

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Université Larbi Tébessi - Tébessa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie mécanique



Thème

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de **Master L.M.D**
Option : Construction Mécanique

Présentée par :
BENKHEDIR Randa

Étude et conception d'un moteur à combustion interne à quatre temps

Devant le jury composé de :

LAOUER Radouane	M.C.A Université Larbi Tébessi - Tébessa	Président
HADJEB Abdelhakim	M.A.A Université Larbi Tébessi - Tébessa	Examineur
MALIM Madani	M.A.A Université Larbi Tébessi - Tébessa	Encadreur

Année universitaire: 2020/2021



Remerciement

EN TOUT PREMIER LIEU, JE REMERCIE LE BON DIEU, TOUT PUISSANT, DE M'AVOIR DONNÉ LA FORCE POUR SURVIVRE, AINSI QUE L'AUDACE POUR DÉPASSER TOUTES LES DIFFICULTÉS.

JE PROFITE PAR LE BIAIS DE CE MÉMOIRE, POUR EXPRIMER MES VIFS REMERCIEMENTS À TOUTE PERSONNE CONTRIBUANT DE PRÈS OU DE LOI À L'ÉLABORATION DE CE MODESTE TRAVAIL.

JE TIENS À REMERCIER VIVEMENT TOUS MES PROFESSEURS, EN PARTICULIER MON ENCADREUR *MAALIM MADANI*, QUI A CONTRIBUÉ À LA RÉALISATION DE CE MODESTE PROJET, AINSI QUE « DR. HADJEB .A », « DR. LAOUER .R » DE M'AVOIR FAIT L'HONNEUR ET D'AVOIR ACCEPTÉ DE PARTICIPER EN TANT QUE MEMBRES DU JURÝ POUR DISCUTER MON MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES. JE TIENS À LES EXPRIMER MES SINCÈRES REMERCIEMENTS POUR SON SUIVI ET SES ORIENTATIONS.

AUSSI, JE PRÉSENTE MA RECONNAISSANCE À TOUTE PERSONNE QUI M'ACCUEILLIT, CONSEILLÉ ET SOUTENU LE LONG DE CE TRAVAIL.

QUE TOUS CEUX QUI ONT CONTRIBUÉ À MENER À BIEN CE MÉMOIRE TROUVENT ICI L'EXPRESSION DE MA PARFAITE CONSIDÉRATION.

BENKHEDIR RANDA

DÉDICACE

Avec beaucoup de bonheur et d'amour je dédie ce modeste travail, fruits de mes longues années d'études:

✓ A la plus chère au monde :

Ma mère ; celle qui est la plus chère au monde, la joie de ma vie, qui a été toujours là pour moi, qui donne un sens à mon existence, à la lumière de mes yeux en témoignage de son affectation et son soutien. Je prie Dieu de vous guérir et de te donner la santé et le bien-être et de faire de toi une couronne pour moi.

✓ A mon cher père :

Pour tous leur sacrifice, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leur prière tout au long de mes études.

✓ A mon deuxième papa Attia Hatem.

✓ A ma chère sœur pour leur encouragement permanent, et leur soutien morale.

✓ A mon cher frère Bachir pour leur appui et leur encouragement.

✓ A mes enseignants BERIANI Samir, DHAOUËDI Seddik, ma chère amie CHENATLIA Habiba pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infailible.

BENKHEDIR Randa

Liste des figures

CHAPITRE 01 GENERALITES SUR LES MOTEURS A COMBUSTION

Figure 1.1 Moteur à quatre temps	12
Figure 1.2 Bloc moteur à 4 cylindres en ligne	11
Figure 1.3 La chemise	10
Figure 1.4 La culasse	10
Figure 1.5 Joint de culasse	09
Figure 1.6 Carter	08
Figure 1.7 Cache culbuteur	07
Figure 1.8 Culbuteur	06
Figure 1.9 Les soupapes	06
Figure 1.10 Les pistons	05
Figure 1.11 Les segments	05
Figure 1.12 La bielle	04
Figure 1.13 Le vilebrequin	03
Figure 1.14 Le volant moteur	02
Figure 1.15 L'arbre à cames	12
Figure 1.16 Courroie de distribution	13
Figure 1.17 injecteur	14
Figure 1.18 présentation des quatre temps d'un moteur à combustion interne	15
Figure 1.19 Position de l'injecteur dans un moteur à injection directe	16
Figure 1.20 Position de l'injecteur dans un moteur à injection indirecte	17
Figure 1.21 Le moteur thermique	18
Figure 1.22 Le turbocompresseur dans les moteurs suralimenté	20
Figure 1.23 Principe de fonctionnement de turbocompresseur	21
Figure 1.24 Différence entre moteur thermique et moteur suralimenté	22
Figure 1.25 Circuit de lubrification d'un turbo	23

CHAPITRE 02 ETUDE ENERGETIQUE

Figure 2.1 Cycle théorique d'Otto (Beau de Rochas)	26
Figure 2.2 Cycle théorique Diesel	26
Figure 2.3 Cycle théorique de Saba thé	28
Figure 2.4 Cycle réel d'un moteur à essence	30
Figure 2.5 Croisement des soupapes	31
Figure 2.6 Cycle réel Diesel	32
Figure 2.7 Croisement des soupapes pendant un cycle	33
Figure 2.8 Moteur Caterpillar à étudier	39

CHAPITRE 03 ETUDE CINEMATIQUE ET DYNAMIQUE (ETUDE D'UN SYSTEME BIELLE-MANIVELLE)

Figure 3.1 : Système bielle-manivelle	44
Figure 3.2 La projection des vitesses (A et B) sur AB	46
Figure 3.3 Vitesse du point B ; $r=38\text{mm}$	48
Figure 3.4 Accélération du point B ; $r= 38\text{mm}$	48
Figure 3.5 Vitesse du piston ; $r=38\text{mm}$	49
Figure 3. 6 Accélération du piston ; $r=38\text{mm}$	49
Figure 3.7 L'ensemble bielle piston	51
Figure 3.8 Equilibre du piston	54
Figure 3.9 Equilibre de la bielle	54
Figure 3.10 Equilibre de vilebrequin	55
Figure 3.11 Système bielle-manivelle fictive	56
Figure 3.12 Bielle réelle et fictive	57
Figure 3.13 Vilebrequin fictif	58
Figure 3.14 Les forces exercés sur la bielle	60
Figure 3.15 Forces et réaction de la bielle	61
Figure 3.17 Une coupe $0 < x < L$	62
Figure 3.18 Coupe AA de la bielle	63
Figure 3.19 Flexion de la bielle	64
Figure 3.20 Les forces exercées sur la bielle	64
Figure 3.21 Simulation SOLIDWORKS	65

CHAPITRE 04 CONCEPTION D'UN MOTEUR A QUATRE TEMPS

Figure 4.1 présentation 3D d'une bielle	72
Figure 4.2 Présentation 3D d'un piston	73
Figure 4.3 présentation en 3D d'un axe piston	74
Figure 4.4 présentation 3D d'un vilebrequin	74
Figure 4.5 Assemblage d'un moteur à 4 temps	76
Figure 4.6 Mis en plan d'un moteur quatre temps	78

Sommaire

INTRODUCTION

CHAPITRE 01 GENERALITES SUR LES MOTEURS A COMBUSTION

1. Historique	01
2. Définition d'un moteur à combustion interne	01
2.1 Structure du moteur	03
2.1.1 Organes fixes	03
2.1.1.1 Bloc moteur	03
2.1.1.2 Chemise de cylindre	04
2.1.1.3 Culasse	04
2.1.1.4 Joints de culasse	05
2.1.1.5 Carter	06
2.1.1.6 Cache culbuteur	06
2.1.2 Organes mobiles	07
2.1.2.1 Culbuteur	07
2.1.2.2 Soupapes	07
2.1.2.3 Piston	08
2.1.2.4 Bielle	10
2.1.2.5 Vilebrequin	11
2.1.2.6 Volant moteur	11
2.1.2.7 Arbre à cames	12
2.1.2.8 : Courroie de distribution	13
2.2 Principe de fonctionnement du moteur à quatre temps	14
2.3. Les différents types des moteurs	16
2.3.1 Selon le type d'injection	16
2.3.1.1 Injection directe	16
2.3.1.2 Injection indirecte	17
2.3.2 Selon le type d'alimentation	17
2.3.2.1 Moteur atmosphérique	18
a. Définition	18
b- Analyse du moteur atmosphérique	18
c- Avantages du moteur atmosphérique	18
d- Inconvénients du moteur atmosphérique	19
2.3.2.2 Moteur suralimenté par turbo	19
a- Fonctionnement du turbocompresseur	20
b- Objectif du turbo	21

CHAPITRE 02 : ETUDE ENERGETIQUE

2.1 Les cycles de combustion	24
------------------------------	----

2.1.1 Définition	24
2.1.2 Les cycles théoriques	25
2.1.2.1 Cycle de Beau de Rochas	25
2.1.2.2 Cycle Diesel	26
2.1.2.3 Cycle de Saba thé	27
2.1.3 Cycles réels	29
2.1.3.1 Moteur à essence	29
2.1.3.2 Moteur Diesel	31
2.2 Le rendement	34
2.2.1 Rendement théorique	34
2.2.1.1 Rendement théorique du cycle d’Otto	34
2.2.1.2 Rendement théorique de cycle Diesel	35
2.2.2 Rendement réel	37
2.2.2.1 Rendement mécanique	37
2.2.2.2 Rendement indiqué	37
2.2.2.3 Rendement effectif	38
Calcul thermodynamique	39

CHAPITRE 03 ETUDE CINEMATIQUE ET DYNAMIQUE (ETUDE D’UN SYSTEME BIELLE MANIVELLE)

3.1 Introduction	43
3.2 Définition d’un système bielle-manivelle	43
3.2.1 Déplacement du piston	44
3.2.2 Vitesse du piston	44
3.2.3 Le vilebrequin	45
3.2.3 Détermination graphique des vitesses et accélérations du système bielle-manivelle	46
3.3 Introduction	50
3.4 Equilibrage du moteur	50
3.4.1 Equilibrage des pistons et des bielles	51
3.4.2 Equilibrage du vilebrequin	52
3-5- Système bielle manivelle soumis aux forces de pression	53
3-5-1- Equilibre du piston isolé	53
3-5-2- Equilibre de la bielle	54
3-5-3- Equilibre du vilebrequin	55
3-6- Système bielle-manivelle et mouvement	55
3-6-1-a- Bielle réelle et fictive	56
3-6-1-b- Vilebrequin fictif	57
a- Force agissant sur le piston	59
b- Force exercée sur la bielle	60

CHAPITRE 04 : CONCEPTION D'UN MOTEUR A QUATRE TEMPS

4.1 Historique	67
4.2 Définition de la conception	67
4.3 Le programme SOLIDWORKS	70
4.3.1 Historique	70
4.3.2 Fonctionnement	70
4.3.3 Les pièces	70
4.3.3.1 La représentation 3D d'un système bielle-manivelle	72
a- La bielle	72
b- Le piston	73
c-Vilebrequin	74
d-Axe piston	74
4.3.4 Les assemblages	75
4.3.5 Les mise en plan	76
4.3.5.1 La mis en plan d'un moteur à 4 temps	77

CONCLUSION

Résumé

Avec l'augmentation des vitesses de rotation des moteurs à combustion interne nous avons une augmentation des pressions des gaz et des forces d'inertie qui sont appliquées sur le piston du moteur qui se traduisent eux-mêmes par un accroissement des forces et des moments qui agissent sur le système bielle-manivelle, et par conséquent sur le vilebrequin du moteur. Le vilebrequin étant soumis à des sollicitations périodiques, nous avons l'apparition de vibrations.

Dans ce projet, nous étudions le moteur sous plusieurs aspects : énergétique, cinématique et dynamique, et cela nous permet de calculer les puissances et les rendements du moteur, et nous calculons également les forces agissant sur le système bielle-manivelle pour assurer son équilibrage.

Dans la dernière partie de notre étude nous utilisons le logiciel SOLIDWORKS pour la conception.

Mots clés : moteur à combustion interne, système bielle-manivelle, études énergétique, cinématique et dynamique, rendement de moteur, logiciel SOLIDWORKS.

ملخص

مع رفع السرعات الدّوّارة في المحرّكات ذات الاحتراق الدّاخلّي يوجد رفع ضغط الغازات و قوى العطالة المؤثرة على المكبس و النّبي تتّرجم برفع القوى و الاستطاعة المؤثرة على آليّة ذراع مرفق ثمّ على العمود المرفقي. هذا الأخير يتأثر بالقوى المتغيّرة و هذا ما يظهر الاهتزازات.

في هذا المشروعة سوف نقوم بدراسة المحرّك من عدّة نواحي: طاقيًا، حركيًا و ديناميكيًا. و هذا ما يسمح لنا بحساب قوّة و مردود المحرّك و كذلك دراسة و حساب القوى المؤثرة على نظام مرفق عمود من أجل ضمان توازنه.

الكلمات المفتاحيّة: المحرّكات ذات الاحتراق الدّاخلّي، آليّة ذراع- مرفق، دراسة طاقيّة، حركيّة و ديناميكيّة، مردود المحرّك، برنامج التّصميم SOLIDWORKS.

Abstract

The increasing of the internal combustion engine rotating speed's, we notice the increasing of pressure gas and inertia efforts, those efforts are applied on the engine piston, which permit the increasing of the moment's load. They are also, loading on the rod-crankshaft system and the crankshaft.

In this project, we study the engine on several aspects : energy, kinematics and dynamics ; and this allows us to calculate the powers and efficiency of the engine, and we also calculate the force acting on the connecting rod-crank system to ensure its balance.

In the last part of our study we use the SOLIDWORKS software for the disgn.

Key words : internal combustion engine, the rod-crankshaft system, energy, kinematics and dynamics study, efficiency of the engine, SOLIDWORKS softeware.

Introduction générale

Introduction générale

L'évolution du moteur à combustion interne a été tellement importante ces dernières années, les constructeurs essaient de donner au moteur un régime maximal, qui se traduit par une augmentation de la pression moyenne effective. L'augmentation de cette pression se traduit par une augmentation des forces et moments qui agissent sur les différentes parties du moteur et plus spécialement sur le système bielle-manivelle.

Le moteur est soumis à des sollicitations périodiques alternées et ayant une vitesse assez grande, nous avons apparition du phénomène de vibration. L'accroissement des charges dynamiques nous donne une augmentation des amplitudes des composantes harmoniques de l'excitation. Les charges dynamiques sont donc importantes d'où la nécessité de l'analyse du système bielle-manivelle.

Nous étudierons les moteurs de tous les côtés : énergétique ; cinématique et dynamique puis nous essayons de faire une conception d'un moteur à quatre temps sur SOLIDWORKS. Le deuxième chapitre nous avons fait un bilan énergétique du moteur diesel six cylindres en ligne. Pour pouvoir faire cette étude, nous avons réservé le troisième chapitre du travail à l'étude cinématique du moteur choisi parmi les moteurs, cette partie nous a permis de calculer les vitesses, déplacement et accélération d'un système bielle manivelle. et dans le quatrième chapitre nous avons pu calculer les forces agissant sur le système bielle-manivelle, ainsi que les efforts dynamiques sollicitant le système bielle-manivelle à chaque position du vilebrequin, qui permettent de déterminer le moment d'excitation.

Dans le cinquième chapitre et le dernier nous essayons de faire une conception et une simulation d'un moteur à quatre temps par SOLIDWORKS.

Chapitre 1

GENERALITES SUR LES MOTEURS A COMBUSTION

CHAPITRE 1 GENERALITES SUR LES MOTEURS A COMBUSTION INTERNE

1. Historique

Le terme « moteur à combustion et explosion » désigne tout type de moteur à combustion interne à pistons alternatifs ou rotatifs, diesel ou à allumage commandé dans lesquels les gaz brûlent avec un front de flamme dont la vitesse est normalement, inférieure à celle du son.

Le premier moteur à combustion à un cylindre a été réalisé par Eugenio Barsanti et Felice Matteucci en 1856. Le moteur à combustion à deux temps est réalisé par Etienne Lenoir en 1859. Le moteur à combustion à quatre temps est inventé par Beau de Rochas en 1862 ; développé par Nikolaus Otto en 1867, puis perfectionné par Gottlieb Daimler et Wilhem Maybach en 1886, suivi par le moteur Diesel en 1893.

Ce type de moteur est principalement utilisé pour la propulsion des véhicules de transport (tels qu'avions, automobiles, motos, camions et bateaux). Pour de nombreux outils mobiles (tels que tronçonneuses, tondeuses à gazon) et pour de nombreuses installations fixes.[01]

2. Définition d'un moteur à combustion interne

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, énergie calorifique), puis en 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).[02]

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 carburant. 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 engagé 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 des 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.[02]

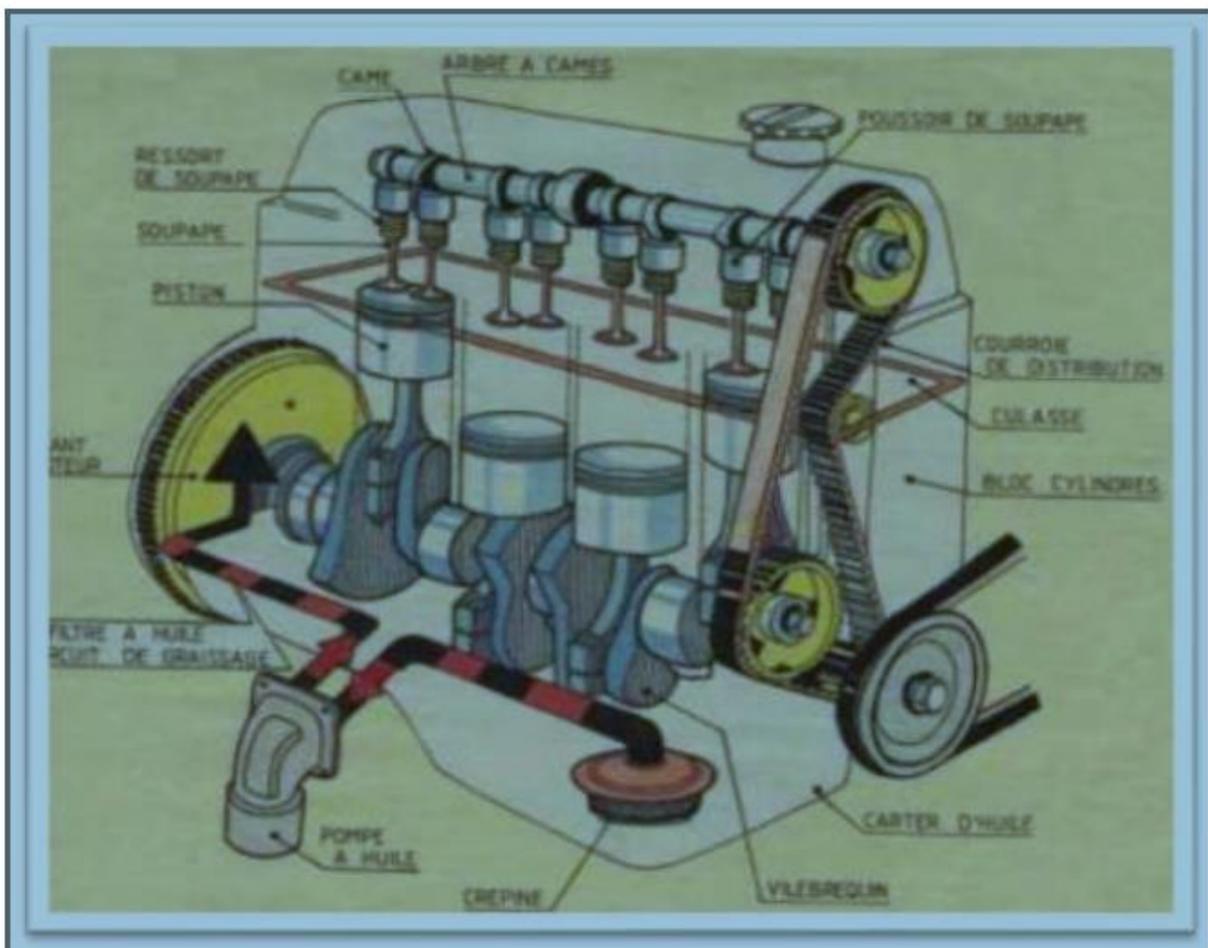


Figure 1.1 Moteur à quatre temps

2.1 Structure du moteur

Dans l'ensemble, les constituants des moteurs à allumage commandé sont semblables à ceux des moteurs Diesel. La chambre de combustion est constituée d'un cylindre, en général immobile, fermé à l'une de ses extrémités et dans lequel un piston coulisse. Le mouvement de va-et-vient du piston modifie le volume de la chambre située entre la face interne du piston et l'extrémité fermée du cylindre. La face externe du piston est couplée à un vilebrequin par une bielle. Le vilebrequin transforme le mouvement alternatif du piston en un mouvement rotatif. Dans les moteurs multicylindres, le vilebrequin possède une partie coudée, le maneton, associé à chaque bielle. Ainsi, la force de chaque cylindre s'applique sur le vilebrequin au moment approprié de sa rotation. Les vilebrequins sont munis de lourds volants et de contrepoids qui minimisent l'irrégularité du mouvement de l'arbre. Un moteur peut contenir jusqu'à 28 cylindres.[03]

2.1.1 Organes fixes :

2.1.1.1 Bloc moteur :

Le bloc-moteur ou carter-cylindre est la partie la plus massive, il contient les cylindres et reçoit l'ensemble des organes du moteur : équipement d'injection, vilebrequin, distribution, auxiliaires électriques,...etc. Le bloc moteur doit être étanche et robuste afin de résister aux pressions élevées qui règnent dans les cylindres pendant la combustion.

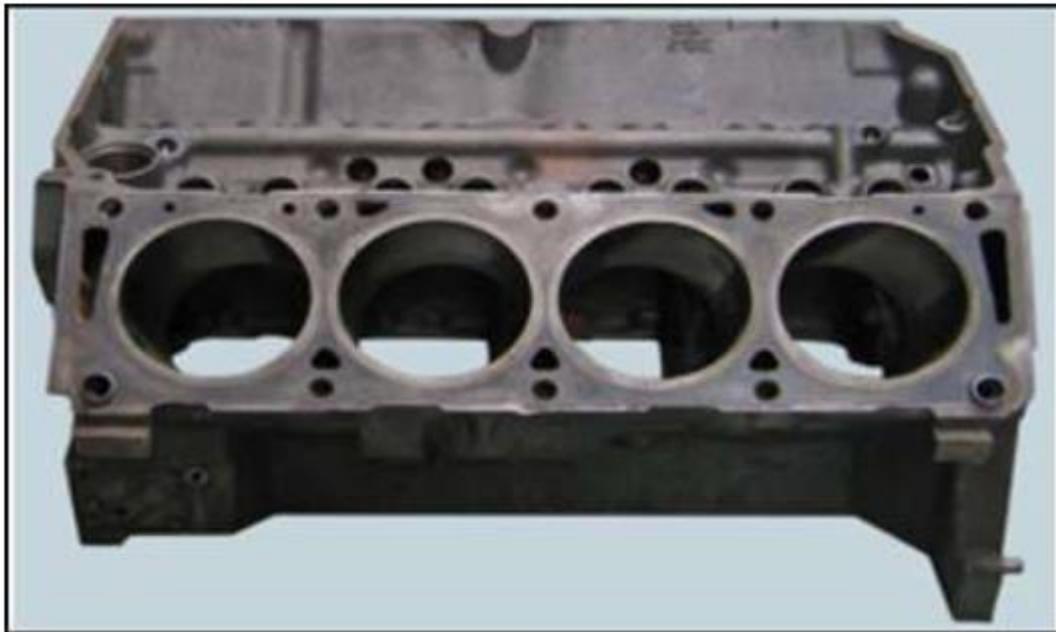


Figure 1.2 Bloc moteur à 4 cylindres en ligne

2.1.1.2 Chemise de cylindre :

Les chemises sont en fonte spécifique centrifugée et type amovible. Chaque chemise est fixée à sa partie supérieure par sa collerette serrée entre la culasse et le bloc. La partie inférieure est guidée dans le bloc et l'étanchéité assurée par des joints toriques.



Figure 1.3 La chemise

2.1.1.3 Culasse :

Elle couvre le bloc-moteur. Elle contient les soupapes, les chambres d'admission et d'échappement et les trous de fixation des bougies. Une culasse est dite « multisoupapes » si elle contient plus de deux soupapes par cylindre.

