

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN DE CYCLE MASTER

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Génie Mécanique
Parcours : Master
Spécialité : Construction Mécanique

Thème

Étude d'un arbre à cames d'un moteur à
combustion interne par analyses des éléments finis
(FEM : Finite Element Method)

Préparé par :

ASRI Mohamed Riadh et BOUCEKKINE Ibrahim El Khalil

Soutenu publiquement le : 30 / 06 / 2022, devant le jury composé de :

M. AISSAT Sahraoui	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun) Président
M. ABOSHIGHIBA Hicham	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun) Examineur
M. MAZARI Djamel	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun) Examineur
M. ELGUERRI Mohamed	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun) Encadrant

Année universitaire : 2021 – 2022

REMERCIEMENTS

Tout d'abord on remercie « Allah », le tout puissant, de nous avoir donné le courage et la santé pour réaliser ce modeste travail.

On tient à remercier particulièrement Monsieur ELGUERRI Mohamed, notre encadreur, d'avoir accepté de diriger ce travail, l'expression de nos profonds et sincère remerciements, pour ses efforts, ses critiques constructives, sa confiance et de nous avoir ouvert les portes de ses conseils et encouragements durant cette difficile période de recherche et surtout notre cher enseignant et frère EL GUERRI Yassine pour son aide.

On tient également à remercier les membres du jury Mr AISSAT Sahraoui, Mr ABOSHIGHIBA Hicham et Mr MAZARI Djamel pour l'honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant de juger notre humble travail.

Enfin, nous remercions également nos familles respectives et nos amies, nous n'aurions jamais pu réaliser ce travail sans votre soutien.

Nos sincères remerciements à tous.

DEDICACES

Nous dédions ce mémoire :

À nos chers parents, qui se sont toujours souciés de notre avenir, qui nous ont toujours comblés d'amour et d'affection.

À notre prof et cher frère EL GUERRI Yassine pour son aide.

À nos amis.

À tous nos enseignants.

À tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ASRI et BOUCEKKINE

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I : MOTEUR À COMBUSTION INTERNE.....	2
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition.....	3
I.3. Historique.....	3
I.4. Moteur à combustion interne.....	4
I.5. Éléments mécaniques fondamentaux d'un MCI.....	4
1) Composants fixe.....	5
2) Composants mobiles.....	6
I.6. Aspects du moteur à combustion interne.....	9
1) Moteur thermique à combustion interne.....	9
2) Principe de fonctionnement.....	9
3) Comparaison entre le moteur Diesel et le moteur essence.....	10
4) Avantages et inconvénients du moteur diesel.....	10
5) Classification des moteurs à combustion interne.....	11
CHAPITRE II : SYSTÈME DE DISTRIBUTION.....	16
II.1. Introduction.....	17
II.2. Définition de la distribution.....	17
II.3. Mécanisme de distribution.....	17
II.4. Différents types de distribution.....	19
1) Distribution par chaîne.....	19
2) Distribution par cascade de pignon.....	19
3) Distribution par courroie.....	20
II.5. Éléments de la distribution.....	20
1) Culbuteur.....	21
2) Tiges culbuteur.....	22
3) Poussoirs.....	22
4) Poussoir Hydraulique.....	23
5) Culbuteur Linguet.....	23
6) Arbre à cames.....	24
II.6. Emplacement de l'arbre à cames.....	24
II.7. Entraînement de l'arbre à cames.....	24

II.8. Soupapes	25
II.9. Détails d'une soupape	25
II.10. Principe de fonctionnement des soupapes.....	26
II.11. Calage de distribution	26
II.12. Jeu des soupapes	27

CHAPITRE III : CONCEPTION DE L'ARBRE À CAMES28

III.1. Introduction	29
III.2. Historique.....	29
III.3. Principe de fonctionnement.....	30
III.4. Implantation des arbres à cames	30
III.5. Fonctionnement de l'arbre à cames sur les soupapes.....	30
III.6. Différents types d'arbres à cames	31
1) Arbre à cames latéral.....	31
2) Arbre à cames en tête	31
3) Double arbre à cames en tête	31
III.7. Les Cames	31
III.8. Causes et problèmes des arbre à cames.....	32
III.9. Matériaux utilisés dans l'arbre à cames	32
III.10. Problématiques	33
III.11. Méthodologie	33
III.12. Calculs de la force de contrainte appliquée sur la came	35
III.13. FreeCAD	37

CHAPITRE IV : SIMULATIONS ET INTERPRÉTATIONS39

IV.1. Introduction	40
IV.2. Méthode des éléments finis FEM.....	40
IV.3. Avantage du FEM	40
IV.4. Type d'analyse FEM :.....	40
IV.5. Comparaison de différents maillages sur l'arbre à cames.....	41
IV.6. Comparaison de matériaux.....	43
IV.7. Approches différentes des conditions aux limites.....	44
1) Fixation des paliers	44
2) Application des forces.....	49
IV.8. Simulation finale	51
IV.9. Conclusion	53

CONCLUSION GÉNÉRALE.....	54
ANNEXES	55
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIE .	59
ملخص.....	61
RÉSUMÉ	61
ABSTRACT.....	61

Liste des figures

Figure I.1 : Vue éclatée d'un moteur à explosion.....	4
Figure I.2 : Composantes principales du moteur à combustion interne.....	4
Figure I.3 : Bloc moteur.....	5
Figure I.4 : Culasse.....	6
Figure I.5 : Piston.....	7
Figure I.6 : Soupape.....	7
Figure I.7 : Bielle.....	8
Figure I.8 : Vilebrequin.....	8
Figure I.9 : Arbre à cames.....	9
Figure I.10 : Schématisation des quatre temps.....	13
Figure I.11 : Schématisation des deux temps.....	13
Figure I.12 : Injection directe.....	14
Figure I.13 : Injection indirecte.....	15
Figure II.1 : Mécanisme de distribution.....	18
Figure II.2 : Dispositions de l'arbre à cames.....	18
Figure II.3 : Distribution par chaîne.....	19
Figure II.4 : Distribution de cascade de pignon.....	19
Figure II.5 : Distribution par courrois.....	20
Figure II.6 : Les éléments de distribution.....	20
Figure II.7 : Les éléments intermédiaires.....	21
Figure II.8 : Culbuteur.....	21
Figure II.9 : Tiges culbuteur.....	22
Figure II.10 : Pousoirs.....	22
Figure II.11 : Pousoir hydraulique.....	23
Figure II.12 : Culbuteur linguet.....	23
Figure II.13 : Arbre à cames.....	24
Figure II.14 : Détails d'une soupape.....	25
Figure II.15 : Calage de distribution.....	26
Figure II.16 : Jeu des soupapes.....	27

Figure III.1 : Fonctionnement du l'arbre à cames.....	30
Figure III.2 : Chargement et fixation de la géométrie.....	33
Figure III.3 : Arbre à cames modélisé dans FreeCAD.....	34
Figure III.4 : Arbre à cames modélisé dans FreeCAD.....	34
Figure IV.1 : Tailles des maillages Gmesh de FreeCAD.....	41
Figure IV.2: Amplitude des déplacements avec un maillage de 3 mm.....	42
Figure IV.3 : Contraintes de Von Mises avec un maillage de 3 mm.....	43
Figure IV.4 : Amplitude des déplacements exagérées dans l'arbre à came.....	44
Figure IV.5 : Contrainte de Von Mises exagérées dans l'arbre à came.....	44
Figure IV.6 : Palier complet.....	45
Figure IV.7 : Palier limité.....	45
Figure IV.8 : Palier limité.....	45
Figure IV.9 : Palier extrémité.....	45
Figure IV.10 : Amplitude des déplacements dans le cas de Palier complet.....	46
Figure IV.11 : Amplitude des déplacements dans le cas de Palier limité.....	46
Figure IV.12 : Amplitude des déplacements dans le cas de Palier milieu.....	46
Figure IV.13 : Amplitude des déplacements dans le cas de Palier extrémité.....	46
Figure IV.14 : Contrainte de Von Mises dans le cas de Palier complet.....	47
Figure IV.15 : Contrainte de Von Mises dans le cas de Palier limité.....	47
Figure IV.16 : Contrainte de Von Mises dans le cas de Palier milieu.....	48
Figure IV.17 : Contrainte de Von Mises dans le cas de Palier extrémité.....	48
Figure IV.18 : Application des forces dans le cas de Forces surface profil.....	49
Figure IV.19 : Application des forces dans le cas de Forces surface linéaire.....	49
Figure IV.20 : Application des forces dans le cas de Forces doigt soupape.....	50
Figure IV.21 : Contrainte de Von Mises du cas des Forces surface profile.....	50
Figure IV.22 : Contrainte de Von Mises du cas des Forces surface linéaire.....	50
Figure IV.23 : Contrainte de Von Mises du cas de Forces doigt soupape.....	51
Figure IV.24 : Simulation des amplitude des déplacements.....	52
Figure IV.25 : Simulation finale des amplitude des contraintes de Von Mises.....	52

Liste des tableaux

Tableau IV.1 : Comparaison des maillages.....	41
Tableau IV.2 : Comparaison des matériaux.....	42
Tableau IV.3 : Comparaison des types de fixation des paliers.....	44
Tableau IV.4 : Comparaison des manières d'application de forces.....	49
Tableau IV.5 : comparaison entre la simulation du maillage de 2 et 3 mm.....	52

Liste des abréviations

D :	Diamètre de l'orifice d'admission [m]
AC :	Surface du cylindre [m ²]
L :	Longueur de course [m]
V :	Vitesse de l'arbre à cames [tr/min]
N :	Vitesse de l'arbre à cames [m/s]
Q :	Débit volumique [m ³ /sec]
Vip :	Vitesse de l'orifice d'entrée [m/s ²]
Dip :	Diamètre de l'orifice d'entrée [m]
F :	Forces appliquées sur la came d'admission [N]
Fs :	La force du ressort [N]
Fi :	La force d'inertie [N]
Mv :	Masse de la soupape [gms]
T :	Temps [S]
Hv :	Distance entre soupape et siège soupape [m]
Av :	Accélération [m/s ²]
U :	Déplacement initial [m]

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le moteur à combustion se compose de plusieurs pièces qui travaillent ensemble pour le faire tourner, comme la chemise, bielle, vilebrequin, soupapes, arbre à came ; ce dernier est notre thème de ce mémoire, il est commandé par une poulie, il a le rôle d'ouvrir les soupapes d'admission et d'échappement les unes après les autres.

L'organisation de ce mémoire est présentée par trois chapitres :

Le premier chapitre donne des généralités sur le moteur à combustion interne et leurs organes de fonctionnement. Les moteurs à combustions internes sont l'ensemble des organes qui transforment l'énergie calorifique d'un combustible en énergie mécanique. On s'intéresse dans cette étude pour distinguer le fonctionnement des moteurs (diesel, essence) et leurs organes.

Le deuxième chapitre constitue des généralités sur système de distribution, On nomme « distribution », l'ensemble des éléments qui permettent de réaliser l'ouverture et la fermeture des cylindres dans les conditions définies par l'épure circulaire du moteur. Dans les moteurs à quatre temps, l'ouverture et la fermeture des cylindres sont réalisées par les soupapes. Une ouverture est réalisée par des cames montées sur un ou plusieurs arbres à cames. La fermeture est assurée, en général, par des ressorts de rappel nommés " ressorts de soupapes. Des poussoirs sont interposés entre les cames et les queues de soupapes.

Le troisième chapitre décrit une étude de l'arbre à came et sa conception par FreeCAD. Aujourd'hui, l'arbre à cames est une pièce essentielle du moteur à combustion interne, il est appelé également « arbre de distribution », commande l'ouverture des soupapes, en transformant le mouvement rotatif issu du moteur en mouvement longitudinal actionnant les soupapes. Il s'agit d'un arbre, entraîné par des pignons, une chaîne ou une courroie dentée.

Le quatrième chapitre constitue une simulation avec le logiciel FreeCAD, dans lequel on va faire des études et des comparaisons avec un arbre à came de certain article, enfin on va obtenir des résultats de déplacements et contraintes.

Chapitre I

Moteur à combustion interne

I.1. Introduction

Une machine thermique c'est tous les types de machines qui permettent de transformer l'énergie thermique à une énergie mécanique. Pratiquement, une machine thermique fonctionne à l'aide d'un agent thermique (qui constitue le système) subissant une transformation cyclique et échangeant avec l'extérieur du travail et de la chaleur. Les différentes machines motrices peuvent être classées selon le type de la combustion, les transformations subies par le fluide et son état.

I.2. Définition

Le moteur est un organe qui transforme en travail mécanique une source d'énergie qui lui est fournie :

- Il est dit "moteur électrique" si la source d'énergie est l'électricité.
- Il est dit "moteur thermique" si la source d'énergie est donnée par un combustible.

Dans un moteur thermique si la combustion se fait à l'intérieur du moteur : on le dénomme alors moteur thermique à combustion interne. C'est le cas de tous les moteurs thermiques employés actuellement en automobiles, dont le travail mécanique est obtenu par l'explosion plus détente des gaz portés à haute pression et haute température.

I.3. Historique

Le premier moteur à combustion à un cylindre a été réalisé par les Eugenio Barsanti et Felice Matteucci en 1856. Le moteur à combustion à deux temps a été réalisé par Étienne Lenoir en 1859. Le moteur à combustion à quatre temps est inventé par Alphonse Beau de Rochas en 1862, puis développé par Nikolaus Otto en 1867, perfectionné par Gottlieb Daimler et Wilhelm Maybach en 1887, suivi par le moteur Diesel en 1893. Ce type de moteurs est principalement utilisé pour la propulsion des véhicules de transport (telle que les avions, les automobiles, les motos, les camions, les bateaux, etc.) mais aussi pour de nombreux outils mobiles tel que les tronçonneuses, les tondeuses à gazon ainsi que pour de nombreuses installations fixes (les groupes électrogènes, les pompes, etc.) [1].

I.4. Moteur à combustion interne

Un moteur à combustion interne ou MCI (en anglais : Internal Combustion Engine ou ICE) est un type de moteur à combustion, c'est-à-dire un moteur permettant d'obtenir un travail mécanique à partir d'un gaz en surpression, cette dernière étant obtenue à l'aide d'un processus de combustion. Dans le cas d'un moteur à combustion interne, cette combustion a lieu à l'intérieur du moteur [2].

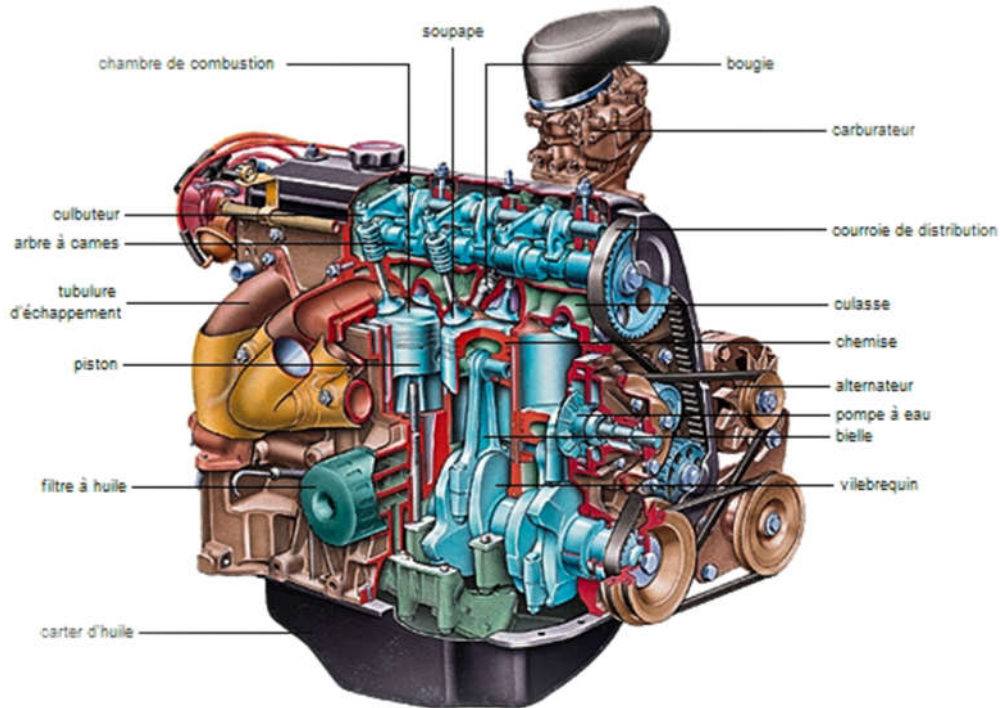


Figure I.1 : Vue éclatée d'un moteur à explosion [2].

I.5. Éléments mécaniques fondamentaux d'un MCI

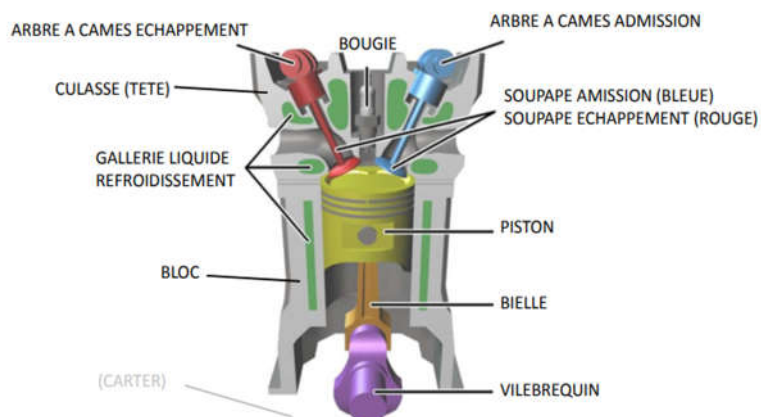


Figure I.2 : Composantes principales du moteur à combustion interne.

1) Composants fixe

a. Le bloc-moteur

Le bloc-cylindres, aussi appelé bloc-moteur, constitue le bâti du moteur à pistons dont la partie intérieure est usinée pour former les cylindres ou les logements de chemises, s'il s'agit d'un moteur à chemises rapportées. L'eau de refroidissement circule librement à l'intérieur du carter-moteur. La partie supérieure du bloc est dressée pour former le plan de joint pour la culasse du moteur, qui vient coiffer les cylindres.

