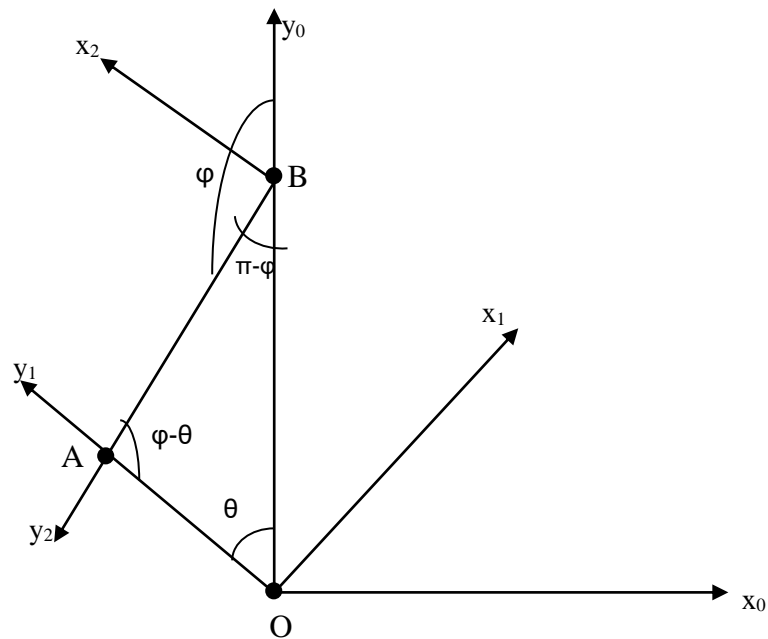


Figure IV-2 Repères, système piston bielle manivelle.

A savoir le repère fixe  $(O, \vec{i}_0, \vec{j}_0, \vec{k}_0)$ , définit par les repères suivants ;

O : caractérise le centre de vilebrequin.

$\vec{i}_0$  : L'axe perpendiculaire au piston.

$\vec{j}_0$  : Caractérise l'axe de la cylindrée.

$\vec{k}_0$  : Caractérise l'axe de vilebrequin. Le système tourne positivement selon  $\vec{k}_0$



Le repère mobile  $(O, \vec{i}_1, \vec{j}_1, \vec{k}_1)$ , lié au vilebrequin est défini comme suivant ;

$\vec{j}_1$  : porte la manivelle.

$\theta$  : Représente l'angle de rotation du vilebrequin  $\theta = (\vec{j}_0, \vec{j}_1)$

Comme le moteur tourne à une vitesse constante, avec A est le centre de la bielle et R le rayon de la manivelle, il en résulte alors ;

$$\vec{OA} = R \vec{j}_1 \quad (4.1)$$

Le repère mobile  $(B, \vec{i}_2, \vec{j}_2, \vec{k}_2)$ , lié à la bielle est défini comme suite ;

B : caractérise le centre de pied de bielle.

$\vec{j}_2$  : porte la bielle.

$\varphi$  : Représente l'angle de rotation de la bielle  $\theta = (\vec{j}_0, \vec{j}_2)$ .

L : représente l'entraxe de la bielle, on a donc  $\vec{BA} = L \vec{j}_2$

Si  $G_b$  est le centre de gravité de la bielle, alors ;

$$\vec{BG}_b = L_1 \vec{j}_2 \quad (4.2)$$

#### IV.2.2 Passage des repères et définition des paramètres

Le passage du repère  $(O, \vec{i}_0, \vec{j}_0, \vec{k}_0)$  au repère  $(O, \vec{i}_1, \vec{j}_1, \vec{k}_1)$ , est défini par ma matrice de passage suivante ;

$$\begin{pmatrix} \vec{i}_1 \\ \vec{j}_1 \\ \vec{k}_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i}_0 \\ \vec{j}_0 \\ \vec{k}_0 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

La vitesse de rotation est  $\vec{\Omega}(1/0) = \dot{\theta} \vec{k}_0$

Le passage du repère  $(O, \vec{i}_0, \vec{j}_0, \vec{k}_0)$  au repère  $(O, \vec{i}_2, \vec{j}_2, \vec{k}_2)$ , est défini par ma matrice de passage suivante ;

$$\begin{pmatrix} \vec{i}_2 \\ \vec{j}_2 \\ \vec{k}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \vec{i}_0 \\ \vec{j}_0 \\ \vec{k}_0 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

La vitesse de rotation est  $\overline{\Omega}(2/0) = \dot{\varphi} \overline{k_0}$