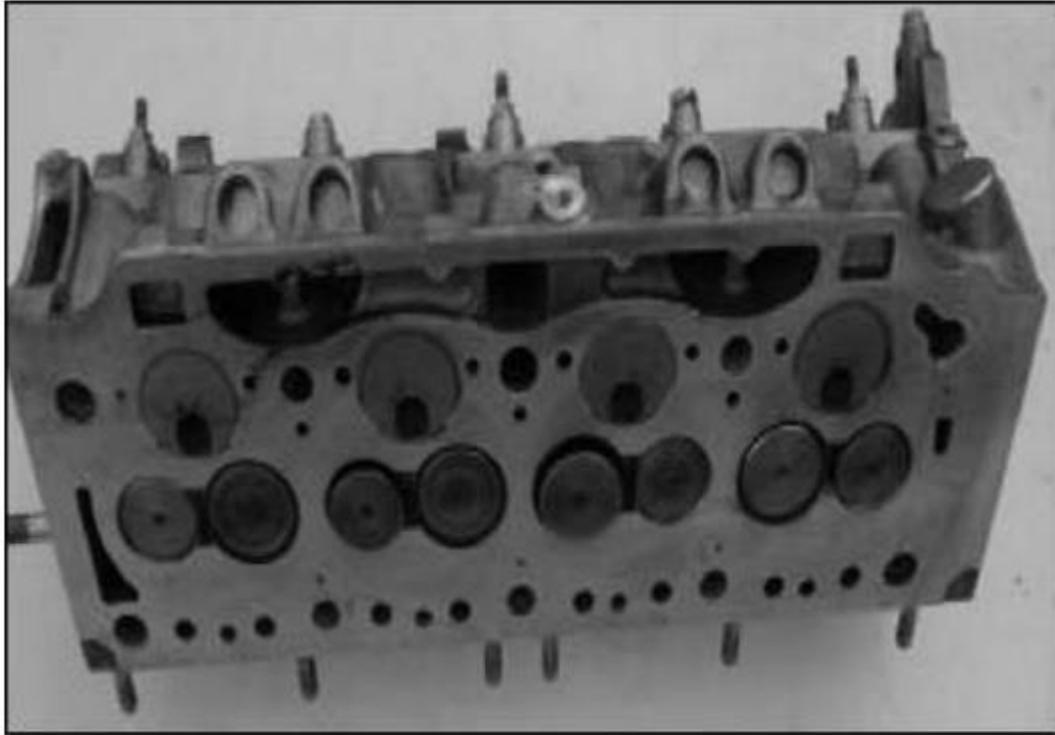


Figure 1.4 La culasse

2.1.1.4 Joints de culasse :

Généralement constitué, de deux feuilles de cuivre ou réduit quelque fois à sa plus simple expression : une simple feuille de cuivre. Le joint de culasse assure l'étanchéité entre la culasse et le bloc cylindre.



Figure 1.5 Joint de culasse

2.1.1.5 Carter :

Le carter est une enveloppe métallique placée à la partie inférieure du moteur, le carter se compose de :

- Le demi-carter supérieur fixé par les boulons à la partie inférieure de bloc-cylindres. Il est coulé avec l'ensemble du bloc-cylindres, il forme le carter cylindre ;
- Le demi-carter inférieur ferme complètement la partie inférieure de bloc-moteur.



Figure 1.6 Carter

2.1.1.6 Cache culbuteur :

Elle couvre la culasse du côté supérieur.



Figure 1.7 Cache culbuteur

2.1.2 Organes mobiles :

2.1.2.1 Culbuteur :

Quelque fois appelés aussi basculeurs, les culbuteurs transmettent le mouvement des cames aux soupapes par l'intermédiaire des tiges de culbuteur. L'extrémité en contact avec la tige de culbuteur est munie d'un système vis écrou permettant le réglage du jeu aux culbuteurs.



Figure 1.8 Culbuteur

2.1.2.2 Soupapes :

Une soupape est un organe mécanique de la distribution des moteurs thermiques à quatre temps permettant l'admission des gaz frais et l'évacuation des gaz brûlés. De manière générale, une soupape d'admission sépare le conduit d'admission de la chambre de combustion et une soupape d'échappement sépare celle-ci du conduit d'échappement.

Les soupapes se classent principalement en trois catégories : Les soupapes à tige (aussi appelées soupapes à tulipes) ; les soupapes rotatives et les soupapes à chemise louvoyant. Les plus répandues sont les soupapes à tige/tulipe qui équipent la quasi-totalité des moteurs à combustion interne actuels. Ces dernières soupapes sont les plus souvent actionnées par un arbre à cames et maintenues par un ou plusieurs ressorts de rappel.

On distingue deux sortes de soupapes :[03]

- Les soupapes d'admission ;
- Les soupapes d'échappement.



Figure 1.9 Les soupapes

2.1.2.3 Piston :

Pièce cylindrique mobile, qui sert à comprimer les gaz en vue d'une explosion et qui après l'explosion transforme une énergie thermique en énergie mécanique.

Outre ces deux rôles primordiaux, le piston a d'autres rôles tout aussi importants pour le bon fonctionnement du moteur :

- Il va aspirer le mélange de gaz dans la chambre de combustion lors de la descente ;
- Il va expulser les gaz brûlés lors de sa remontée ;
- Il doit évacuer la chaleur créée par les explosions répétées ;
- Il doit assurer l'étanchéité entre la chambre de combustion et le carter du vilebrequin rempli d'huile ;
- Il doit résister à la très forte chaleur et aux contraintes mécaniques ;
- En fin, il doit être le plus léger possible pour diminuer les masses en mouvement.



Figure 1.10 Les pistons

➤ **Les segments :**

Ce sont des anneaux « élastiques » ouverts qui se logent dans des rainures faites dans la tête du piston.

Sur un moteur à quatre temps on trouve en général trois segments :

- Ils assurent l'étanchéité entre la chambre de combustion (Les gaz) et le carter d'huile du vilebrequin,
- Ils sont utilisés aussi pour l'évacuation de la chaleur vers le cylindre.
- ✓ **Le segment de feu** : C'est le segment en contact avec les gaz. Lors de l'explosion, il est plaqué contre le piston (dans sa rainure) et contre le cylindre, ce qui assure quasiment toute l'étanchéité ;
- ✓ **Le segment d'étanchéité** : Il assure l'étanchéité total des gaz en arrêtant ceux qui seraient passés par l'ouverture du segment de feu ;
- ✓ **Le segment racleur** : (Que sur les quatre temps) il assure l'étanchéité coté huile, il doit « racleur » l'huile des parois du cylindre et la rejeter dans le carter d'huile de vilebrequin.[02]



Figure 1.11 Les segments

2.1.2.4 Bielle :

Il s'agit d'une pièce qui assure la liaison entre le piston et le vilebrequin. La bielle se compose de trois parties :

- ✓ Le pied (au niveau du piston) ;
- ✓ Le corps ;
- ✓ La tête (au niveau du vilebrequin).

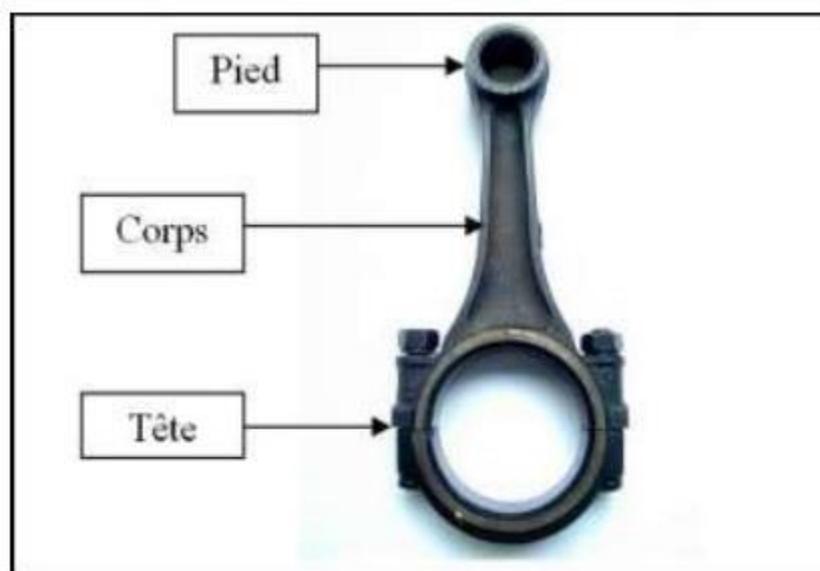


Figure 1.12 La bielle

2.1.2.5 Vilebrequin :

Le vilebrequin est une pièce de moteur à combustion interne ou de moteur Stirling. Il est l'élément principal du système bille-manivelle, il permet la transformation du mouvement linéaire alternatif du aux pistons en un mouvement de rotation continue. Par conséquent, le vilebrequin va entraîner tous les éléments du moteur qui on besoin d'un mouvement rotatif comme :

- La transmission primaire ;
- L'alternateur ;
- Les contre-arbres d'équilibrage.



Figure 1.13 Le vilebrequin

2.1.2.6 Volant moteur :

Le volant moteur joue le rôle d'un volant d'inertie lié au démarreur du moteur et à l'embrayage dont le but est d'amortir les chocs, les vibrations et les bruits du moteur. Il peut aussi stocker un excès d'énergie au moment de l'explosion du moteur afin de dépasser le point mort qui correspond à la compression. Lorsqu'il s'agit d'une volante motrice biomasse, celui-ci est composé de deux masses reliées entre elles par un ressort, des taquets et un roulement à billes. La première masse fonctionne avec le vilebrequin et la deuxième masse fonctionne avec la transmission. Ce sont les deux masses du volant moteur qui permettent de réduire les vibrations.



Figure 1.14 Le volant moteur

2.1.2.7 Arbre à cames :

L'arbre à cames est une pièce principale du moteur automobile. L'arbre à cames, nommé aussi « arbre de distribution », commande l'ouverture des soupapes en transformant le mouvement rotatif issu du moteur en mouvement longitudinal actionnant les soupapes. C'est un arbre, une pièce métallique longiligne, entraîné par une roue dentée.



Figure 1.15 L'arbre à cames

2.1.2.8 : Courroie de distribution :

La courroie de distribution est un élément essentiel de la motorisation d'une voiture puisqu'elle permet la synchronisation de certains de ses organes. La courroie de distribution a pour principale fonction de synchroniser le mouvement des soupapes et des pistons afin que votre moteur fonctionne correctement. Elle sert également dans certains cas à entraîner la pompe à eau, organe clé du refroidissement de votre moteur.



Figure 1.16 Courroie de distribution

2.1.2.9 Injecteur :

L'injecteur est un procédé permettant d'alimenter un moteur à combustion en amenant le carburant dans la chambre de combustion sous pression et avec un dosage parfait remplaçant le carburateur. Il reçoit sous pression le carburant et le libère dans le moteur (de manière directe ou indirecte) sous la forme d'un jet microscopique.

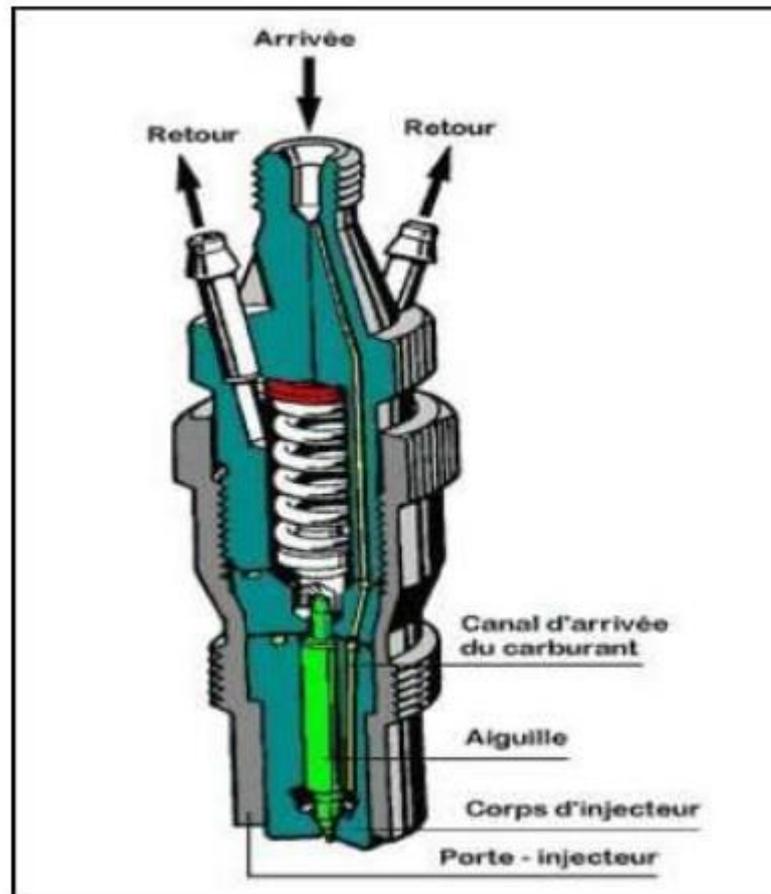


Figure 1.17 injecteur

2.2 Principe de fonctionnement du moteur à quatre temps :

Le moteur à quatre temps correspond à deux tours vilebrequin qui regroupent les quatre temps. Phase d'admission où le piston descend et la soupape d'admission s'ouvre et l'air frais s'engouffre dans le cylindre. La phase de compression où la soupape d'admission se ferme et le piston remonte. L'air ou bien la charge fraîche sont comprimés et s'échauffent fortement. Pour les moteurs diesel lorsque le piston atteint les 9/10ème de sa course environ une quantité de carburant est alors injectée. Phase de détente où les soupapes sont fermées, le mélange d'air et de carburant contenu dans le cylindre est sous pression et la température est suffisamment élevée pour que ce mélange s'enflamme en créant une surpression qui pousse le piston vers le bas. Phase d'échappement où la soupape d'échappement s'ouvre et le piston remonte en chassant les gaz brûlés vers le circuit d'échappement. Dans le cas d'un moteur à quatre cylindres chacun des pistons effectue les quatre phases décrites précédemment et est décalé de 180° par rapport aux autres pistons suivant l'ordre d'allumage 1342. Ainsi, pendant que le premier piston est enfin de phase de compression, le troisième est en fin de phase d'admission début de

compression, le quatrième en fin de phase d'échappement début d'admission et le deuxième en fin de phase d'explosion début d'échappement.[02]

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 flamme 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 dissociation. [01]

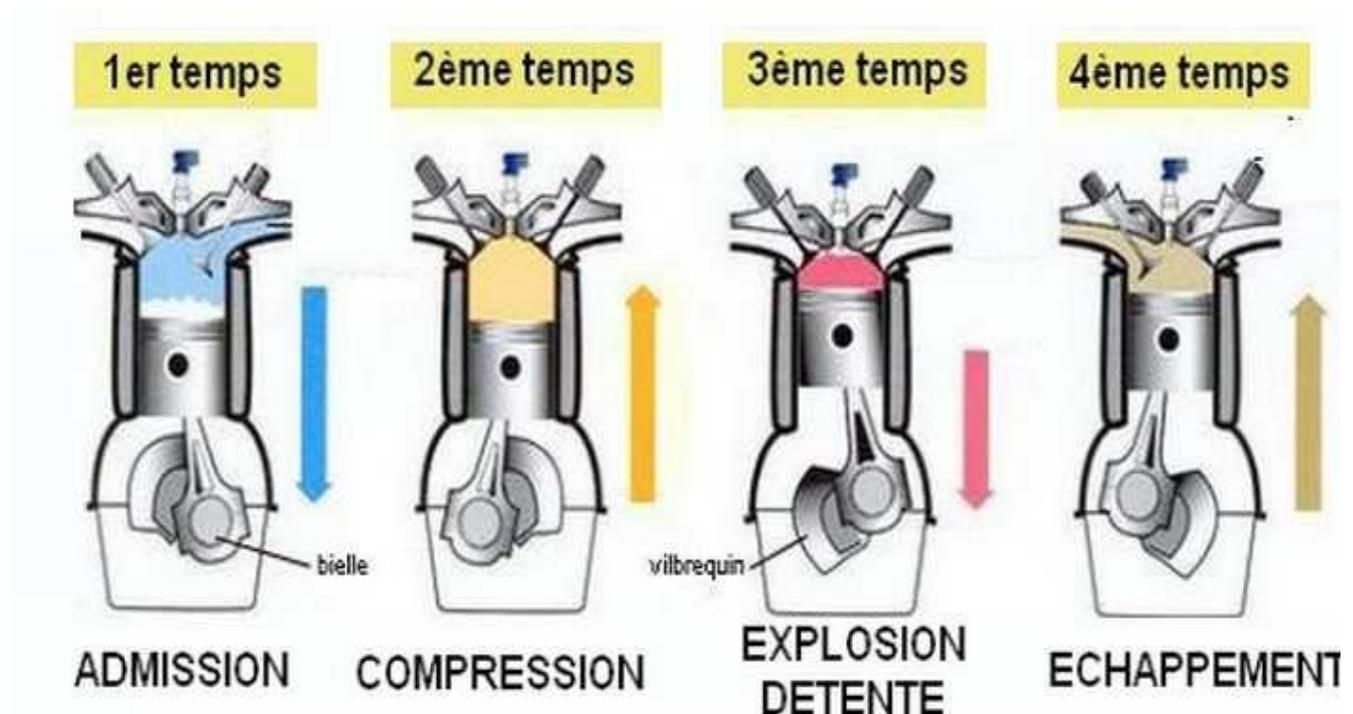


Figure 1.18 présentation des quatre temps d'un moteur à combustion interne

2.3. Les différents types des moteurs :

2.3.1 Selon le type d'injection :

On distingue deux catégories de moteurs selon le type d'injection. Deux grands types d'injection existent :

2.3.1.1 Injection directe :

Le système d'injection directe est assez commun entre un moteur diesel et une motrice essence, ce qui n'est pas le cas pour l'injection indirecte dont la conception change en partie. Ici c'est donc assez simple : le bout de l'injecteur donne directement sur la chambre de combustion (le cylindre), il va donc pulvériser le carburant directement dans cette chambre au moment voulu (3^{ème} temps sur les quatre temps).

Sur un diesel, il est un peu plus difficile d'injecter le gazole car il est moins fluide que l'essence. En conséquence, l'injection est souvent plus puissante en termes de pression. Notez qu'il ne s'agit pas d'une bougie mais bel et bien d'un injecteur.....le carburant est ici envoyé sous pression directement dans la chambre de combustion.

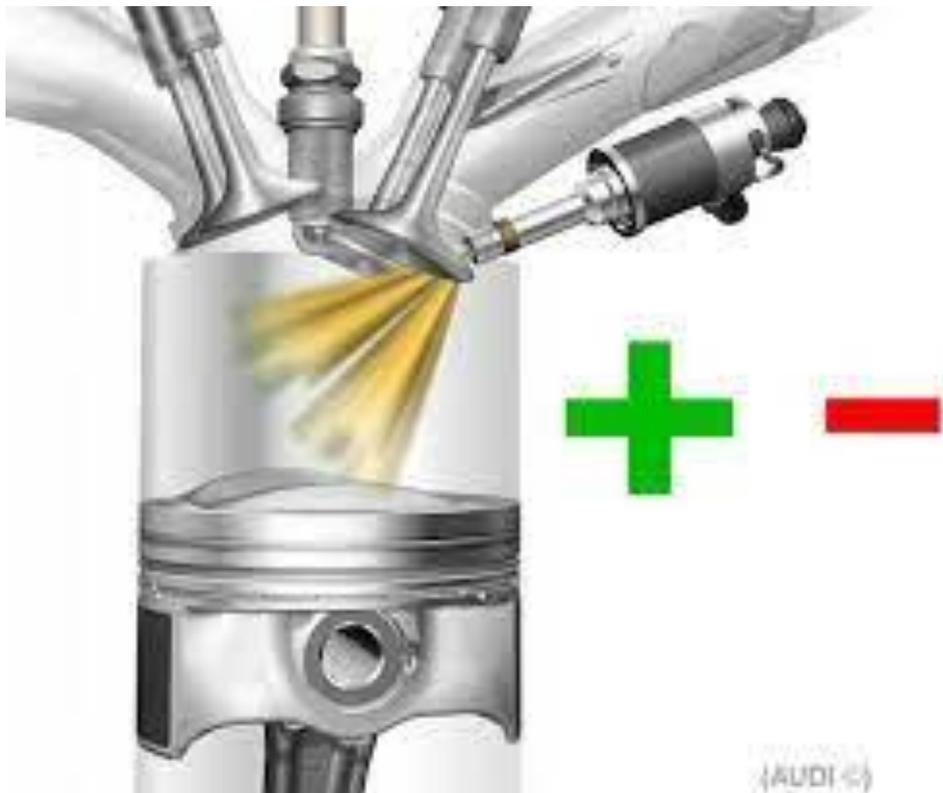


Figure 1.19 Position de l'injecteur dans un moteur à injection directe

2.3.1.2 Injection indirecte :

En effet, ce qui arrive par la soupape d'admission dans un diesel ne se limite qu'à de l'air, alors que dans une essence c'est un mélange air/carburant. En conséquence, le mélange se fait dans une petite chambre à part qui est connectée au cylindre via un conduit, et non pas dans un autre endroit situé ailleurs (dans le circuit d'admission dans le cas d'une essence). Le mélange sera effectué encore une fois grâce aux « courants d'air » générés par les va et vient du cycle quatre temps (mais aussi par la conception aérodynamique précise de l'intérieur du moteur, qui permet alors les turbulences nécessaires au mélange air/carburant).

Notez que les bougies de préchauffage sont plus importantes pour une injection indirecte que directe. En effet, un moteur à injection directe démarrera très bien sans elles s'il ne fait pas trop froid évidemment. Une petite chambre connectée au cylindre permet à la fois d'injecter le carburant mais aussi de le mélanger à l'air de l'admission grâce à une forme spécifique en termes d'aérodynamisme. L'air circulant dans la sphère au moment de la compression (quand le piston remonte en « écrasant » l'air) provoque un tourbillon qui brasse le tout : ce qui permet d'avoir un mélange uniforme et donc plus avantageux pour la combustion (ce qui améliore le rendement). [03]

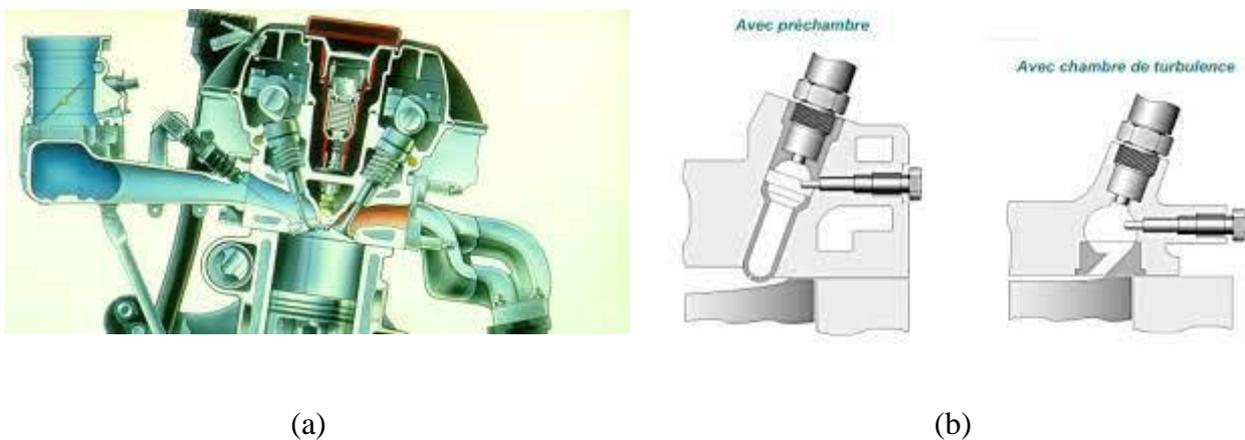


Figure 1.20 Position de l'injecteur dans un moteur à injection indirecte

2.3.2 Selon le type d'alimentation :

C'est un sujet qui a pris le pas depuis l'arrivée massive des moteurs downsizés. C'était donc l'occasion de faire un article pour essayer d'éclaircir la chose, voyons donc l'ensemble des éléments qui distinguent les moteurs atmosphériques des moteurs turbo.

2.3.2.1 Moteur atmosphérique :

a. Définition :

Le moteur atmosphérique désigne un moteur à combustion interne avec une alimentation en air simplement déterminée par l'aspiration du piston qui en phase descendante dans le cylindre. C'est ce qu'on appelle le temps d'admission.



Figure 1.21 Le moteur thermique

b- Analyse du moteur atmosphérique :

En étudiant le cycle du moteur à 4 temps, on s'aperçoit que le temps crucial pour celui-ci est le temps d'admission. En effet, le dosage du carburant se fait par la mesure du volume d'air aspiré, mesuré par le système d'injection avec le capteur de pression d'air et le débitmètre. L'intérêt est donc d'admettre un maximum d'air pour le besoin du moteur, c'est ce qu'on appelle le remplissage

c- Avantages du moteur atmosphérique :

- C'est un système simple s'appuyant sur l'aspiration moteur, contrairement au moteur turbocompressé, où l'air est comprimé à l'admission ;
- Couple disponible dès les premiers tours moteur ;

- Moteur très exploitable et régulier sur toute la courbe de puissance (pas d'arrivée brutale de la puissance) ;
- Consommation moindre ;
- Fiabilité bien meilleure par rapport au moteur turbocompressé que ce soit pour la longévité moteur ou les frais d'entretien.

d- Inconvénients du moteur atmosphérique :

Les performances du moteur sont variables :

- La pression atmosphérique : en altitude, l'oxygène de l'air est plus rare, donc la quantité d'essence injecté par le moteur, proportionnelle au volume d'air, sera moindre et le véhicule fonctionnera moins bien ;
- Le temps : un temps pluvieux, sec, chaud ou froid aura une influence sur la pression atmosphérique, donc sur le volume de remplissage d'air. Les conséquences seront les mêmes que celles énumérées au paragraphe précédent.

2.3.2.2 Moteur suralimenté par turbo :

Premier constat, un moteur turbo potentiellement plus de puissance. En effet, la puissance découle directement de la combustion dans les cylindres, plus elle est importante plus le cylindre « bouge fort » est donc plus la voiture est puissante. Avec un turbo, on peut caser plus d'air dans les cylindres que sans. Et comme on arrive à envoyer plus de comburant (l'air, et surtout la petite portion d'oxygène qui s'y trouve) on peut alors envoyer plus de carburant. On a donc plus d'énergie à brûler pour un cycle, on a donc plus de puissance. Le terme suralimentation est d'ailleurs très partant, on gave littéralement le moteur d'air et de carburant, on en « bourre » un maximum dans les cylindres.