Le bloc-cylindres ou bloc moteur remplit des différentes fonctions. Il doit résister à la pression des gaz de la combustion qui tendent à le dilater et pousser sur la culasse. Il doit guider le piston, d'où la nécessité de réduire le frottement et d'augmenter la résistance à l'usure.

Il doit contenir le liquide de refroidissement tout en résistant à la corrosion [3].

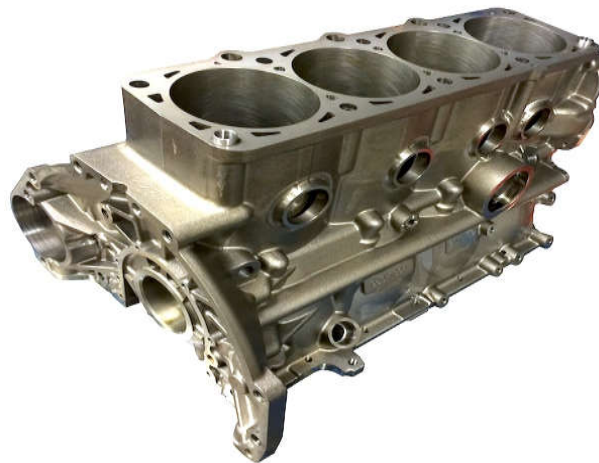


Figure I.3 : Bloc moteur [3].

b. Culasse

La culasse est la partie supérieure du moteur. Il s'agit d'une pièce complexe, en fonte ou en aluminium généralement obtenue par la fonderie qui comporte le plus souvent, sur un moteur à quatre temps :

- Les conduits d'admission,
- Les conduits d'échappement,
- Des chambres d'eau pour les moteurs à refroidissement liquide ou de larges ailettes pour les moteurs à refroidissement à air.

D'autre part, suivant les types de moteurs, et les technologies retenues, elle est le support des dispositifs suivants [3] :

- Les soupapes et leur système de commande (distribution) et le sous-système de graissage associé ;
- Les dispositifs d'injection et/ou d'allumage ;
- Les dispositifs d'assemblage culasse/bloc-cylindres.

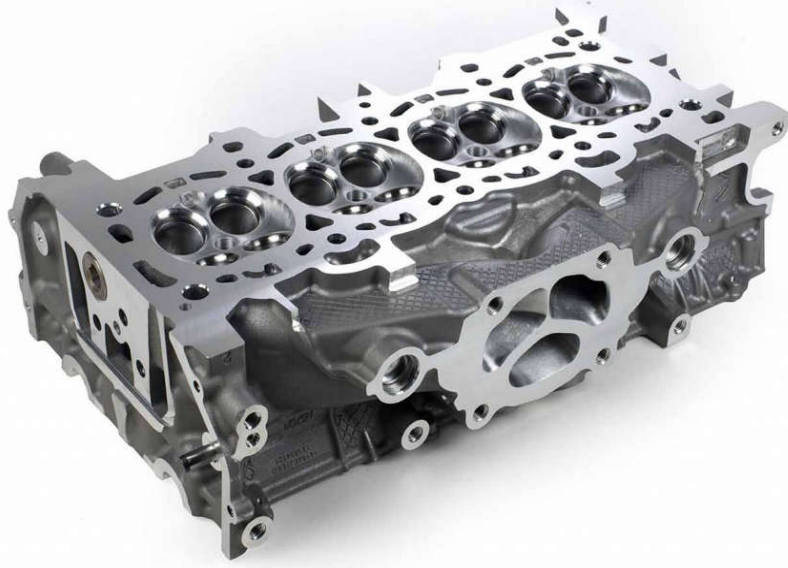


Figure I.4 : Culasse [3].

2) Composants mobiles

a. Piston

Le piston est un organe qui constitue les parois de la chambre de combustion, il est animé d'un mouvement alternatif et rectiligne dans le cylindre, il détermine ainsi l'admission, la compression et l'échappement. Il transmet au vilebrequin par l'intermédiaire de la bielle, l'effort exercé par la pression des gaz pendant la combustion et la détente.

Pour que l'aspiration et compression puissent avoir lieu dans de bonnes conditions, il faut que le piston forme avec le cylindre un espace parfaitement clos.

Le piston est en alliage d'aluminium avec un anneau porte-segment en fonte, recouvert d'un enduit graphité permettant de favoriser le rodage et éviter les grippages en cas de surchauffe anormale.

Les segments sont au nombre de trois, le segment Key stone à surface bombée, chromée. Le segment intermédiaire est un segment Key stone chromé droit qui assure l'étanchéité du piston dans le cylindre. Le segment racleur est de type deux rails chromés, il sert à racler l'huile sur le cylindre pour qu'elle ne soit pas brûlée [3].



Figure I.5 : Piston [3].

b. 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 tulipe), 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 [3].

On distingue deux sortes de soupapes :

- Les soupapes d'admission permettent à l'air d'entrer dans la chambre combustion.
- Les soupapes d'échappement permettent l'évacuations des gaz brûlés.



Figure I.6 : Soupape [3].

c. Bielle

Il s'agit d'une pièce qui assure la liaison entre le piston et le vilebrequin. La bielle se compose de trois parties [3] :

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



Figure I.7 : Bielle [3].

d. Vilebrequin

Le vilebrequin est une pièce de moteur à combustion interne ou de moteur Stirling. Il est l'élément principal du système bielle-manivelle, il permet la transformation du mouvement linéaire alternatif dû aux pistons en un mouvement de rotation continu [5]. Par conséquent, le vilebrequin va entraîner tous les éléments du moteur qui ont besoin d'un mouvement rotatif comme [3] :

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



Figure I.8 : Vilebrequin [3].

e. 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 [3].



Figure I.9 : Arbre à cames [3].

I.6. Aspects du moteur à combustion interne

1) Moteur thermique à combustion interne

Le moteur à combustion interne est une machine thermique qui convertit l'énergie chimique du combustible en énergie mécanique, généralement sous forme d'un mouvement rotatif d'un arbre en procédant par une combustion du combustible. Un moteur est dit à combustion interne si la combustion se fait à l'intérieur du moteur [4].

2) Principe de fonctionnement

Le carburant pulvérisé très finement et mélangé à l'air forme un mélange combustible qui est introduit dans le cylindre. Cette introduction correspond à l'opération d'admission. À ce stade de l'introduction dans le cylindre, le mélange gazeux est à faible pression. Si on l'enflammait à ce moment, il ne pourrait fournir qu'un travail insuffisant, il faut au préalable le comprimer : c'est l'opération de compression.

Puis, le mélange enflammé se détend en fournissant l'effort moteur transformé en mouvement de rotation sur l'arbre moteur grâce au mécanisme bielle-manivelle.

Enfin, il faut que les gaz brûlés soient évacués avant qu'un nouveau mélange frais soit admis dans le cylindre : c'est l'opération d'échappement. Puis, ces opérations se répètent dans le même ordre pour constituer le cycle moteur [4].

3) Comparaison entre le moteur Diesel et le moteur essence

Le moteur diesel se différencie du moteur à explosion par plusieurs points.

Dans le moteur à explosion, le mélange air-essence est formé dans le carburateur à l'extérieur du cylindre. Par contre, dans le moteur diesel, il se fait dans le cylindre, l'air étant aspiré et le combustible injecté ensuite, à l'aide d'un "injecteur" alimenté par une "pompe d'injection" qui lui communique une pression supérieure à celle régnant dans le cylindre en fin de compression pour permettre son introduction.

Dans le moteur à explosion on essaie d'augmenter le taux de compression mais on est limité par le phénomène "d'auto-allumage". Dans le moteur Diesel, seul l'air est aspiré et on peut le comprimer sans inconvénient pour atteindre des pressions et des températures très élevées.

Le taux de compression est plus élevé dans le moteur diesel que dans le moteur à explosion, ce qui permet d'obtenir un rendement de l'ordre de 35 % alors que le rendement d'un moteur à explosion ne dépasse pas 25 %.

C'est au contact de cet air comprimé que le combustible alors injecté s'enflamme.

Comparativement au moteur à explosion, le moteur Diesel ne possède ni carburateur, ni système d'allumage, mais chaque cylindre a un système d'alimentation propre qui comprend : un injecteur et un élément de la pompe d'injection [4].

4) Avantages et inconvénients du moteur diesel

Le moteur diesel fournit de l'énergie mécanique meilleure que le moteur à essence pour les raisons suivantes [4] :

- Le rendement est élevé ;
- Le combustible employé pour les moteurs Diesel est relativement bon marché ;
- Les gaz d'échappement sont moins toxiques ;
- Les pièces doivent être largement calculées. ;
- La construction est donc lourde ;

- L'étanchéité entre piston et cylindre est difficile à réaliser, d'où obligation de disposer sur les pistons d'un nombre suffisant de segments ;
- Une température constante assez élevée est indispensable pour obtenir une bonne combustion. Il faut donc prévoir un refroidissement correct du moteur ;
- L'entretien d'organes de précision tels que les injecteurs ou la pompe d'injection nécessite l'intervention de spécialistes qualifiés ;
- Le graissage est délicat en raison des pressions élevées transmises par le piston à tous les organes mobiles du moteur.

5) Classification des moteurs à combustion interne

a) Selon le mode de construction

Il y a 3 types de moteur thermique [5] :

- Moteur à piston alternatif ;
- Moteur à piston rotatif ;
- Moteur appelé turbine.

b) Selon la source d'énergie

Il y a [5] :

- Moteur thermique (source d'énergie est la combustion) ;
- Moteur électrique (source d'énergie électrique) ;
- Moteur solaire (source d'énergie solaire).

c) Selon le mode de combustion

Les moteurs thermiques existent en deux types [5] :

- Moteur à combustion interne ;
- Moteur à combustion externe.

Si les processus I (combustion) et le processus II (détente), se produisent dans un même organe, le moteur est dit à combustion interne.

Si les processus I (combustion) et processus II (détente) se produisent dans des organes différents, le moteur est dit à combustion externe.

d) Selon le mode de fonctionnement

Il y a deux types de moteur à combustion interne [5] :

- Moteur fonctionnant suivant le cycle d'Otto, ($V = \text{constant}$) à essence appelé moteur à allumage commandé ;
- Moteur fonctionnant suivant le cycle diesel, ($P = \text{constante}$) ;
- Moteur diesel à cycle mixte ($V = \text{constante}$ et $P = \text{constante}$).

e) Selon le type d'admission

Il y a deux genres de moteurs [5] :

- Moteur atmosphérique (sans suralimentation) ;
- Moteur suralimenté.

f) Par la méthode de formation du mélange

Il y a : [5]

- Moteur avec formation de mélange externe (carburateur et gaz) ;
- Moteur avec formation de mélange interne (diesel et essence avec injection de carburant dans le cylindre).

g) Par le biais de la réalisation du cycle de travail

Il y'a deux types [5] :

- **Cycle a quatre temps**

Les quatre phases de fonctionnement du moteur ont été définies dès 1862 par Beau de Rochas [6] :

- ❖ **Temps admission** : aspiration d'air ou de mélange air-essence ;
- ❖ **Temps compression** : de l'air ou du mélange ;
- ❖ **Temps combustion-détente** : inflammation rapide du mélange provoquant une brusque montée en pression des gaz puis leur détente ;
- ❖ **Temps échappement** : évacuation des gaz brûlés par la soupape d'échappement.

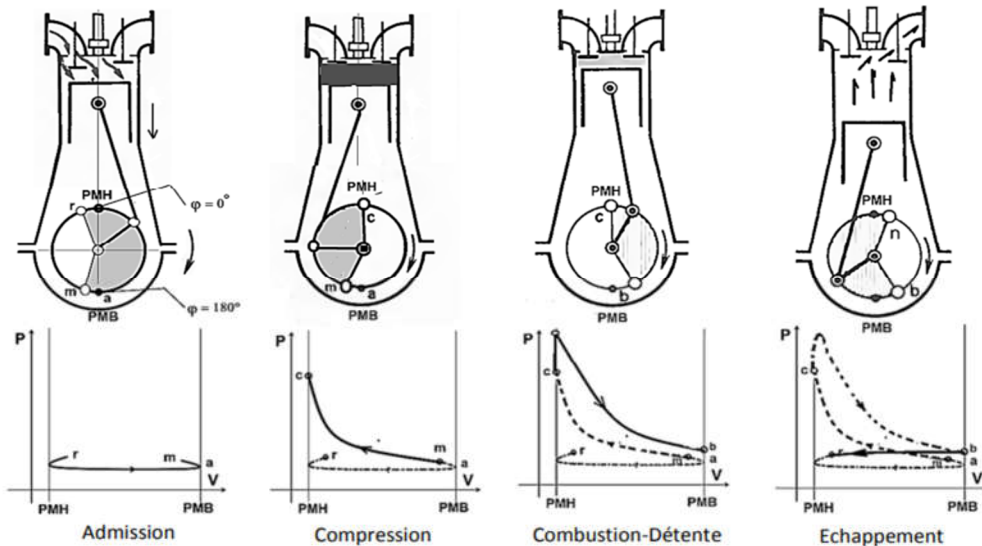


Figure I.10 : Schématisation des quatre temps [6].

- **Le cycle a deux temps**

Il est possible de fabriquer des moteurs à allumage commandé ou des moteurs Diesel à deux temps, ayant un cycle de combustion un temps sur deux, au lieu d'un temps sur quatre pour les moteurs à quatre temps. Le rendement de tels moteurs est plus faible que celui des moteurs à quatre temps ; la puissance d'un moteur à deux temps est toujours inférieure à la moitié de celle d'un moteur à quatre temps de taille comparable [6].

- ❖ 2 temps = 2 courses du piston (1 tour)
- ❖ Le 1er temps (du PMB au PMH)
- ❖ Le 2ème temps (du PMH au PMB)

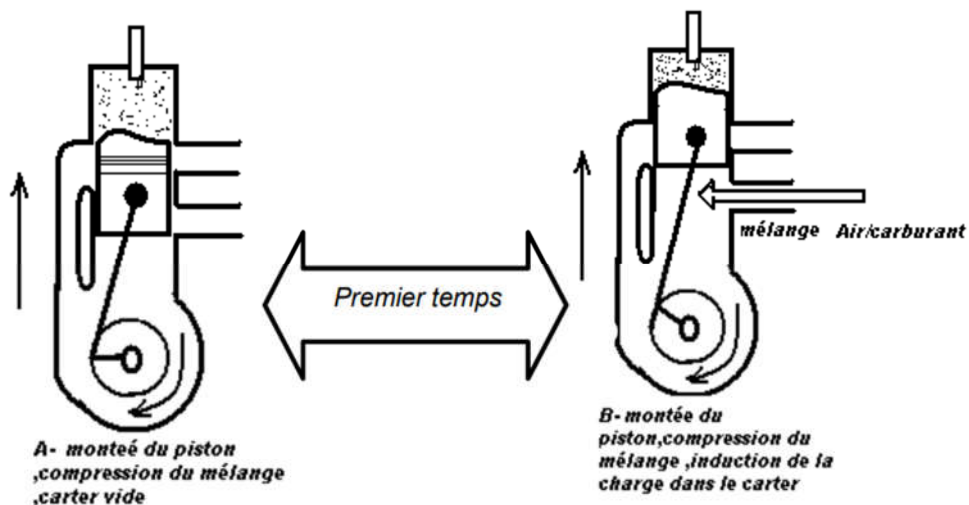


Figure I.11 : Schématisation des deux temps [6].

h) Selon le type d'injection

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

- **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 (temps sur les 4 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 [7].

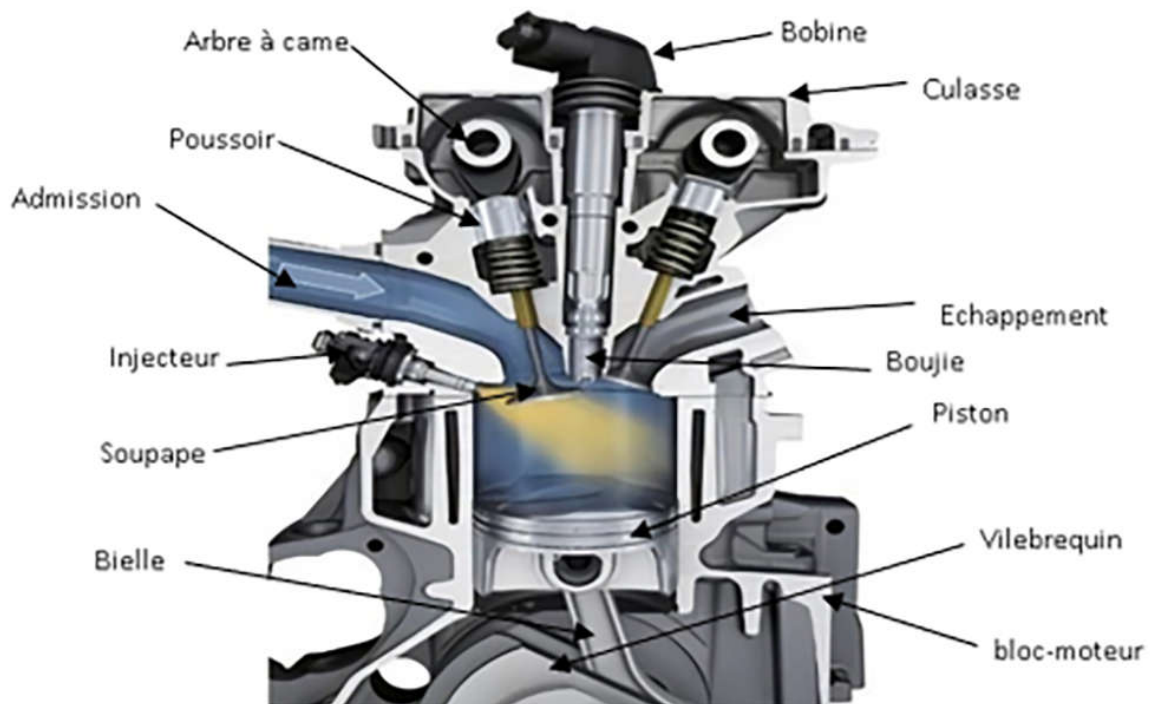


Figure I.12 : Injection directe.