Le passage du repère  $(O, \overline{i_1}, \overline{j_1}, \overline{k_1})$  au repère  $(O, \overline{i_2}, \overline{j_2}, \overline{k_2})$ , est défini par la matrice de passage suivante ;

$$\begin{pmatrix} \overline{i_2} \\ \overline{j_2} \\ \overline{k_2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi - \theta) & \sin(\varphi - \theta) & 0 \\ -\sin(\varphi - \theta) & \cos(\varphi - \theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \overline{i_1} \\ \overline{j_1} \\ \overline{k_1} \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

La vitesse de rotation est  $\overline{\Omega}(2/1) = (\dot{\varphi} - \dot{\theta}) \overline{k_0}$

D'après la figure, la projection sur l'axe  $\overline{i_0}$ , le rayon de la manivelle est égale à l'entraxe de la bielle. Donc, nous pouvons tirer les relations suivantes ;

$$\overline{OA} = R \overline{j_1} = (-\sin \theta \overline{i_0} + \cos \theta \overline{j_0}) \quad (4.6)$$

$$\overline{BA} = L \overline{j_2} = (-\sin \varphi \overline{i_0} + \cos \varphi \overline{j_0}) \quad (4.7)$$

Avec la relation cinématique fondamentale suivante ;

$$R \sin \theta = L \sin \varphi ; \text{ Avec ; } \lambda = \frac{R}{L} \quad (4.8)$$

$$\text{Donc, } \sin \varphi = \lambda \sin \theta \quad (4.9)$$

Par ailleurs, on sait que ;

$$\cos^2 \varphi = 1 - \sin^2 \varphi = 1 - \lambda^2 \sin^2 \theta \quad (4.10)$$

L'angle  $\varphi$  est positif avec une variation légère et positive autour de son cosinus, ce qui donne finalement ;

$$\cos \varphi = -\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \theta} \quad (4.11)$$

Pour avoir la vitesse angulaire  $\dot{\varphi}$  de la bielle on applique la dérivée temporelle de la relation cinématique fondamentale suivante ;

$$\frac{d(R \sin \theta)}{dt} = \frac{d(L \sin \varphi)}{dt} \quad (4.12)$$

$$R \dot{\theta} \cos \theta = L \dot{\varphi} \cos \varphi \quad (4.13)$$

$$\text{Soit ; } \dot{\varphi} = \frac{R \dot{\theta} \cos \theta}{L \cos \varphi} = \frac{\lambda \dot{\theta} \cos \theta}{\cos \varphi} \quad (4.14)$$

L'accélération angulaire  $\ddot{\varphi}$  de la bielle est donnée par la formule suivante ;

$$\frac{d(R\dot{\theta} \cos \theta)}{dt} = \frac{d(L\dot{\varphi} \cos \varphi)}{dt}, \text{ avec } \dot{\theta} = \text{constante, donc } \ddot{\theta} = 0 \quad (4.15)$$

$$\text{Ce qui donne } \ddot{\varphi} = \frac{L\dot{\varphi}^2 \sin \varphi - L\dot{\theta}^2 \sin \varphi}{L \cos \varphi} \quad (4.16)$$

$$\text{Finalement ; } \ddot{\varphi} = (\dot{\varphi}^2 - \dot{\theta}^2) \tan \varphi \quad (4.17)$$

### IV.3 Cinématique du système bielle manivelle

L'étude de la cinématique du système bielle-manivelle d'un moteur à combustion interne implique l'analyse des mouvements relatifs entre le piston, la bielle et la manivelle lors du cycle de fonctionnement du moteur.

#### IV.3.1 Cinématique du point A

Le point A se déplace sur un cercle de rayon R autour du centre O par la formule qu'on a déjà calculé

$$\vec{OA} = R \vec{j}_1 = (-\sin \theta \vec{i}_0 + \cos \theta \vec{j}_0) \quad (4.18)$$

Donc la vitesse du point est ;

$$\vec{V}(A)_{1/0} = \frac{d\vec{OA}}{dt} = \frac{d(R, \vec{j}_1)}{dt} = -R \dot{\theta} \vec{i}_1$$

Pour avoir ainsi l'accélération au point A, nous utilisons la formulation suivante ;

$$\vec{\gamma}(A)_{1/0} = \frac{d\vec{V}(A)_{1/0}}{dt} = -R \dot{\theta}^2 \vec{j}_1 \quad (4.19)$$

Indiquant que la vitesse et l'accélération au point A sont tangentes au cercle de rayon R avec des modules qui sont constants.