Un moteur turbo voit son système d'échappement être encore plus gêné....En effet, en plus des catalyseurs et FAP. On a désormais une turbine qui s'alimente des flux induits par l'extraction des gaz d'échappement. Tout ça fait qu'on rajoute encore quelque chose qui vient obstruer la ligne, on entend donc un peu moins de bruit. De plus, les régimes sont moins élevés, donc le moteur peut crier moins fort.

Les F1 sont le meilleur exemple qui soit, avec un plaisir pour le téléspectateur qui s'est largement atténué (Le son moteur faisait partie des ingrédients indispensables).

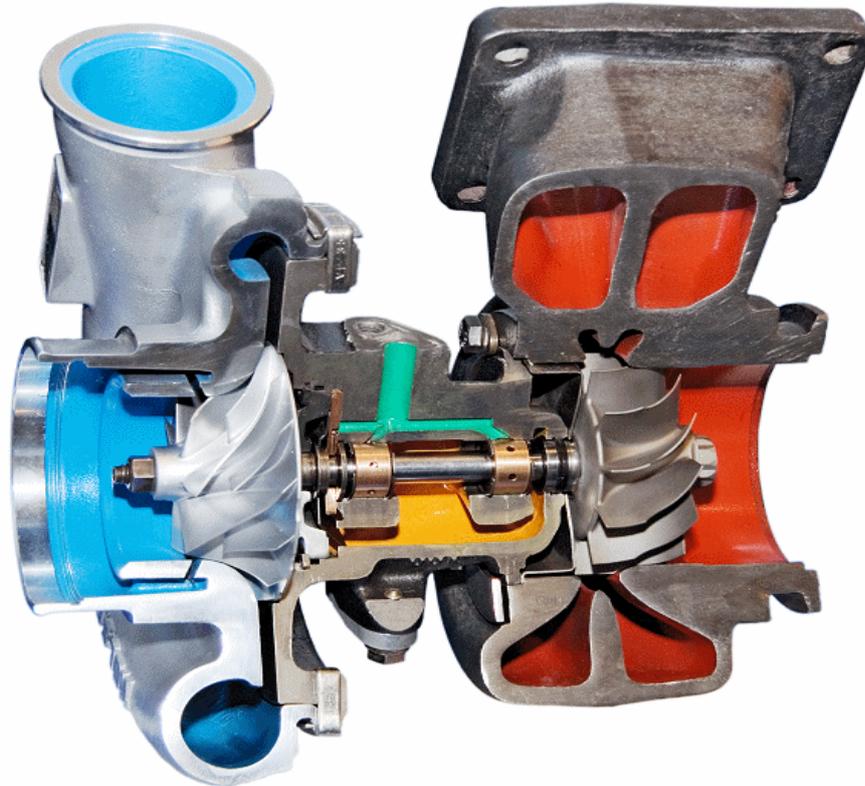


Figure 1.22 Le turbocompresseur dans les moteurs suralimenté

a- Fonctionnement du turbocompresseur :

Un turbocompresseur est composé de deux hélices reliées entre elles (une turbine et un compresseur). Le principe du turbo est le suivant, les gaz d'échappement rejetés par le moteur font tourner une turbine. Cette turbine est reliée par un axe à une deuxième hélice qui aura comme rôle d'envoyer une grande masse d'air vers l'admission (l'air qui s'accumule finit par se compresser d'où le nom de turbocompresseur). Cet air comprimé sera envoyé dans le moteur augmentant alors l'apport d'oxygène dans le moteur de combustion, favorisant ainsi la puissance.[04]

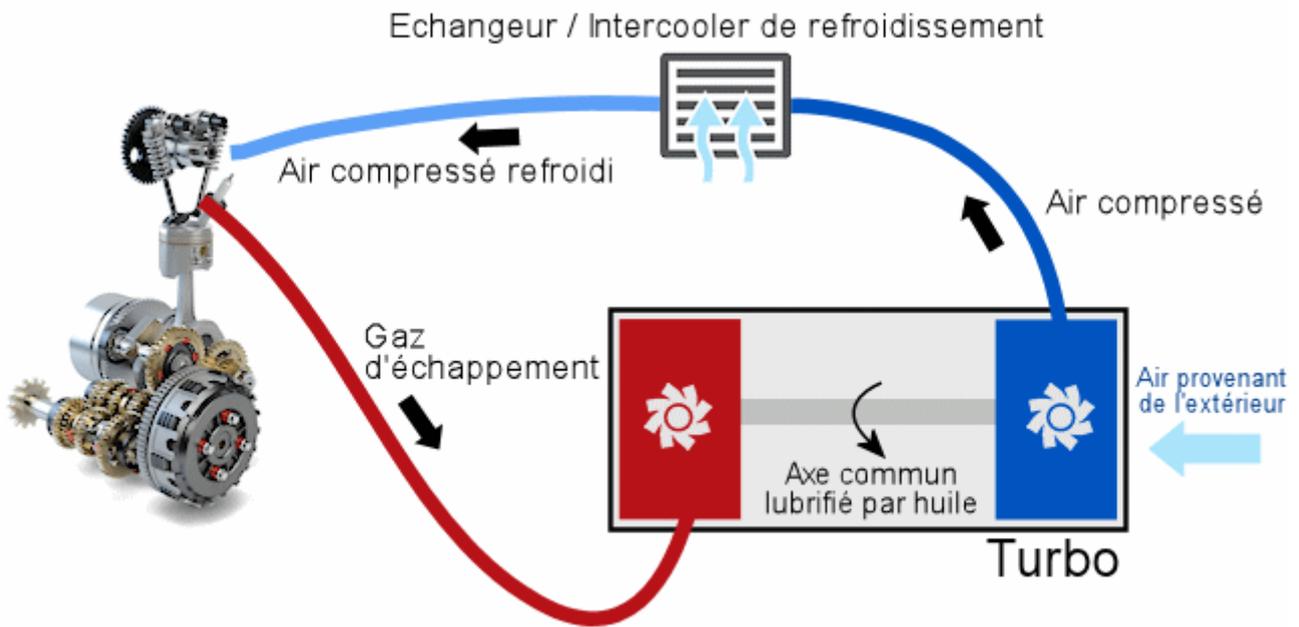


Figure 1.23 Principe de fonctionnement de turbocompresseur

b- Objectif du turbo :

Son appellation nous donne la réponse : suralimentation. C'est donc un organe destiné à booster les moteurs, à savoir pouvoir les graver encore plus en air et en carburant. Car si on est normalement limité à la cylindrée et la pression atmosphérique, ce n'est pas la cas si on peut forcer plus d'air à y entrer.

On peut alors obtenir bien plus de puissance pour une même cylindrée. et un moteur de 1.5 litres peut alors pouvoir engloutir autant d'air et de carburant qu'un 2.5 litres. Cela permet donc de vendre des moteurs plus petits qu'avant tout en proposant des puissances identiques, voir même supérieures. Comme à bas régime le turbo ne fonctionne quasiment pas, on se retrouve avec un moteur plus sobre en conduite calme, et c'est tout l'avantage de la suralimentation aujourd'hui limiter la casse coté malus en proposant des moteurs qui se débrouillent bien aux cycles d'homologation WLTP.

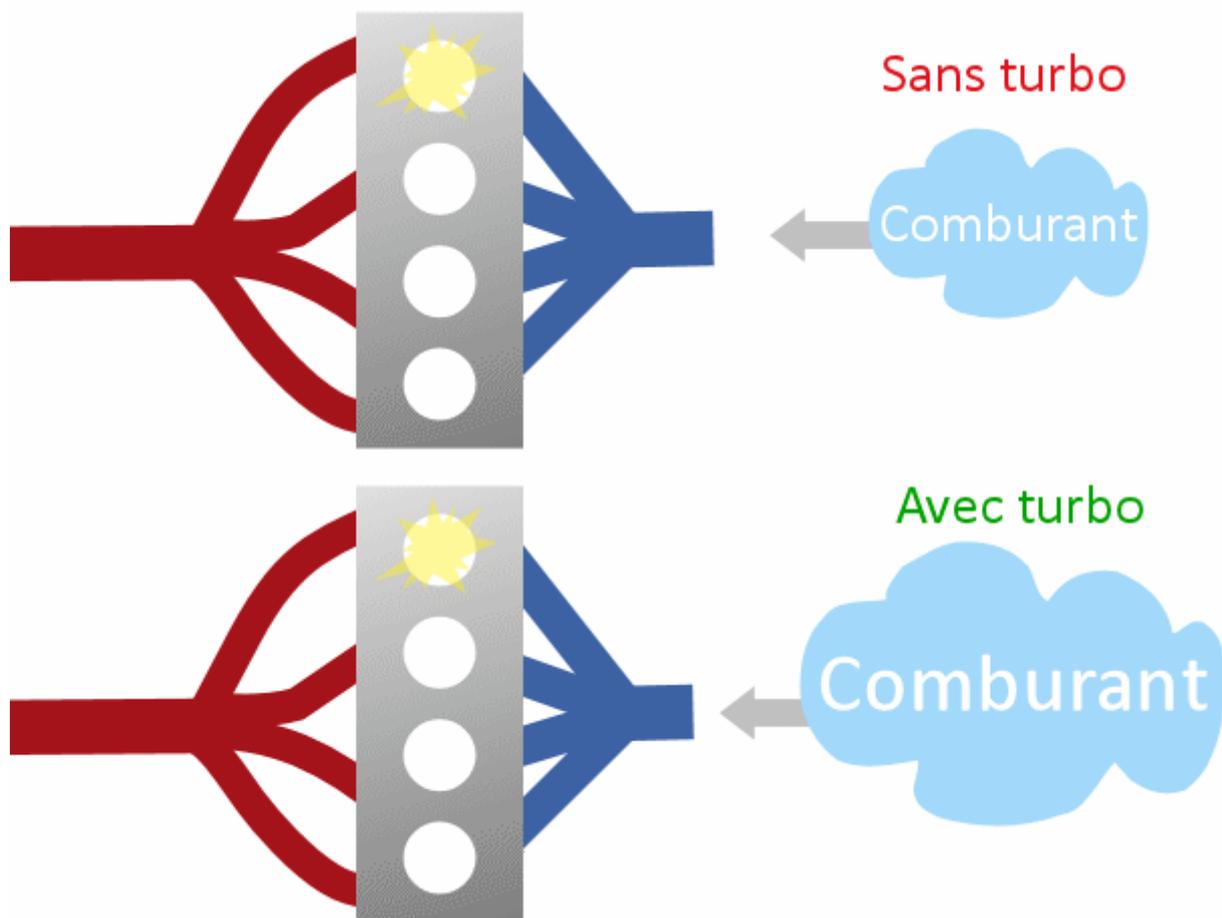


Figure 1.24 Différence entre moteur thermique et moteur suralimenté

c- Lubrification du turbo :

Le turbo doit être lubrifié au niveau de son axe central. Et comme un roulement à billes ne suffit pas pour résister à de telles régimes, il faut utiliser un palier doit continuellement être alimenté en huile pour qu'il fonctionne. [04]

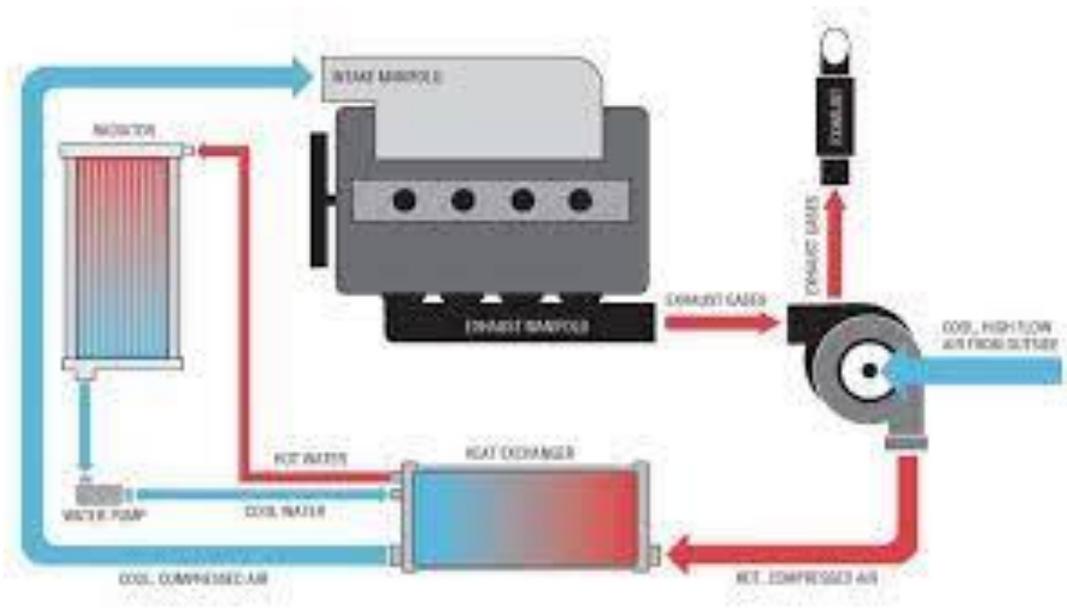


Figure 1.25 Circuit de lubrification d'un turbo

Chapitre 2

ETUDE ENERGETIQUE

CHAPITRE 02 : ETUDE ENERGETIQUE

2.1 Les cycles de combustion :

2.1.1 Définition :

Sur terre, l'énergie mécanique se présente sous deux formes principales :

- L'énergie potentielle, provenant essentiellement de l'attraction de la gravitation terrestre, est celle que possède un corps au repos situé en altitude : énergie continue dans l'eau d'un barrage ;
- L'énergie cinétique est celle que possède un corps en mouvement : énergie du vent, des cours d'eau.....

Sous ces deux formes, l'énergie mécanique disponible est largement inférieure aux nombreux besoins des sociétés humaines actuelles, qui correspondent aux transports, à la génération d'électricité ou à l'entraînement des machines agricoles et industrielles...

Ce n'est que depuis le milieu du XVIII^{ème} siècle que l'homme est devenu capable, grâce aux découvertes de papin et de Watt, de transformer de la chaleur en énergie mécanique. Depuis, des progrès considérables ont été faits dans la mise au point des moteurs, et les évolutions technologiques se poursuivent à un rythme soutenu, du fait des avancées de la science et des contraintes environnementales de plus en plus strictes.

Pour convertir de la chaleur en énergie mécanique, dans la quasi-totalité des cycles utilisés, le fluide thermodynamique est successivement comprimé, puis chauffé, et en fin détendu. Si le cycle est ouvert, le fluide est alors évacué dans l'environnement externe ; s'il est fermé, il est refroidi, puis de nouveau comprimé... les divers moteurs que l'on utilise diffèrent par :

- Le type de cycle thermodynamique qu'ils utilisent ;
- La nature du fluide thermodynamique qui les traverse ;
- Les types de source chaude et d'organe de compression et de détente qu'ils emploient.

Différentes typologies peuvent être ainsi établies. Généralement, on distingue :

- Les moteurs à fluide compressible ;
- Les moteurs à fluide condensable ;
- Les moteurs à combustion interne ;

- Les moteurs à combustion externe.

Il est clair que ces différentes catégories se recouvrent partiellement. Pour notre part, nous avons choisi de présenter les moteurs à combustion interne : moteurs à essence et moteurs diesel. [05]

2.1.2 Les cycles théoriques :

Les cycles thermodynamiques théoriques relatifs aux moteurs thermiques ont été imaginés par Otto (Beau de Rochas) et diesel en prenant comme hypothèses : [02]

- ✓ La compression et la détente sont isentropique ;
- ✓ La combustion dans les moteurs à essence se fait à volume constant ;
- ✓ La combustion dans les moteurs diesel se fait à pression constante ;
- ✓ La combustion est instantanée (sans délais) ;
- ✓ L'écoulement dans la tubulure d'admission est sans pertes de charge ;
- ✓ Le balayage des gaz d'échappement est isochore ;
- ✓ L'écoulement dans le collecteur d'échappement est sans pertes de charge.

2.1.2.1 Cycle de Beau de Rochas :

- **Phase 0-1 ou 1^{er} temps :** C'est la phase d'admission de l'air, la soupape d'admission s'ouvre, un peu de combustible (essence vaporisée) est aussi aspirée. A la fin de cette phase, la soupape d'admission se ferme et on travail avec l'air enfermé à la température T1.
- **Phase 1-2 ou 2^{ème} temps :** Le piston remonte et le gaz est comprimé, la phase est rapide et comme les échanges thermiques sont lents, la transformation est adiabatique, on la suppose en général aussi quasi-statique et donc isentropique.
- **Phase 2-3 :** Explosion, à cet instant une étincelle provoque l'explosion du mélange, il y a accroissement de la pression par l'explosion, à volume constant car le piston n'a pas le temps de réagir.
- **Phase 3-4 ou 3^{ème} temps :** Détente et effet moteur, l'air chauffé se détend en repoussant le piston et en fournissant un travail ($\delta W = -pdV < 0$), on l'idéalise par une transformation isentropique.
- **Phase 4-1 ou 4^{ème} temps :** La soupape d'échappement s'ouvre, la pression interne retombe instantanément à la pression atmosphérique, puis le piston remonte en repoussant l'air restant (retour à 0).[06]

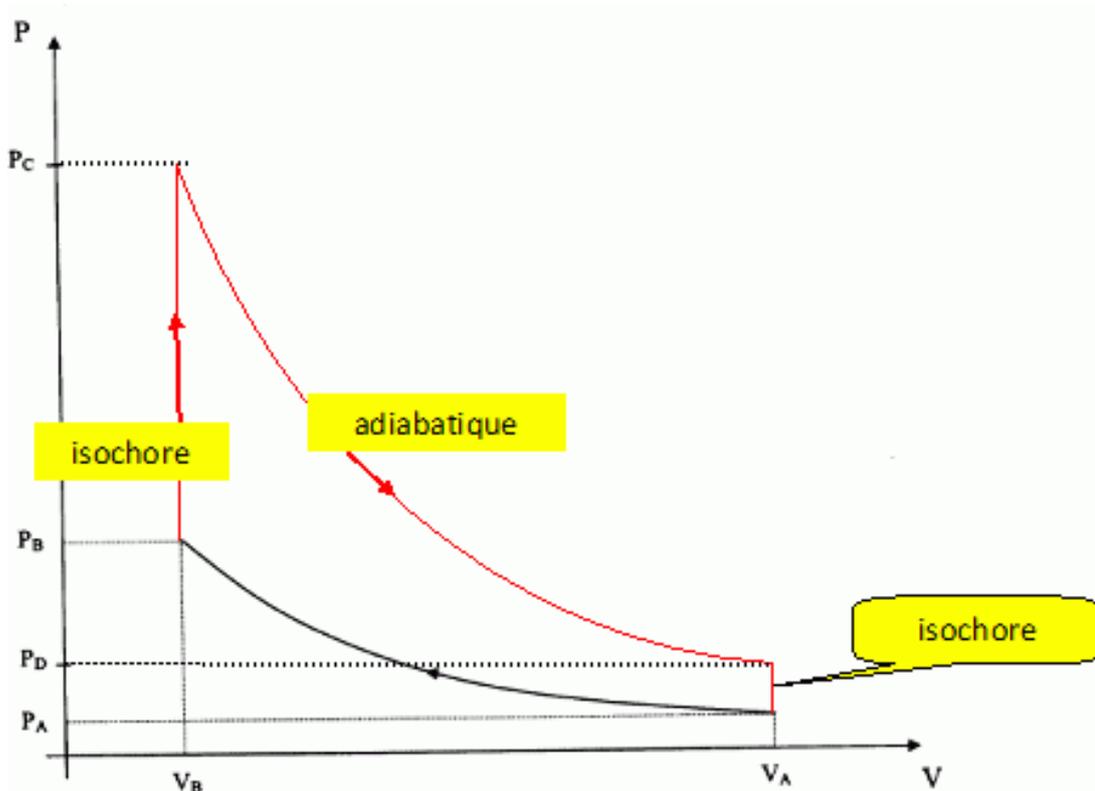


Figure 2.1 Cycle théorique d’Otto (Beau de Rochas) [06]

2.1.2.2 Cycle Diesel :

On le prend ici avec d’autres notations plus allégées.

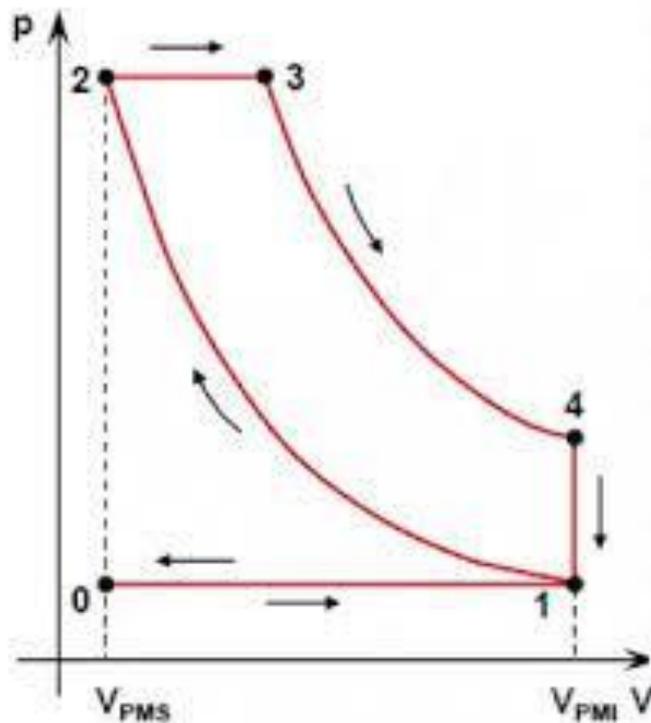


Figure 2.2 Cycle théorique Diesel

On injecte uniquement de l'air sans combustible puis :

- **1-2** : Compression plus forte que dans le cas du moteur à essence, la température T est plus forte aussi.
- **2-3** : Le gas-oil est injecté et s'enflamme automatiquement (T , P élevées) sans besoin d'étincelle donc de bougies.

Pendant la combustion P est constante.

Puis à la fin de la combustion on passe sur l'isentropique 3-4.[06]

2.1.2.3 Cycle de Saba thé :

Le cycle de Saba thé, appelé aussi cycle mixte de Saba thé, cycle de Trinkler ou cycle de Seiliger est un cycle de fonctionnement des moteurs thermiques. Découvert au début du XX^{ème} siècle par deux scientifiques russes, Gustav Trinkler et Miron Seigler, il s'inscrit dans la liste des cycles de moteurs à combustion interne.

Le cycle de Saba thé est un des cycles théoriques les plus généralistes qui soient avec le cycle de Carnot. Il permet d'expliquer les cycles d'Otto/Beau de Rochas (moteur à essence, combustion uniquement à volume constant) et Diesel (moteur diesel, combustion uniquement à pression constante). Ces deux exemples de cycles thermodynamiques sont en réalité des cas particuliers du cycle de Saba thé. Il existe un cas où le cycle théorique de Diesel s'applique de manière plus adéquate que le cycle de Saba thé, celui des gros moteurs diesel qui fonctionnent lentement.

Ce cycle est dit mixte car il a particularité de diviser sa combustion en deux parties l'une à volume constant et l'autre à pression constante. Cette décomposition semble plus adaptée dans la réalité car elle permet une combustion complète et donc moins de rejets d'imbrulés.[08]

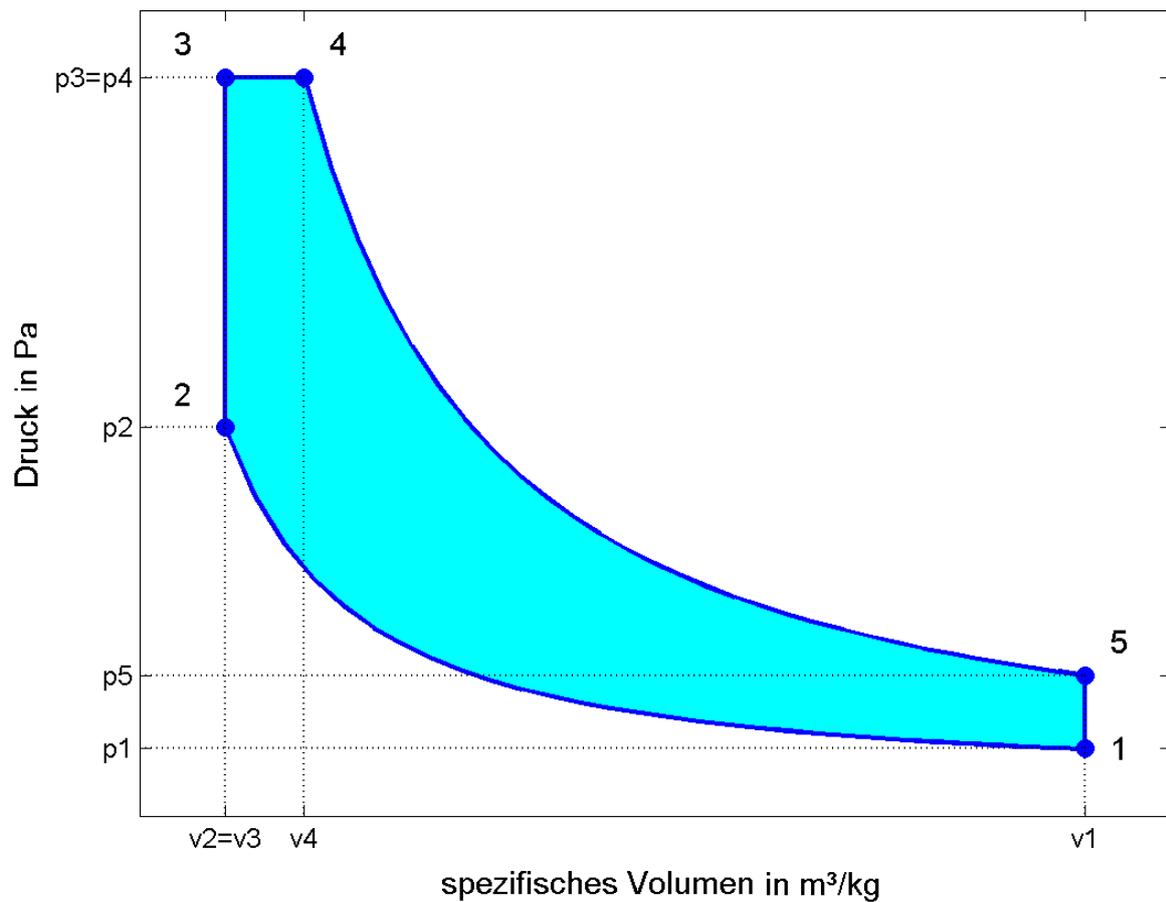


Figure 2.3 Cycle théorique de Saba thé. [08]

Le cycle se compose de 5 transformations élémentaires : [08]

- (1-2) Compression isentropique, adiabatique réversible ;
- (2-3) Combustion à volume constant, isochore ;
- (3-4) Combustion à pression constante isobare ;
- (4-5) Détente isentropique, adiabatique réversible ;
- (5-1) Refoulement à volume constant, isochore.