- **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'essence). Le mélange sera effectué encore une fois grâce aux "courants d'air" générés par les va et vient du cycle 4 temps (mais aussi par la conception aérodynamique précise de l'intérieur du moteur, qui permet alors les turbulences nécessaires au mélanges air/carburant).

Notons 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) [7].



Figure I.13 : Injection indirecte.

Chapitre II

Systeme de distribution

II.1. Introduction

Lors de son fonctionnement, un moteur à combustion ou explosion passe par un certain nombre de phase, et cela dans un ordre bien précis. Ces phases sont appelées "temps".

Afin que toutes ces phases soient ordonnées, il est nécessaire de parfaitement les synchroniser.

Dans le cas de l'automobile (moteur 4 temps) il s'agit d'un système relativement complexe compte tenu du nombre de pièces en mouvement simultanés, tout cela à synchroniser avec précision.

Le mouvement circulaire du vilebrequin est transmis à l'arbre à cames par le biais d'un système appelé "**système de distribution**" puisqu'il est chargé d'utiliser et de distribuer la force transmise par le bas moteur à l'ensemble du moteur et ainsi faire fonctionner ensemble des éléments mécaniques et entraîne parfois entraîne la pompe à injection ou la pompe à eau.

II.2. Définition de la distribution

On appelle "distribution" l'ensemble des organes qui réalisent l'ouverture et la fermeture des conduits d'admission et d'échappement, et des éléments qui effectuent leur commande.

Le rôle de la distribution est de commander l'ouverture et la fermeture des soupapes, imposer leur instant de l'ouverture, l'amplitude et la durée du mouvement [8].

II.3. Mécanisme de distribution

La distribution regroupe les mécanismes illustrés sur la figure II.1 qui assurent l'admission et l'échappement des gaz dans les cylindres d'un moteur à explosion.

Le principe de fonctionnement de la distribution est comme suit : L'ouverture et la fermeture des cylindres sont réalisées par les soupapes.

L'ouverture est possible grâce à des cames, la fermeture est assurée par des ressorts. La transmission du mouvement de l'arbre à cames aux soupapes est assurée par des poussoirs. Elle peut comprendre également des tiges de culbuteurs et des culbuteurs [9].

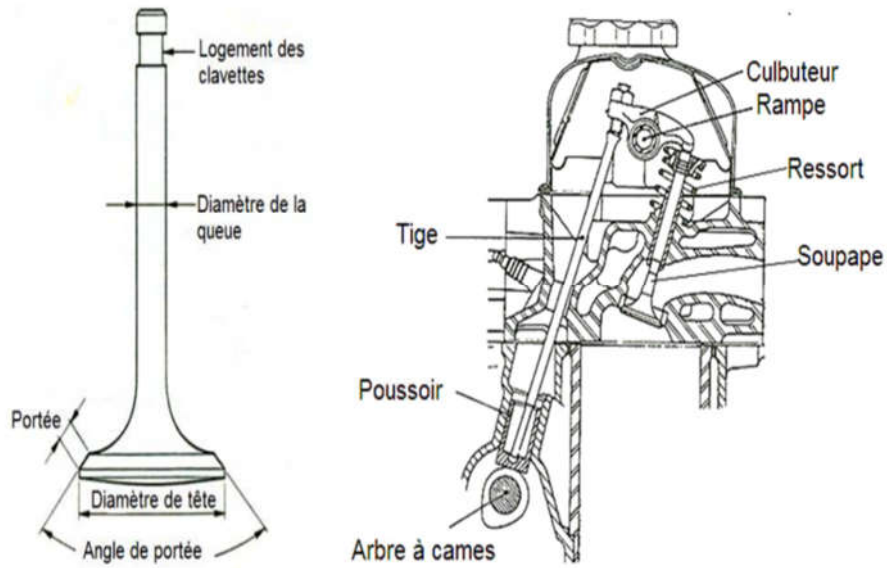


Figure II.1 : Mécanisme de distribution.

La synchronisation avec le vilebrequin est réalisée par des pignons reliés entre eux par un système indéformable (ex. chaîne, courroie...). Les différentes dispositions de l'arbre à came sont illustrées par la figure II.2.

- a. Arbre à came latéral et soupape inversée ;
- b. Arbre à came en tête ;
- c. Arbre à came latérale, poussoir, tige, culbuteur ;
- d. Arbre à came en tête et culbuteur.

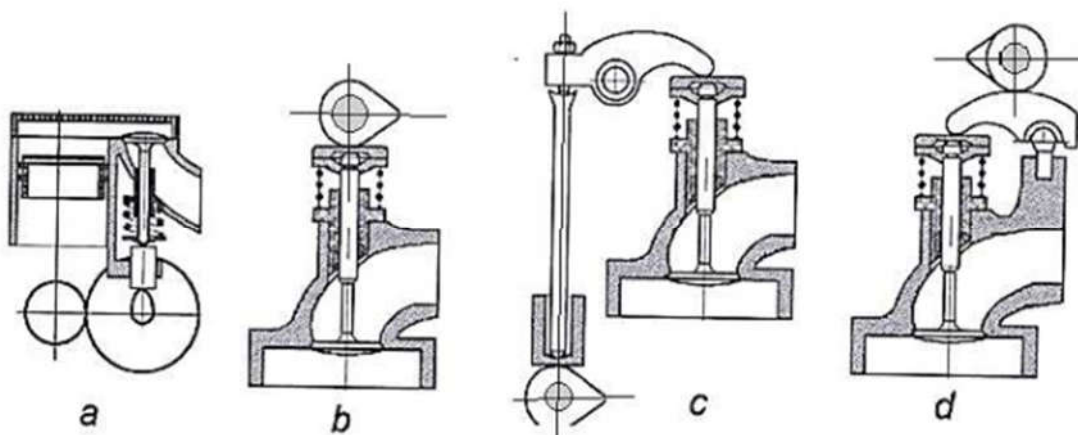


Figure II.2 : Dispositions de l'arbre à cames [9].

II.4. Différents types de distribution

Il existe trois grands types de système de distribution :

1) Distribution par chaîne

Comme son nom l'indique, c'est ici une chaîne qui s'occupe de faire la jonction entre les éléments (voir la figure II.3).

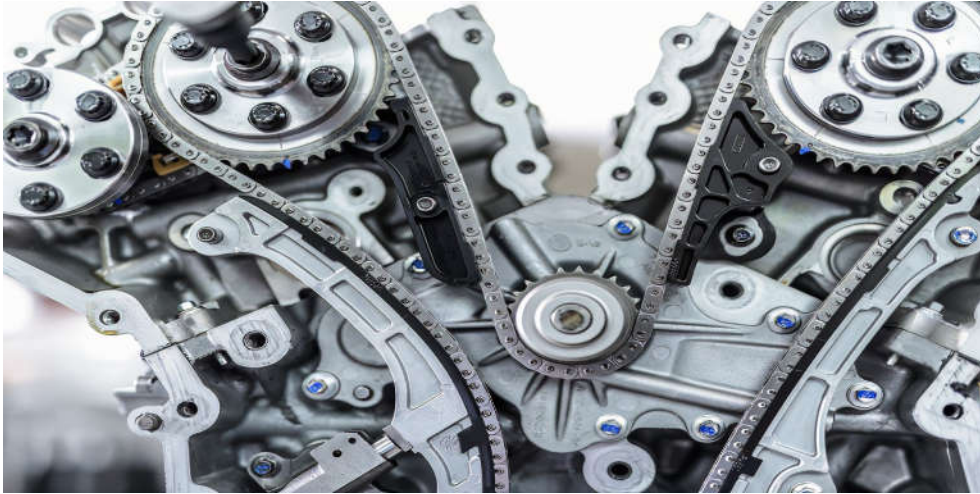


Figure II.3 : Distribution par chaîne.

2) Distribution par cascade de pignon

Très peu diffusé, il s'agit d'un système complexe d'engrènement de pignons, réputé inusable mais consommatrice de puissance (voir la figure II.4).

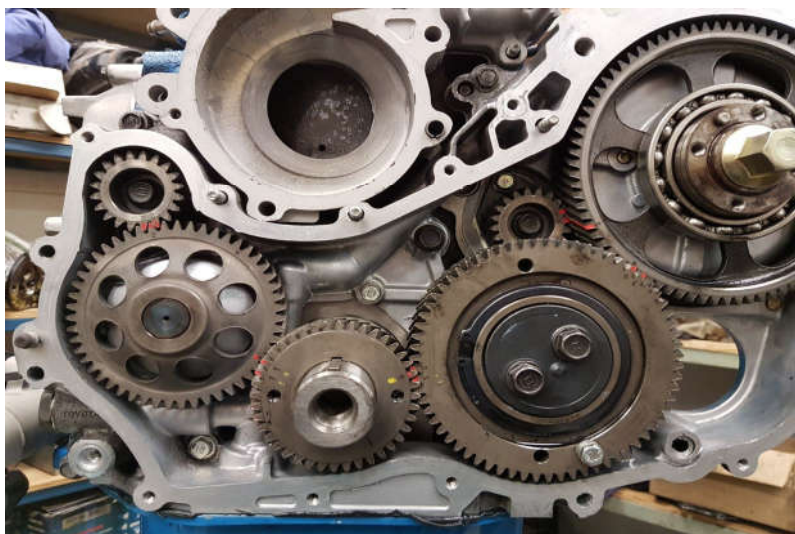


Figure II.4 : Distribution de cascade de pignon.

3) Distribution par courroie

C'est le montage le plus courant sur les véhicules modernes. En effet elles ont l'avantage de ne nécessiter aucun graissage et d'être silencieuses mais nécessitent un entretien particulier (voir la figure II.5).



Figure II.5 : Distribution par courroie.

II.5. Éléments de la distribution

Il existe plusieurs éléments de distribution (voir la figure II.6) dans le moteur à combustion interne, parmi eux on a les éléments intermédiaires indiqués dans la figure II.7 (Culbuteur, Tiges culbuteur, Poussoirs, Arbre à cames ...etc.).

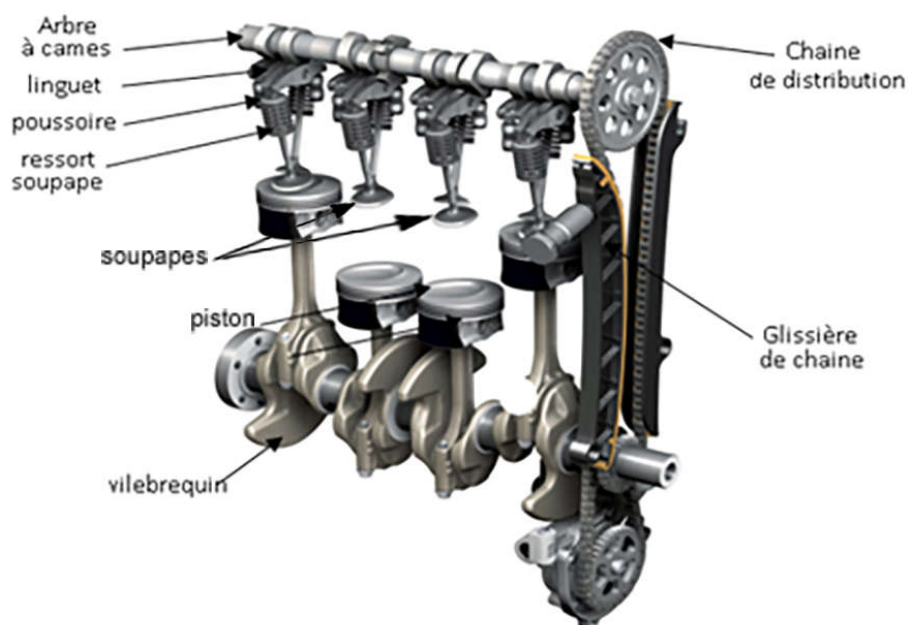


Figure II.6 : Les éléments de distribution.

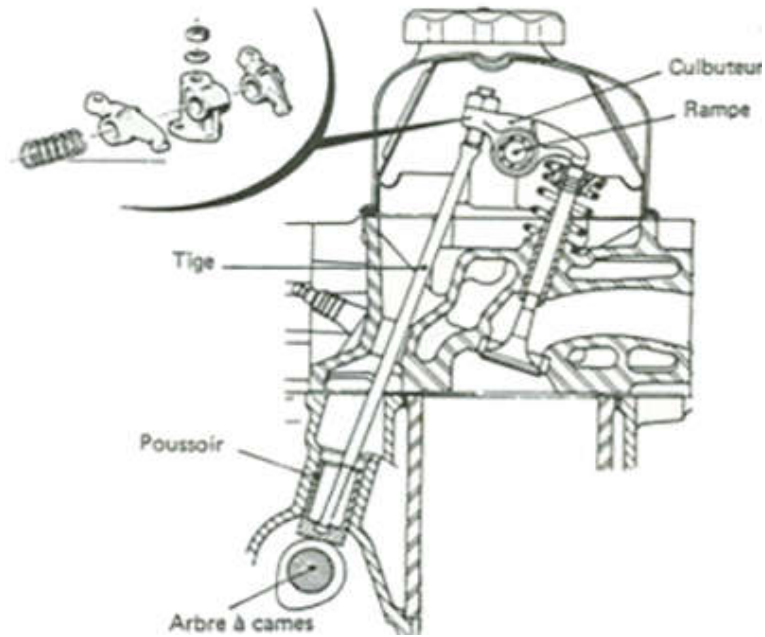


Figure II.7 : Les éléments intermédiaires [8].

1) Culbuteur

Un culbuteur (voir figure II.8) est un levier basculant qui fait partie de la transmission secondaire alternative de la commande de distribution. Le culbuteur reçoit en un point la poussée de la came, soit directement soit par l'intermédiaire d'une tige, et par un autre point pousse la soupape en ouverture.

Le culbuteur peut être en fonte, matériau convenant pour les parties frottantes. Il peut être en acier, mais nécessite alors un traitement thermique pour durcir les parties frottantes [8].



Figure II.8 : Culbuteur [8].

2) Tiges culbuteur

La tige de culbuteur est un élément de la commande de distribution qui transmet le mouvement de la came au culbuteur dans un moteur culbuté. Elle comporte une extrémité de forme sphérique qui appuie au fond du poussoir et l'autre extrémité en forme de cuvette dans laquelle s'articule la vis de réglage portée par le culbuteur [8] (voir la figure II.9).



Figure II.9 : Tiges culbuteur [8].

3) Poussoirs

Des poussoirs sont interposés entre les cames et les soupapes. Ils servent d'intermédiaire entre le mouvement de rotation des cames et le mouvement rectiligne des soupapes. Selon la position de l'arbre à cames par rapport aux soupapes, il est nécessaire d'interposer des culbuteurs et des tiges de culbuteurs.

Sur les moteurs à arbre à cames latéral, ils sont interposés entre les cames et les tiges de culbuteurs. Sur les moteurs à arbres à cames en tête, les poussoirs sont inversés et coiffent les ressorts de rappel de soupapes. Un graissage performant est nécessaire, sauf lorsqu'ils sont à galet [8]. Il existe trois types de poussoirs : Poussoir à galet, Poussoir cylindrique et Poussoir à plateau (voir la figure II.10).

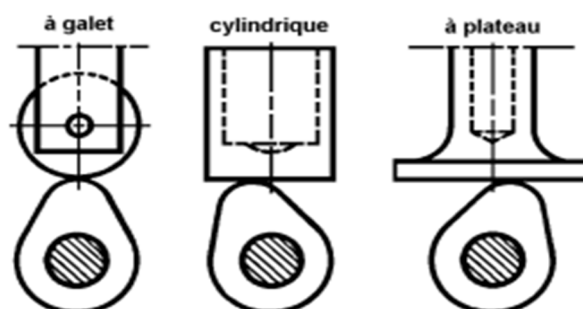


Figure II.10 : Poussoirs [8].

4) Poussoir Hydraulique

Certains moteurs sont équipés de poussoirs hydrauliques, ce qui supprime le réglage du jeu aux soupapes qui devient automatique [8] (voir la figure II.11).



Figure II.11 : Poussoir hydraulique [8].

5) Culbuteur Linguet

Le mouvement du linguet (figure II.12) est défini par :

- ❖ Une rotation à l'une de ses extrémités, présentant éventuellement une butée hydraulique ;
- ❖ Le contact avec la came, le linguet peut posséder soit un roulement à aiguilles afin de diminuer les frottements, soit un simple patin pour réduire la masse ;
- ❖ Le contact à la soupape à l'autre extrémité du linguet ;
- ❖ Le linguet est conçu pour avoir une faible masse mobile, et permet une implantation des arbres à cames moins contraignante par rapport à une distribution à poussoirs. En revanche, l'usinage de la came est plus délicat car elle contient des concavités.



Figure II.12 : Culbuteur linguet [8].

6) Arbre à cames

L'arbre à cames (figure II.13) 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 [3].



Figure II.13 : Arbre à cames [3].

II.6. Emplacement de l'arbre à cames

L'emplacement de l'arbre à cames varie en fonction du modèle. Pour un moteur doté de soupapes latérales, l'arbre à distribution se trouve près du vilebrequin. Un arbre à cames en tête est directement situé sur la culasse, au-dessus des soupapes. Du fait de sa position, l'arbre à cames doit être démonté lors du remplacement de vilebrequin ou de courroie de distribution. Par conséquent, ce genre d'intervention implique le changement des joints SPI de l'arbre à cames.

II.7. Entraînement de l'arbre à cames

Dans tous cas c'est le vilebrequin qui assure l'entraînement de l'arbre à cames. L'arbre à cames doit tourner deux fois moins vite que le vilebrequin car les soupapes ne doivent s'ouvrir qu'une fois par cycle.

II.8. Soupapes

Les soupapes sont les organes qui régissent l'entrée et la sortie des gaz dans la chambre de combustion.