#### IV.3.2 Cinématique du point B

La position du point B par rapport au centre O, est donné par la formule suivante ;

$$\vec{OB} = \vec{OA} + \vec{AB} = R \vec{j}_1 - L \vec{j}_2 = (-R \sin \theta \vec{i}_0 + R \cos \theta \vec{j}_0) + (L \sin \varphi \vec{i}_0 - L \cos \varphi \vec{j}_0) \quad (4.20)$$

$$\text{On a ; } R \sin \theta = L \sin \varphi \quad (4.21)$$

$$\text{Donc ; } \vec{OB} = (R \cos \theta - L \cos \varphi) \vec{j}_0 \quad (4.22)$$

On note d l'ordonnée instantanée du point B, à savoir ;

$$d = (R \cos \theta - L \cos \varphi) \quad (4.23)$$

- Si  $\theta=0$ , le point B est au PMH et  $d = d_{max}$ , avec  $d_{max} = R + L$
- Si  $\theta = \pi$ , le point B est au PMB et  $d = d_{min}$ , avec  $d_{min} = -R + L$

Le point B se déplace entre  $d_{max}$  et  $d_{min}$  avec une course qui est donnée par la formule suivante ;

$$C_p = d_{max} - d_{min} = 2R \quad (4.24)$$

La vitesse au point B par rapport au centre O, est donné par la formule suivante ;

$$\vec{V}(B)_{2/0} = \frac{d(\vec{OB})}{dt} = (R\dot{j}_1 - L\dot{j}_2) = -R\dot{\theta}\vec{i}_1 - L\dot{\varphi}\vec{i}_2 \quad (4.25)$$

$$\vec{V}(B)_{2/0} = -R\dot{\theta}(\cos\theta\vec{i}_0 + \sin\theta\vec{j}_0) - L\dot{\varphi}(\cos\varphi\vec{i}_0 + \sin\varphi\vec{j}_0) \quad (4.26)$$

Finalement ;

$$\vec{V}(B)_{2/0} = R(\dot{\theta} - \dot{\varphi})\sin\theta\vec{j}_0 \quad (4.27)$$

- Si  $\theta=0$ , le piston est au PMH avec une vitesse qui est nulle.
- Si  $\theta = \pi$  le piston est au PMB avec une vitesse qui est nulle.
- Si  $\theta = \frac{(2k+1)}{2}\pi$ , la vitesse du piston est  $\vec{V}(B)_{2/0} = -(-1)^k R\dot{\theta}\vec{j}_0$

La vitesse moyenne du piston peut être calculée par la formule suivante ;

$$V_{moyenne} = \frac{C_p N}{30} \quad (4.28)$$

N est le nombre de tours par minutes du vilebrequin

L'accélération au point B par rapport au centre O, est donné par la formule suivante ;

$$\vec{\gamma}(B)_{2/0} = \frac{d\vec{V}(B)_{2/0}}{dt} = (R\ddot{\varphi}\sin\theta + R\dot{\varphi}\dot{\theta}\cos\theta - R\ddot{\theta}\sin\theta - R\dot{\theta}^2\cos\theta)\vec{j}_0 \quad (4.29)$$

$$\vec{\gamma}(B)_{2/0} = \frac{d\vec{V}(B)_{2/0}}{dt} = \left( R\dot{\theta}(\dot{\varphi} - \dot{\theta})\cos\theta + R\ddot{\varphi}\sin\theta \right)\vec{j}_0 \quad (4.30)$$

- Si  $\theta=0$ , le piston est au PMH  $\cos\varphi = -1$ ,  $\dot{\varphi} = -\dot{\theta}$  et  $\cos\theta = -1$ .

Ainsi l'accélération maximale est ;

$$\vec{\gamma}(B)_{2/0} = \left( -R\dot{\theta}^2(\lambda+1) \right) \vec{j}_0 \quad (4.31)$$

- Si  $\theta = \pi$ , le piston est au PMB  $\cos \varphi = -1$ ,  $\dot{\varphi} = \lambda \dot{\theta}$  et  $\cos \theta = -1$ .

Ainsi l'accélération maximale est ;

$$\vec{\gamma}(B)_{2/0} = \left( -R\dot{\theta}^2(\lambda-1) \right) \vec{j}_0 \quad (4.32)$$

#### IV.4 La dynamique du système bielle-manivelle

L'étude dynamique d'un système bielle-manivelle dans un moteur à combustion interne implique l'analyse des forces, des vitesses et des accélérations associées au mouvement alternatif du piston et à la rotation de la manivelle.