2.1.3 Cycles réels :

2.1.3.1 Moteur à essence :

Il est indéniable qu'un moteur thermique ne peut pas fonctionner suivant le cycle théorique. En fait, les cycles théoriques font abstractions de plusieurs éléments importants et déterminants dans le fonctionnement dans le fonctionnement correct du moteur :

- 1- l'échange de chaleur à travers les parois est impossible à supprimer. Ceci implique des variations de pression à l'intérieur du cylindre moteur ;
- 2- Les pertes de charges lors du passage des gaz frais où brûlés dans les tubulures et collecteurs ne sont pas négligeables ;
- 3- Les pertes de charge par pompage lors des écoulements à travers papillons et soupapes ne sont pas négligeables ;
- 4- Le cylindre moteur ne se remplit pas convenablement surtout lorsque la vitesse de rotation est très élevée ;
- 5- Le balayage des gaz d'échappement ne se fait pas convenablement surtout lorsque la vitesse de rotation est très élevée ;
- 6- La combustion est très rapide mais pas instantanée et dure une fraction appréciable de la course du piston.

Ainsi, l'allumage ou l'injection pile à en fin de compression ne sont pas appropriés.

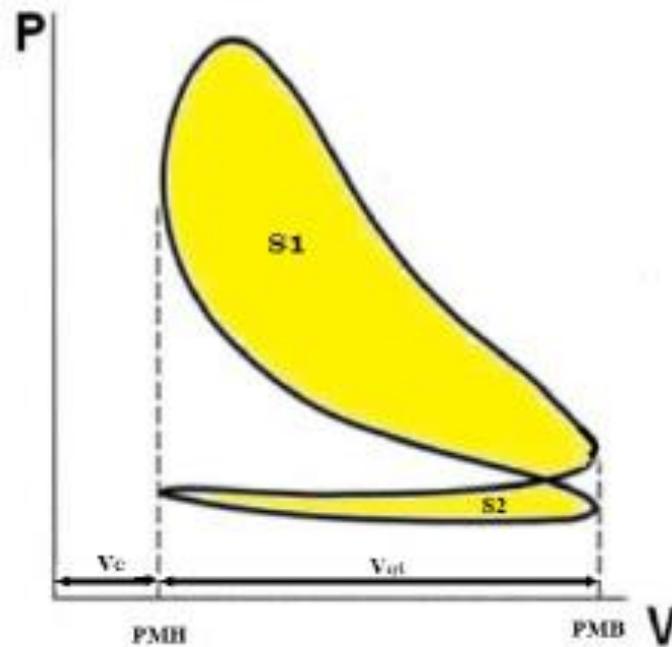


Figure 2.4 Cycle réel d'un moteur à essence

Pour se rapprocher du diagramme théorique et tirer ainsi du moteur un meilleur rendement il faut :

- Compenser la durée de combustion en agissant sur le point d'allumage ;
- Utiliser l'inertie des gaz par des réglages spécifiques d'ouverture et de fermeture des soupapes.

(AOA) Avance ouverture admission :

La soupape d'admission commence à s'ouvrir avant le point mort haut, cette avance évite l'arrêt de la veine gazeuse devant une soupape fermée ;

(RFA) Retard fermeture admission :

La soupape d'admission se ferme après le point mort bas. On profite de l'inertie des gaz pour améliorer le remplissage ;

(AA) Avance à l'allumage :

Dans un moteur à allumage commandé on provoque l'étincelle quelque degrés avant la fin de compression ce qui permet d'obtenir une pression maxi élevée sur le piston en composant la durée de combustion ;

(AOE) Avance ouverture échappement :

La soupape d'échappement commence à s'ouvrir avant le point mort bas ce qui permet d'accélérer la chute de pression des gaz brûlés afin de diminuer la contre pression pendant la remonté du piston ;

(RFE) Retard fermeture échappement :

La soupape d'échappement se ferme après le point mort haut ce qui permet de profiter de l'inertie des gaz pour faciliter leur évacuation complète.

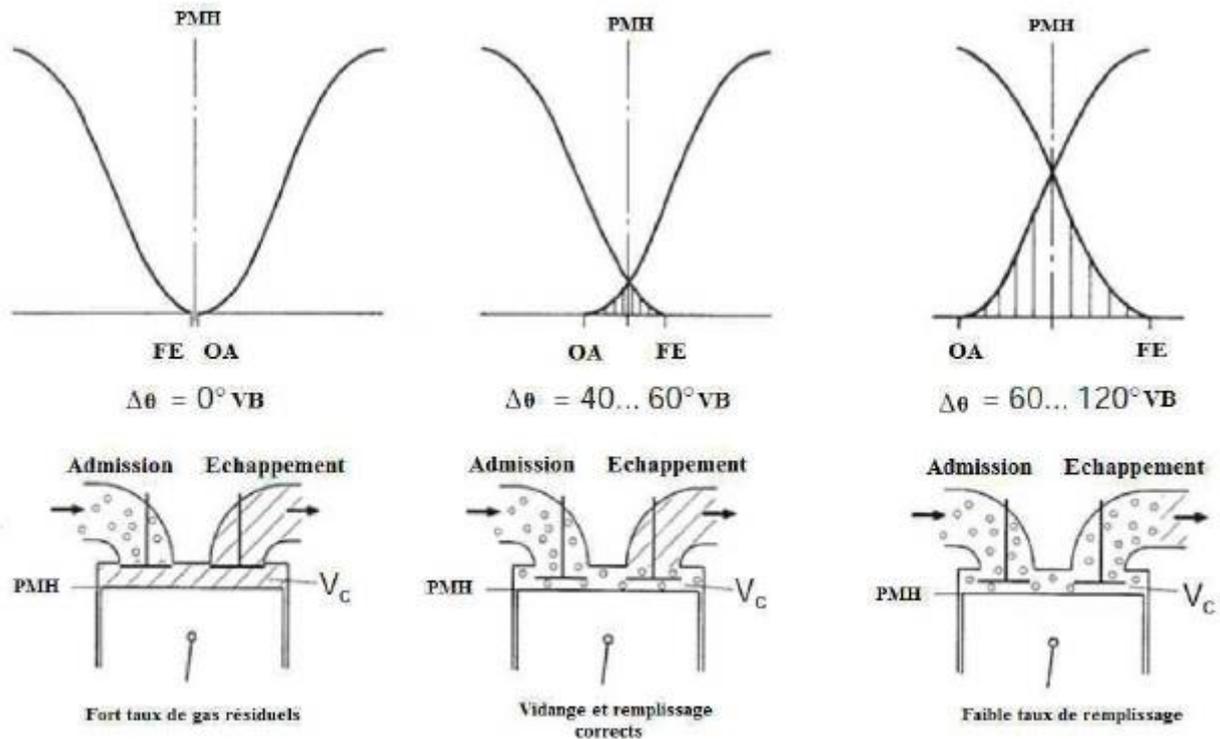


Figure 2.5 Croisement des soupapes

2.1.3.2 Moteur Diesel :

Durant un cycle thermodynamique réel d'un moteur à combustion interne :

- La quantité et la composition du fluide moteur ne sont plus constante, les capacités calorifiques sont déterminées en fonction de la température et de la composition du fluide moteur ;
- Les opérations de compression et de détente ne sont plus adiabatiques, la perte de chaleur entre fluide moteur et les parois est prise en considération ;

- Les pertes de charge dans les canaux d'admission et d'échappement, pendant l'écoulement du fluide moteur, sont aussi considérées.

Dans ce cas le cycle réel du moteur est composé de transformations suivantes :

- Admission du fluide moteur ;
- Compression poly tropique du fluide moteur ;
- Combustion du mélange ;
- Détente poly tropique des produits de combustion de combustion ;
- Echappement des gaz brulés.

✓ **Diagramme indiqué :**

On représente le cycle réel d'un moteur à combustion interne par un diagramme dit « diagramme indiqué » illustrant la variation de la pression dans le cycle soit en fonction du volume (V), soit en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin (θ).

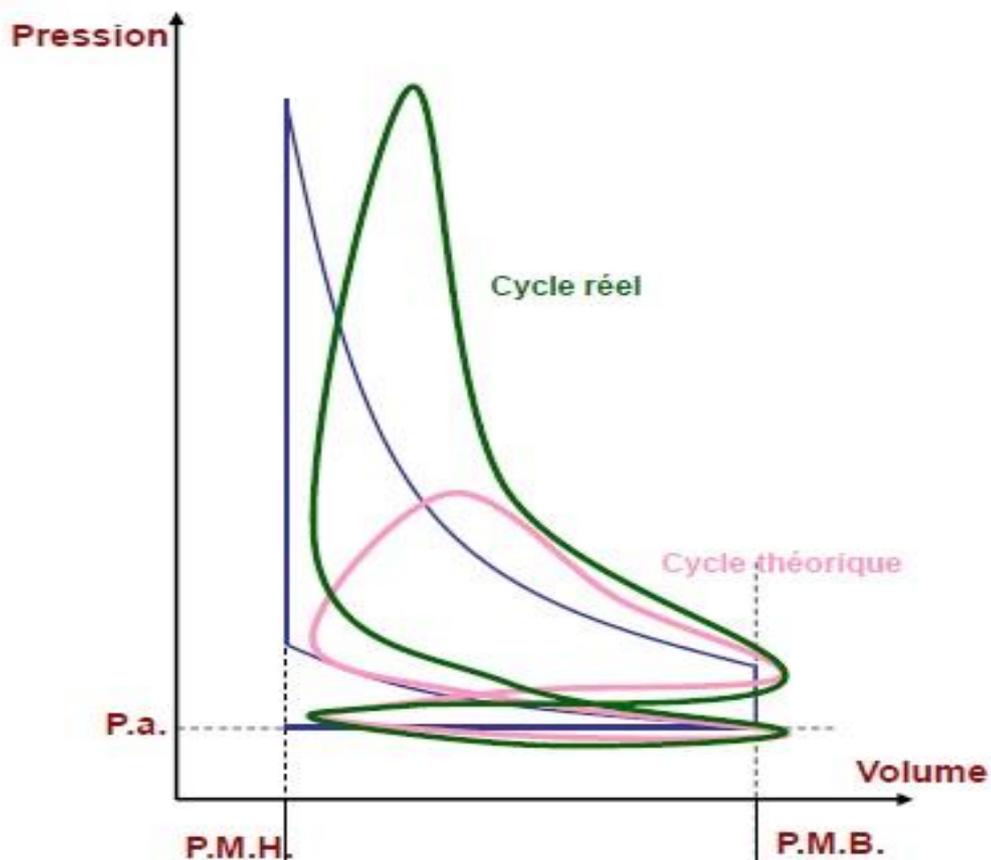


Figure 2.6 Cycle réel Diesel

(**AOE**) Avance à l'ouverture d'échappement (début de l'ouverture de la soupape d'échappement SE) ;

(**RFE**) Retard à la fermeture d'échappement (fin de la fermeture de la soupape d'échappement SE) ;

(**AOA**) Avance à l'ouverture d'admission (début de l'ouverture de la soupape d'admission SA) ;

(**RFA**) Retard à la fermeture d'admission (fin de la fermeture de la soupape d'admission SA).

✓ **Croisement des soupapes :**

A la fin de l'échappement et au début de l'admission, les deux soupapes d'admission SA et d'échappement SE se maintiennent ouvertes en même temps, cette situation s'appelle « croisement des soupapes », elle a pour effet de :

- Favoriser le balayage du cylindre par les produits de combustion ;
- Effectuer un soufflage de la chambre de combustion par l'air frais.
- **Admission :** C'est l'étape de remplissage du cylindre par la charge fraîche (air pour le moteur diesel).

Dans les moteurs réels, la masse de la charge fraîche est plus petite que celle théorique qui pourrait remplir le cylindre à cause de la détente des gaz résiduels se trouvant dans la chambre de combustion du cycle précédent (M_r). Pour augmenter la masse de la charge fraîche on utilise la suralimentation des moteurs.

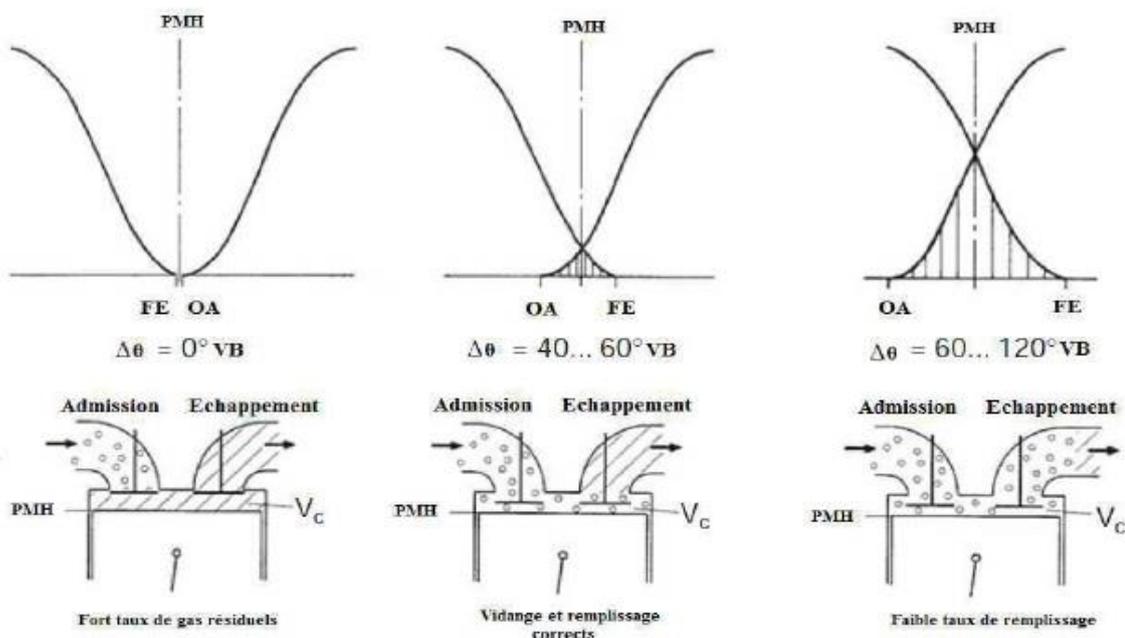


Figure 2.7 Croisement des soupapes pendant un cycle

2.2 Le rendement :

2.2.1 Rendement théorique :

2.2.1.1 Rendement théorique du cycle d’Otto :

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

$$\eta_{o} = \frac{\text{travail du cycle}}{\text{caleur de combustion}} = \frac{W}{Q_c} = \frac{\oint Tds}{Q_c} \dots\dots\dots(01)$$

Avec :

$$S_1=S_2 \quad ; \quad S_3=S_4 \quad ; \quad V_2=V_3 \quad ; \quad V_1=V_4$$

$$\frac{V_3}{V_4} = \frac{V_2}{V_1} = \xi \dots\dots\dots(02)$$

$W_{\text{cycle}} = \oint Tds =$ la surface de l’air 12345

$$\eta_{o} = \frac{\int_1^2 Tds + \int_2^3 Tds + \int_3^4 Tds + \int_4^1 Tds}{\int_2^3 Tds}$$

$$\eta_{o} = \frac{0 + \int_2^3 Tds + 0 + \int_4^1 Tds}{\int_2^3 Tds}$$

$$\eta_{o} = 1 - \frac{\int_1^3 Tds}{\int_2^3 Tds} \dots\dots\dots(03)$$

Avec :

$$Tds = C_v dT + pdV = C_p dT - Vdp$$

On supposant que C_v et C_p sont constants.

$$\eta_{o} = 1 - \frac{\int_1^4 Tds}{\int_2^3 Tds} = 1 - \frac{[\int_1^4 C_v dT + \int_1^4 pdV]}{[\int_2^3 C_v dT + \int_2^3 pdV]} = 1 - \frac{[\int_1^4 C_v dT + 0]}{[\int_2^3 C_v dT + 0]}$$

$$= \frac{1 - (T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)}$$

$$\eta_{o\text{ Otto}} = 1 - \frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right)}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right)}$$

En suppose que la charge est un gaz parfait :

$$P_1 V_1 = RT_1 \dots\dots(01)$$

$$P_2 V_2 = RT_2 \dots\dots(02)$$

$$P_3 V_3 = RT_3 \dots\dots(03)$$

$$P_4 V_4 = RT_4 \dots\dots(04)$$

$$\frac{(4)}{(1)} = \frac{T_4}{T_1} = \frac{P_4}{P_1} \quad ; \quad \frac{(3)}{(2)} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2}$$

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma ; \quad P_4 V_4^\gamma = P_3 V_3^\gamma \rightarrow \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{\left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)} = 1$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma \frac{V_2}{V_1} = \xi^{\gamma-1}$$

Ainsi, le rendement du cycle Otto est fonction du taux de compression et de γ :

$$\eta_{o\text{ Otto}} = 1 - \frac{1}{\xi^{\gamma-1}} \dots\dots\dots(04)$$

2.2.1.2 Rendement théorique de cycle Diesel :

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

[02]

$$\eta_{\text{Diesel}} = \frac{\text{Travail du cycle}}{\text{Chaleur de combustion}} = \frac{W}{Q_c} = \frac{\oint T ds}{Q_c}$$

Avec :

$$S_1=S_2 \quad ; \quad S_3=S_4 \quad ; \quad P_2=P_3 \quad ; \quad V_1=V_4$$

$$\frac{V_3}{V_2} = \alpha \dots\dots\dots(05)$$

$W_{\text{cycle}} = \oint TdS =$ La surface de l'air 12345

$$\eta_{\text{Diesel}} = \frac{\int_1^2 TdS + \int_2^3 TdS + \int_3^4 TdS + \int_4^1 TdS}{\int_2^3 TdS} \dots\dots\dots(06)$$

$$\eta_{\text{Diesel}} = \frac{0 + \int_2^3 TdS + 0 + \int_4^1 TdS}{\int_2^3 TdS}$$

$$\eta_{\text{Diesel}} = 1 - \frac{\int_1^4 TdS}{\int_2^3 TdS} \dots\dots\dots(07)$$

$$\eta_{\text{Diesel}} = 1 - \frac{\int_1^4 TdS}{\int_2^3 TdS} = 1 - \frac{[\int_1^4 C_v dT + \int_1^4 PdV]}{[\int_2^3 C_p dT - \int_2^3 VdP]} = 1 - \frac{[\int_1^4 C_v dT + 0]}{[\int_2^3 C_p dT - 0]} = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_p(T_3 - T_2)}$$

$$\eta_{\text{Diesel}} = 1 - \frac{\left(\frac{T_4}{T_1} - 1\right)}{\gamma \frac{T_2}{T_1} \left(\frac{T_3}{T_2} - 1\right)} \dots\dots\dots(08)$$

En supposant que la charge est un gaz parfait.

$$P_1 V_1 = RT_1 \dots\dots(01)$$

$$P_2 V_2 = RT_2 \dots\dots(02)$$

$$P_3 V_3 = RT_3 \dots\dots(03)$$

$$P_4 V_4 = RT_4 \dots\dots(04)$$

$$\frac{(4)}{(1)} = \frac{T_4}{T_1} = \frac{P_4}{P_1}$$

$$\frac{(3)}{(2)} = \frac{T_3}{T_2} = \frac{V_3}{V_2} = \alpha$$

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma, P_4 V_4^\gamma = P_3 V_3^\gamma$$

$$\frac{T_4}{T_1} = \frac{P_4}{P_1} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^\gamma = \alpha^\gamma$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{P_1 V_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^\gamma$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \xi^{\gamma-1}$$

Ainsi, le rendement du cycle Diesel est fonction du taux de compression ξ de γ et du taux d'introduction α .

$$\eta_{\text{Diesel}} = 1 - \left(\frac{\alpha - 1}{\xi^{\gamma-1}(\alpha^\gamma - 1)}\right) \dots\dots\dots(09)$$

2.2.2 Rendement réel :

2.2.2.1 Rendement mécanique :

Le rendement mécanique est le rapport entre la puissance effective et la puissance indiquée. [02]

$$\eta_{\text{mec}} = \frac{Pe}{Pi} \dots\dots\dots(10)$$

On peut écrire :

$$\eta_{\text{mec}} = \frac{Pi - P_{\text{mec}}}{Pi} \dots\dots\dots(11)$$

$$\eta_{\text{mec}} = 1 - \frac{P_{\text{mec}}}{Pi} \dots\dots\dots(12)$$

2.2.2.2 Rendement indiqué :

C'est le rapport du travail indiqué fourni sur la quantité de chaleur dégagée par combustion pour réaliser ce travail. Pour une durée de travail égale à une heure on peut calculer le rendement indiqué par la relation suivante : [02]

$$\eta_i = \frac{W_i}{\text{PCI} \cdot mf} \dots\dots\dots(13)$$

mf : est la quantité de carburant en Kg

Wi : est le travail indiqué en Kj

PCI : est le pouvoir calorifique du carburant (Kj/Kg)

On peut calculer le rendement indiqué à partir du débit de carburant et de la puissance indiquée à partir de la relation :

$$\eta_i = \frac{P_i}{PCI.B} \dots\dots\dots(14)$$

B : est le débit de carburant en Kg/h.

Le rendement indiqué représente la somme des pertes thermiques à travers les chemises, la tête du piston et la culasse en plus de la chaleur évacuée par les organes d'échappement et les pertes dues à une combustion incomplète et au refroidissement.

2.2.2.3 Rendement effectif :

Le rendement effectif est aussi appelé rendement global. Il sert surtout à comparer les différents moteurs. Par analogie au rendement indiqué on peut calculer le rendement effectif par la relation : [02]

$$\eta_e = \frac{W_e}{PCI.mf} \dots\dots\dots(15)$$

On peut aussi calculer le rendement effectif à partir du débit de carburant et de la puissance indiquée à partir de la relation :

$$\eta_e = \frac{P_e}{PCI.B} \cdot 3600 \dots\dots\dots(16)$$

$$\eta_e = \frac{\eta_i \cdot P_i}{PCI.B} \cdot 3600 \dots\dots\dots(17)$$

$$\eta_e = \eta_m \cdot \eta_i \dots\dots\dots(18)$$

Compte tenu de la dernière expression l'amélioration du rendement global du moteur implique l'augmentation du rendement thermique et du rendement indiqué. Ceci tend à diminuer les frottements, les chocs et vibration et réduire le travail absorbé pour l'entraînement des organes annexes.

Calcul thermodynamique :

Pour faire l'étude énergétique on prend un moteur Caterpillar à 4 temps avec les caractéristiques :

Modèle : 3126B

Type d'injection : Injection directe type Heui



Figure 2.8 Moteur Caterpillar à étudier

Le moteur 3126 comporte 6 cylindres en ligne de 7.25 L de cylindrée. Il s'agit d'un moteur à injection directe électronique de type HEUI.

Ce moteur contient 3 soupapes par cylindre, dont deux d'admission avec pontets

- 1). Tube d'admission. 2). Collecteur d'admission. 3). Sortie d'échappement.
- 4). Collecteur d'échappement. 5). Turbine. 6). Compresseur. 7). Filtre à air.
- 8). Echangeur.

Pour augmenter le rendement du moteur et répondre aux normes de pollution de plus en plus sévères, toutes les applications reçoivent un refroidisseur d'admission refroidi par air.

Air To Air After Cooler.

En sortant du turbo, la température de l'air d'admission atteint environ 160°C, l'aftercooler "ATAAC" abaisse la température à environ 43°C.

En fonctionnement normal, la température ne doit pas excéder 65°C.

Le module "ECM" du moteur prend en compte la température de l'air d'admission.