Le diamètre de leur tête doit être important. Cette dimension est limitée par la place libre dans la chambre de combustion, le poids de la soupape qui doit rester minimal, et par sa résistance mécanique aux chocs et aux déformations.

La portée conique assure une étanchéité parfaite à la fermeture et un centrage correct évitant la déformation de la tige.

Les angles de portée sont d'environ 90° . Les soupapes d'admission qui subissent des températures moins élevées peuvent avoir un angle de 120° , protégeant moins bien la soupape des déformations, mais offrant, pour une même hauteur de levée, une section de passage de gaz plus importante [10].

II.9. Détails d'une soupape

Les soupapes de grande série sont en acier au nickel-chrome sont obtenues par matriçage avec chauffage électrique. Elles sont tournées puis rectifiées. Les queues et les portées reçoivent un traitement qui accroît leur dureté. Pour les moteurs présentant des surchauffes au niveau des soupapes, on dispose de soupapes à tige creuse et partiellement remplies de sodium ou des sels de lithium et potassium [10] (voir figure II.14).

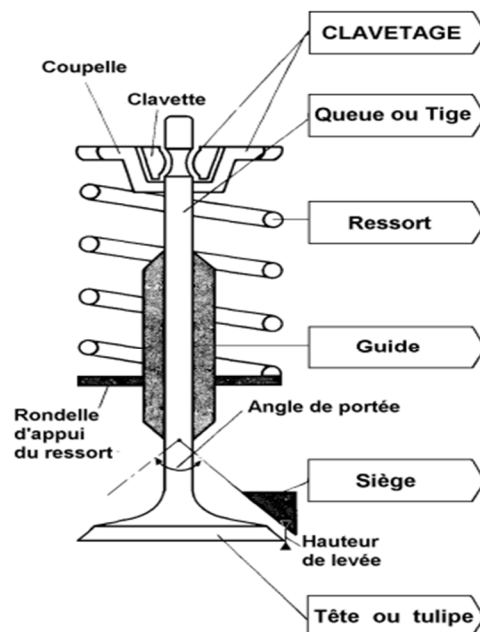


Figure II.14 : Détails d'une soupape [10].

II.10. Principe de fonctionnement des soupapes

L'ouverture et la fermeture des soupapes est régie par une loi de distribution qui impose les points d'ouverture et de fermeture par rapport aux points morts haut et bas.

Le bon fonctionnement est conditionné par :

- L'amplitude du mouvement des soupapes ;
- La synchronisation avec les mouvements du piston ;
- Le respect de l'ordre de fonctionnement des cylindres.

II.11. Calage de distribution

Quel que soit le système de commande de la distribution, le monteur ou le réparateur se trouve confronté au problème du positionnement relatif des éléments afin que le mouvement de l'arbre à cames soit coordonné avec celui du vilebrequin de sorte que les soupapes se lèvent et se ferment au moment où les pistons passent par un point donné de leur cycle.

Cette opération de positionnement est appelée : "calage de la distribution".

Dans la pratique les constructeurs prévoient des repères sur les différents éléments de la commande de distribution : pignons, roues de chaîne, roues dentées, chaînes et courroies. Il suffit que le monteur associe ces repères (figure II.15) pour que le montage soit correct [8].

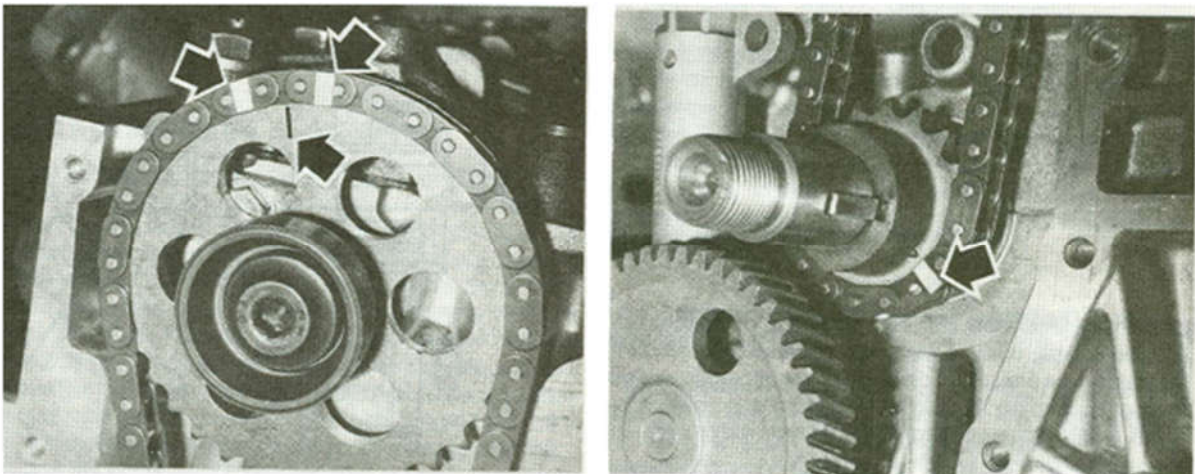


Figure II.15 : Calage de distribution [8].

II.12. Jeu des soupapes

À froid, un jeu aux soupapes est nécessaire (figure II.16) afin d'assurer l'étanchéité parfaite lorsque le moteur sera chaud. En effet, la dilatation de la tige de soupape est importante en raison des températures atteintes dans la chambre de combustion. Ainsi la tête de soupape risquerait de ne plus porter sur son siège.

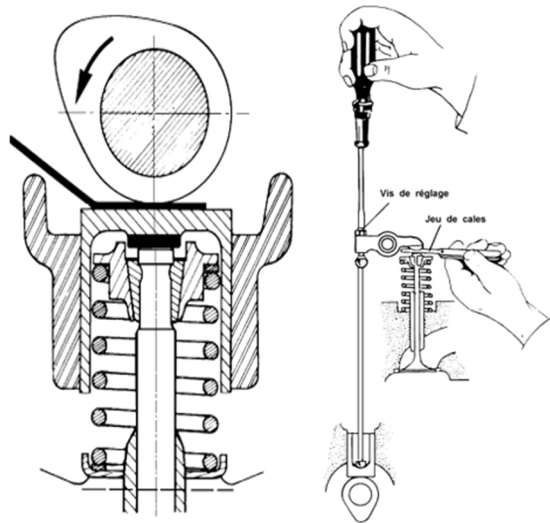


Figure II.16 : Jeu des soupapes [8].

Chapitre III

Conception de l'arbre à cames

III.1. Introduction

L'arbre à cames est un composant mécanique d'un moteur à combustion interne. Il ouvre et ferme les soupapes d'admission et d'échappement du moteur au bon moment, avec la course exacte et dans une séquence précisément définie. L'arbre à cames est entraîné par le vilebrequin au moyen de pignons, d'une courroie ou d'une chaîne de distribution.

III.2. Historique

Au début de l'ère automobile, l'arbre à cames était disposé latéralement, dans le carter moteur, et commandait uniquement les soupapes d'échappement disposées elles aussi latéralement au cylindre ; les soupapes d'admission s'ouvrant quant à elles automatiquement par dépression lors de l'admission.

Plus tard, un jeu de cames supplémentaire fut ajouté sur l'arbre pour la commande des soupapes d'admission. Les soupapes étaient toujours disposées latéralement et actionnées par des poussoirs. Cette configuration simplifiait l'entraînement de l'arbre grâce à un simple train d'engrenages. Cependant, les soupapes latérales ne permettaient pas de réaliser des taux de compression élevés et par conséquent le rendement restait faible, cette disposition impose un vaste espace mort dans la culasse, augmentant inutilement le volume de la chambre de combustion.

Après 1910, le déplacement des soupapes dans la culasse tout en gardant l'arbre à came latéral, imposa les culbuteurs, ce système de distribution a été adopté sur une très grande échelle pendant environ sept décennies.

Cependant, la masse des poussoirs, des tiges et des culbuteurs devint importante, imposant des réglages minutieux et limitant fortement la vitesse de rotation du moteur. L'arbre à cames en tête qui avait fait son apparition en 1903 sur un moteur pour voiture automobile de l'anglais Mandslay, fut adopté en série par Isotta Fraschini en 1905 sur le modèle "D 100 HP". Et seulement bien plus tard, dans la production en grande série industrielle. Un système à deux arbres à cames en tête lui est fréquemment préféré pour ces avantages lors de la disposition en V des soupapes sur les moteurs à fort rendement. La Peugeot Grand Prix 7.6 litres fut la première à inaugurer cette technique en sport automobile [12].

III.3. Principe de fonctionnement

Le mouvement est transmis du vilebrequin jusqu'à l'arbre à cames par l'intermédiaire de la courroie de distribution à partir du pignon de vilebrequin puis le mouvement de rotation est transformé en mouvement de translation à travers l'arbre à cames qui fait actionner les soupapes [13] (voir figure III.1).

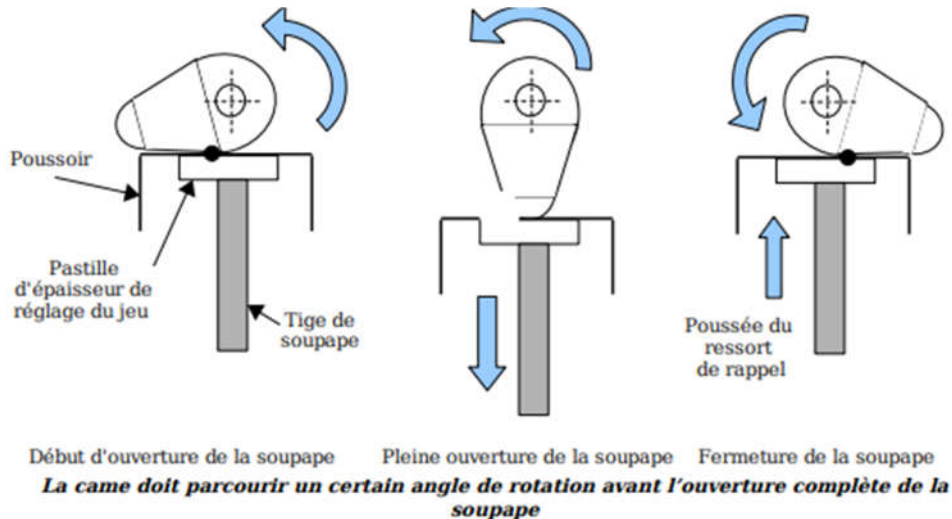


Figure III.1 : Fonctionnement du l'arbre à cames [13].

III.4. Implantation des arbres à cames

Selon la disposition des cylindres et celle des soupapes on peut trouver des moteurs ayant un ou deux, voire plus pour les moteurs en V, arbres à cames en tête. Les arbres à cames en tête permettent une attaque plus directe sur les soupapes. Le nombre de pièces en mouvement, les jeux et les usures sont ainsi diminués [14].

III.5. Fonctionnement de l'arbre à cames sur les soupapes

Lorsque le moteur est lancé par l'utilisateur, l'arbre à cames va se mettre à tourner. En tournant, les cames vont successivement appuyer sur les queues des soupapes, qui sont montées sur des ressorts. C'est cet effet d'appui généré par l'arbre à cames qui va pousser les queues de soupapes vers l'extérieur, permettant l'entrée de l'air ou la sortie du résultat de la combustion du moteur, ceci en fonction de l'utilité des soupapes associées au mouvement. Une fois que la came est passée, la soupape reprend sa place grâce à l'action des ressorts.

Le rythme de rotation de l'arbre à cames, et donc celui de l'ouverture des soupapes, est directement impulsé par le régime moteur [15].

III.6. Différents types d'arbres à cames

Il existe différents types d'arbres à cames, chacun ayant une fonctionnalité différente dépendant des besoins du moteur [15] :

1) Arbre à cames latéral

L'arbre à cames latéral est un modèle d'arbre à cames anciennement installé sur certains moteurs, mais qui est très peu utilisé de nos jours. La particularité de cet arbre à cames est qu'il n'active pas directement les soupapes, mais qu'il doit impulser le mouvement du régime moteur à de grandes tiges en acier, nommées "culbuteurs", et situées sur les côtés du moteur [15].

2) Arbre à cames en tête

L'arbre à cames en tête est placé au-dessus du moteur et impulse le rythme du régime moteur, fourni directement par le vilebrequin, aux soupapes situées sur la partie supérieure du moteur [15].

3) Double arbre à cames en tête

Si son fonctionnement est essentiellement le même que celui des arbres à cames en tête, le fait d'ajouter un second arbre à cames en tête à un moteur permet à celui-ci d'être plus efficace dans les hauts régimes, ce qui en fait un composant essentiel des voitures pensées pour la compétition [15].

III.7. Les Cames

Une came est un organe mécanique constituant une mémoire et destiné à restituer un mouvement de translation ou rotation synchrone par rapport à un mouvement moteur (rotation uniforme le plus souvent).

Le profil de la came constitue la mémoire de mouvement enregistré. Il s'agit d'une forme complexe. La solution la plus répandue est constituée d'un cylindre de rayon variable entraîné en rotation par un arbre. La pièce en contact avec le profil de la came, le suiveur, est alors mise en mouvement. Une association de cames solidaires d'un même arbre s'appelle un excentrique, et sa déclinaison la plus courante, un arbre à cames. Il est utilisé dans la majorité des moteurs à combustion interne [16].

III.8. Causes et problèmes des arbre à cames

L'arbre à cames doit toujours être en parfait état. Il existe plusieurs problèmes d'arbre à cames courants :

1) Usure des lobes de came

L'usure des lobes de came est l'un des problèmes les plus courants nécessitant la réparation ou le remplacement de l'arbre à cames. En tant que composants mobiles, les lobes de came entrent fréquemment en contact avec des débris, de la saleté et un huilage inapproprié. Ainsi, avec le temps, ils peuvent être endommagés et nécessiter un remplacement [17].

2) Capteur d'arbre à cames défectueuses

La deuxième cause de problèmes d'arbre à cames est un capteur d'arbre à cames défectueux. Le travail du capteur d'arbre à cames est de surveiller la synchronisation de la rotation de l'arbre à cames et du vilebrequin. Sur la base des rapports de ce capteur, nous contrôlons les systèmes d'allumage et d'injection de carburant. Inutile de dire que si ce capteur est défectueux, le véhicule peut rencontrer des problèmes de performances ou d'allumage différents [17].

3) Système de distribution désynchronisée

La troisième et la plus grave cause de problèmes d'arbre à cames est un mouvement d'arbre à cames et de vilebrequin déséquilibré, généralement causé par une courroie de distribution défectueuse.

Une courroie de distribution endommagée ou désynchronisée peut nuire à l'arbre à cames et à l'ensemble du moteur. Par exemple, cela peut endommager les pistons, les soupapes, les lobes, les culbuteurs ou même casser tout votre arbre à cames [17].

III.9. Matériaux utilisés dans l'arbre à cames

En raison du besoin de stabilité, de durabilité et de résistance à la température, les arbres à cames sont généralement constitués de certains types de métaux.

Le plus souvent, les fabricants utilisent plusieurs types de matériaux pour produire des arbres à cames mais le plus utilisable c'est la fonte et l'acier allié [17].

III.10. Problématiques

Les arbres à cames sont des composants rotatifs soumis à des charges critiques. Par conséquent, la détermination des valeurs de charge exactes devient un défi par rapport aux autres éléments rotatifs. Ce projet fournit les lignes directrices pour résoudre une telle situation.

L'objectif est de concevoir l'arbre à cames de manière analytique et d'analyser la répartition des contraintes sur l'arbre à cames en maintenant équilibre tout en restant immobile, avec différents matériaux et estimer la durée de vie de l'arbre à cames.

III.11. Méthodologie

Pour la conception du modèle dans notre cas, nous avons utilisé le logiciel FreeCAD qui est très simple d'utilisation et performant d'utilisation, l'analyse et la simulation peuvent également être effectuées sur le même logiciel mais pour des résultats et une précision spécifique.

Au début on a choisi un modèle d'arbre à came proche d'un article récent fait en 2020 de Nikhil Subhash Chatane, Kiran Devade, contenant une étude statique (figure III.2) faite à l'aide de SolidWorks [18].

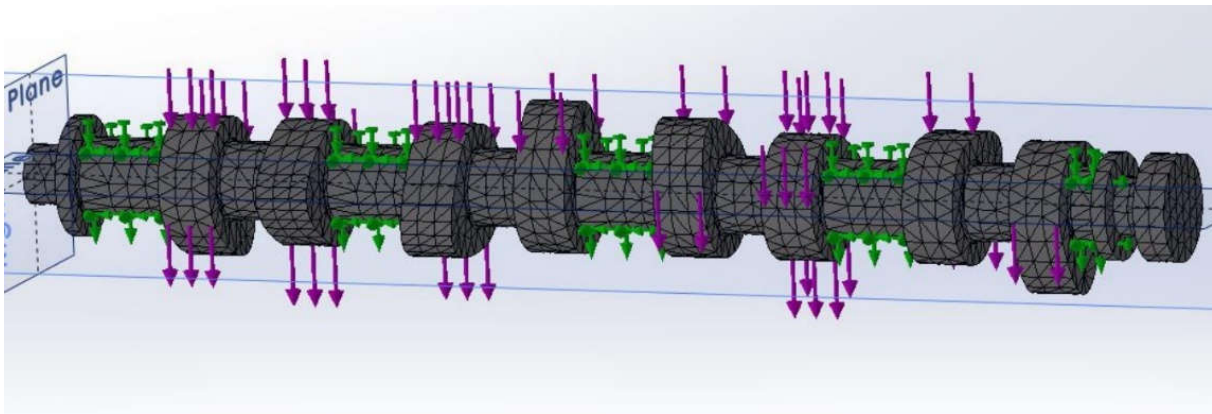


Figure III.2 : Chargement et fixation de la géométrie [18].

Ensuite, on a créé la pièce sur FreeCAD à la base de la pièce de l'article précédent avec les mêmes dimensions (figure III.3).