Le motoriste utilise le terme de « couple » définir le moment d'une force par rapport à un axe de rotation. A tout moment, la valeur du couple s'appliquant au vilebrequin est ;

$$C(N.m) = r(m)F_T(N) \quad (4.33)$$

$F_T$  ; est la décomposition de l'action du piston sur la bielle comme indiqué sur la figure ci-dessous

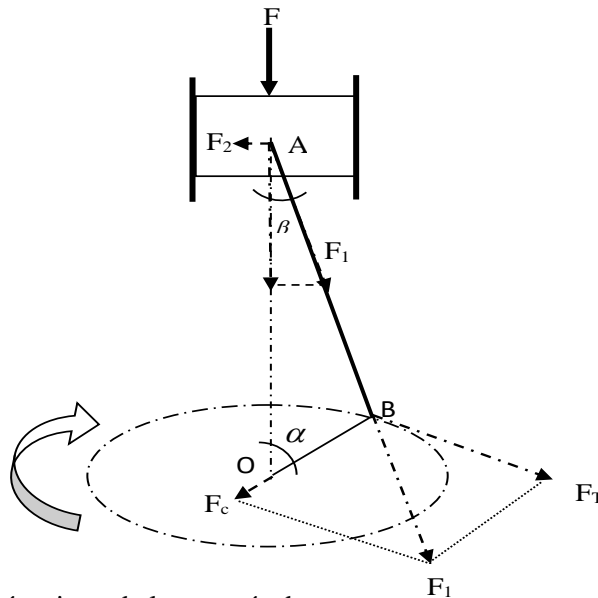


Figure IV-3 Transformation mécanique de la poussée des gaz en couple moteur par le système bielle manivelle

Le travail généré par un couple est ;

$$W(\text{Joule}) = C(N.m).\alpha(\text{radian}) \quad (4.34)$$

Le travail accompli par le couple est la force  $F_1$ . Cette force dépend de la force de pression exercée sur le piston et de l'angle de  $\alpha$  et elle est donnée par la formule suivante ;

$$F(\alpha) = (P(\alpha) - P_{carter}) \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.35)$$

Aussi la force  $F_1$  peut être calculée par la formule suivante ;

$$F_1 = \frac{F}{\cos \beta} \quad (4.36)$$

Le couple moteur est produit à partir de force  $F_T$  qui est donnée par la formule suivante ;

$$F_T = F(\alpha) \frac{\cos(\frac{\pi}{2} - (\alpha + \beta))}{\cos \beta} = F(\alpha) \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} \quad (4.37)$$

Avec

$$\cos \beta = \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha} \quad (4.38)$$

Nous ainsi calculer le couple moteur par la formule suivante ;

$$C(\alpha) = R.F_T = R.F(\alpha) \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\cos \beta} = R.F(\alpha) \frac{\sin(\alpha + \arccos(\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}))}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} \quad (4.39)$$

### Phase admission

Le couple nécessaire pour effectuer la descente est résistant car la force de pression résultante est opposée au mouvement du piston (Pression du carter et supérieure à la pression du cylindre). Ainsi, le couple résistant est important si et seulement si la pression d'admission est plus faible.

### Phase compression

Dans ce cas le piston remonte est donc la force due à la pression va changer de sens. Le couple résultant est toujours résistant et sa valeur instantanée dépend de la position de la bielle à l'instant  $t$  et de la valeur de la pression instantanée dans le cylindre. Le couple résistant devient faible si la masse de gaz admise pendant l'admission est faible.

### Phase détente

Dans ce cas, nous avons une génération d'un couple moteur car la force et le déplacement sont dans même sens. Si par hasard, un dysfonctionnement se produit lors de la combustion (coupure d'injection par exemple) le couple moteur sera le symétrique du couple engendré par la phase de la compression (aux pertes calorifiques et aux frottements près).

### Phase échappement

Dans ce cas le sens de déplacement du piston est opposé à la force engendrée par la pression des gaz brûlés, ainsi le couple résistant se développe dans ce cas. Dans le cas où la pression extérieure du moteur est plus importante, l'énergie résistante de l'échappement sera aussi plus conséquente.

Le travail fourni aux phases d'admission et d'échappement est appelé « travail de pompage ».

## IV.5 Système de distribution

Le processus d'ouverture et de fermeture des conduites d'admission et d'échappement est appelé distribution. Ce processus est assuré par un ensemble d'organes moteur qui effectuent leurs commandes. Elle se compose de pignon d'arbre à cames, entraîné par le pignon de vilebrequin figure IV.5.