Alésage : 110mm

Course : 127 mm

Cylindrée unitaire : 1.2 L

Cylindrée totale : 7.2 L

Notre étude est concerner de calculer quelques paramètres relatifs à ce moteur :

Calcul de travail indiqué :

$$W_i = C_2 \pi n \quad n=2 \text{ car c'est un moteur à 4 temps}$$

Donc :

$$W_i = 929.2 \pi \cdot 2$$

$$W_i = 11674.15 \text{ J}$$

$$W_i = 11.674 \text{ kJ}$$

Calcul de la puissance indiquée :

$$P_i = \frac{W_i}{\Delta t} \quad \text{où} \quad \Delta t = \frac{60n}{N}$$

$$P_i = \frac{W_i \cdot N}{60n} = \frac{11674.15 \cdot 1600}{60 \cdot 2}$$

$$P_i = 155655.33 \text{ w}$$

$$P_i = 155.655 \text{ kw}$$

Calcul de la puissance effective :

$$\eta_{\text{mec}} = \frac{P_e}{P_i} \quad \text{où :} \quad \eta_{\text{mec}} = 0.8 = 80\%$$

$$P_e = \eta_{\text{mec}} * P_i$$

$$P_e = 0.8 * 155655.33$$

$$P_e = 124524.264 \text{ w}$$

$$P_e = 124.524 \text{ kw}$$

Calcul de travail effectif :

$$\eta_m = \frac{We}{Wi}$$

$$We = \eta_{mec} * Wi$$

$$We = 0.8 * 11674.15$$

$$We = 9339.32 \text{ w}$$

Le rendement indiqué :

$$\eta_i = \frac{Wi}{PCI.Wf}$$

$$\eta_i = \frac{11674.15}{42000000} = 0.28$$

$$\eta_i = 28\%$$

La puissance calorifique théorique :

$$\eta_i = \frac{Pi}{P_{ca thé}}$$

$$P_{calthéo} = \frac{Pi}{\eta_i}$$

$$P_{calthéo} = \frac{155655.33}{0.28}$$

$$P_{calthéo} = 555911.8929 \text{ w}$$

Calcul de la quantité de chaleur :

$$\eta_i = \frac{Wi}{Q_{cath}}$$

$$Q_{ca thé} = \frac{Wi}{\eta_i} = \frac{11674.15}{0.28}$$

$$Q_{ca thé} = 41693.39 \text{ J/ cycle}$$

Calcul de rendement effectif :

$$\eta_e = \frac{Wef}{Q} = \frac{9339.32}{41693.39} = 0.22$$

$$\eta_e = 22\%$$

Calcul de la masse brûlée par cycle ::

$$Q_{cathé} = m_{car} . PCI$$

$$m_{\text{car}} = \frac{Q_{\text{cal}}}{\text{PCI}}$$

$$m_{\text{car}} = \frac{41693.39}{42000000} = 0.00099 \text{ kg}$$

$$m_{\text{car}} = 9.9 \cdot 10^{-4} \text{ Kg}$$

Débit de masse de carburant :

$$P_{\text{cath}} = a_{\text{mess}} * \text{PCI} \rightarrow a_{\text{mess}} = \frac{P_{\text{cath}}}{\text{PCI}}$$

$$a_{\text{mess}} = \frac{324282.10}{42000000} = 0.00772 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$a_{\text{mess}} = 7.72 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$$

Chapitre 3

**ETUDE CINEMATIQUE ET
DYNAMIQUE (ETUDE D'UN
SYSTEME BIELLE MANIVELLE)**

CHAPITRE 03 : ETUDE CINEMATIQUE ET DYNAMIQUE (ETUDE D'UN SYSTEME BIELLE-MANIVELLE)

3.1 Introduction :

Quelque soit le moteur à étudier, on remarque de nombreux groupes d'organes assurant des fonctions identiques, il est donc possible de faire une étude de la construction en groupant les organes d'après leur fonction.

Notre étude est réservée uniquement aux organes mobiles (piston, bielle-manivelle). [03]

3.2 Définition d'un système bielle-manivelle :

Le système bielle-manivelle est un système mécanique qui tire son nom des deux pièces mécaniques qui le caractérisent : la bielle et la manivelle. Ce dispositif réalise la transformation du mouvement linéaire alternatif de l'extrémité de la bielle en un mouvement de rotation continu disponible sur la manivelle (vilebrequin).

L'étude cinématique de l'embellage est nécessaire pour déterminer la relation entre le déplacement du piston, sa vitesse et son accélération en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin(θ).

La manivelle est représentée par son rayon (R) est par sa longueur (L), la bielle est liée à l'une de ses extrémités à la manivelle par l'articulation et liée à l'autre extrémité au piston par l'axe du piston. [07]

Notions, conventions :

ω : Vitesse du vilebrequin en radian/seconde ;

$$\omega = 2\pi N / 60 ;$$

N : Vitesse du vilebrequin en tour/minute ;

θ : ωt , t : temps \rightarrow Angle de vilebrequin ;

$OB=R$: Rayon du maneton du vilebrequin ;

$\lambda = \frac{R}{L}$: Le rapport bielle/rayon manivelle

H est la projection du point B sur l'axe (OX)

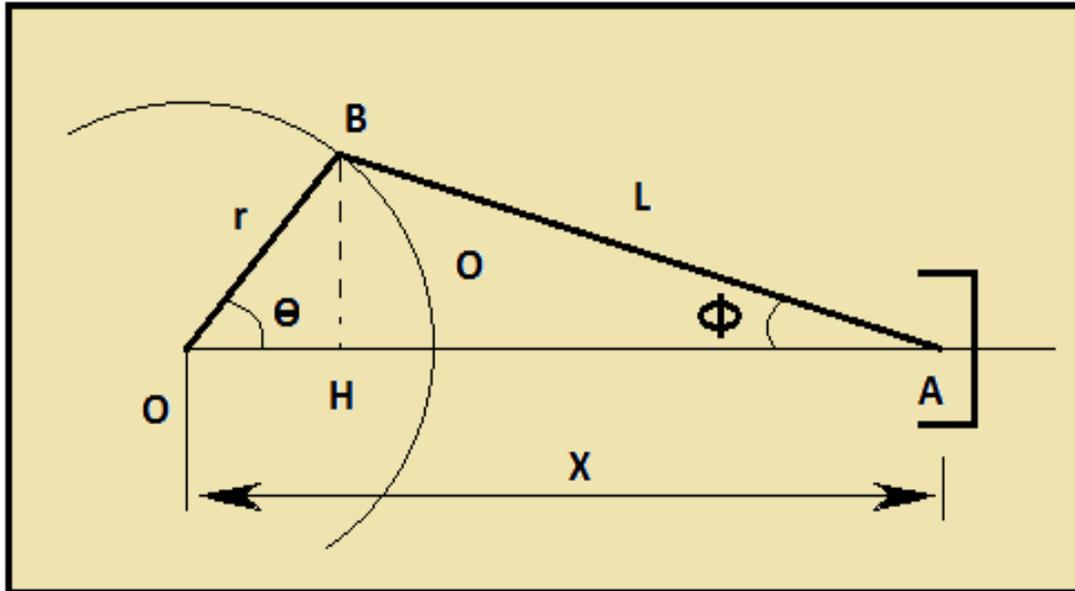


Figure 3.1 : Système bielle-manivelle

3.2.1 Déplacement du piston :

La relation vectorielle :

$$OA = OB + BA ;$$

Par projection sur l'axe (OX) :

$$OA = R \cdot \cos \theta + L \cdot \cos \varphi$$

$$BH = R \cdot \sin \theta = L \cdot \sin \varphi$$

Et donc :

$$\sin \varphi = \left(\frac{R}{L}\right) \cdot \sin \theta = \lambda \cdot \sqrt{1 - \lambda^2 \cos^2 \theta} \dots\dots\dots(19)$$

L'elongation du piston pour expression :

$$X = R \cdot \cos \theta + L \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \theta} \dots\dots\dots(20)$$

3.2.2 Vitesse du piston :

La vitesse du piston est calculée en dérivant par rapport au temps le déplacement du point « A ». Afin de présenter des relations simplifiées, un développement limité au 4^{ème} terme est effectué.

$$\sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2 \theta} = 1 - \frac{1}{2} \lambda^2 \cdot \sin^2 \theta - \frac{1}{8} \lambda^4 \cdot \sin^4 \theta + \dots\dots\dots(21)$$

Le développement limité est arrêté à l'ordre 4, en effet si $\lambda=0.25$, alors $\lambda^4 = 1/1256$ et $\frac{1}{8} \cdot \lambda^2 \cdot \sin^4$ inférieur à 1/2000. Alors l'élongation X du piston A s'écrit :

$$X = R \cdot \cos\theta + L \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \lambda^2 \cdot \sin\theta - \frac{1}{8} \lambda^4 \sin^4 \theta\right) \dots \dots \dots (22)$$

On concédera deux triangles : ABH et OBH

$$\left\{ \begin{array}{l} \sin \varphi = \frac{BH}{L} \\ \sin \theta = \frac{BH}{R} \end{array} \right. ; \frac{\sin \varphi}{\sin \theta} = \frac{BH}{L} \cdot \frac{R}{BH} = \frac{R}{L} = \lambda$$

3.2.2 Le vilebrequin : [09]

OB R.cos θ

R.sin θ

Le vecteur vitesse :

$$V_B = \frac{dOB}{dt} = \begin{cases} -R \cdot \theta' \cdot \sin\theta \\ R \cdot \theta' \cdot \cos\theta \end{cases}$$

Accélération du piston :

L'accélération du piston est calculée en dérivant la vitesse du piston par rapport au temps :

$$A \left\{ -R\theta'' \cos\theta - L\varphi'' \cos\varphi \right.$$

Ou bien

$$A = \frac{d^2x}{dt^2} = - \omega^2 R (\cos\theta + \lambda \cos(2\theta)) \dots \dots \dots (24)$$

Accélération du vilebrequin :

$$\gamma_B = \begin{cases} -R\theta'' \cos \theta \\ -R\theta'' \sin \theta \end{cases}$$

Volume du cylindre en fonction de l'angle du vilebrequin :

Le volume de cylindre a pour expression :

$$V = V_m + (L + R - X) S_p \dots\dots\dots(25)$$

S_p : Section du cylindre ;

V_m : volume mort ;

Il s'écrit encore :

$$V = V_m + R \cdot ((1 - \cos\theta) + (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \cdot \sin^2\theta})) \cdot S_p \dots\dots\dots(26)$$

Soit :

$$V(\theta) = V_m + C_y \cdot f(\theta) \dots\dots\dots(27)$$

3.2.3 Détermination graphique des vitesses et accélérations du système bielle-manivelle :

On applique à chacun des solides le théorème de l'équiprojectivité des vitesses. La vitesse de rotation du vilebrequin est ω , la vitesse du point B : $V_B = \omega \cdot R$

Se Project sur AB en $V_{(B/AB)}$. Au point A, La projection sur AB de la vitesse du piston $V_{(A)}$ selon l'axe OX et égale à $V_{(A/AB)}$.

$$V_{(A/AB)} = V_{(B/AB)}$$

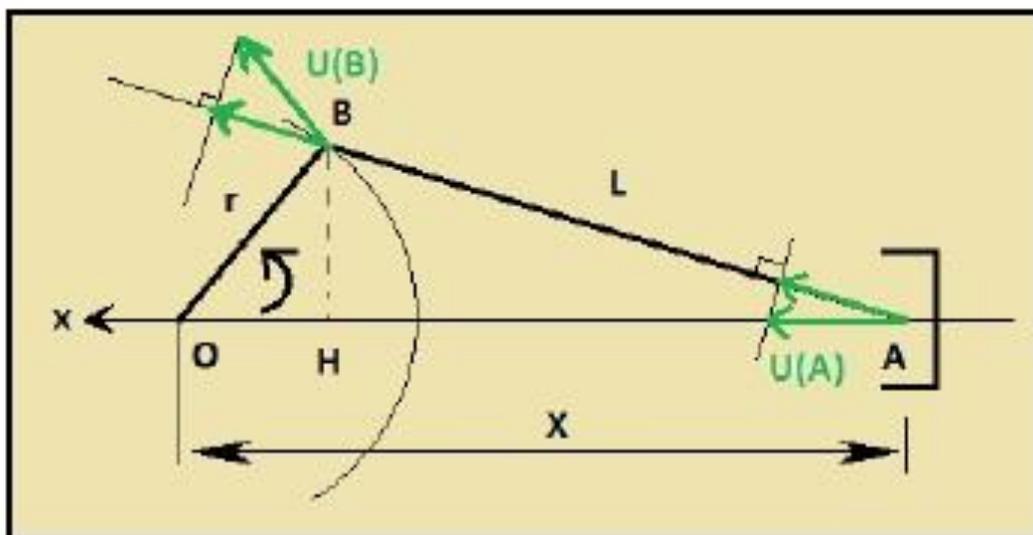


Figure 3.2 La projection des vitesses (A et B) sur AB

ω	83.73	Rad/s
R	38	mm
L	150	mm

Tableau 3.1 Cinématique de système bielle
Manivelle $\lambda=0.25$

θ (deg)	θ (rad)	V (Bx)	V (By)	V (B)	γ (Bx)	γ (By)	γ (B)	V (Ax)	γ (A)	cos (θ)	sin (θ)	φ'	φ''
0	0	0	3181,7	3181,74	-266407,1	0	266407,09	0	-333008,9	1	0	20,933	0
15	0,262	-823,495	3073,3	3181,74	-257329,5	-68951,229	266407,09	-1020,149	-315008,3	0,966	0,259	20,262	-427,96
30	0,524	-1590,87	2755,5	3181,74	-230715,3	-133203,545	266407,09	-1933,458	-264016,2	0,866	0,5	18,271	-841,206
45	0,785	-2249,83	2249,8	3181,74	-188378,3	-188378,26	266407,09	-2648,594	-188378,3	0,707	0,707	15,038	-1218,543
60	1,047	-2755,468	1590,9	3181,74	-133203,5	-230715,308	266407,09	-3103,627	-99902,7	0,5	0,866	10,721	-1529,253
75	1,309	-3073,325	823,5	3181,74	-68951,2	-257329,489	266407,09	-3275,552	-11272,4	0,259	0,966	5,583	-1736,831
90	1,571	-3181,74	0	3181,74	0	-266407,09	266407,09	-3181,74	66601,8	0	1	0	-1810,158
105	1,833	-3073,325	-823,5	3181,74	68951,2	-257329,489	266407,09	-2871,098	126630,1	-0,259	0,966	-5,583	-1736,831
120	2,094	-2755,468	-1590,9	3181,74	133203,5	-230715,308	266407,09	-2407,308	166504,4	-0,5	0,866	-10,721	-1529,253
135	2,356	-2249,83	-2249,8	3181,74	188378,3	-188378,26	266407,09	-1851,065	188378,3	-0,707	0,707	-15,038	-1218,543
150	2,618	-1590,87	-2755,5	3181,74	230751,3	-133203,545	266407,09	-1248,282	197414,4	-0,866	0,5	-18,271	-841,206
165	2,88	-823,495	-3073,3	3181,74	257329,5	-68951,229	266407,09	-626,841	199650,7	-0,966	0,259	-20,262	-427,96
180	3,142	0	-3181,7	3181,74	266407,1	-3,26E-11	266407,09	0	199805,3	-1	0	-20,933	0
195	3,403	823,495	-3073,3	3181,74	257329,5	68951,229	266407,09	626,841	199650,7	-0,966	-0,259	-20,262	427,96
210	3,665	1590,87	-2755,5	3181,74	230715,3	133203,545	266407,09	1248,282	197414,4	-0,866	-0,5	-18,271	841,206
225	3,927	2249,83	-2249,8	3181,74	188378,3	188378,26	266407,09	1851,065	188378,3	-0,707	-0,707	-15,038	1218,543
240	4,189	2755,468	-1590,9	3181,74	133203,5	230715,308	266407,09	2407,308	166504,4	-0,5	-0,866	-10,721	1529,253
255	4,451	3073,325	-823,5	3181,74	68951,2	257329,489	266407,09	2871,098	126630,1	-0,259	-0,966	-5,583	1736,831
270	4,712	3181,74	0	3181,74	0	266407,09	266407,09	3181,74	66601,8	0	-1	0	1810,158
285	4,974	3073,325	823,5	3181,74	-68951,2	257329,489	266407,09	3275,552	-11272,4	0,259	-0,966	5,583	1736,831
300	5,236	2755,468	1590,9	3181,74	-133203,5	230715,308	266407,09	3103,627	-99902,7	0,5	-0,866	10,721	1529,253
315	5,498	2249,83	2249,8	3181,74	-188378,3	188378,26	266407,09	2648,594	-188378,3	0,707	-0,707	15,038	1218,543
330	5,76	1590,87	2755,5	3181,74	-230715,3	133203,545	266407,09	1933,458	-264016,2	0,866	-0,5	18,271	841,206
345	6,021	823,495	3073,3	3181,74	-257329,5	68951,229	266407,09	1020,149	-315008,3	0,966	-0,259	20,262	427,96
360	6,283	0	3181,7	3181,74	-266407,1	6,53E-11	266407,09	0	-333008,9	1	0	20,933	0

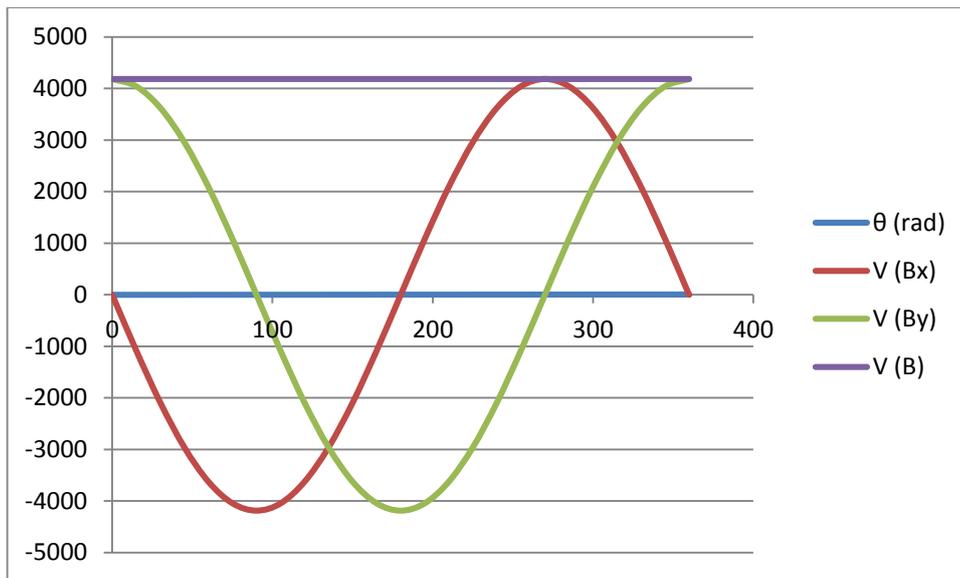


Figure 3.3 Vitesse du point B ; r=38mm.

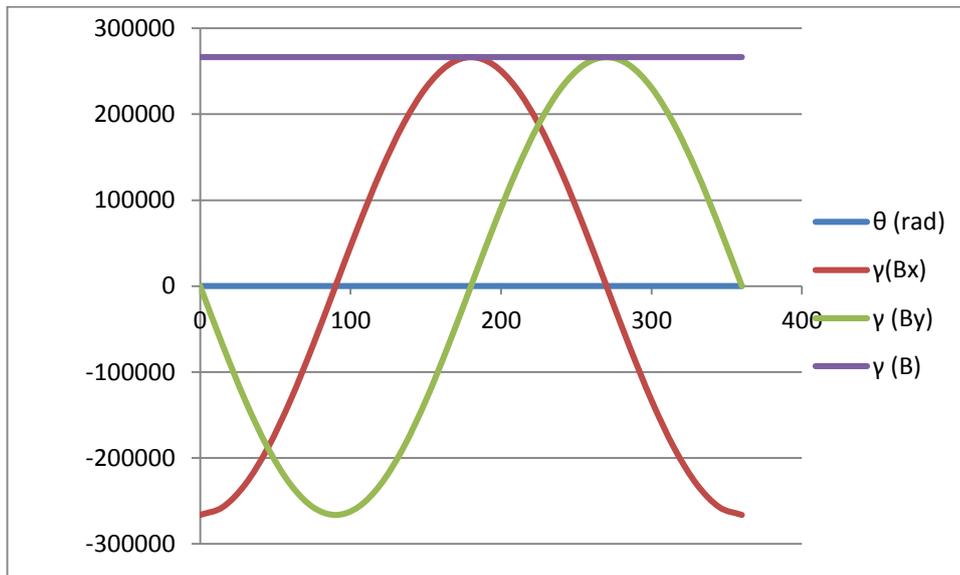


Figure 3.4 Accélération du point B ; r= 38mm.

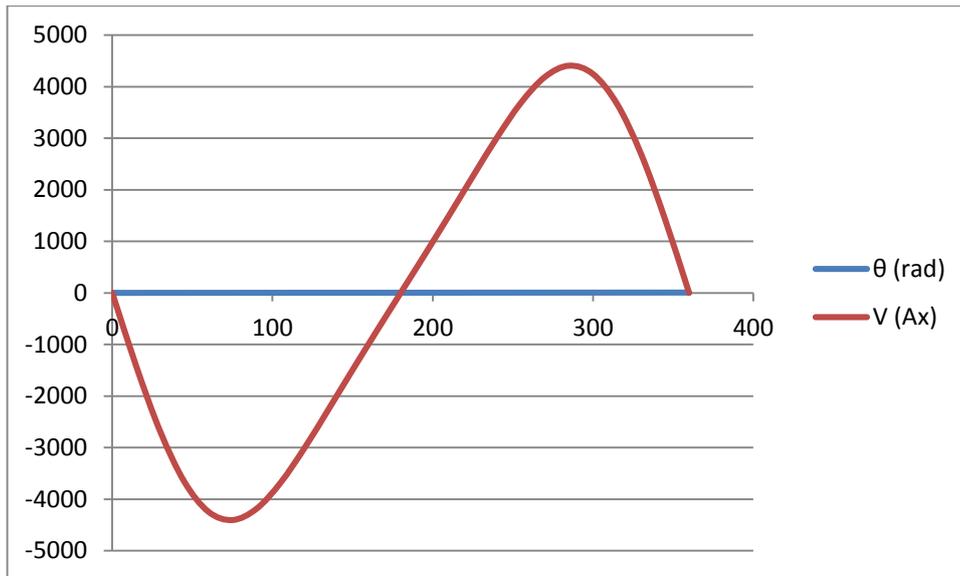


Figure 3.5 Vitesse du piston ; $r=38mm$.

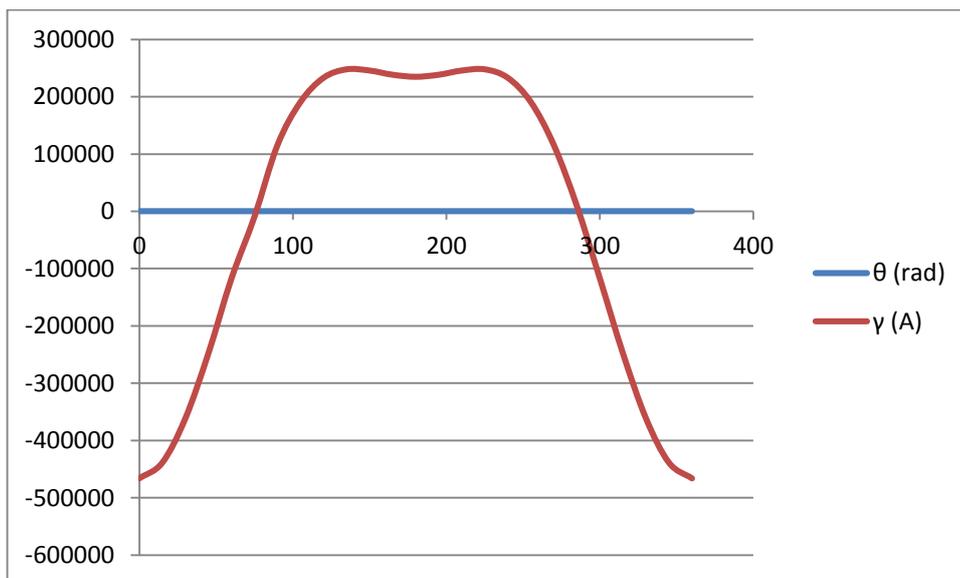


Figure3. 6 Accélération du piston ; $r=38mm$.

ETUDE DYNAMIQUE (EQUILIBRAGE D'UN SYSTEME BIELLE-MANIVELLE)

3.3 Introduction :

Les forces et les moments variables qui agissent sur le mécanisme bielle-manivelle du moteur provoquent des vibrations dans les différentes parties du moteur. La suppression partielle ou totale de l'influence de ces forces et ces moments qui sont l'équilibrage du moteur est un problème délicat.[03]

Un moteur est considéré équilibré si pour une vitesse de rotation constante de vilebrequin les forces et les moments qui agissent sur les paliers sont constantes.

Ces forces et moments sont : [03]

- Les forces centrifuges d'inertie \mathbf{P}_{cb} ;
- Les forces d'inertie \mathbf{P}_j ;
- Les moments \mathbf{M}_{cb} et \mathbf{M}_j dus aux forces \mathbf{P}_{cb} et \mathbf{P}_j dans le cas d'un moteur à plusieurs cylindres ;
- Le couple moteur instantané C_i et le moment de réaction dans les paliers.

L'analyse dynamique du mécanisme bielle-manivelle montre qu'un équilibrage complet du moteur peut être atteint en considérant simplement les forces d'inertie centrifuge \mathbf{P}_{cb} et leurs moments \mathbf{M}_{cb} .

Les forces d'inertie \mathbf{P}_j et leurs moments \mathbf{M}_j peuvent être partiellement ou totalement équilibrés en fonction de la construction du moteur.