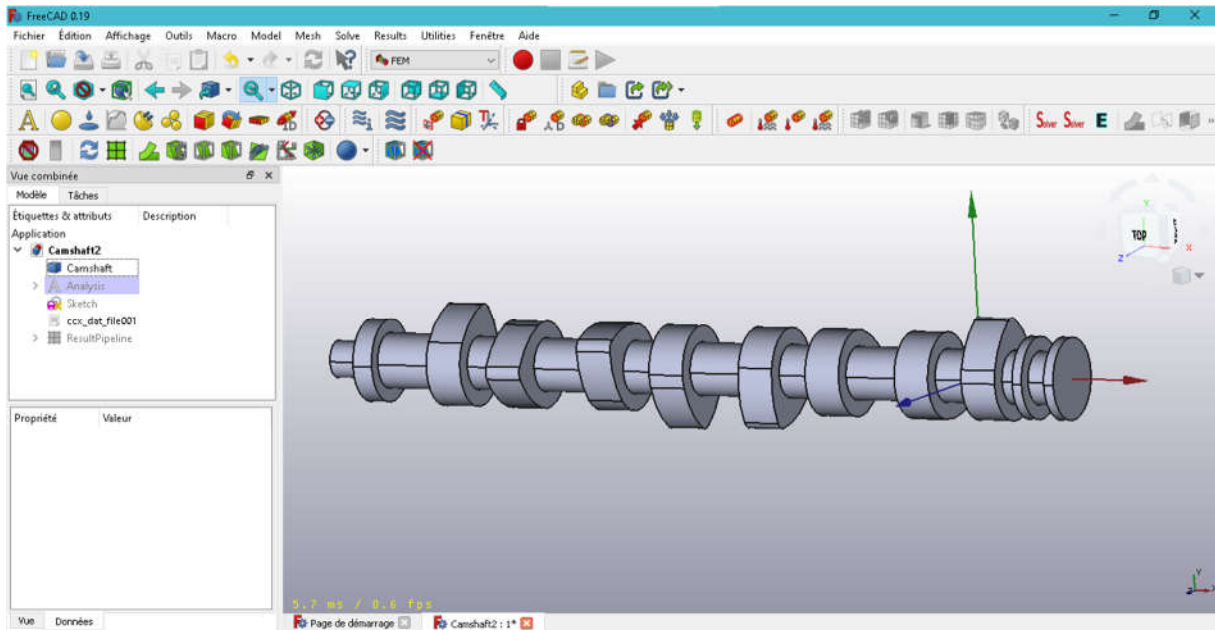


Figure III.3 : Arbre à cames modélisé dans FreeCAD.

Ensuite on a pris les mêmes conditions aux limites (figure III.4) de l'étude statique mentionnée comme illustré dans la figure III.2.

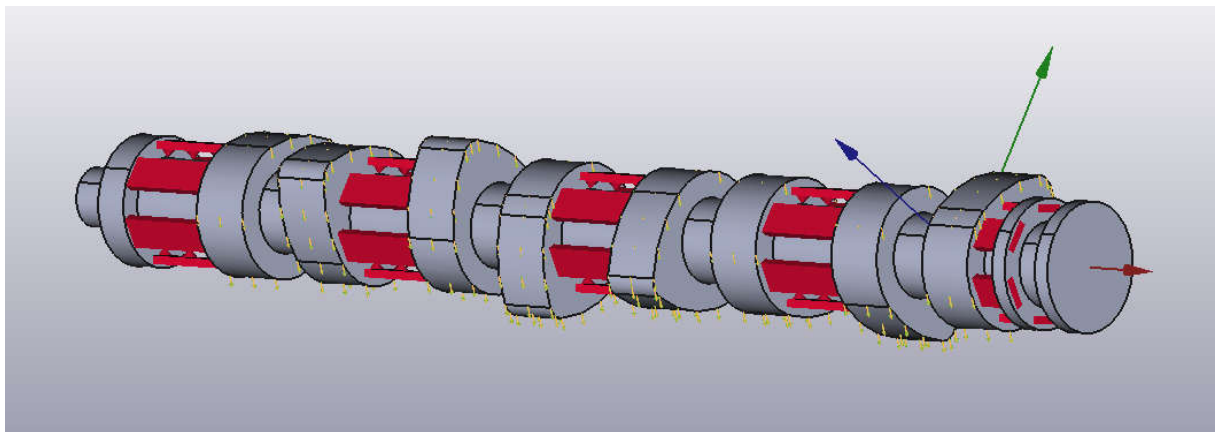


Figure III.4 : Arbre à cames modélisé dans FreeCAD.

Enfin, on a changé des paramètres et des conditions pour faire la différence entre le travail de l'article et notre travail et d'avoir de bons résultats.

III.12. Calculs de la force de contrainte appliquée sur la came

Diamètre d'alésage (D_b) = 75 mm = 0,075 m

Longueur de course (L) = mm = 0,0944 m

1) Pour l'équation de continuité [18] :

$$A_c = \frac{\pi}{4} D_b^2$$

$$A_c = \text{Aire du cylindre} = \frac{\pi}{4} 0,075^2 = 4,417 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$V = 2 L N / 60 \text{ tr/min}$$

$$N = \text{Vitesse du piston} = (2 \cdot 0,0944 \cdot 8000) / 60 = 25,17 \text{ m/s}$$

$$Q = A_c V$$

$$Q = 4,417 \cdot 10^{-3} \cdot 20 = 0,08834 \text{ m}^3/\text{sec}$$

2) Soupape d'admission :

V_{ip} = Vitesse d'orifice d'entrée = 145 m/s

$$\frac{\pi}{4} d_{ip}^2 V_{ip} = A_c V$$

$$\frac{\pi}{4} d_{ip}^2 \cdot 145 = 0,08834$$

d_{ip} = Diamètre d'orifice d'entrée.

$$d_{ip}^2 = 0,08834 \cdot 4 / (145 \pi)$$

$$d_{ip}^2 = 0,000775 \text{ m}$$

$$d_{ip} = 2,785 \cdot 10^{-2} \text{ m} = 27,85 \text{ mm}$$

3) Conception de l'arbre à cames :

Diamètre de l'arbre à cames = 0.026 m

Diamètre du cercle de base = 0.042 m

Largeur de came = 0.018 m

4) Les forces :

$$\text{Force} = F_{\text{ressort}} + F_{\text{inertie}}$$

5) Forces sur la came d'admission :

$$F = F_s + F_i$$

$$F_s = \text{Force du ressort}$$

$$F_i = \text{Force d'inertie}$$

$$d_{iv} = d_{ip} + 2 (0,05 d_{ip} \text{ jusqu'à } 0,07 d_{ip})$$

$$= 0,02785 + 2 (0,05 \cdot 0,02785)$$

$$= 0,03072\text{m}$$

$$d_{iv} = \text{Diamètre de soupape}$$

$$F_s = 703,33 \text{ N}$$

$$F_i = m_v \cdot a_v$$

$$m_v = 40 \text{ g}$$

$$\text{Vitesse de l'arbre à cames} = 8000/2 = 4000 \text{ tr/m}$$

6) Calcule de la vitesse en degrés par seconde :

$$V = 4000 / (60 \cdot 360) = 2400 \text{ }^\circ/\text{sec.}$$

$$T = 58 / 24000 = 2,4166 \cdot 10^{-3} \text{ sec.}$$

7) Calcule de l'accélération [18] :

$$h_v = u \cdot t + \frac{1}{2} a_v \cdot t^2 \text{ avec : } [u = 0]$$

$$h_v = 10,5211 \cdot 10^{-3}$$

$$= 0 + 2,4166 \cdot 10^{-3} + 0,5 (2,4166 \cdot 10^{-3} a_v)^2 \cdot 10,5211 \cdot 10^{-3}$$

$$= 0 + 2,9210 \cdot 10^{-6} a_v$$

$$a_v = 10,5211 \cdot 10^{-3} / 2,9201 \cdot 10^{-6}$$

$$a_v = 3626,7149 \text{ m/s}^2$$

$$F_i = 40 \cdot 3626,71 \text{ N}$$

$$F_i = 149 \text{ N}$$

$$F_t = F_s + F_i = 703,33 + 149 = 852,33 \text{ N}$$

Donc la Force totale appliqué sur une seule came est égale à :

$$F_t = 852,33 \text{ N.}$$

La force totale exercée sur l'arbre à cames est le résultat de la charge F_t multipliée par le nombre de cames :

$$F_T = 6818,64 \text{ N}$$

III.13. FreeCAD

FreeCAD est un logiciel libre et open source, de Conception Assistée par Ordinateur "CAO" en 3D paramétrique, publié sous License LGPLv2+ depuis 2002 [19]. Il permet d'utiliser la modélisation volumique (ou Géométrie de Construction du Solide "CSG"), la modélisation fonctionnelle (constituée par des fonctions sous-jacentes) et depuis la version 0.17 la modélisation surfacique (ou B-Rep). Ces trois types de modélisation sont entièrement paramétrables. FreeCAD intègre un module de calcul, utilisant la méthode des éléments finis (MEF), basée sur le logiciel Calculix.

FreeCAD est un modeleur à conception paramétrique, qui propose des outils similaires à CATIA, NX, SolidWorks et Solid Edge. D'abord destiné aux métiers du génie mécanique, avec la CMAO, FreeCAD s'est ensuite étendu à d'autres branches de l'ingénierie, comme l'architecture, grâce à son module BIM. Il supporte la MEF et peut être utilisé pour l'IAO, la FAO et la GCVP.

Ce logiciel possède une architecture modulaire et a vocation à devenir un logiciel de CFAO plus généraliste. Grâce à sa nature libre et open-source, les utilisateurs peuvent étendre ses possibilités en ajoutant divers plug-ins gratuits, ou en se servant du langage de programmation Python.

Avec l'essor des imprimantes 3D bon marché auprès du grand public, FreeCAD s'est popularisé davantage au sein de la « culture maker ». La chose est facilitée par le côté libre et open source du logiciel. La personnalisation de l'interface, l'ergonomie, s'améliorant à chaque version, permettent une meilleure prise en main du logiciel par l'utilisateur final. La documentation officielle est importante et de nombreux tutoriels YouTube sont également à disposition.

FreeCAD utilise des bibliothèques logicielles open-source dans le domaine des sciences numériques comme Open CASCADE Technology, un puissant noyau géométrique (c'est le kernel, le cœur de FreeCAD). Ce programme dispose aussi, d'un modèle de représentation de scènes 3D, conforme au format Open Inventor et fourni par Coin 3D. L'interface graphique est bâtie sur Qt et FreeCAD fonctionne donc de façon identique sur les plateformes Windows, macOS et GNU/Linux.

La documentation officielle de FreeCAD, est organisée sous forme de wiki, animé par le moteur MediaWiki. C'est à partir de l'anglais qui est la langue source, que toutes les modifications sont effectuées. Tout ajout ou retrait doit d'abord être fait en anglais et c'est ensuite que l'on peut effectuer les traductions vers les autres langues. De cette manière, on évite d'avoir des documentations divergentes, entre les différentes langues, ce qui rendrait la compréhension du logiciel plus difficile. C'est une différence avec wikipédia où chaque version linguistique de l'encyclopédie, peut évoluer de manière indépendante sans que cela ne pose de problèmes.

En mai 2021, ce wiki très fourni contient 1 459 pages pour la documentation utilisateurs. 97 pages supplémentaires sont destinés aux « utilisateurs expérimentés » et permettent notamment d'apprendre à utiliser des scripts Python. 124 autres pages sont consacrées plus spécifiquement aux développeurs.

Il existe aussi un manuel, sous forme de livre électronique, publié sous licence Creative Commons 4.0, qui peut être plus adapté aux débutants.

Dans la documentation, le français est une des langues les plus traduites et Yorik Van Havre un des principaux développeurs, est francophone.

Chapitre IV

Simulations et interprétations

IV.1. Introduction

Sur ce chapitre, différentes approches seront présentées donnant une bonne idée à la simulation FEM de FreeCAD 0.19.

On commencera premièrement par trouver un maillage adéquat qui prend le moins de temps de calculs suivant les moyens que nous avons : Processeur (CPU) Intel Core i5-4670K, Mémoire (RAM) 8 Go DDR3 et un disque (SSD) ADATA SP610.

Après cela on passera à l'étude de différents types de matériaux puis à différentes approches dans l'application des conditions aux limites (Géométrie Fixe autrement dit Palier, Application des Forces) pour en finir avec une simulation finale.

IV.2. Méthode des éléments finis FEM

La méthode des éléments finis (FEM) est également appelée analyse des éléments finis (FEA). La méthode des éléments finis est une technique d'analyse de base pour résoudre et remplacer des problèmes compliqués par des problèmes plus simples, en obtenant des solutions approximatives. La méthode des éléments finis étant un outil flexible, elle est utilisée dans diverses industries pour résoudre plusieurs problèmes d'ingénierie pratiques. Dans la méthode des éléments finis, il est possible de générer les résultats relatifs.

IV.3. Avantage du FEM

Les propriétés de chaque élément sont évaluées séparément, donc un avantage évident est que nous pouvons incorporer différentes propriétés matérielles pour chaque élément. Ainsi, presque n'importe quel degré de non-homogénéité peut être inclus.

Il n'y a aucune restriction quant à la forme du support ; par conséquent, les formes arbitraires et irrégulières ne posent aucune difficulté comme toutes les approximations numériques.

IV.4. Type d'analyse FEM :

Il existe plusieurs types d'analyses FEM. Dans FreeCAD, il existe quatre types :

- Analyse statique ;
- Analyse dynamique ;
- Analyse thermomécanique ;
- Vérification de maillage.

IV.5. Comparaison de différents maillages sur l'arbre à cames

Tout d'abord on a choisi l'acier 20NiCrMo2 comme matériau en appliquant les mêmes conditions aux limites (figure III.4), de l'article présenté dans le chapitre III (figure III.2).

Avec ceci mis en place, on a fait des calculs de la simulation en suivant un maillage Gmesh utilisé dans FreeCAD de type tétraédrique avec quatre différentes tailles : 5, 4, 3 et 2 mm, comme illustré sur la figure IV.1.

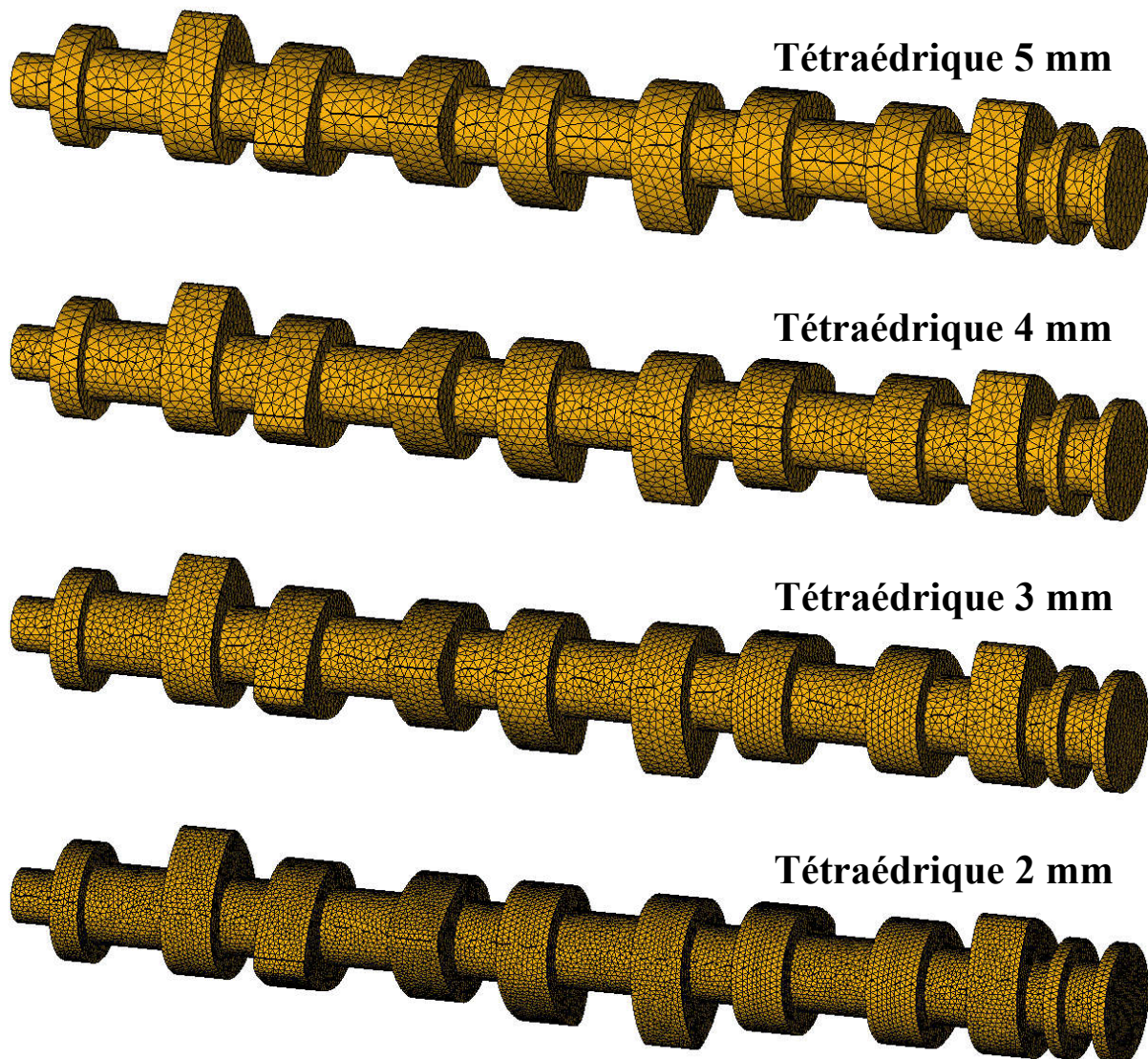


Figure IV.1 : Tailles des maillages Gmesh de FreeCAD.