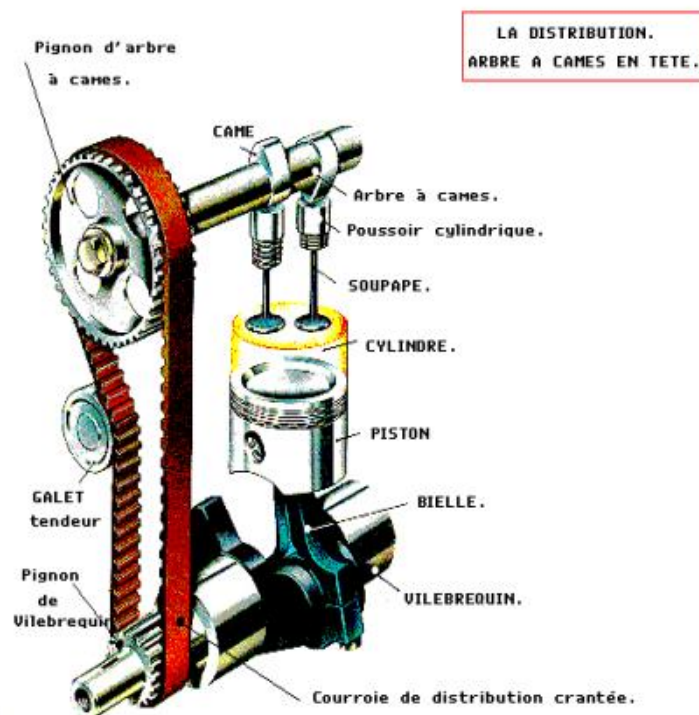


Figure IV-4 chaîne de distribution d'un moteur à combustion interne [3]

### IV.5.1 Le principe de fonctionnement

Les soupapes sont chargées d'ouvrir et de fermer les cylindres. Chaque soupape ne doit s'ouvrir qu'une fois pendant ce cycle. Des cames permettent l'ouverture, tandis que des ressorts garantissent la fermeture. Des poussoirs assurent la transmission du mouvement de l'arbre à cames aux soupapes. Il peut également inclure des culbuteurs et des tiges de culbuteurs. Les pignons sont reliés entre eux par un système indéréglable (pignon, chaîne, courroie) pour synchroniser avec le vilebrequin.

### IV.5.2 Le rôle de la distribution

Le système de distribution dans un moteur à combustion interne joue un rôle crucial dans la synchronisation des mouvements des composants internes du moteur, notamment les soupapes et le vilebrequin, ses principaux rôles sont ;

**Commandes des soupapes :** Le système de distribution contrôle l'ouverture et la fermeture des soupapes d'admission et d'échappement au bon moment pendant le cycle de combustion. Cela garantit l'entrée d'un mélange air-carburant frais dans les cylindres et permet l'évacuation efficace des gaz brûlés.

**Synchronisation avec le vilebrequin :** Le système de distribution synchronise les mouvements des soupapes avec la rotation du vilebrequin. Cette synchronisation précise est essentielle pour maximiser l'efficacité et la puissance du moteur.

**Régulation du timing des soupapes :** En ajustant le moment précis où les soupapes s'ouvrent et se ferment, le système de distribution peut influencer le temps d'admission et d'échappement, ce qui peut avoir un impact sur les performances, la consommation de carburant et les émissions.

**Contrôle de la distribution variable :** Certains moteurs modernes sont équipés d'un système de distribution variable qui permet de modifier le timing des soupapes en fonction des conditions de conduite. Cela peut améliorer à la fois les performances et l'efficacité énergétique du moteur.



### IV.5.3 Les principaux organes de la distribution

**Les soupapes :** Il s'agit d'organes qui contrôlent l'entrée et la sortie des gaz de la chambre de combustion. Les cames à l'ouverture les commandent et les ressorts à la fermeture les rappellent.

**Culbuteur :** Il s'agit d'un levier basculant qui reçoit la poussée de la came, soit directement, soit par l'intermédiaire d'une tige, puis pousse la soupape en ouverture à un moment donné. Le principal inconvénient de ce montage est l'inertie et le nombre de pièces en mouvement.

**Arbre à came :** Le vilebrequin l'entraîne pour effectuer un tour pour deux tours.

**Poussoir :** Afin d'améliorer le contact entre la queue de soupape et la came, il est nécessaire d'installer un poussoir.

**Les cames :** Les parties de l'arbre sont arrivées pour demander l'ouverture des soupapes. Leurs formes ont un impact significatif sur le rendement du moteur.

La Figure IV-5 montre comment lever un poussoir ou un culbuteur grâce à la came qui est représentée à gauche en fonction de la position angulaire du vilebrequin. Il y a une hauteur de levée de 7 mm et un jeu de soupapes de 0.30 mm sur le graphique. Il en est de même pour l'angle d'ouverture du vilebrequin qui est de  $230^\circ$ , soit deux fois l'angle de la came.