3.4 Equilibrage du moteur :

Si vous prenez un moteur à un cylindre et vous le faites tourner rapidement sans aucune attention spéciale à l'équilibrage, le vilebrequin sera toujours appuyé sur la même surface au niveau des tourillons. Maintenant, prenons un autre vilebrequin, ce dernier peut être considéré comme étant balancé lorsqu'il est à l'arrêt.

Toutefois, en le faisant tourner sur lui-même très rapidement il agira comme deux vilebrequins. On se retrouvera avec le tourillon de gauche appuyant toujours sur la même surface, la droite sur une autre surface située à l'opposé. Qu'arrive-t-il au tourillon du centre ?

En théorie, il ne participera pas. Se fait n'est pas souhaitable du point de vue de l'effort sur le vilebrequin. [04]

Ce qu'on souhaite idéalement en balançant une pièce et qu'elle n'est pas tendance à toujours s'appuyer du même côté des coussinets, mais qu'elle soit flottante au centre, s'appuyant parfois d'un côté puis de l'autre en fonction de la charge et du mouvement des masses alternatives.

Je comprends que ce n'est pas simple à comprendre à la seule lecture, il faut assurément faire un effort pour en avoir une image claire.

Un moteur comprend des pièces qui tournent sur elles même (masses tournantes) et des pièces qui ont un mouvement alternatif (masses alternatives) tel que les pistons.

3.4.1 Equilibrage des pistons et des bielles :

Les ensembles piston bielle doivent être balancés ensemble, et ici, il faut bien comprendre que nous avons en jeu des masses tournantes ainsi que des masses alternatives. [09]

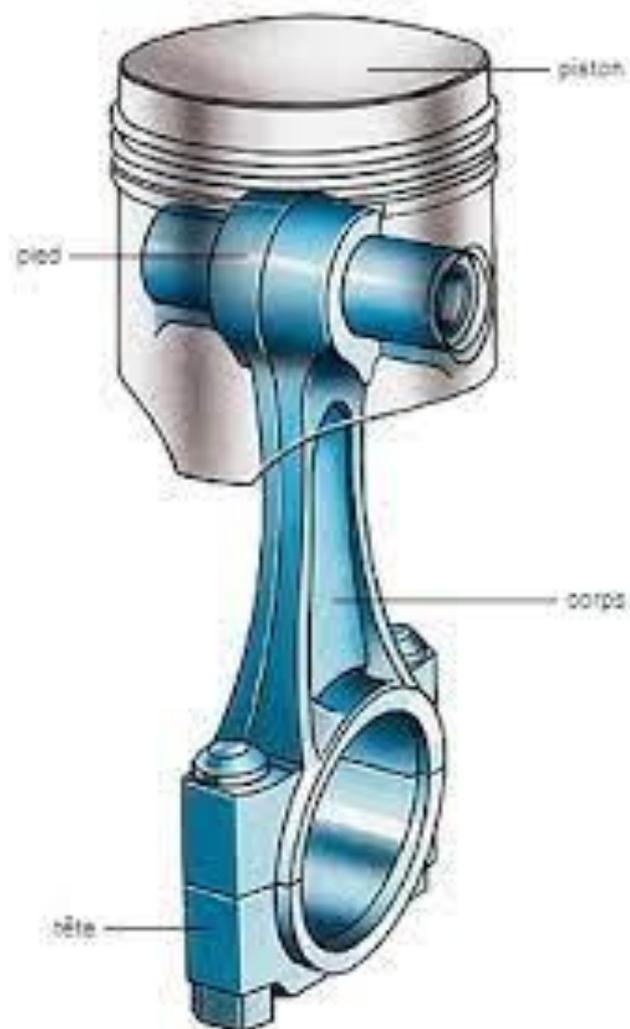


Figure 3.7 L'ensemble bielle piston

On considère donc la bielle comme un élément qui a un effet double. Possédant une masse tournante et aussi une masse alternative. La figure montre clairement la distribution de la masse de la bielle entre la masse tournante et la masse alternative.

Idéalement, dans votre moteur, toutes les bielles auraient la même masse tournante. Pour atteindre ce but, il faut peser la masse tournante de chacune des bielles en retenant avec soin et constance le bout de la masse alternative. On peut utiliser l'axe de piston comme appui. Utilisez normalement une petite balance électronique de précision. Puis installez une petite lame de métal dans la séparation de la bielle. La plus légère devient la référence, il faut ensuite enlever du matériel sur les bielles plus lourdes à des endroits sécuritaires et sans influencer autant que possible la masse alternative. À la fin toutes les bielles auront la même masse tournante.

Ensuite, il faut balancer la partie alternative. Ici, c'est à la fois simple et compliqué. La masse totale alternative inclut la masse du piston, des segments, de l'axe de piston et évidemment la masse alternative de la bielle.

Du fait que toutes les bielles ont le même poids pour ce qui est de la masse tournante, on peut donc prendre le poids total piston, axe, segments, bielle, puis ajuster le poids total en enlevant tout simplement du poids sur les pistons. Toutefois, c'est la différence et importante, vous serez obligé d'enlever du matériel directement sur la bielle, mais vous constaterez que votre travail risque d'influencer le travail que vous avez fait sur la masse tournante des bielles.

3.4.2 Équilibrage du vilebrequin :

L'équilibrage du vilebrequin se divise en deux : segments bien différents, soit le segment où on peut changer quelque chose, puis le segment où on a peu d'action.

Le segment où on n'a aucun pouvoir est l'équilibrage interne au vilebrequin qui est fonction de la conception elle-même du vilebrequin. La conception du vilebrequin peut avoir prévu des contre poids sur le vilebrequin pour contrer la masse rotative et alternative de l'ensemble piston-bielle, et aussi pour balancer le poids des manetons. Lorsqu'on fait équilibrer un vilebrequin, personne n'ajuste ce poids. Sur un vilebrequin modifié avec coupe des bordures, on influence négativement cet équilibrage interne du vilebrequin. Lorsqu'on fait balancer un vilebrequin, l'opération ajuste le poids du vilebrequin afin de diminuer la vibration de votre moteur dans son ensemble, mais n'a pas au peu d'effet sur les contraintes internes du vilebrequin. [07]

Comme nous avons vu dans l'ensemble piston-bielle possède une masse rotative et une masse alternative. La masse rotative peut être considérée comme fixée sur le vilebrequin, et s'ajoute à la

masse du maneton. La masse alternative quant à elle provoque parfois de la position du vilebrequin dans son cycle. Les systèmes d'équations qui décrivent les efforts résultants de la masse alternative sont très complexes et dépassent le niveau de ce manuel, mais il est généralement considéré que la masse du contre poids devrait comprendre 100% de la masse du maneton et de son attachement, 100% de la masse rotative de l'ensemble piston-bielle, puis 50% de la masse alternative de l'ensemble piston-bielle le 50% étant pour une bielle de longueur infinie.

Vous aux recommandations de votre centre d'usinage.

Dans tous les cas, l'équilibrage du vilebrequin tel qu'il est fait par les centres de reconditionnement de vilebrequin offre une paix d'esprit additionnelle sur les vibrations globales, le cout relativement faible de l'opération en fait incontournable. [07]

3-5- Système bielle manivelle soumis aux forces de pression :

3-5-1-Equilibre du piston isolé :

Le piston est soumis aux forces de pression de réaction du cylindre $R(\text{cy/p})$ et de réaction de la bielle $R(\text{B/P})$.

Vectoriellement la somme de toutes ces forces doit être nulle, en l'absence de frottement mécanique, graphiquement, les directions des forces tracées doivent être concourantes et le dynamisme de ces forces doit être fermé. [07]

$$F + R(\text{B/P}) + R(\text{cy/p}) = 0$$

Qui s'écrit en projection sur l'axe OX =

$$R(\text{B/P}) \cos\phi - Sp(p - p_a) = 0$$

$$Sp = \frac{\pi d^2}{4}$$

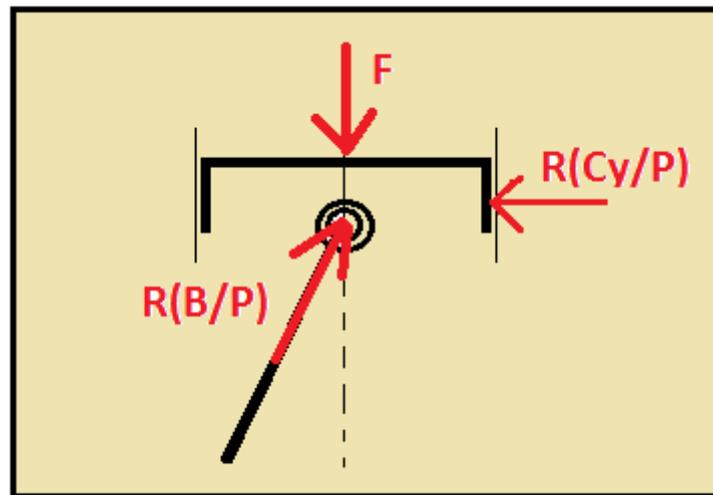


Figure 3.8 Equilibre du piston

3-5-2- Equilibre de la bielle :

La bielle est soumise à deux forces = les réactions du piston et du vilebrequin aux deux extrémités. Pour que cette bielle soit en équilibre, il est nécessaire que la somme vectorielle de ces deux forces soit nulle c'est-à-dire que graphiquement elles aient le même support, qu'elles soient égales et opposées.

[03]

$$R(P/B) + R(V/B) = 0.$$

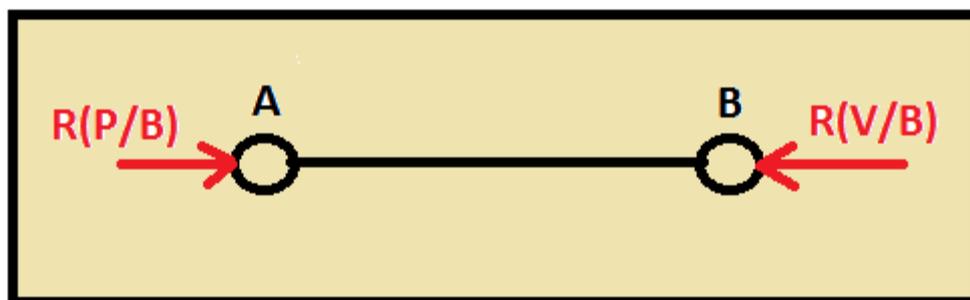


Figure 3.9 Equilibre de la bielle

3-5-3- Equilibre du vilebrequin :

Calcul du couple moteur :

Le maneton du vilebrequin est soumis à la réaction de la bielle dont l'intensité est de celle des forces de pression, et dont le support est celui de la direction de la bielle.

Le tourillon du vilebrequin est soumis à la réaction du bâti, qui peut être décomposé en deux composantes sur un système d'axes orthonormés. [09]

Le couple moteur par rapport à l'axe de rotation du vilebrequin a pour expression :

$$C_m = R(B/V) \cdot OH$$

$$\text{Or : } OH = R \cdot \sin(\theta + \phi)$$

Donc le couple moteur s'écrit=

$$C_m = (P - P_a) \cdot S_p \cdot r \cdot \sin(\theta + \phi) / \cos \phi$$

Calcul des réactions du bâti :

En projection sur les axes oy :

$$Y(Ba/V) + R(B/V) \cos \phi = 0$$

Et sur oz :

$$Z(BaV) + R(B/V) \cdot \sin \phi$$

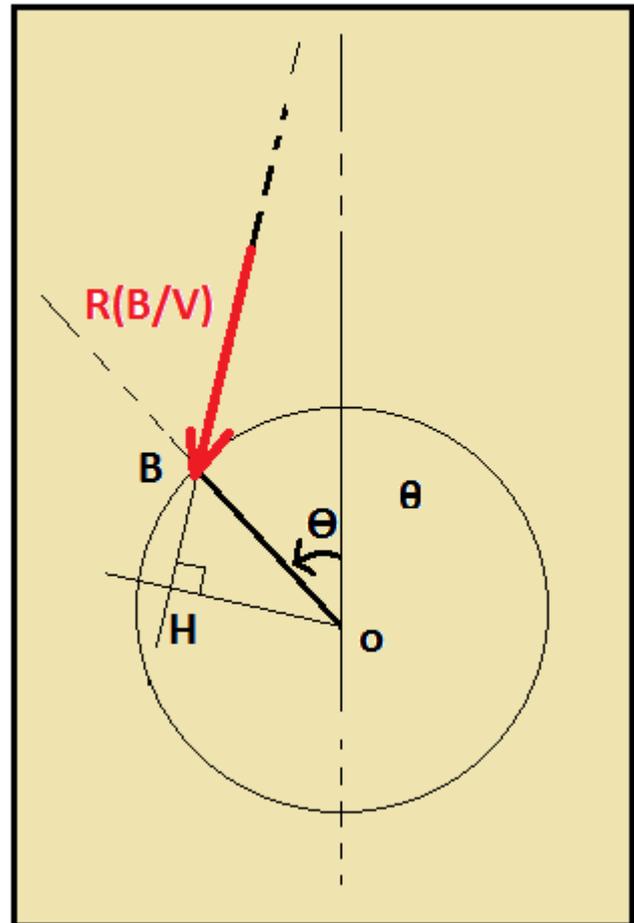


Figure 3.10 Equilibre de vilebrequin

3-6- Système bielle-manivelle et mouvement :

Dans l'étude des forces d'inertie on fait l'hypothèse que la pression dans le cylindre est égale à la pression atmosphérique. Une modélisation des différentes pièces en mouvement permet un calcul simplifié des forces d'inertie. [04]

Système bielle-manivelle réel et fictive

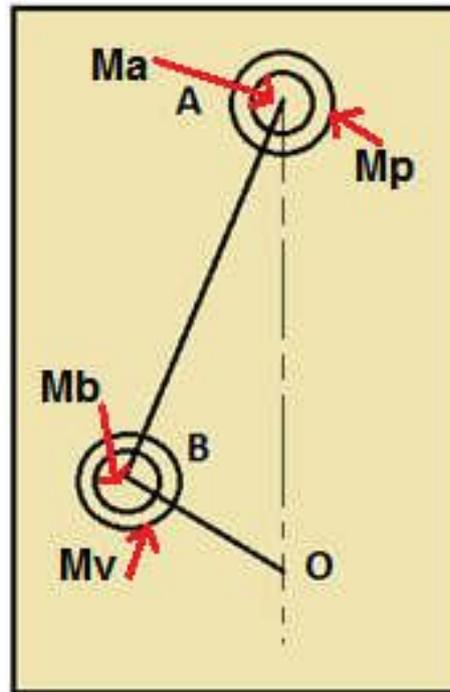


Figure 3.11 Système bielle-manivelle fictive

3-6-1-a- Bielle réelle et fictive :

La masse totale de la bielle est M , elle se décompose en deux masses M_a et M_b aux points A et B = pied et chapeau de la bielle. Telle que la position du centre de gravité est restée inchangée entre bielle réelle et fictive. Alors

Moment par rapport au centre de gravité de la masse M_a = moment par rapport au centre de gravité de la masse M_b , soit $M_a \cdot M_b = M_b \cdot L_b$, en moyenne $L_b = l/3$ et $l_a = 2l/3$. La relation ci-dessus s'écrit :

$$\frac{M_a}{M_b} = \frac{L_b}{L_a} = \frac{M_a + M_b}{L_a + L_b} = \frac{M}{L}$$

Et donc $M_a = M \cdot L_b / l$ et $M_b = M L_a / l$. En moyenne

$$M_a = M/3 \text{ et } M_b = 2M/3$$

La bielle réelle est donc remplacée par une bielle fictive constituée de deux masses M_a et M_b concentrées en A et B, le centre de gravité restant à la même place par rapport aux points A et B. [07]

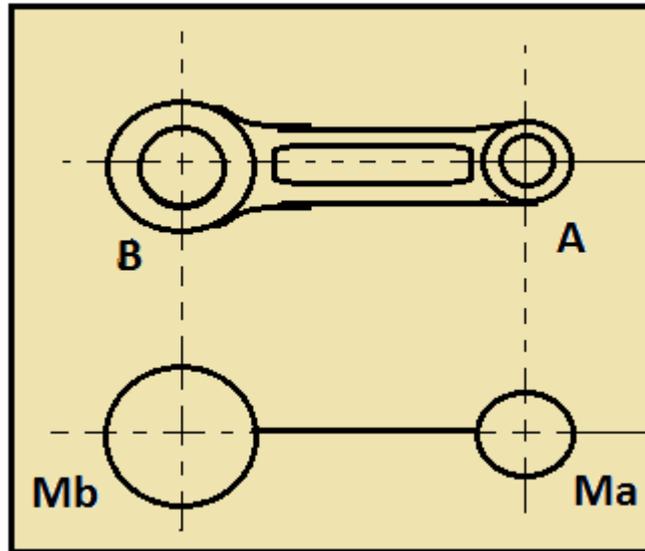


Figure 3.12 Bielle réelle et fictive

3-6-1-b- Vilebrequin fictif :

On effectue une opération analogue que sur le vilebrequin de façon à définir un vilebrequin fictif ayant le même centre de gravité que le vilebrequin réel. La masse M_m du vilebrequin est déplacée jusqu'au maneton B ou elle devient M_v , produisant les mêmes effets d'inertie par rapport au centre de rotation du vilebrequin, moment par rapport à 0 de la masse M_m : moment par rapport à 0 de la masse. [04]

$M_v = M_m \cdot OG = M_v \cdot R$. De cette relation on déduit

$$M_v = M_m \cdot OG/R$$

Par conséquent, il existe :

En A : deux masses : celle du piston M_p et celle de la bielle reportée en A soumise à l'accélération du point A.

En B : la masse du vilebrequin M_v et de la bielle reportée en B : $M_v + M_b$ soumise à l'accélération centrifuge.

On applique ici l'accélération fondamentale de la dynamique sous la forme :

$$\sum F_e = M \cdot \gamma$$

F_e = Force extérieure

Ou la forme équivalente

$$\sum \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_i = \mathbf{0}$$

F_i : Forces d'inertie : $(-\mathbf{M} \cdot \gamma \mathbf{A})$.

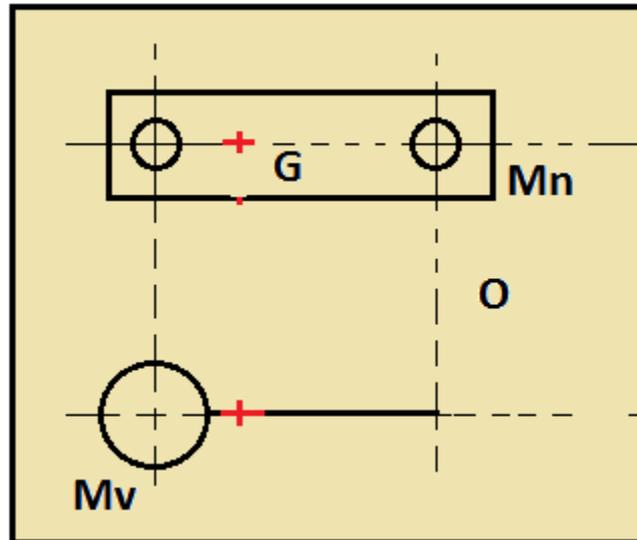


Figure 3.14 Vilebrequin fictif

Le piston est soumis aux forces extérieures : réaction du cylindre $\mathbf{R}(\mathbf{cy}/\mathbf{p})$ et réaction de la bielle $\mathbf{R}(\mathbf{B}/\mathbf{P})$ et à la force d'inertie alternative $(\mathbf{M}_a + \mathbf{M}_b) \cdot \gamma \mathbf{A}$

En projection sur OZ, on obtient :

$$\mathbf{R}(\mathbf{B}/\mathbf{P}) = (\mathbf{M}_a + \mathbf{M}_p) \cdot \gamma \mathbf{A} / \cos \theta$$

Equilibre de la bielle :

$$\mathbf{R}(\mathbf{P}/\mathbf{B}) + \mathbf{R}(\mathbf{V}/\mathbf{B}) = \mathbf{0}$$

Equilibre de vilebrequin :

Le vilebrequin est soumis à la réaction de la bielle $\mathbf{R}(\mathbf{R}/\mathbf{V})$, aux forces d'inertie rotatives et aux réactions du bâti $\mathbf{Z}(\mathbf{Ba}/\mathbf{V})$ et $\mathbf{Y}(\mathbf{Ba}/\mathbf{v})$ en projection sur les axes OZ et OY.

Couple du aux forces d'inertie

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{R}(\mathbf{B} + \mathbf{V}) \cdot \mathbf{OH}$$

Avec $\mathbf{OH} = \mathbf{R} \cdot \sin(\theta + \phi)$ d'où :

$$C_i = -(M_a + M_p) \cdot \gamma_A \cdot (R \cdot \sin(\theta + \phi)) / \cos \phi$$

Le couple total transmis par le vilebrequin a pour valeur :

$$C_t = C_p + C_i = R \cdot \sin(\theta + \phi) \cdot (S_p \cdot (P - P_a) - (M_a + M_p) \cdot \gamma_A) / \cos \phi$$

Calcul statique :

Calcule des différents efforts :

Les grandeurs géométriques du piston :

- La surface du piston :

$$S_p = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi (48)^2}{4} = 5671.625 \text{ mm}^2$$

On considère que la masse oscillante (du piston A) se compose des masses :

- La masse du pied de bielle $M_a = 0.262 \text{ Kg}$;
- La masse du piston équipé (piston+ segment+axe du piston) $M_p = 0.910 \text{ Kg}$
- La masse rotative M_{rot} (du point B) est composée des masses suivantes :
 - La masse de la tête de la bielle $M_b = 0.523 \text{ Kg}$;
 - La masse réduite des flagues (rayon) à de manivelle $M_v = 1.476 \text{ Kg}$;
 - De coussinets $M_{cous} = 0.04 \text{ Kg}$.

Donc la masse totale de l'ensemble est 2 Kg .

A-Force agissant sur le piston :

$$F_p = S_p \cdot P_{max} = 283581.25 \text{ N}$$

- La force oscillante :

$$F_{osc} = m_{osc} \cdot \gamma_A$$

Après un calcul, on constate le max des efforts se trouve à la position ($\theta = 240^\circ$), la valeur de $\gamma_A = 394352.6$.

- La force résultante :

$$F_{res} = F_p + F_{osc}$$

B- Force exercée sur la bielle :

$$F_b = F_{res} \cdot \cos\phi$$

Force rotative :

$$F_{rot} = m_{rot} \cdot \gamma_B$$

Force radiale :

$$F_R = F_{res} \cdot \sin\phi$$

Après chaque construction d'un système on doit vérifier les conditions de résistance.

On doit prendre les efforts importants. Après les calculs dynamiques on conclure que ces efforts sont maximums dans le cas où : $\lambda=0.5$ ($R=75\text{mm}$).

On premier on doit calculer la résistance de la bielle :

On suppose la bielle comme une poutre de longueur (L) reposant sur deux appuis (A et B) voir la figure (4.8).

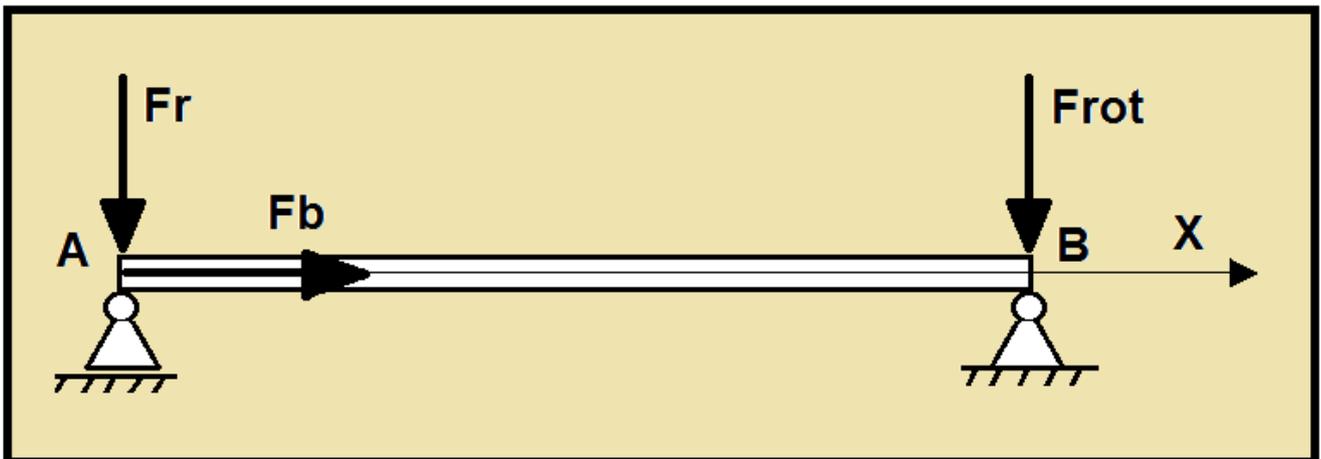


Figure 3.15 Les forces exercés sur la bielle

Donc la poutre est soumise aux efforts F_b , F_r , F_{rot} .