Tableau IV.1 : Comparaison des maillages

Taille du maillage [mm]	5	4	3	2
Nombre de nœuds	32 445	55 464	113 072	334 691
Nombre d'éléments	27 451	46 062	91 953	266 029
Nombre d'équations	89 787	153 960	318 924	960 225
Temps de maillage [s]	3,4	4,9	9,4	27
Temps de calcul [s]	5,8	12,9	45,8	834,3
Déplacement max [μm]	0,43	0,44	0,45	0,46
Contrainte de Von Mises [MPa]	5,43	7,08	8,39	12,39

Le tableau IV.1 représente les résultats des simulations dépendant de différents types de maillages où on trouve que plus le maillage est précis plus les résultats changent mais au détriment du temps de maillage et de calcul que l'on voit augmenter d'une manière exponentielle et non pas constante ce qui limite les possibilités de choix du maillage.

Faire la suite des simulations avec un maillage de 2 mm ou moins ralenti la machine dû à la saturation de la mémoire et du cache en plus du temps total pris par le processus du maillage puisqu'il prend 15 min au minimum. Toutefois, prendre un maillage de 5 mm peut compromettre la précision des résultats. Par conséquent, on a choisi le maillage de 3 mm ayant un temps de calculs acceptable d'environ une minute et des résultats assez valables (Fig. IV.2 et IV.3) mais en sachant que c'est dans le but de faire plusieurs études et non pas avoir des résultats très réels car pour cela il faut simuler avec le maillage le plus précis possible.

La figure IV.2 illustre l'amplitude des déplacements le long de l'arbre à cames où on voit que les déplacements sont maximaux aux lobes des cames du côté intérieur de chaque paire de cames. Tandis que la figure IV.3 illustre les contraintes de Von Mises qui sont concentrées au contact arbre-cames, autrement dit, la partie intérieure des cames.

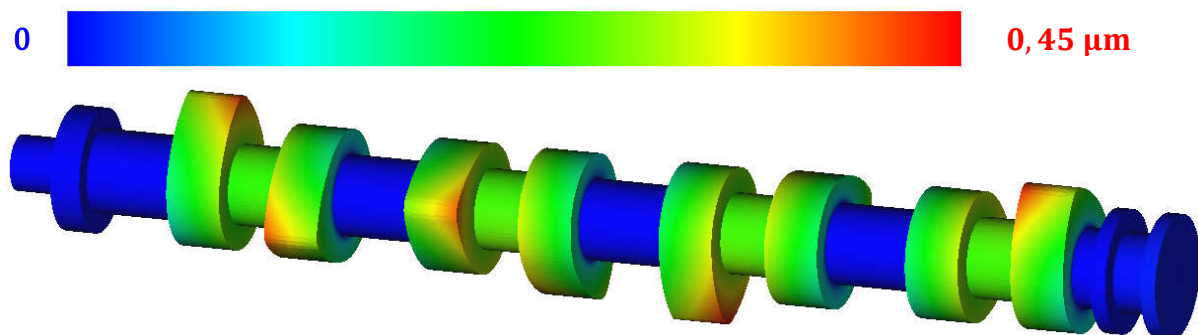


Figure IV.2: Amplitude des déplacements avec un maillage de 3 mm.

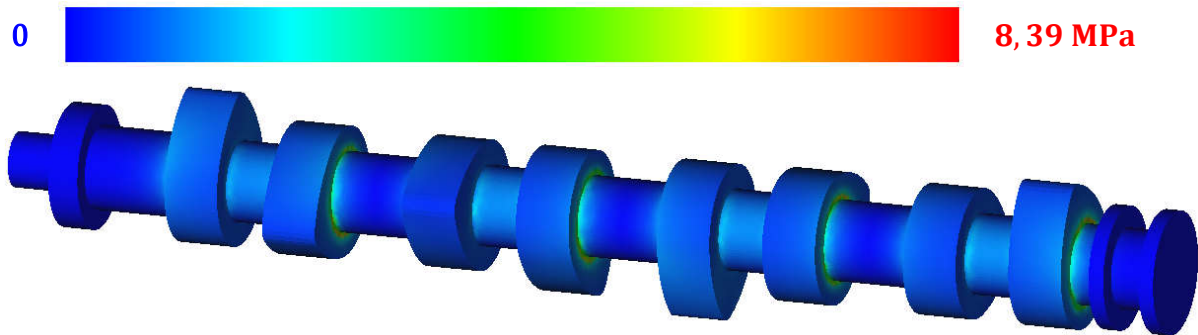


Figure IV.3 : Contraintes de Von Mises avec un maillage de 3 mm.

IV.6. Comparaison de matériaux

Pour faire cette comparaison, on a choisi quatre matériaux différents : Acier-20NiCrMo2, EN GJL 800, EN GJMB 550-4 et Aluminium-6061-T6. Les mêmes conditions aux limites sont appliquées (La manière d'application des forces et des fixation). Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau IV.2.

Le changement de matériau comme l'indique le tableau IV.2 n'influe pas sur la contrainte maximale de Von Mises car elle est engendrée par la force appliquée qui est la même. Par contre, ce changement influe sur les déplacements maximaux, sachant que l'acier allié est le plus résistant par rapport aux autres matériaux, car il a une amplitude de déplacement maximale d'environ 0,45 μm .

Tableau IV.2 : Comparaison des matériaux.

Matériaux	Déplacement (μm)	Contrainte de Von Mises (MPa)
Acier-20NiCrMo2	0,45	8,39
EN GJL 800	0,52	8,39
EN GJMB 550-4	0,54	8,39
Al-6061-T6	1,37	8,28

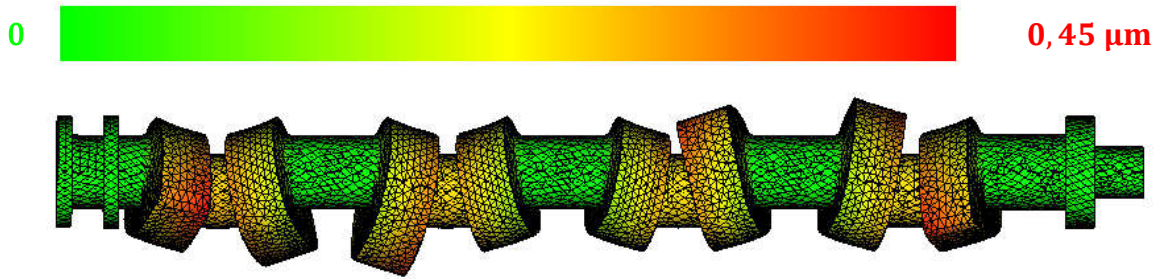


Figure IV.4 : Amplitude des déplacements exagérés dans l'arbre à came.

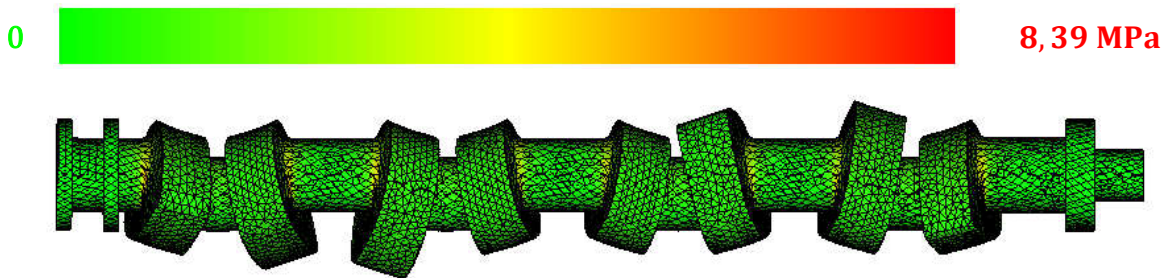


Figure IV.5 : Contrainte de Von Mises exagérées dans l'arbre à came.

IV.7. Approches différentes des conditions aux limites

1) Fixation des paliers

Pour cet aspect de géométrie fixe, on a fixé les paliers dans l'arbre de plusieurs façons :

- **Palier complet** : En suivant les conditions aux limites de l'article mentionné auparavant (fixation tout le long - figure III.2 et figure III.4).
- **Palier limité** : L'espace de fixation des paliers est réduit de 30cm à 20cm dans notre cas ou dépendant des paliers choisis et ceci en suivant la logique que le palier ne peut pas être dans toute la section qui sépare les paires de cames.
- **Palier milieu** : Fixation des paliers à l'extrémité et au milieu ce qui résulte à trois sections de fixation (3 points).
- **Palier extrémité** : Fixation seulement à l'extrémité de l'arbre à cames donnant deux sections de fixation (2points).

Les figures IV.6, IV.7, IV.8 et IV.9 illustres la manière de fixation des paliers dans l'arbre à cames.

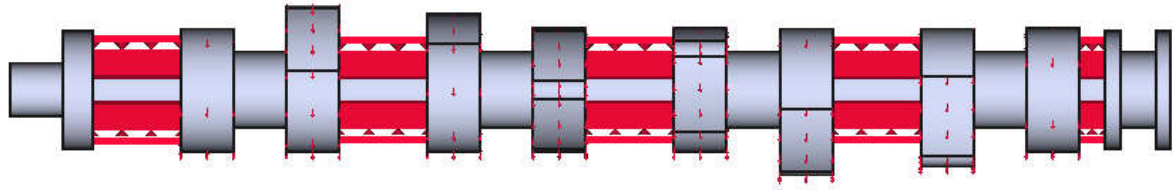


Figure IV.6 : Palier complet.

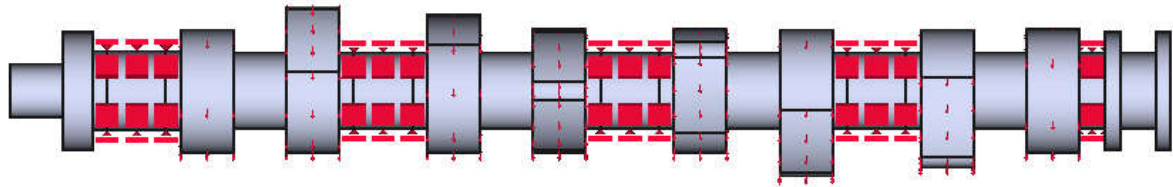


Figure IV.7 : Palier limité.

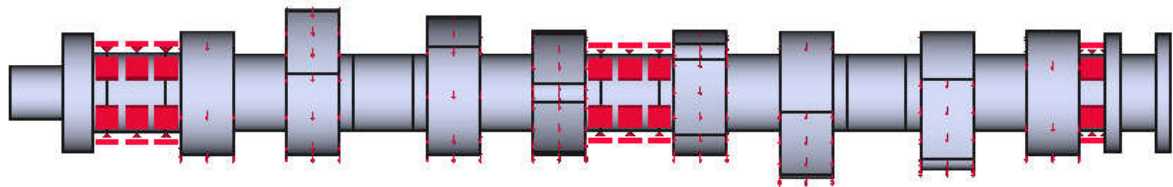


Figure IV.8 : Palier limité.

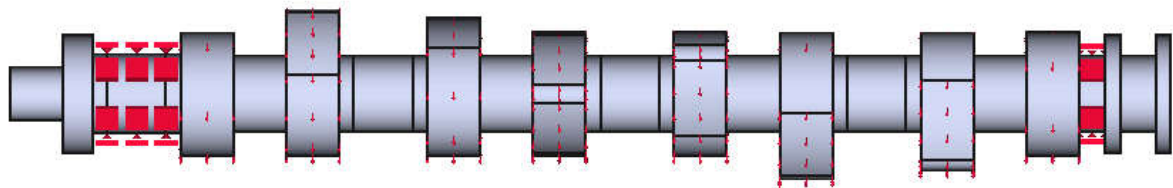


Figure IV.9 : Palier extrémité.

Tableau IV.3 : Comparaison des types de fixation des paliers.

Palier	Déplacement (μm)	Contrainte (MPa)
Palier complet	0,45	8,39
Palier limité	0,78	9,40
Palier milieu	5,87	35,98
Palier extrémité	86,02	145,36

Du tableau IV.3, on remarque que pour les deux premiers cas, les résultats sont assez proches mais si on se fie aux conditions aux limites des cas de paliers complets (fixation selon Chatane et Devade [18] – Fig. III.2) on peut avoir des résultats trompeurs. Donc il vaut mieux savoir l'espace de fixation des paliers et le fixer pour avoir des résultats acceptables.

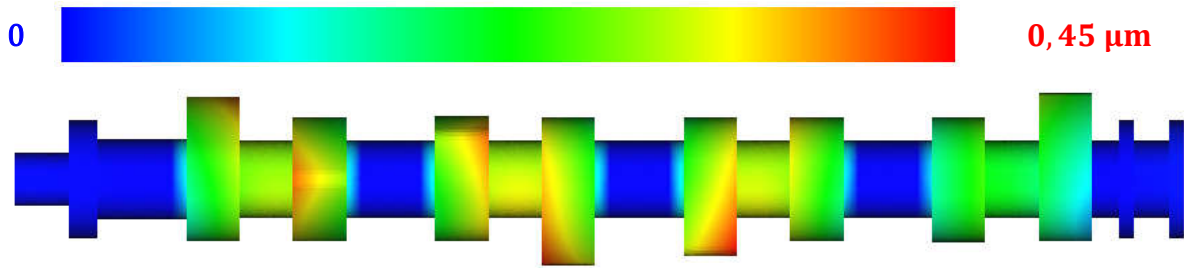


Figure IV.10 : Amplitude des déplacements dans le cas de Palier complet.

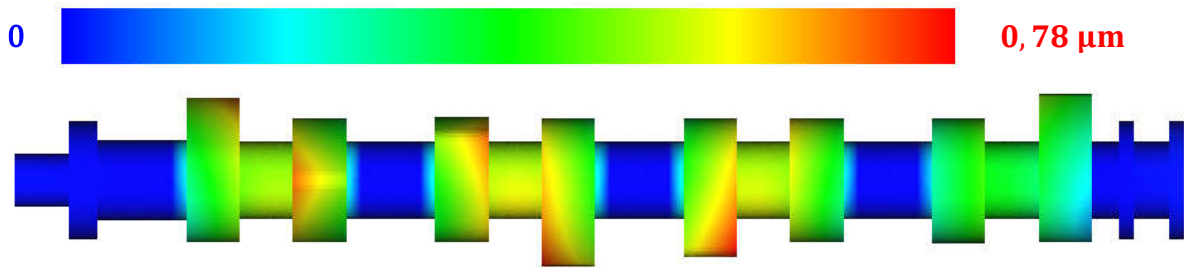


Figure IV.11 : Amplitude des déplacements dans le cas de Palier limité.

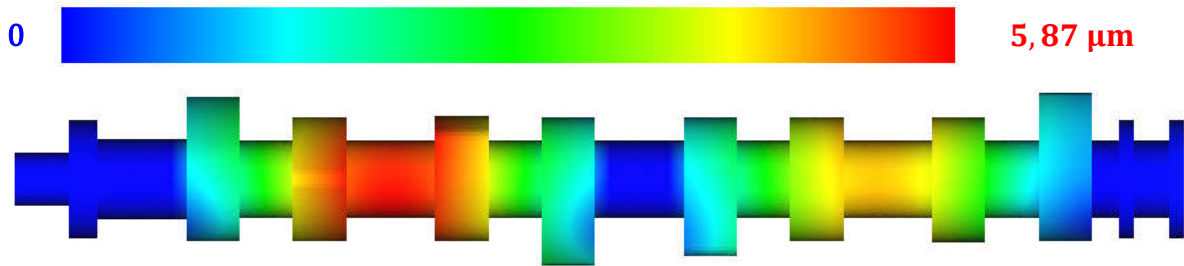


Figure IV.12 : Amplitude des déplacements dans le cas de Palier du milieu.

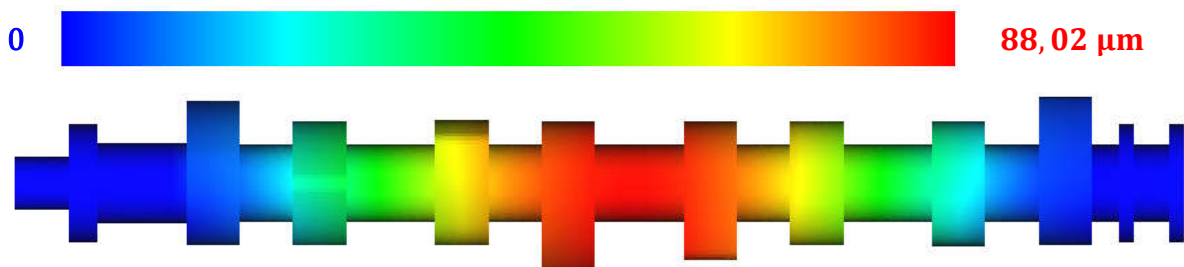


Figure IV.13 : Amplitude des déplacements dans le cas de Palier d'extrémité.

Les figures IV.10, IV.11, IV.12 et IV.13 montrent que les deux derniers cas se différencient par rapport au deux premiers dans les points de fixation où les deux premiers ont 5 points de fixation de palier, le troisième 3 points et le dernier 2 points. Ceci, impacte l'amplitude

des déplacements maximale où l'on remarque qu'elle augmente de manière significative avec la diminution des points de fixation du palier.

On note aussi que les déplacements sont maximaux du côté gauche de l'arbre à cames et ils sont plus notables dans les cames gauches que celles de droite à cause de la fixation proche du palier droit extrême.