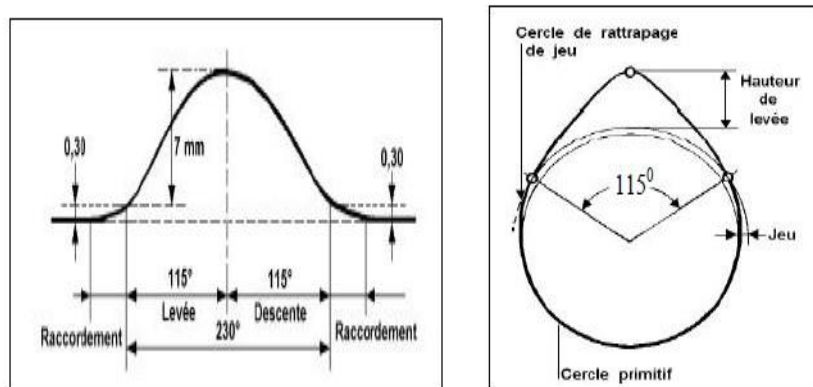


Figure IV-5 Les caractéristiques d'une came

## IV.6 Équilibrage

Si un solide (S) tourne autour de son axe Z0, soit P chaque point du solide ayant des coordonnées (x, y, z) et dmP la masse qui y est ponctuellement concentrée. Si les deux conditions suivantes sont satisfaites, l'axe Z0 est l'axe central d'inertie du solide :

➤ **Condition 1 :** Le centre de gravité du solide doit être situé sur l'axe Z0 ; pour y parvenir, il faut

$$\sum X dm_p = 0 \quad (4.40)$$

$$\sum Y dm_p = 0 \quad (4.41)$$

➤ **Condition 2 :** Pour que le solide soit un axe principal d'inertie, il faut :

$$\sum X.Z.dm_p = 0 \quad (4.42)$$

$$\sum Y.Z.dm_p = 0 \quad (4.43)$$

### IV.6.1 Équilibrage théorique

En plaçant des masses dans des plans normaux à l'axe de rotation, de part et d'autre du plan contenant la masse à équilibrer, on peut toujours équilibrer parfaitement les inerties rotatives. La démonstration qui suit est valide quel que soit le nombre de masses rotatives à équilibrer, mais nous la ferons pour une seule masse pour simplifier les calculs.

Si M est un point du plan de masse rotatif du  $m_{rot}$  à équilibrer, Deux plans placés de part et d'autre du plan sont perpendiculaires à l'axe de rotation.

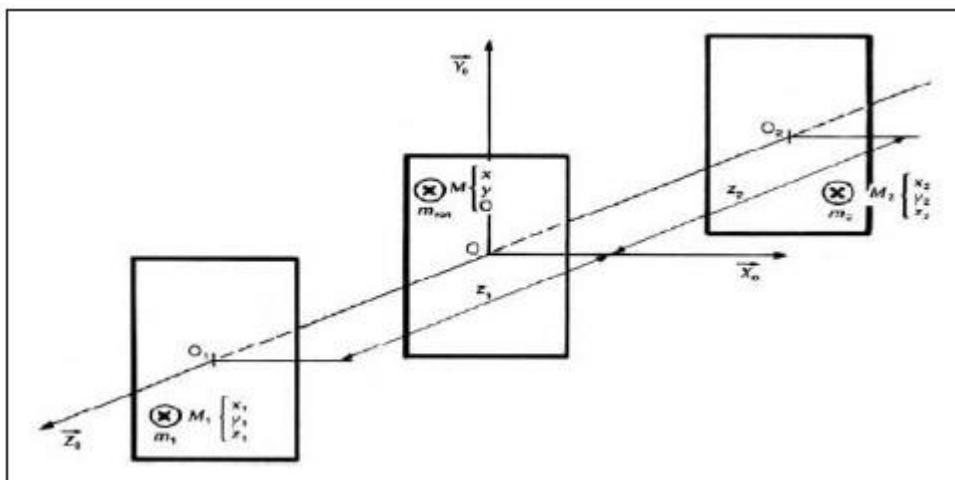


Figure IV-6 Équilibrage théorique

Chaque plan est positionné par ;

$$\overrightarrow{OO_1} = z_1 \vec{Z}_0, \text{ et } \overrightarrow{OO_2} = z_2 \vec{Z}_0 \quad (4.44)$$