De plus on suppose que ces efforts sont repartis sur toute longueur de la bielle.

$$q = \frac{Fr + Frot}{L} = \frac{F1 + F2}{L} = \frac{F}{L}$$

$$(322753.873 + 1051606.94)/150 = 9162.4 \text{ N.mm}$$

ce qui nous donnons le schéma ci-dessous :

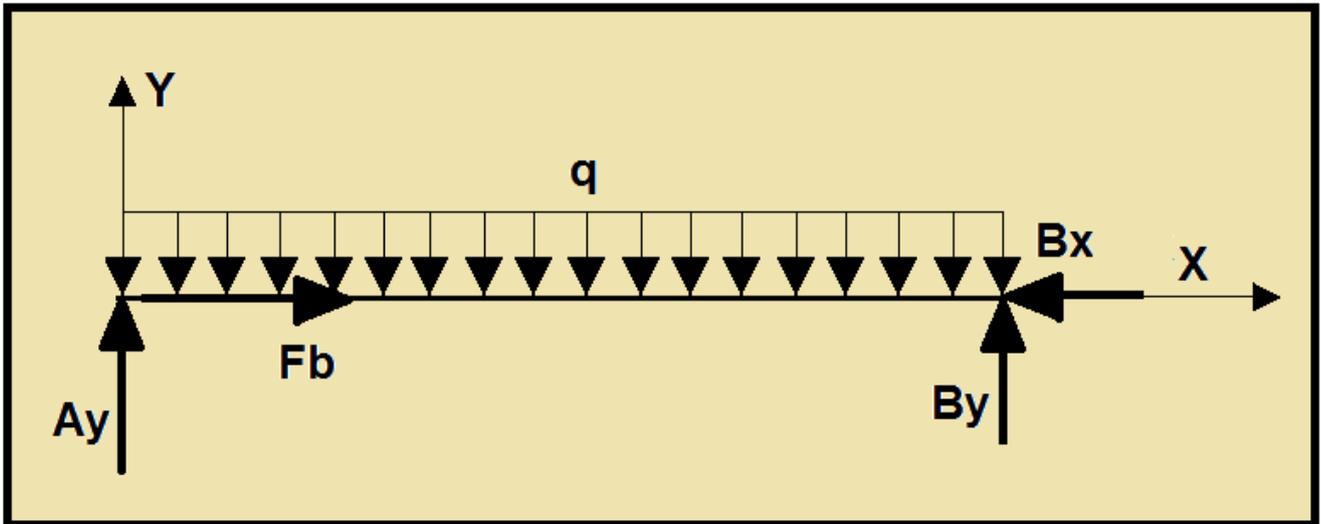


Figure 3.16 Forces et réaction de la bielle

Quand on prend le cas où $\lambda=0.5$ et $R=75\text{mm}$. Les calculs nous donnent les valeurs suivantes :

$$\theta = 240^\circ$$

$$F_b = 671865.767 \text{ N}, F_r = 322753.873 \text{ N}, F_{\text{rot}} = 1051606.94 \text{ N}, q = 9162.41\text{N/mm}$$

Pour faciliter les calculs on pose :

$$F_r = F_1, F_{\text{rot}} = F_2 \text{ et } F_b = F_3$$

Calcul des réactions :

$$\sum M/B = 0 \quad \rightarrow \quad A_y \cdot q \cdot \frac{L}{2} = 0 \quad \rightarrow \quad A_y = q \cdot \frac{L}{2}$$

$$A_y = 9162.405 \cdot 150/2$$

$$A_y = 687180.40 \text{ N}$$

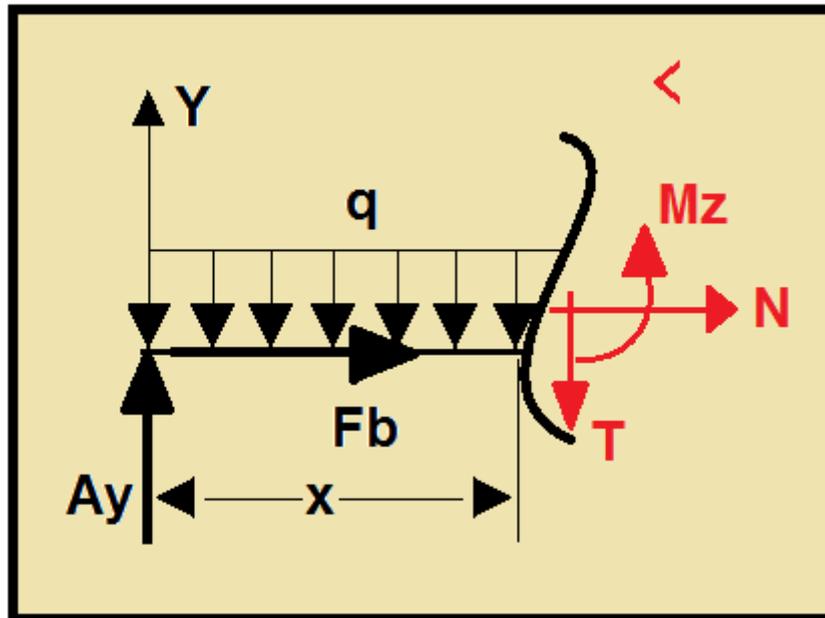
$$A_y + B_y = q \cdot L \quad \rightarrow \quad B_y = q \cdot L - A_y$$

$$B_y = q \cdot L - q \cdot L/2$$

$$B_y = 687180.40 \text{ N}$$

Calcul des moments de flexion :

Coupe $0 < x < L$

Figure 3.17 Une coupe $0 < x < L$

$$\sum M/O = 0$$

$$-A_y \cdot x + q \cdot x^2/2 + M_f = 0 \rightarrow M_f = A_y \cdot x - q \cdot x^2/2$$

$$M_f = \begin{cases} X=0 \rightarrow M_f=0 \\ X=L \rightarrow M_f=0 \end{cases}$$

Calcul de la flèche max :

$$M(\max) = M(x=L/2)$$

$$M_{\max} = A_y \cdot L/2 - q \cdot L^2/4/2$$

$$M_{\max} = q \cdot L^2/4 - q \cdot L^2/8$$

$$M_{\max} = qL^2/8$$

$$M_{\max} = 25769264.05 \text{ N.mm}$$

$$M_{\max} = 25769.26 \text{ N.m}$$

Calcul de contrainte normale σ :

$$\sigma = \frac{M\rho}{I} = \frac{M}{W}$$

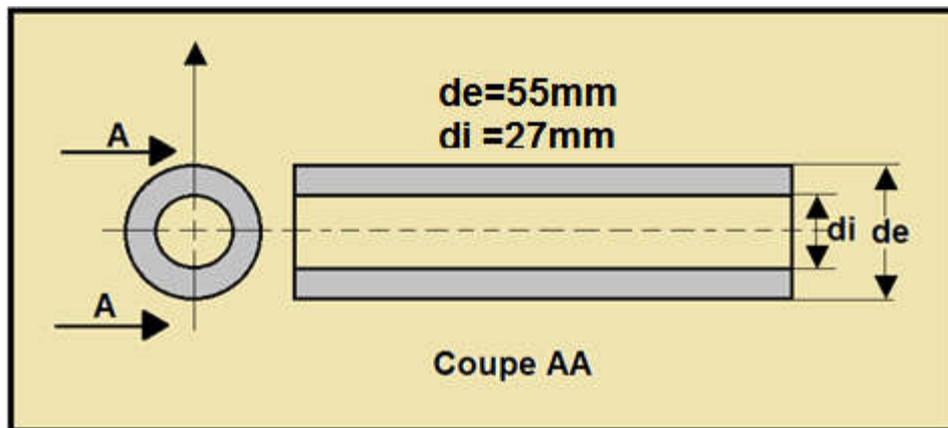


Figure 3.18 Coupe AA de la bielle.

I = moment d'inertie de surface ; W = moment de résistance de la section de la bielle.

P = rayon reliant le centre de gravité au point le plus loin de ce, centre pour simplifier le calcul.

On assimile le corps de la bielle à un cylindre creux de diamètre extérieur (d_e) et diamètre intérieur (d_i) avec : $d_e = 55\text{mm}$ et $d_i = 27\text{mm}$

Ce qui nous donne : $I_p = \frac{\pi}{32} (d_e^4 - d_i^4)$

Et $\rho = \frac{55}{2}$

$$\sigma = \frac{\frac{Flde}{8.2}}{\frac{\pi}{32}(de^4 - di^4)} = 444.353 \text{ N}$$

Calcul de la flèche maximale :

On assimile la bielle à une poutre de longueur L reposant sur deux appuis (voir la Fig 6-4) sous l'effet des efforts la poutre fléchit (c'est à dire la poutre se déforme comme le montre dans la figure ci-dessous.

Le calcul de la flèche est donné par la formule suivante appelée l'équation universelle

$$EI\theta = EI\theta_0 + EI\theta_0' x + \frac{\sum Mi(x-ai)^2}{2} + \frac{\sum Fi(x-bi)^3}{6} + \frac{\sum qi(x-ci)^4}{24}$$

$$EI\theta' = EI\theta_0' + \sum Mi(x-ai) + \frac{\sum Fi(x-bi)^2}{2} + \frac{\sum Qi(x-ci)^3}{6}$$

Ou EI : Rigidité \square : flèche à n'importe quel point de la poutre

$$f = \frac{df}{dt} = \theta = \text{angle de rotation}$$

f_0 et f'_0 sont des constantes Que l'on détermine à partir des conditions initiales qui sont pour notre cas

$$EIf_0(x=0) = 0$$

$$\text{et } EIf_0(x=L) = 0.$$

(Car la poutre d'appuie à sur deux extrémités (A et B))

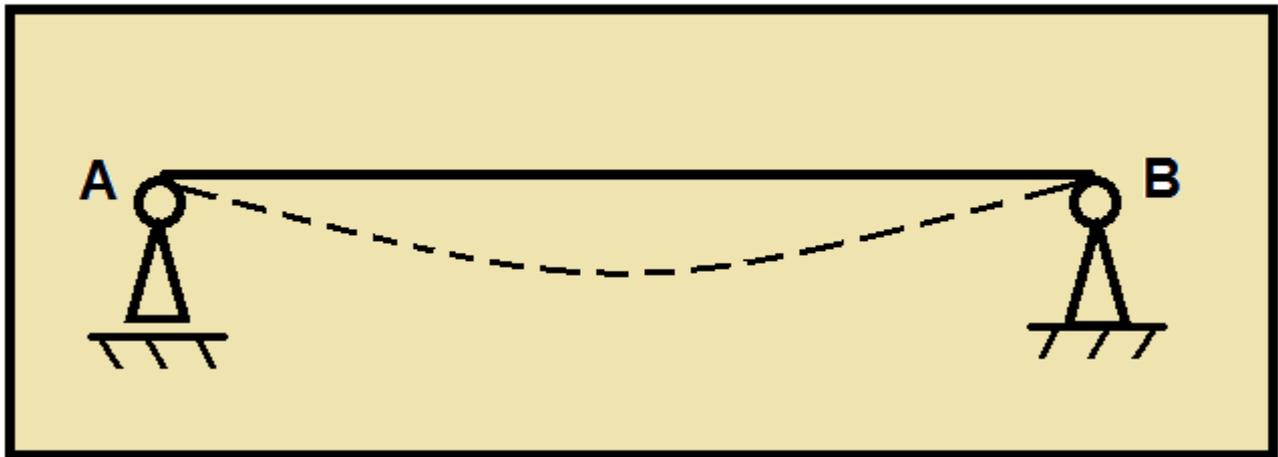


Figure 3.19 Flexion de la bielle

On précise aussi que notre poutre est soumise seulement aux efforts (F_i) et (q_i)

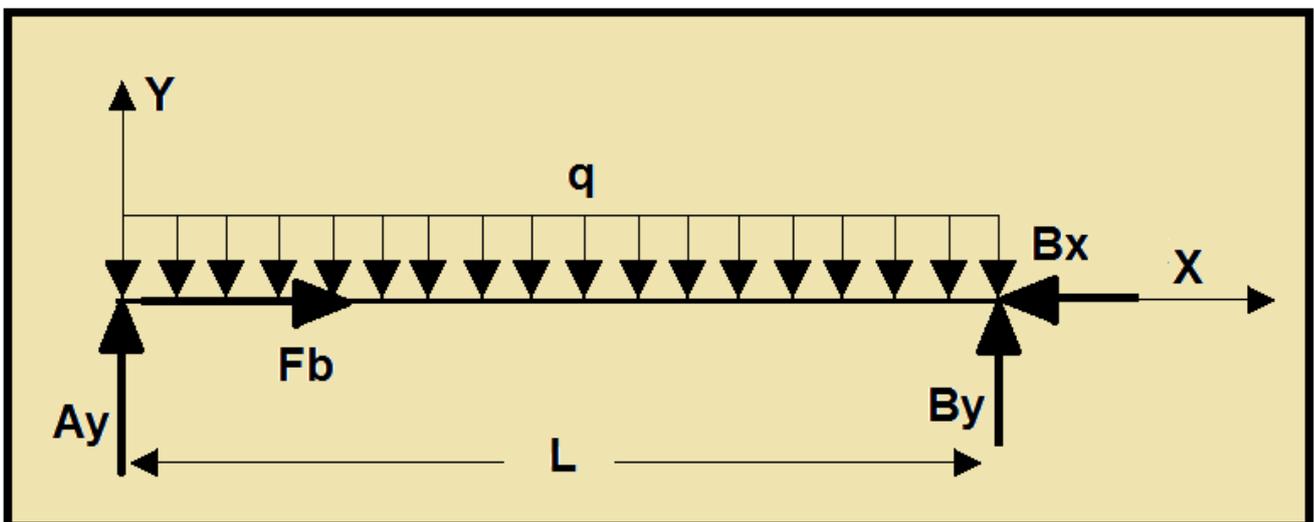


Figure 3.20 Les forces exercées sur la bielle

Donc :

$$EIf = EIf_0 + EIf'_0 x - \frac{Ay(x-0)^3}{6} + \frac{q(x-0)^4}{24} - \frac{By(x-L)^3}{6}$$

$$EIf = EIf + EIf'_0 x - \frac{F}{12} x^3 + \frac{F}{24L} x^4$$

Les conditions initiales sont :

$$EIf(0)=0 \quad ; \quad EIf(L)=0$$

$$EIf'_0 = \frac{FL^2}{12} - \frac{FL^2}{24} = \frac{FL^2}{24}$$

$$EIf(x) = \frac{FL^2}{24} x - \frac{F}{12} x^3 + \frac{F}{24L} x^4$$

La flèche maximale se trouve au milieu (c'est-à-dire $x = L/2$) en remplaçant x par cette valeur ($x = L/2$), on trouve la flèche maximale.

$$EIf_{\max} = \frac{FL^2}{24} \frac{L}{2} - \frac{F}{12} \left(\frac{L}{2}\right)^3 + \frac{F}{24L} \left(\frac{L}{2}\right)^4 \rightarrow EIf_{\max} = \frac{FL^3}{48} \cdot \frac{7}{8}$$

$$f_{\max} = 0.26\text{mm}$$

Calcul de la flèche numériquement :

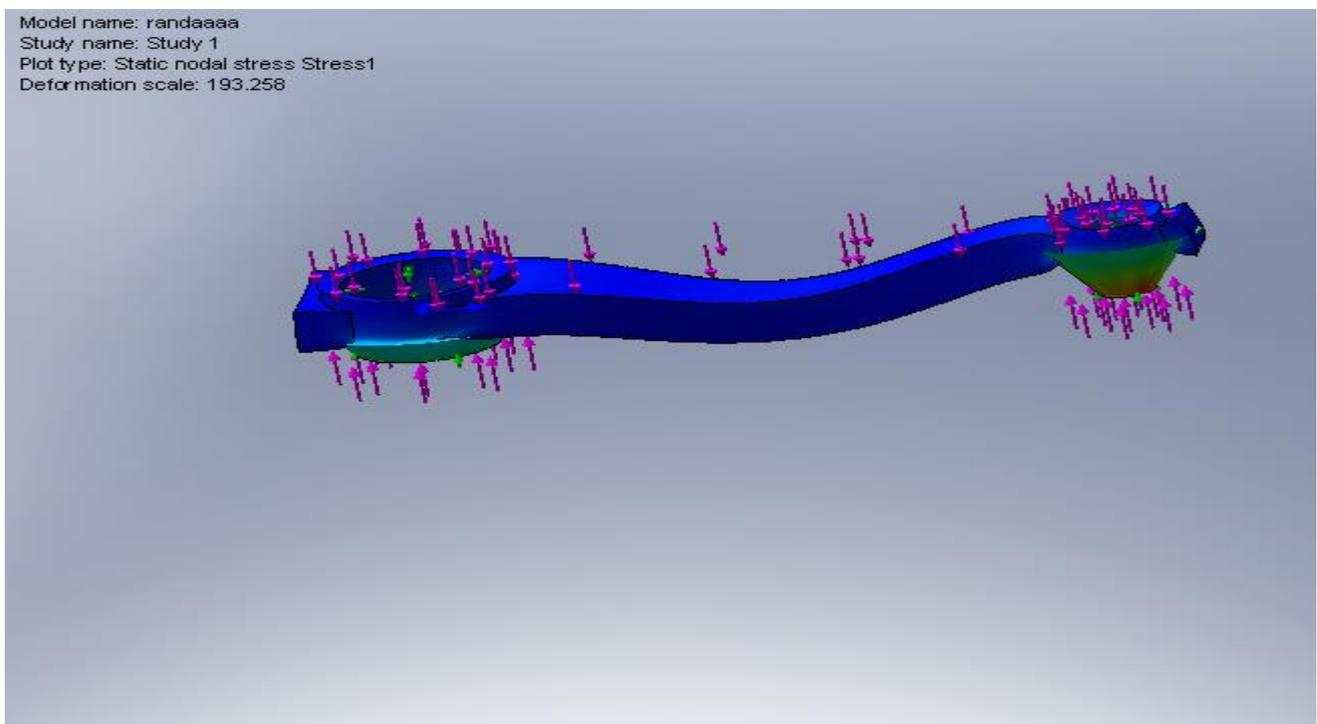


Figure 3.21 Simulation SOLIDWORKS

Conclusion :

Dans le présent travail on a essayé de faire une étude cinématique et dynamique et un équilibrage ainsi qu'une vérification de condition de résistance en étudiant un cas concret (c'est-à-dire en précisant les grandeurs géométriques : d ; r ; L ; λ ainsi que les grandeurs physiques : N ; ω etc.

Pour la vérification de condition de résistance on a calculé la contrainte normale σ ainsi la flèche maximale subis par la bielle sous l'effet de l'effort entraînant une flexion. Pour la confirmation des résultats on a fait une simulation par le logiciel SOLIDWORKS et on a déterminé que ces valeurs sont conformes aux valeurs calculées analytiquement.

Chapitre 4

CONCEPTION D'UN MOTEUR A QUATRE TEMPS

CHAPITRE 04 : CONCEPTION D'UN MOTEUR A QUATRE TEMPS

4.1 Historique :

La CAO décolle dans les années 75-90, lorsque le coût de mise en place d'un poste se rapprocha du coût annuel d'un dessinateur. La mise en place fut un peu pénible au début en raison d'une nécessité de reprendre les plans existants [10]. On s'aperçut à cette occasion que statistiquement *près de 10 %* des cotations sur les plans existants étaient inexactes, que des références de plans existaient en double, qu'une référence unique pouvait correspondre à plusieurs plans légèrement différents, etc. Au bout du compte, le gain de fiabilité de l'information se révéla constituer un argument supplémentaire important décidant à généraliser la CAO.

4.2 Définition de la conception :

La conception assistée par ordinateur ou **CAO** comprend l'ensemble des logiciels et des techniques de modélisation géométrique permettant de concevoir, de tester virtuellement – à l'aide d'un ordinateur et des techniques de simulation numérique – et de réaliser des produits manufacturés et les outils pour les fabriquer. [10]

On confond souvent CAO et **DAO** (dessin assisté par ordinateur) : la CAO n'a pas pour fonction première l'édition du dessin. Il s'agit d'un outil informatique souvent lié à un métier, fonctionnant en langage dit objet, et permettant l'organisation virtuelle de fonctions techniques. Cela permet ensuite la simulation de comportement de l'objet conçu, l'édition éventuelle d'un plan ou d'un schéma étant automatique et accessoire. En DAO, un trait est un trait et le logiciel ne permet pas l'interprétation technique de l'ensemble.

La conception assistée par ordinateur est à l'intersection de nombreux domaines : dessin par ordinateur, calcul scientifique, programmation par contrainte. Les systèmes de CAO peuvent alors se voir adjoindre des fonctionnalités périphériques, telles que la **MFN** qui permet de prendre en compte les équations de la thermodynamique pour étudier le comportement du système modélisé.

Parmi les domaines qui utilisent la conception on peut voir : [10]

- Domaine de mécanique ;
- Domaine d'électronique ;
- Domaine d'électrotechnique ;

- Domaine d'architecture ;
- Domaine d'orthopédie.

Dans notre étude on va préciser l'étude de la conception en mécanique.

Le domaine de la mécanique est historiquement l'un des premiers à s'être doté, dans les années 1960, de logiciels de CAO. Ceux-ci permettent au concepteur d'exprimer et de modéliser un grand nombre de contraintes (fonctionnalités, matériaux, capacité d'assemblage, fabrication, etc.) pendant la phase de conception d'un ensemble mécanique. Les logiciels correspondants sont utilisés lors d'une ou plusieurs phases du développement (ex: spécifications produit/processus, esquisses, dimensionnement, analyses cinématiques, analyses dynamiques, préparation de la fabrication...).

Les logiciels modernes permettent une conception directe en trois dimensions et sont surtout intéressants pour les fonctionnalités proposées : aujourd'hui une pièce de tôlerie est modélisée directement en pliant virtuellement une tôle, un perçage est placé d'un simple clic sans avoir à réfléchir sur le choix des formes volumiques - au sens mathématique - à adopter pour modéliser son intention technologique. Si les premiers logiciels proposaient un historique figé (pas de retouche possible des formes déjà définies), les dernières versions utilisant la conception paramétrique autorisent toutes les modifications.

Ces progrès fonctionnels et ergonomiques sont notamment dus aux évolutions des modèles produit/processus sous-jacents, selon la progression temporelle suivante [Année des systèmes pionniers - Année des systèmes totalement vulgarisés] : [10]

- [1950-1970] 1^{re} génération de **CAO 2D** : *Graphic-based* (ex. : système graphique AutoCAD) ;
- [1960-1980] 2^e génération de **CAO 2,5D** : *Depth-based* (ex. : systèmes de génie civil MicroStation, Cadwork),
- [1970-1990] 3^e génération de **CAO 3D** : *Geometry-based* (ex. : système de CSG Euclid),
- [1980-2000] 4^e génération de **CAO 3,5D** : *Feature-based* (ex. : système paramétrique Pro/Engineer),

et de manière récente :

- [1990-2010] 5^e génération de **CAO 4D^{1,2}** : *Rule-based* (ex. : système à base de déductions Kadviser)³,
- [2000-2020] 6^e génération de **CAO 5D** : *Induction-based* (ex. : système à base d'inductions KAD-Office)^[réf. nécessaire].

Ces logiciels aident non seulement à la création des pièces mécaniques, ou à la mise en œuvre de leur fabrication, mais aussi à la simulation de leur comportement, et donc à la validation des solutions retenues.

Une fois la création terminée, l'exécution automatique de plans, respectant les conventions de représentation et visuellement corrects est facile. Le passage en mode 2D n'est plus ressort du dessinateur à la différence avec le dessin assisté par ordinateur qui demande de maîtriser à la fois, et en même temps, le fond (ce qu'on veut représenter) et la forme (le trait sur le plan), notions qui sont indépendantes pour le logiciel. La réalisation de plans techniques permettant la compréhension du fonctionnement reste toujours plus laborieuse. [10]

La cotation fonctionnelle, et la cotation sur le principe de l'indépendance sont désormais plus faciles avec les outils logiciels en conception paramétrique. Ce qui a été pensé lors de la conception de la pièce est répercuté à la bonne cote lors de la mise en plan automatique. Ce travail est supplémentaire pour le technicien utilisant un outil de dessin assisté par ordinateur (DAO).

Exemples de logiciels de CAO pour la mécanique : [10],[11],[12]

- PTC Creo Parametric (ex Pro/Engineer)
- ESPRIT édité par DPtechnology
- Solid Edge with Synchronous Technology édités par Siemens PLM Software
- Alibre Design, édité par Alibre Inc
- CATIA, DraftSight et SolidWorks édités par Dassault Systèmes
- FreeCAD, de Juergen Riegel, logiciel multiplateforme (Linux/Windows/macOs) distribué sous licence libre
- Inventor, AutoCAD et Fusion 360 édité par Autodesk
- NX (Unigraphics) et Solid Edge, édités par Siemens PLM Software
- TELL Softwares édité par AIM
- TopSolid
- SpaceClaim LTX
- Bricscad de bricsys, CAO sous Windows. Clone de AutoCAD
- GstarCAD
- ZWCAD
- DAC-1

Parmi les programmes les plus populaires et les plus utilisés en conception et construction mécanique, le programme SOLIDWORKS. Qu'est ce que ce programme, comment fonctionne-t-il et quels sont ses avantages et ses inconvénients ?

4.3 Le programme SOLIDWORKS :

4.3.1 Historique :

Créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, SOLIDWORKS est racheté le 24 juin 1997 par la société Dassault Systèmes.

Parmi les plus grandes organisations utilisant SOLIDWORKS, on peut citer Franckie, Équipement d'emballage MMC, AREVA, Patek Philippe, Mega Bloks, Axiome, ME2C, SACMO, Le Boulch, Robert Renaud. [13]

4.3.2 Fonctionnement :

SOLIDWORKS est un modéleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

Un dossier complet contenant l'ensemble des relatifs à un même système constitue une maquette numérique. De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur SOLIDWORKS. Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, BTP...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image de synthèse travaillent à partir des éléments de la maquette virtuelle.