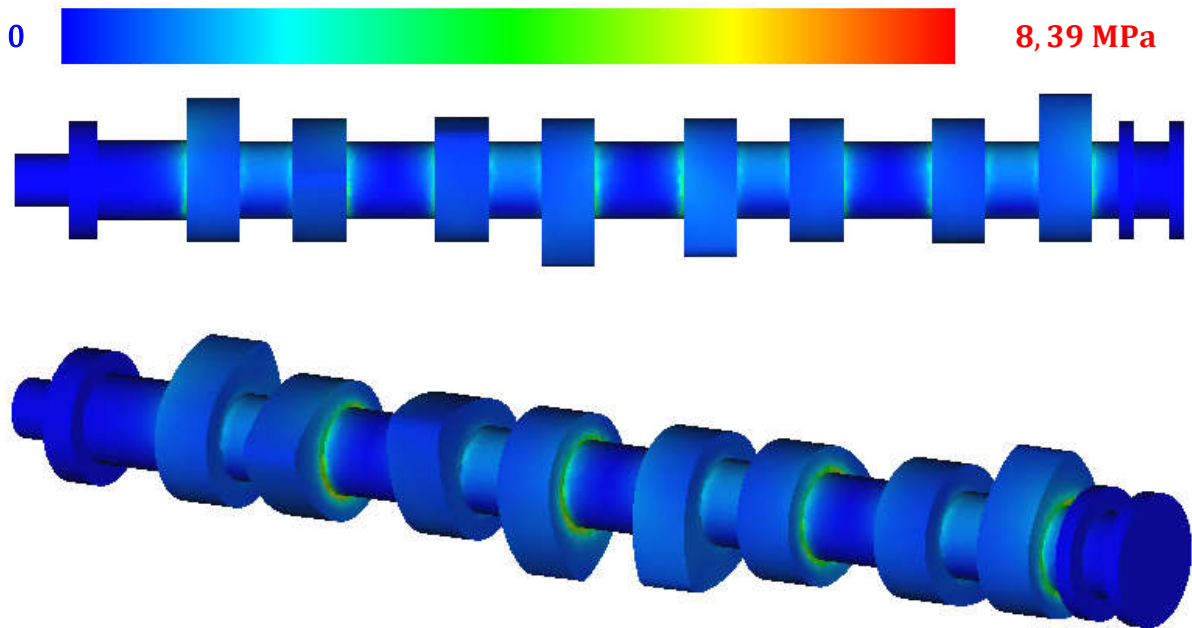


Figure IV.14 : Contrainte de Von Mises dans le cas de Palier complet.

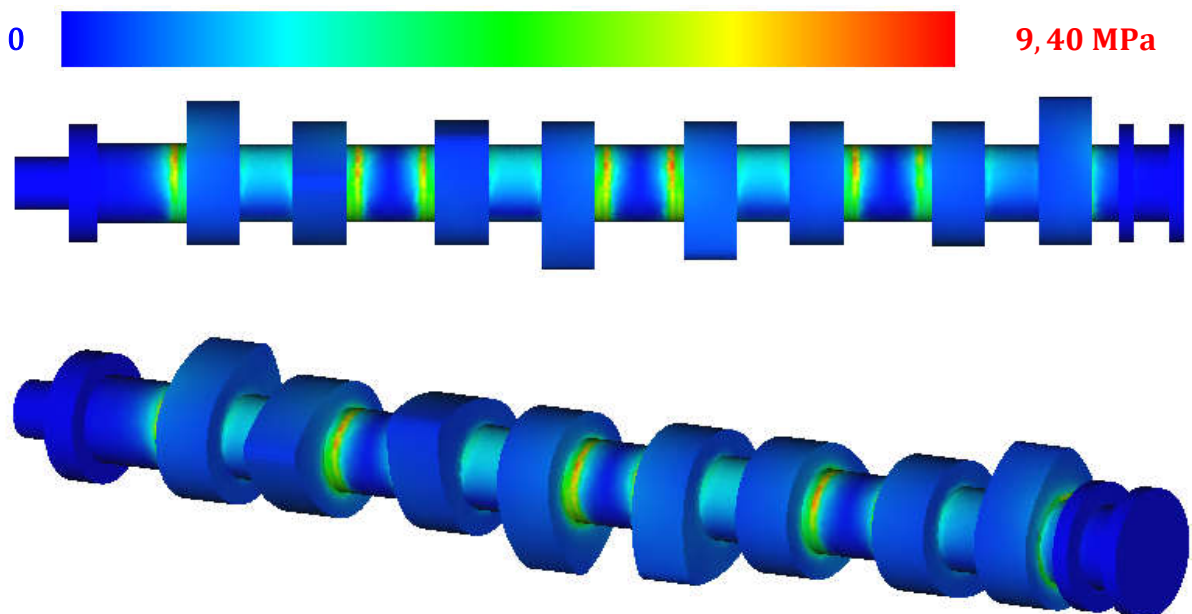


Figure IV.15 : Contrainte de Von Mises dans le cas de Palier limité.

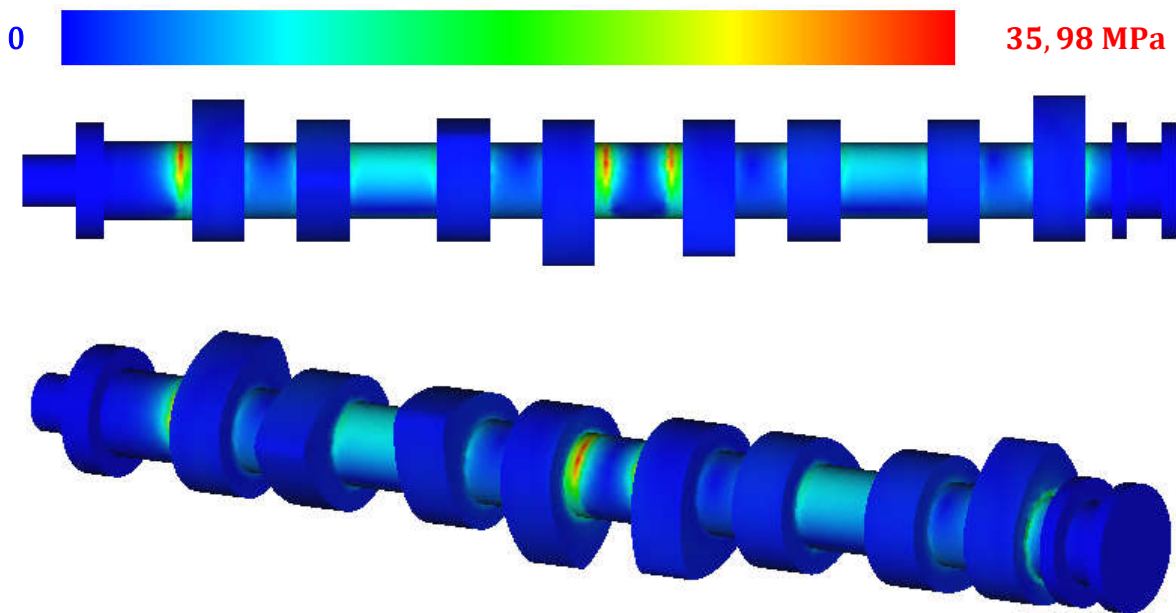


Figure IV.16 : Contrainte de Von Mises dans le cas de Palier milieu.

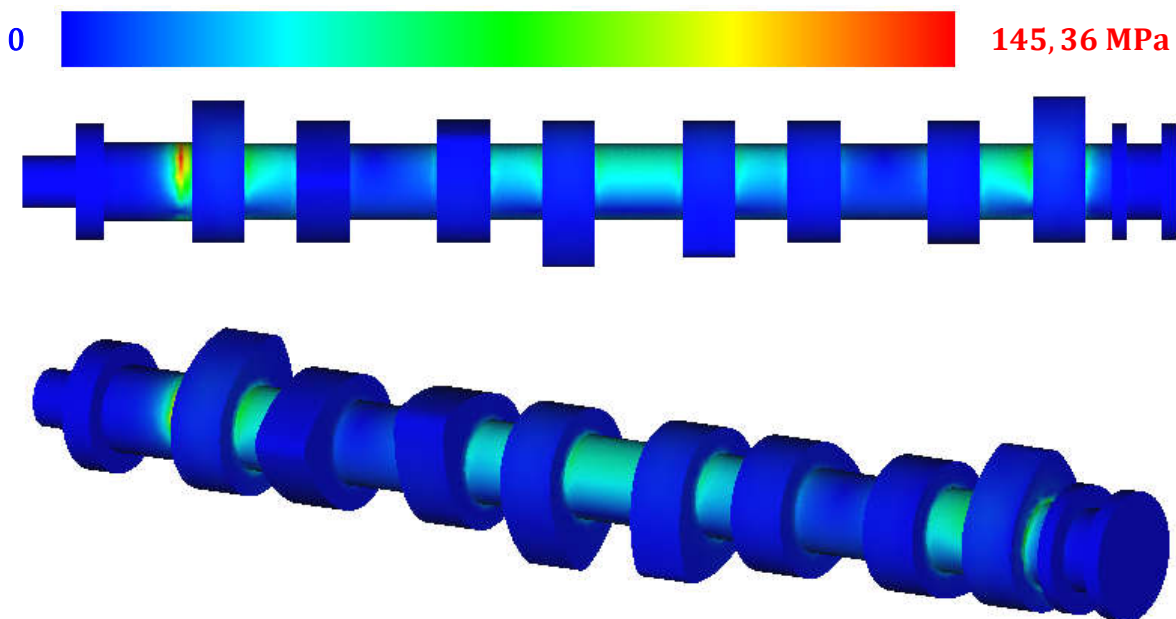


Figure IV.17 : Contrainte de Von Mises dans le cas de Palier extrémité.

Les figures IV.14, IV.15, IV.16 et IV.17 représentent les contraintes dans l'arbre à cames des quatre cas étudiés. Dans le premier cas on voit que les contraintes se concentrent à l'intérieur des cames dû à la fixation complète mais dès qu'on a limité les fixations des paliers (2^{ème} cas), la concentration des contraintes s'est déplacée aux environs des paliers et moyennement dans l'intérieure cames. Même remarque pour le troisième et quatrième cas, les contraintes se situent des côtés des paliers dans l'arbre et se répartissent dans son prolongement où c'est libre avec des contraintes minimales sur les cames.

2) Application des forces

Dans cette section on prendra les conditions aux limites appliquées dans l'article vue auparavant et on passe à d'autre cas où l'on change la manière d'exécution des forces, comme illustré en vert sur les figure IV.18, IV.19 et IV.20.

- **Forces surface profil** : Les forces sont appliquées dans une direction choisie sur tout le profil des faces actives des cames, figure IV.18 ;
- **Forces surface linéaire** : Les forces sont appliquées dans une surface linéaire qui représente le contact entre les cames et les poussoirs, figure IV.19 ;
- **Forces doigt soupape** : Les forces sont appliquées dans une sorte de surface complexe entre surface linéaire ayant aux extrémités un arc de cercle de diamètre 6mm représentant le contact des doigts des soupapes et des cames, figure IV.20.

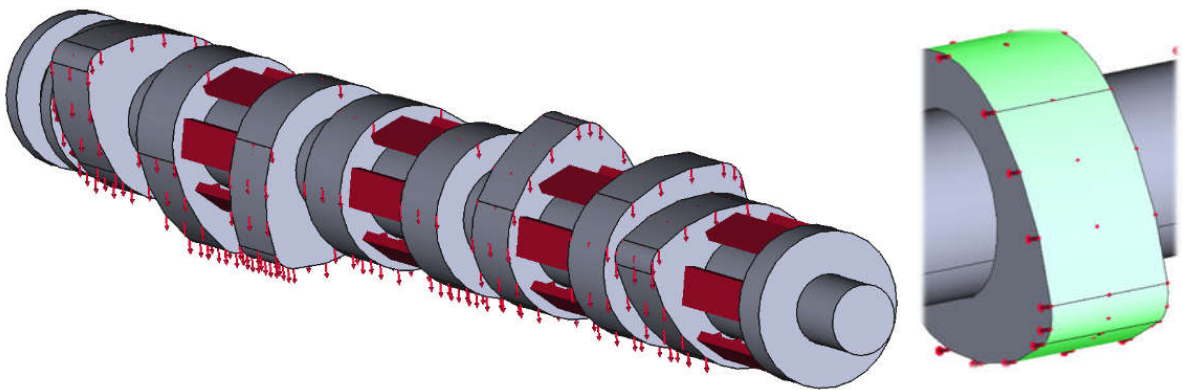


Figure IV.18 : Application des forces dans le cas de Forces surface profil.

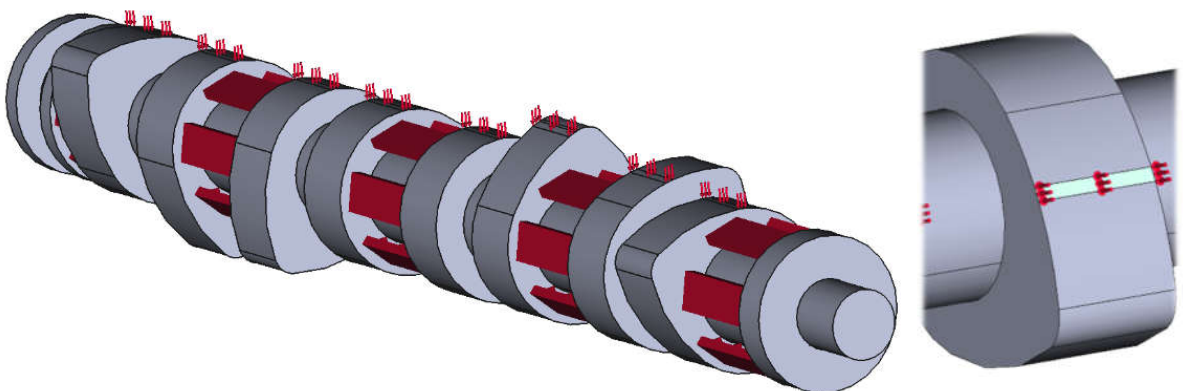


Figure IV.19 : Application des forces dans le cas de Forces surface linéaire.

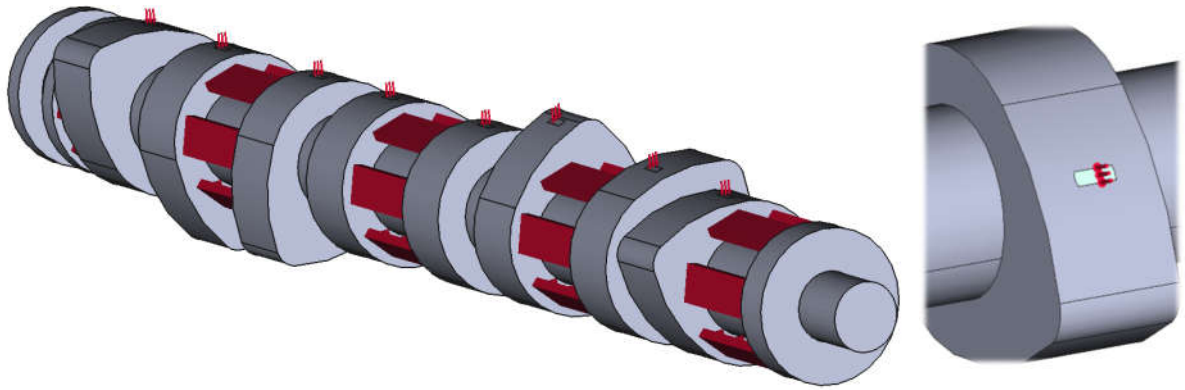


Figure IV.20 : Application des forces dans le cas de Forces doigt soupape.

Les résultats obtenus après avoir exécuter le calcul des simulations passées seront donnés sur le tableau IV.4.

Tableau IV.4 : Comparaison des manières d’application de forces.

Applications des forces	Déplacement max (µm)	Contrainte max (MPa)
Forces surface profile	0,45	8,40
Forces surface linéaire	1,01	23,66
Forces doigt soupape	1,28	56,12

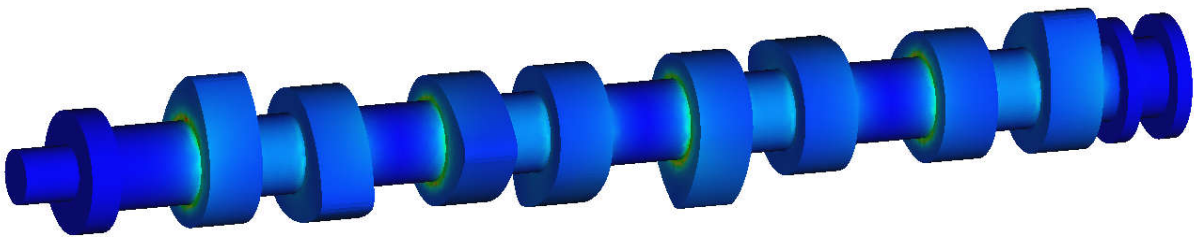


Figure IV.21 : Contrainte de Von Mises du cas des Forces surface profile.

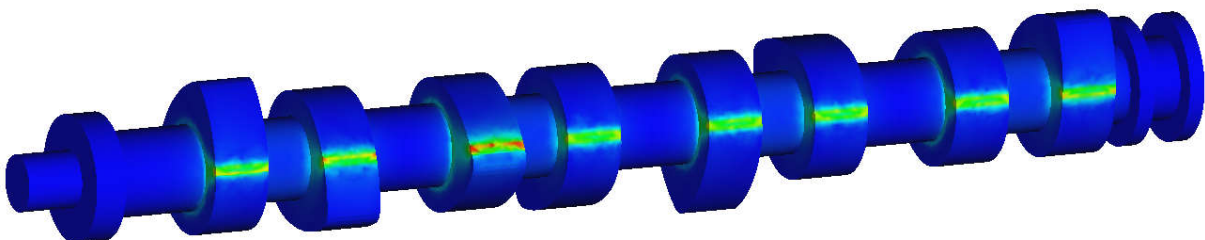


Figure IV.22 : Contrainte de Von Mises du cas des Forces surface linéaire.

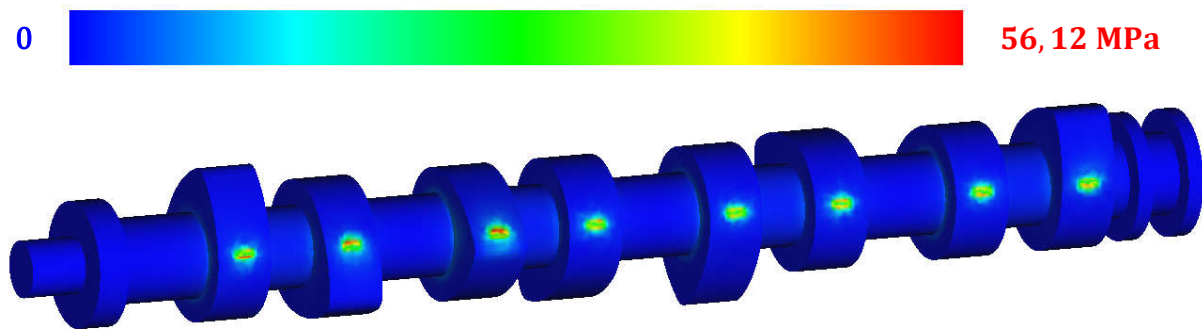


Figure IV.23 : Contrainte de Von Mises du cas de Forces doigt soupape.