La masse  $m_1$  et  $m_2$  de chaque plan est concentrée aux points M1 et M2. Il est nécessaire que les quatre sommes fondamentales soient nulles afin que le solide formé par les trois masses en rotation soit en parfait équilibre.

$$x_1 m_1 + x_2 m_2 + x m_{rot} = 0 \quad (4.45)$$

$$y_1 m_1 + y_2 m_2 + x m_{rot} = 0 \quad (4.46)$$

$$x_1 z_1 m_1 + x_2 z_2 m_2 = 0 \quad (4.47)$$

$$y_1 z_1 m_1 + y_2 z_2 m_2 = 0 \quad (4.48)$$

Après résolution, c'est un système de quatre équations avec quatre inconnues :

$$x_1 m_1 = \frac{x z_2}{z_1 - z_2} m_{rot} \quad (4.49)$$

$$y_1 m_1 = \frac{x z_2}{z_1 - z_2} m_{rot} \quad (4.50)$$

$$x_2 m_2 = \frac{x z_1}{z_2 - z_1} m_{rot} \quad (4.51)$$

$$y_2 m_2 = \frac{x z_1}{z_2 - z_1} m_{rot} \quad (4.52)$$

$x$ ,  $y$  et  $m_{rot}$  sont connus. A priori, la position des deux plans est choisie, ce qui signifie que  $z_1$  et  $z_2$  sont connus. Les quatre équations donnent les distances  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $y_1$  et  $y_2$  si les masses  $m_1$  et  $m_2$  sont fixées. Les masses  $m_1$  et  $m_2$  et leurs ordonnées  $y_1$  et  $y_2$  sont fournies par les quatre équations si les abscisses  $x_1$  et  $x_2$  sont fixées.

#### IV.5.1. Équilibrage théorique d'une masse rotative

On suppose que la masse rotative attachée au maneton est concentrée au point A de coordonnées  $\overrightarrow{OA} = R \vec{Y}_0$

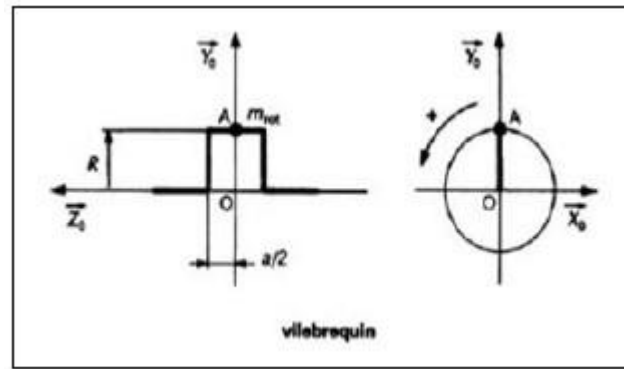


Figure IV-7 Equilibrage d'une masse.

Dans ce cas on a :

$$\sum ym = Rm_{rot} \neq 0 \quad (4.53)$$

Les masses  $m_1$  et  $m_2$  sont concentrées aux points  $M_1$  et  $M_2$  à une distance  $y_1$  et  $y_2$  de l'axe de rotation pour équilibrer la masse rotative, Figure IV-8:

$$\overline{OM}_1 = Y_1 \overline{Y}_0 + \frac{\alpha}{2} \overline{Z}_0 \quad (4.54)$$

$$\overline{OM}_2 = Y_2 \overline{Y}_0 - \frac{\alpha}{2} \overline{Z}_0 \quad (4.55)$$

Les quatre sommes fondamentales doivent être nulles :

$$\sum ym = y_1 m_1 + y_2 m_2 + y m_{rot} = 0 \quad (4.56)$$

$$\sum yzm = y_1 \frac{\alpha}{2} m_1 - y_2 \frac{\alpha}{2} m_2 = 0 \quad (4.57)$$

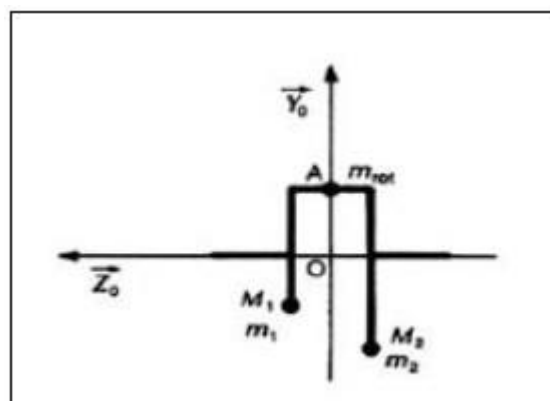


Figure IV-8 Equilibrage de deux masses

#### IV.6.2 Cas de deux cylindres moteur en ligne

On suppose que la masse rotative attachée à chaque maneton est concentrée aux points de coordonnées A1 et A2, Figure IV-9 :