4.3.3 Les pièces :

La pièce est l'objet 3D monobloc. La modélisation d'une telle entité dépendra de la culture de l'utilisateur. Comme de nombreux logiciels conviviaux, SOLIDWORKS permet d'aboutir à un même résultat apparent par des voies souvent différentes. C'est lors de la retouche de ces fichiers ou de leur exploitation qu'on appréciera la bonne méthode.

Une pièce est la réunion d'un ensemble de fonctions volumiques avec des relations d'antériorité, des géométriques, des relations booléennes (ajout retrait)... Cette organisation est rappelée sur **l'arbre de construction**. Chaque ligne est associée à une fonction qu'on peut renommer à sa guise. [14]

Trois générations de volume à partir d'une même section: droite (aspect bois), révolution partielle (en rouge), et gauche

Parmi les fonctions génératrices il existe :

- l'**extrusion** : déplacement d'une section droite dans une direction perpendiculaire à la section. La section est définie dans une **esquisse** (qui apparaît alors dans l'arbre de création comme élément générateur de la fonction). Cette esquisse contient l'ensemble des spécifications géométriques (cotation) nécessaires à la complète définition de la section. Cet ensemble de cotes auquel il faut ajouter la (ou les) longueur d'extrusion constitue l'ensemble des paramètres de la fonction ; il est possible de les modifier une fois la fonction validée. Les extrusions peuvent également être réalisées en s'appuyant sur des esquisses 3D⁶
- la révolution : déplacement d'une section droite autour d'un axe, ou extrusion suivant un **cercle** ou un arc de cercle.
- le balayage : déplacement d'une section droite le long d'une ligne quelconque. Lorsque la génératrice de balayage est **gauche**, l'esquisse est en 3 dimensions.

Différentes fonctions logicielles

D'autres fonctions, plutôt orientées métier intègrent des notions qu'il serait fastidieux de modéliser :

- congés et **chanfreins**,
- nervure,
- dépouille,
- coque (permettant d'évider un objet en lui conférant une épaisseur constante),
- trous normalisés (perçages, mortaises...),
- plis de tôle⁷...

Des fonctions d'ordre logiciel comme la répétition linéaire, circulaire, curviligne ou par symétrie...

Les dernières versions autorisent la réalisation de pièces momentanément disjointes, ce qui permet de concevoir un objet fonctionnellement, c'est-à-dire en définissant d'abord les éléments fonctionnels, puis en joignant les différentes parties par de la matière (nervures, carter...).

L'édition de familles de pièces est possible en associant à SOLIDWORKS, le tableur **Microsoft Excel** : Un tableau devient ainsi éditeur des références (lignes) donnant la valeur des paramètres variables des fonctions (colonnes) :

- valeur de certaines cotes ;
- valeur de certaines propriétés (nombre d'occurrences...) ;
- état de suppression d'une fonction.

Ainsi, il est possible d'obtenir à partir d'un seul fichier de type pièce, l'ensemble des modèles de vis d'assemblage (toutes forme de tête ou dimensions), ou encore toutes les combinaisons de briques **Lego** (1x1, 1x2 etc).

Avec tous ces outils, la méthode de conception d'une pièce très proche du métier du concepteur qui ne se soucie plus de savoir où placer les traits du dessin mais les formes de la pièce.

Les possibilités d'éditations sont complétées par un ensemble d'outils de mesures **géométriques**. Ainsi il est possible de connaître le **volume** de la pièce, son **poids**, la position de **centre de masse**, sa **matrice d'inertie**, la surface...

4.3.3.1 La représentation 3D d'un système bielle-manivelle :

a- La bielle :

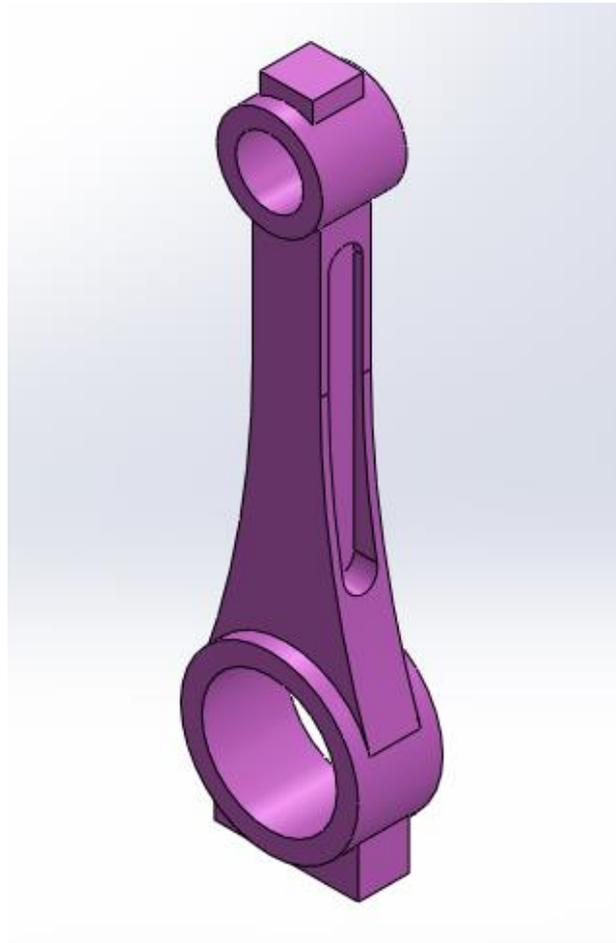


Figure 4.1 présentation 3D d'une bielle

b- Le piston :

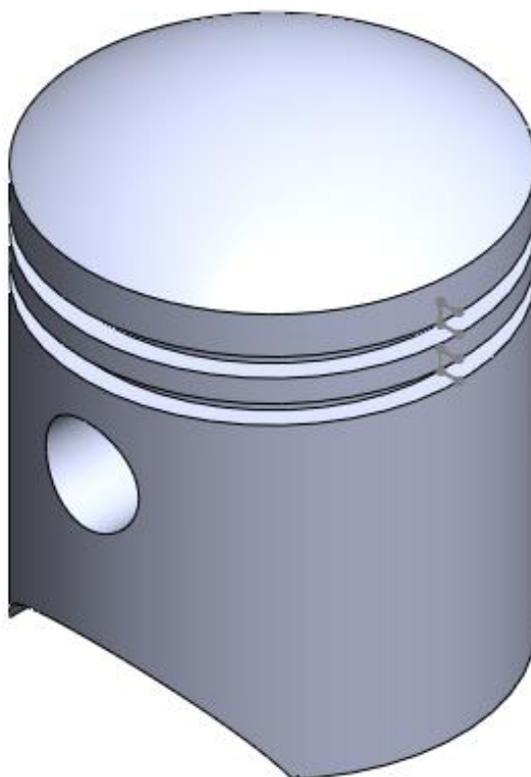


Figure 4.2 Présentation 3D d'un piston

c- Axe piston :



Figure 5.3 présentation en 3D d'un axe piston

d- Vilebrequin :

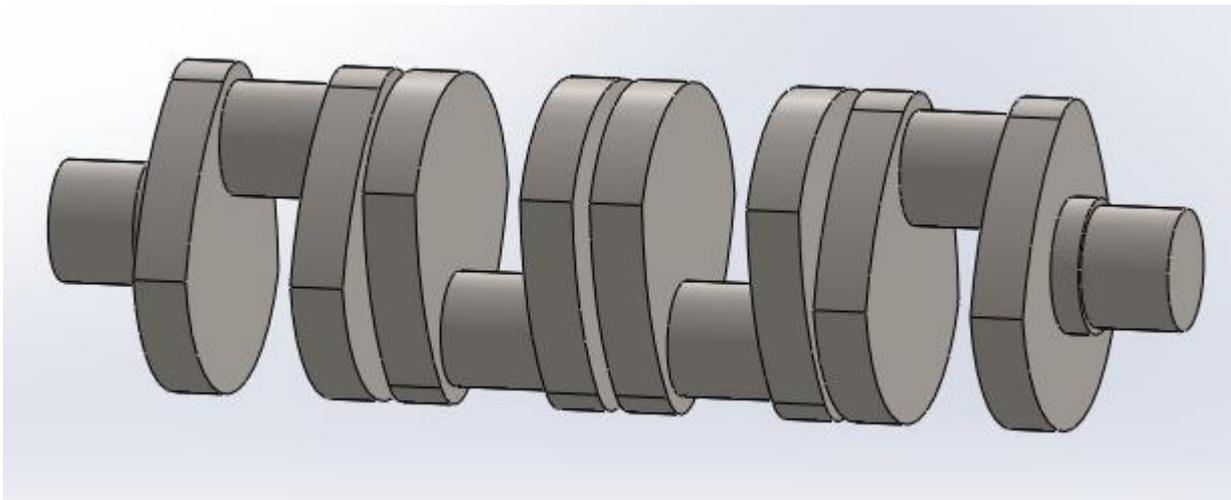


Figure 4.4 présentation 3D d'un vilebrequin

4.3.4 Les assemblages :

Les assemblages sont obtenus par la juxtaposition de pièces. La mise en position de pièces est définie par un ensemble de **contraintes d'assemblage** associant, deux entités respectives par une relation géométrique (coïncidence, tangence, coaxialité...). Dans une certaine mesure, ces associations de contraintes s'apparentent aux liaisons mécaniques entre les pièces. Le mécanisme monté, s'il possède encore des mobilités, peut être manipulé virtuellement. On peut alors aisément procéder à des réglages à l'aide des différents outils disponibles (déplacement composants, détection de collision ou d'interférence, mesure des jeux, etc.) [15]

Comme pour les pièces, la gestion de l'ensemble est portée par un arbre de création qui donne accès à l'arbre de création de chaque pièce. Il est d'ailleurs possible d'assembler des *assemblages*, donc de former des *sous-groupes* de pièces. Cette opération étant préalable ou en cours d'édition. [15]

L'intérêt de cet outil, c'est qu'il rend possible la création d'une pièce **dans l'assemblage**. Il propose la même méthode au concepteur que celle qu'il appliquait sur la table à dessin : tout concevoir en même temps. En effet, à part sur les petits ensembles simples (ou déjà définis), il n'est pas raisonnable de concevoir chaque pièce indépendamment pour corriger ensuite, lors de l'assemblage, les problèmes d'interférence ou de coïncidence. La conception intégrée lie automatiquement les géométries des pièces entre elles. Ainsi, une modification sur une pièce est automatiquement répercutée sur les autres. Alors l'édition de pièce est la conséquence de l'édition de l'ensemble. De plus, SOLIDWORKS gère les références cycliques. En effet, non seulement il est possible de créer des pièces enfants à partir de la pièce parent, mais il est aussi possible de modifier la pièce parent en fonction des pièces enfants sans générer de boucle de mise à jour comme sur CATIA.

En va voir dans la figure ci-dessous la présentation En 3D d'un moteur à 4 temps : [15]

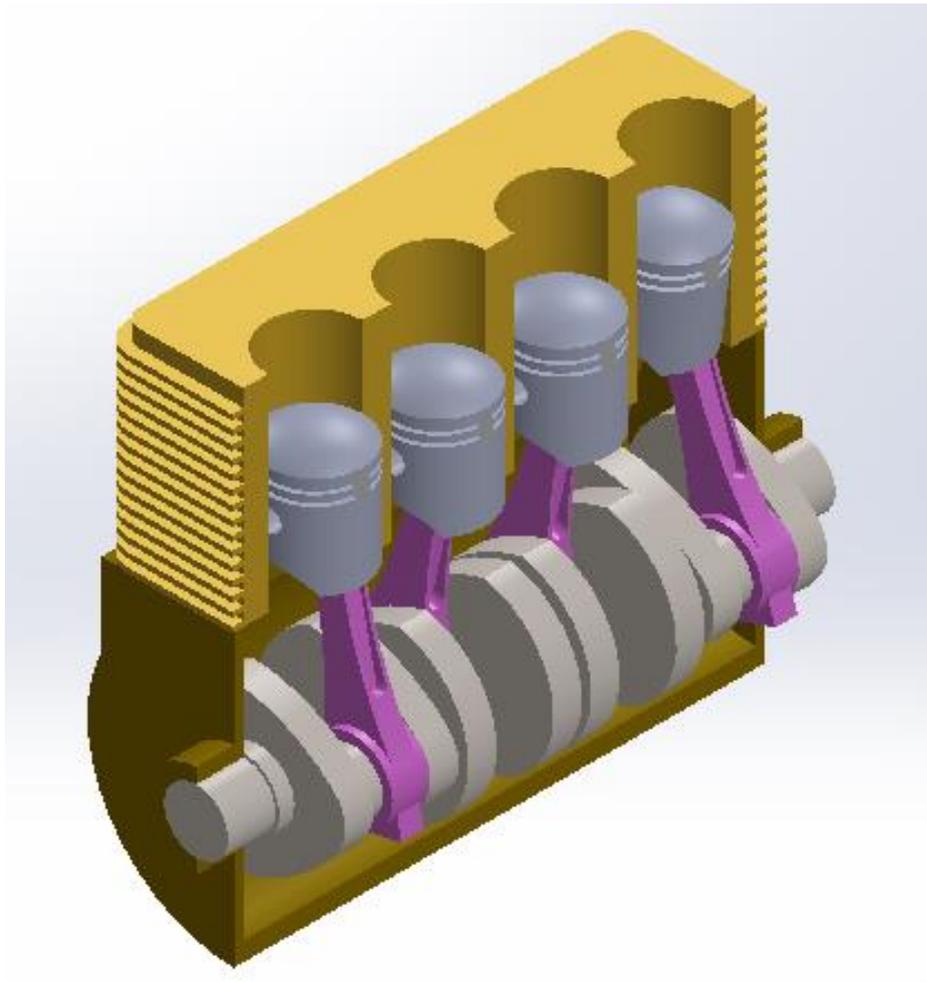


Figure 4.5 Assemblage d'un moteur à 4 temps

4.3.5 Les mise en plan :

Les mises en plan concernent à la fois les pièces ([dessin de définition](#)) ou les assemblages ([dessin d'ensemble](#)). Pour aboutir à un plan fini d'une pièce on peut estimer mettre 2 fois moins de temps qu'avec un outil DAO (temps de conception et exécution du dessin). En effet, en DAO, chaque trait est indépendant, et c'est au dessinateur de savoir quelles entités graphiques sont concernées par une modification. Le logiciel 3D ne fait qu'une projection de l'objet. Les modifications éventuelles sont opérées sur l'objet représenté, et ne concernent pas directement le plan. [16]

- **Vues**

La projection sur plan du modèle ne pose aucun problème. Aujourd'hui il est très facile d'obtenir un plan, forcément juste (avec un logiciel de DAO il est possible d'éditer un plan faux!). Les vues en coupes, les vues partielles, perspectives, sont exécutées d'un simple clic. Les seuls problèmes encore rencontrés concernent la représentation des [filetages](#) et [taraudages](#) dans les assemblages.

De plus, chaque vue peut être exécutée avec un habillage différent, filaire, conventionnel ou ombré rendant encore plus accessible la lecture de plans aux non initiés. [13], [16]

- **Cotation**

La **cotation** regroupe l'ensemble des spécifications géométriques définissant la pièce. Bien sûr, les paramètres déclarés des esquisses en font partie. Ils peuvent être automatiquement intégrés, de manière équilibrée, à la mise en plan. À ce niveau, il est encore possible de modifier la pièce en changeant la valeur des cotes. L'indépendance de ces paramètres, se rapproche du principe dit d'indépendance (cotation GPS). Cependant, la mise en forme définitive de la cotation demande encore un peu de travail (avec un éditeur DAO ou sur le calque aussi !). [13], [16]

- **Fond de plan**

SOLIDWORKS par défaut propose ses propres fonds de plan. Mais il est possible de les faire soi-même ; Il existe deux types de fond de plan :

- ✓ Le fond de plan statique, où il faut remplir à la main chacun des champs.
- ✓ Le fond de plan dynamique, où il se remplit automatiquement suivant les paramètres mis dans l'assemblage ou dans la pièce.
- ✓ Des modèles sont proposés (équivalent du *.dot* de Word). [13], [16]

4.3.5.1 La mis en plan d'un moteur à 4 temps :

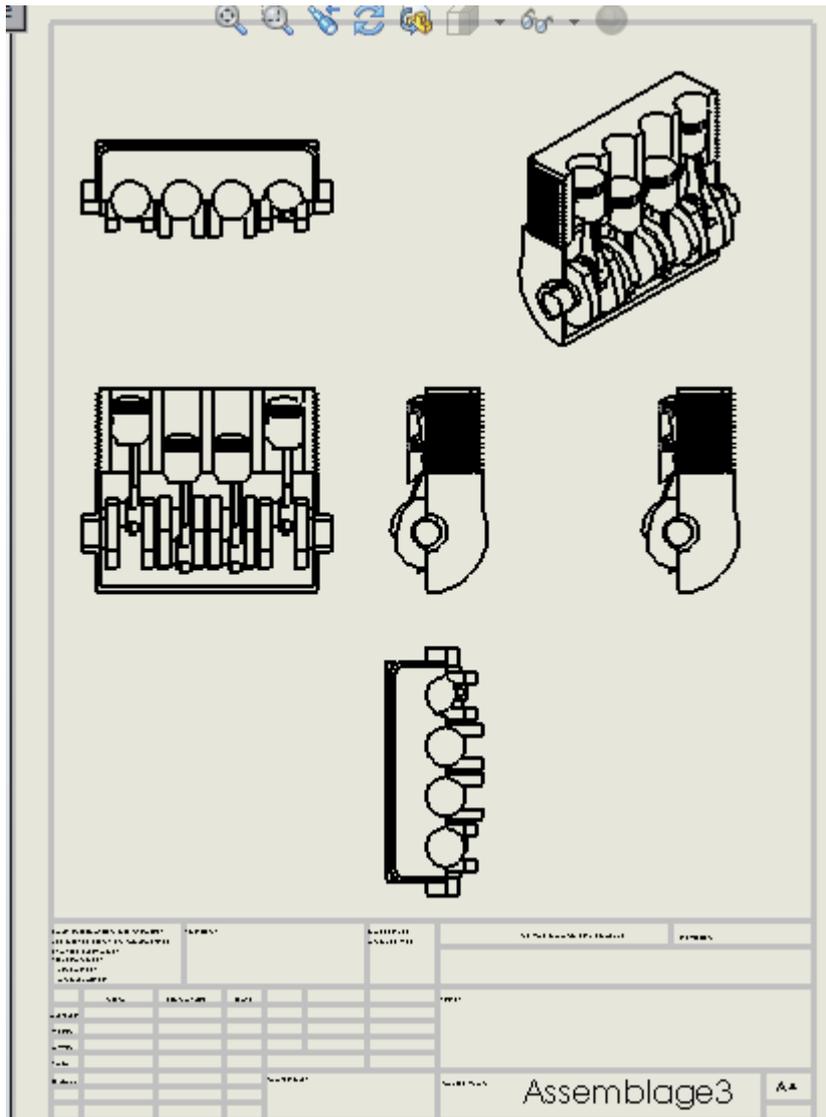


Figure 4.6 Mis en plan d'un moteur quatre temps

Conclusion

Conclusion

Ce projet de fin des études de master en Génie Mécanique, option construction mécanique, ma permis de faire le contact directe avec la réalité des problèmes au niveau des moteurs à combustion interne , en particulier les problèmes du vibrations et de l'équilibrage de moteur diesel six cylindre en ligne, considérés comme des éléments essentiels de bon fonctionnement du moteurs.

Cette étude à permet d'appliquer nos connaissances de thermodynamique dans un problème réel qui est le calcul thermique dans les moteurs diesel, il nous à aussi permet d'élargir nos connaissances dans le domaine de vibration, ainsi que la familiarisation avec les méthodes de calcul utilisées pour la détermination des paramètres thermiques, dynamiques et cinématique de moteur.

La première partie consacrée à l'étude thermiques nous à permis de déterminer :

- Les puissances et rendements d'un moteur à quatre temps.
- Les forces appliquées au maneton de vilebrequin.
- Le couple moteur instantané qui appliqué sur le vilebrequin nous donne le moment d'excitation dans le cas des vibrations forcées.

La deuxième partie à été consacrée à l'étude dynamique du moteur diesel à six cylindres :

Nous avons déterminé les forces agissant le système bielle-manivelle dans l'état de mouvement et soumis aux forces de pression.

L'étude des vibrations forcées nous a aussi permit de déterminer les amplitudes angulaires des différentes masses et la zone la plus sollicitée du vilebrequin.

Ainsi on a pu vérifier le dimensionnement du système bielle-manivelle, nous avons aussi procédé au calcul du système

Références et bibliographie

- [01] https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_%C3%A0_combustion_et_explosion
Dr. Mohamed BENCHERIF. Moteurs à Combustion Interne, Combustion et Eléments de
- [02] carburation, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohammed Boudiaf, (année 2018).
- [03] Bekhti Mohamed Amine. Equilibrage du moteur diesel quatre temps quatre cylindres, université Abou Bekr Belkaïd – Tlemcen, (Année universitaire 2016-2017)
- [04] <http://www.fiches-auto.fr/articles-auto/fonctionnement-d-une-auto/s-1873-differences-entre-moteur-atmospherique-et-suralimente-par-turbo.php>.
- [05] « Résultats des essais de la machine de l'école polytechnique », dans l'expérience récente sur les machines thermiques de basse température dites machines-abwaerme, De Ggruyter, 31 décembre 1901.
- [06] [https://people.lam.fr/buat.veronique/Veronique/Teaching_\(contd\)_files/poly3web.pdf](https://people.lam.fr/buat.veronique/Veronique/Teaching_(contd)_files/poly3web.pdf)
- [07] Benabdelhafid Oussama, Etude cinématique et dynamique d'un moteur à combustion interne. AIN BEIDA ALGERIE. JUIN2003.
- [08] https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_de_Sabath%C3%A9
- [09] TIENNE Émilien ,GAUDRON Antoine, dossier travaux d'initiative personnels encadrés étude cinématique du moteur, Lycée POTHIER ORLÉANS – Année Universitaire (2004/2005)
- [10] https://fr.wikipedia.org/wiki/Conception_assist%C3%A9e_par_ordinateur#M%C3%A9canique
- [11] <http://www.codekf.org/index.php?id=10&langue=1>
- [12] <http://www.stanford.edu/group/4D/>
- [13] <https://fr.wikipedia.org/wiki/SolidWorks>
- [14] <http://www.leguide3d.com/profiles/blogs/solidworks-extrusions-multiples-spatiales-avec-les-esquisses3d>
- [15] https://www.youtube.com/watch?v=BIb0E91GBE8&index=6&list=PLjkvI_IbLbweeJrIJR_KmjB0g8EOoESkg
- [16] <http://www.leguide3d.com/profiles/blogs/solidworkq-comprendre-le-fonctionnement-des-tables-en-tolerie>



المكتبة الجامعية المركزية
معلومات حول الأطروحة أو المذكرة

الاسم: Randa اللقب: BENKHEDIR

الكلية: Sciences et technologie

القسم: Génie mécanique

التخصص: Construction mécanique

المستوى: Master 2

عنوان المذكرة أو الأطروحة: ETUDE ET CONCEPRION D'UN MOTEUR A COMBUSTION INTERNE A QUATRE TEMPS

المؤطر: Dr. MALIM Madani

الكلمات المفتاحية: internal combustion engine, the rod-crankshaft system, energy , kinematics and

dynamics study, efficiency of the engine, SOLIDWORKS software.

تاريخ المناقشة للمذكرة: 2021/06/24

السنة الجامعية: 2021/2020

Résumé

Avec l'augmentation des vitesses de rotation des moteurs à combustion interne nous avons une augmentation des pressions des gaz et des forces d'inertie qui sont appliquées sur le piston du moteur qui se traduisent eux-mêmes par un accroissement des forces et des moments qui agissent sur le système bielle-manivelle, et par conséquent sur le vilebrequin du moteur. Le vilebrequin étant soumis à des sollicitations périodiques, nous avons l'apparition de vibrations.

Dans ce projet, nous étudions le moteur sous plusieurs aspects : énergétique, cinématique et dynamique, et cela nous permet de calculer les puissances et les rendements du moteur, et nous calculons également les forces agissant sur le système bielle-manivelle pour assurer son équilibrage.

Dans la dernière partie de notre étude nous utilisons le logiciel SOLIDWORKS pour la conception.

ملخص

مع رفع السرعات الدّوّارة في المحرّكات ذات الاحتراق الدّاخلّي يوجد رفع ضغط الغازات و قوى العطالة المؤثرة على المكبس و التّي تترجم برفع القوى و الاستطاعة المؤثرة على آليّة ذراع مرفق ثمّ على العمود المرفقي. هذا الأخير يتأثر بالقوى المتغيّرة و هذا ما يظهر الاهتزازات.

في هذا المشروعة سوف نقوم بدراسة المحرّك من عدّة نواحي: طاقيًا، حركيًا و ديناميكيًا. و هذا ما يسمح لنا بحساب قوّة و مردود المحرّك و كذلك دراسة و حساب القوى المؤثرة على نظام مرفق عمود من أجل ضمان توازنه.

Abstract

The increasing of the internal combustion engine rotating speed's, we notice the increasing of pressure gas and inertia efforts, those efforts are applied on the engine piston, which permit the increasing of the moment's load. They are also, loading on the rod-crankshaft system and the crankshaft.

In this project, we study the engine on several aspects : energy, kinematics and dynamics ; and this allows us to calculate the powers and efficiency of the engine, and we also calculate the force acting on the connecting rod-crank system to ensure its balance.

In the last part of our study we use the SOLIDWORKS software for the disgn.