$$\vec{OA}_1 = R\vec{Y}_0 + \alpha\vec{Z}_0 \tag{4.58}$$

$$\vec{OA}_2 = R\vec{Y}_0 - \alpha\vec{Z}_0 \tag{4.59}$$

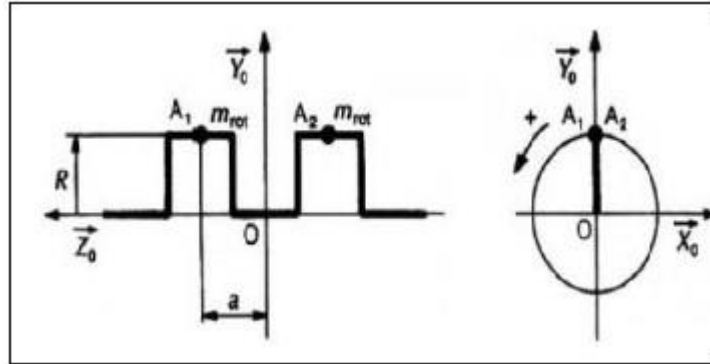


Figure IV-9 Deux cylindres en ligne monté sur un vilebrequin.

En raison du plan de symétrie du plan médian, le moteur n'est pas soumis à aucun couple. En ce cas, nous avons :

$$\sum ym = 2Rm_{rot} \neq 0 \tag{4.60}$$

Il existe une multitude de solutions possibles pour équilibrer les masses rotatives.

#### IV.6.2.1 Équilibrage par deux masses

Il est possible de placer ces deux masses dans des plans symétriques par rapport au plan x0 y0 ou dans des plans non symétriques, Figure IV-10.

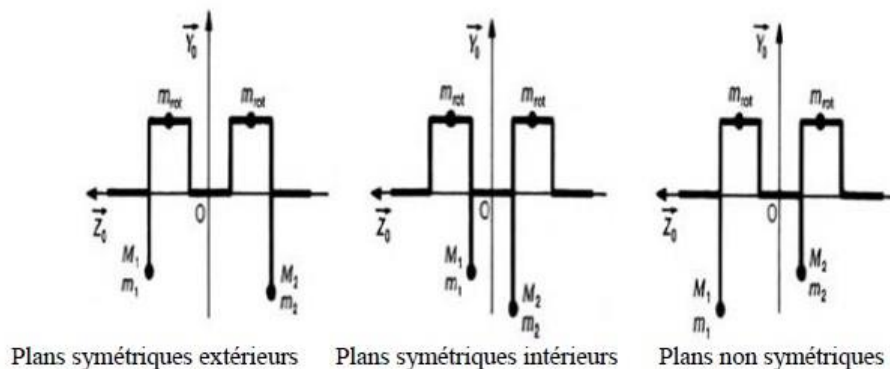


Figure IV-10 Equilibrage par deux masses.

$$\vec{OM}_1 = Y_1\vec{Y}_0 + \frac{3\alpha}{2}\vec{Z}_0 \tag{4.61}$$

$$\vec{OM}_2 = Y_1\vec{Y}_0 - \frac{3\alpha}{2}\vec{Z}_0 \tag{4.62}$$

Les quatre sommes fondamentales doivent être nulles :

$$\sum ym = y_1 m_1 + y_2 m_2 + 2Rm_{rot} = 0 \quad (4.63)$$

$$\sum yzm = y_1 \frac{3\alpha}{2} m_1 - y_2 \frac{3\alpha}{2} m_2 = 0 \quad (4.64)$$

**Listes des Références**

- [1] Mohamed BENCHERIF, *Moteurs à Combustion Interne, Combustion et Eléments de Carburant*: Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohammed Boudiaf, 2018.
- [2] J. B. Heywood, *Internal Combustion Fundamentals*,: McGraw Hill Higher Education, 1989.
- [3] MOULGADA Abdelmadjid, *Polycopié Moteur à combustion interne*: UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN TIARET, 2022.
- [4] J-C. Guibet, *Carburants et moteurs*, 1997.
- [5] B. A., *Les moteurs à combustion interne, Introduction à la théorie*,: Alger, OPU, 2002.
- [6] T. OUKSEL, *Cours Moteurs à Combustion Interne*: Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, 2021.
- [7] P. Arquès, *Conception et construction des moteurs alternatifs*,: Ellipse, 2000.