A partir des figures IV.21, IV.22 et IV.23 on a changé le mode d'application des forces appliquées par les poussoirs, ce qui donne des résultats différents.

Pour le premier cas, on a remarqué déjà que les contraintes résident à l'intérieur des cames. Pour les deux autres cas, on a changé le point d'application des forces où on les a appliqué sur la partie qui est en contact avec le poussoir et ça nous a donné des contraintes importantes ce qui peut diverger des résultats de l'étude de Chatane et Devade [18].

Le troisième cas représente le contact directe des soupapes qui engendre des déplacements supérieures du deuxième cas et de grandes valeurs de contraintes, ce qui peut endommager le profil de la came. Ceci explique l'existence des poussoirs entre les soupapes et les cames (voir la Fig. IV.23).

En conclusion, il faut bien choisir l'emplacement d'application des forces, pour cela il faut les appliquées sur des surfaces linéaire ce qui est proche de la réalité et que la came garde sa fiabilité et sa rigidité.

IV.8. Simulation finale

Chaque paramètre qu'on a vu précédement influe grandement sur la simulation de l'étude statique sur l'arbre à cames.

En prenant chaque approche en considération et en les jumelants on obtient une simulation qui représente bien la réalité comme illustré dans les figures IV.24 et IV.25 sachant que cette fois on le feras avec un maillage de 3 mm et un autre maillage fin de 2 mm afin de voir si les résultats sont proches.

Tableau IV.5 : Comparaison entre la simulation du maillage de 2 et 3 mm.

Taille du maillage [mm]	3	2
Nombre de noeuds	113612	338542
Nombre des éléments	92732	269532
Nombre des équations	326916	984354
Temps de la simulation [s]	62	868.5
Amplitude de déplacement maximale [μm]	1,27	1,30
Contrainte de Von Mises maximale [MPa]	23,58	27,18

Cette simulation associe toute les études précédentes en prenant le matériau le plus résistant 20NiCrMo2 et en tenant compte des remarques, le choix était de prendre une fixation de palier limitée et une application linéaire des forces. Après un maillage de 3 et 2 mm, on remarque que les résultats sont assez représentatifs des résultats publiés dans d'autres articles similaires, Barua et al. [20] et Jasdanwalla et al. [21].

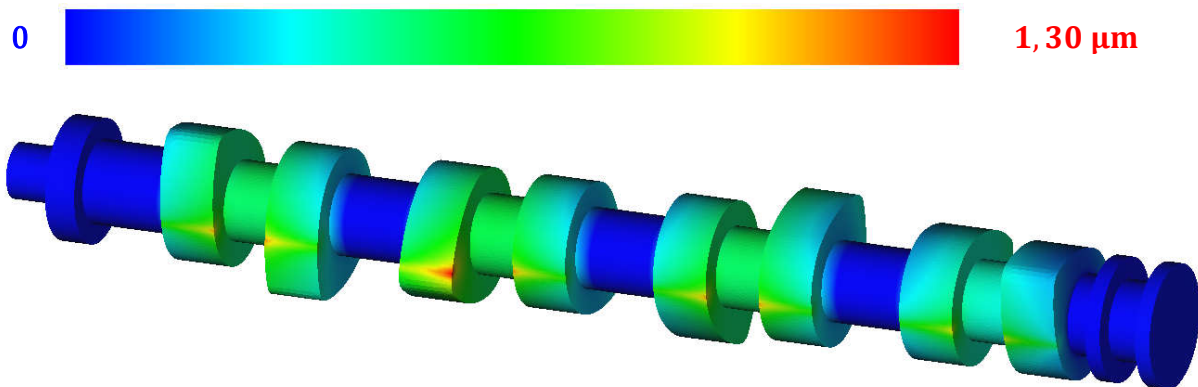


Figure IV.24 : Simulation des amplitudes des déplacements.

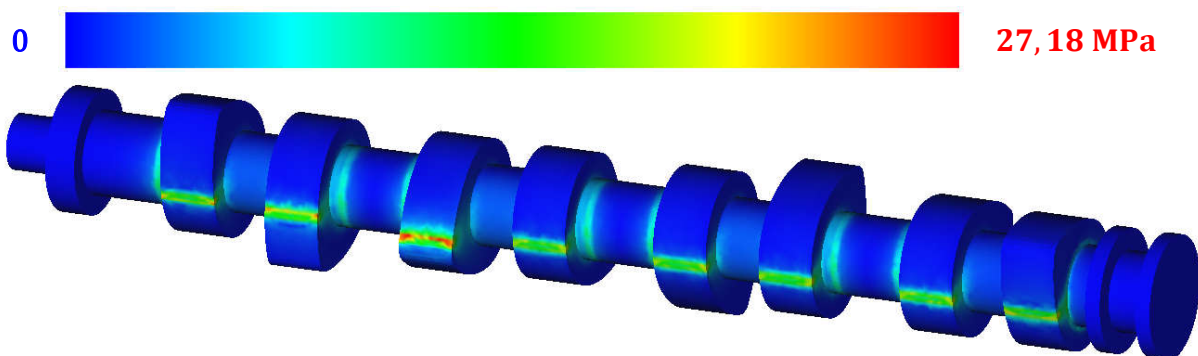


Figure IV.25 : Simulation finale des amplitudes des contraintes de Von Mises.

IV.9. Conclusion

La recherche rapportée dans cette étude se compose de quatre parties ; la première partie a fourni la comparaison de l'arbre à cames avec différent maillages, par conséquent, on a choisi le maillage de 3 mm ayant un bon temps de calculs d'environ un à deux minutes et des résultats assez acceptables. La deuxième partie a rapporté la comparaison de l'arbre à cames en quatre matériaux différents, on a vu que l'Aluminium est le moins résistant, puis le EN550 similaire un petit peu à celui de EN800 et le plus résistant, l'Acier allié 20NiCrMo2 avec une amplitude de déplacement maximale d'environ 0,45 μm . Pour la troisième partie on a fixé les paliers dans l'arbre de plusieurs façons ; Palier complet, Palier limité, Palier milieu et Palier extrémité et on a remarqué que la deuxième approche est la plus valable. Enfin, pour mieux connaître l'espace de fixation des paliers est le fixer au lieu de fixer l'espace complet entre les cames.

Pour la dernière partie, on a pris en considération des conditions aux limites appliquées similairement à l'article publié cité comme référence à notre travail en utilisant différentes applications de forces ; force surface linéaire et force doigts de soupapes, ensuite on est passé à d'autre cas avec changement de la manière d'application des charges.

Pour obtenir une étude bien précisée avec de bons résultats, on doit utiliser une simulation avec un maillage de 2 mm avec un matériau acier allié 20NiCrMo2 avec une fixation des paliers limités, en appliquant des forces sur des surfaces linéaire.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'arbre à cames est l'un des éléments ou pièces clés à l'intérieur du moteur d'automobile. Il existe divers facteurs qui provoquent la défaillance de cet arbre. L'analyse statique est le premier pas vers les études complètes qui sont complexes et coûteuses et qui sont incontournables pour assurer la sécurité et la longévité de l'arbres à cames.

Le travail présenté dans ce mémoire s'est porté sur L'étude d'un arbre à cames d'un moteur à combustion interne par analyses des éléments finis

Tout d'abord, on a fait une généralité sur les moteurs et leurs organes un par un et leurs fonctionnements, après on a déterminé les différents types du système de distribution

Aujourd'hui, l'arbre à cames est une pièce essentielle du moteur à combustion interne, nous avons abordé la conception et ses fonctionnements et ses différents types.

Enfin, on a décrit une étude de l'arbre à came et leur conception par ordinateur. On a présenté des différentes approches, comme on a aussi pris une expérience de simulation FEM de FreeCAD, d'un autre coté c'est un programme gratuit (open source) et limité par rapport au programmes payants.

D'après nos analyses, les zones dangereuses sur l'arbre à cames sont près des coins des cames, c'est-à-dire au niveau du chanfrein et dans certains cas au niveau du lobe de la came à cause de l'intensité des efforts de contact.

L'appareil que nous utilisons affecte les résultats finals, plus les capacités et la vitesse de notre ordinateur sont bonnes (CPU, RAM, SSD) plus les résultats seront bien précis.

ANNEXES

1) Calcul du maillage 2 mm

```
0.0: Check dependencies...
33.5: Write completed.
0.0: CalculiX binary: C:/Program Files/FreeCAD 0.19/bin/ccx.exe
0.0: CalculiX input file:
C:\Users\CEPC~1\AppData\Local\Temp\fcfem_72jmfhdt\FEMMeshGmsh.inp
0.0: Run CalculiX...
0.0: Starting CalculiX...
0.0: CalculiX is running...
834.2: CalculiX stopped.
834.3: *****
CalculiX Version 2.17, Copyright(C) 1998-2020 Guido Dhondt
CalculiX comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY. This is free
software, and you are welcome to redistribute it under
certain conditions, see gpl.htm
*****
You are using an executable made on Thu Jul 23 21:43:50 CEST 2020
The numbers below are estimated upper bounds
number of:
nodes: 334691
elements: 266029
one-dimensional elements: 0
two-dimensional elements: 0
integration points per element: 4
degrees of freedom per node: 3
layers per element: 1
distributed facial loads: 0
distributed volumetric loads: 0
concentrated loads: 55896
single point constraints: 43848
multiple point constraints: 1
terms in all multiple point constraints: 1
tie constraints: 0
dependent nodes tied by cyclic constraints: 0
Dépendent nodes in pre-tension constraints : 0
Sets: 5
terms in all sets: 1347517
materials: 1
constants per material and temperature: 2
temperature points per material: 1
plastic data points per material: 0
Orientations: 0
Amplitudes: 2
Data points in all amplitudes: 2
print requests: 1
transformations: 0
property cards: 0
STEP 1
Static analysis was selected
Decascading the MPC's
Determining the structure of the matrix:
number of equations: 960225
number of nonzero lower triangular matrix elements
37636179
Using up to 1 cpu(s) for the stress calculation.
Using up to 1 cpu(s) for the symmetric stiffness/mass contributions.
Factoring the system of equations using the symmetric spooles solver
Using up to 1 cpu(s) for spooles.
Using up to 1 cpu(s) for the stress calculation.
Job finished
834.3: CalculiX done without error!
834.3: Loading result sets...
```

2) Calcul du maillage 3 mm:

```
0.0: Check dependencies...
11.4: Write completed.
0.0: CalculiX binary: C:/Program Files/FreeCAD 0.19/bin/ccx.exe
0.0: CalculiX input file:
C:\Users\CEPC-1\AppData\Local\Temp\fcfem_c_cizt89\FEMMeshGmsh.inp
0.0: Run CalculiX...
0.0: Starting CalculiX...
0.0: CalculiX is running...
45.8: CalculiX stopped.
45.8: *****
CalculiX Version 2.17, Copyright(C) 1998-2020 Guido Dhondt
CalculiX comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY. This is free
software, and you are welcome to redistribute it under
certain conditions, see gpl.htm
*****
You are using an executable made on Thu Jul 23 21:43:50 CEST 2020
The numbers below are estimated upper bounds
number of:
nodes: 113072
elements: 91953
one-dimensional elements: 0
two-dimensional elements: 0
integration points per element: 4
degrees of freedom per node: 3
layers per element: 1
distributed facial loads: 0
distributed volumetric loads: 0
concentrated loads: 26980
single point constraints: 20292
multiple point constraints: 1
terms in all multiple point constraints: 1
tie constraints: 0
dependent nodes tied by cyclic constraints: 0
dependent nodes in pre-tension constraints: 0
sets: 5
terms in all sets: 443985
materials: 1
constants per material and temperature: 2
temperature points per material: 1
plastic data points per material: 0
orientations: 0
amplitudes: 2
data points in all amplitudes: 2
print requests: 1
transformations: 0
property cards: 0
STEP 1
Static analysis was selected
Decascading the MPC's
Determining the structure of the matrix:
number of equations
318924
number of nonzero lower triangular matrix elements
11971566
Using up to 1 cpu(s) for the stress calculation.
Using up to 1 cpu(s) for the symmetric stiffness/mass contributions.
Factoring the system of equations using the symmetric spooles solver
Using up to 1 cpu(s) for spooles.
Using up to 1 cpu(s) for the stress calculation.
Job finished
45.8: CalculiX done without error!
45.8: Loading result sets...
```

3) Calcul du mallaige de 4 mm

```
0.0: Check dependencies...
5.5: Write completed.
0.0: CalculiX binary: C:/Program Files/FreeCAD 0.19/bin/ccx.exe
0.0: CalculiX input file:
C:\Users\CEPC-1\AppData\Local\Temp\fcfem_c4wls9gj\FEMMeshGmsh.inp
0.0: Run CalculiX...
0.0: Starting CalculiX...
0.0: CalculiX is running...
12.9: CalculiX stopped.
12.9: *****
CalculiX Version 2.17, Copyright(C) 1998-2020 Guido Dhondt
CalculiX comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY. This is free
software, and you are welcome to redistribute it under
certain conditions, see gpl.htm
*****
You are using an executable made on Thu Jul 23 21:43:50 CEST 2020
The numbers below are estimated upper bounds
number of:
nodes: 55464
elements: 46062
one-dimensional elements: 0
two-dimensional elements: 0
integration points per element: 4
degrees of freedom per node: 3
layers per element: 1
distributed facial loads: 0
distributed volumetric loads: 0
concentrated loads: 16932
single point constraints: 12432
multiple point constraints: 1
terms in all multiple point constraints: 1
tie constraints: 0
dependent nodes tied by cyclic constraints: 0
dependent nodes in pre-tension constraints: 0
sets: 5
terms in all sets: 213790
materials: 1
constants per material and temperature: 2
temperature points per material: 1
plastic data points per material: 0
orientations: 0
amplitudes: 2
data points in all amplitudes: 2
print requests: 1
transformations: 0
property cards: 0
STEP 1
Static analysis was selected
Decascading the MPC's
Determining the structure of the matrix:
number of equations
153960
number of nonzero lower triangular matrix elements
5567343
Using up to 1 cpu(s) for the stress calculation.
Using up to 1 cpu(s) for the symmetric stiffness/mass contributions.
Factoring the system of equations using the symmetric spooles solver
Using up to 1 cpu(s) for spooles.
Using up to 1 cpu(s) for the stress calculation.
Job finished
12.9: CalculiX done without error!
12.9: Loading result sets...
```

4) Calcul du maillage de 5 mm

```
0.0: Check dependencies...
3.2: Write completed.
0.0: CalculiX binary: C:/Program Files/FreeCAD 0.19/bin/ccx.exe
0.0: CalculiX input file:
C:\Users\CEPC-1\AppData\Local\Temp\fcfem_bfcg_a53\FEMMeshGmsh.inp
0.0: Run CalculiX...
0.0: Starting CalculiX...
0.0: CalculiX is running...
5.8: CalculiX stopped.
5.8: *****
CalculiX Version 2.17, Copyright(C) 1998-2020 Guido Dhondt
CalculiX comes with ABSOLUTELY NO WARRANTY. This is free
software, and you are welcome to redistribute it under
certain conditions, see gpl.htm
*****
You are using an executable made on Thu Jul 23 21:43:50 CEST 2020
The numbers below are estimated upper bounds
number of:
nodes: 32445
elements: 27451
one-dimensional elements: 0
two-dimensional elements: 0
integration points per element: 4
degrees of freedom per node: 3
layers per element: 1
distributed facial loads: 0
distributed volumetric loads: 0
concentrated loads: 11404
single point constraints: 7548
multiple point constraints: 1
terms in all multiple point constraints: 1
tie constraints: 0
dependent nodes tied by cyclic constraints: 0
dependent nodes in pre-tension constraints: 0
sets: 5
terms in all sets: 122687
materials: 1
constants per material and temperature: 2
temperature points per material: 1
plastic data points per material: 0
orientations: 0
amplitudes: 2
data points in all amplitudes: 2
print requests: 1
transformations: 0
property cards: 0
STEP 1
Static analysis was selected
Decascading the MPC's
Determining the structure of the matrix:
number of equations
89787
number of nonzero lower triangular matrix elements
3149121
Using up to 1 cpu(s) for the stress calculation.
Using up to 1 cpu(s) for the symmetric stiffness/mass contributions.
Factoring the system of equations using the symmetric spooles solver
Using up to 1 cpu(s) for spooles.
Using up to 1 cpu(s) for the stress calculation.
Job finished
5.8: CalculiX done without error!
5.8: Loading result sets...
```

Références bibliographiques et webographie

- [1] Moteur à combustion et explosion-3D CAD Models & 2D Drawings, partcommunity.com, accès le 22/03/2022
- [2] Moteur à air comprimé — Wikipédia, wikipedia.org, accès le 28/03/2022
- [3] Carbon Cleaning, carbon-cleaning.com, accès le 12/04/2022
- [4] G. Renaud, Moteur à combustion interne, Edition l'École des Mines, Paris, 2005
- [5] Moteurs à Combustion Interne Cours et exemples résolus à l'usage des étudiants en graduation. Présenté par Dr Chehhat Abdelmadjid, pages 3 et 4
- [6] Technologie fonctionnelle de l'automobile, Tome 1, page 88
- [7] Marc Julien, performance à 4 temps v3.1, 2009/2012
- [8] https://www4.ac.nancy.metz.fr/autocompetences/2_ressources_pedagogiques/1_motorisation/stockage_le%E7ons_technologie/distribution_bep.pdf, accès le 25/04/2022
- [9] Moteurs à Combustion Interne Cours et exemples résolus à l'usage des étudiants en graduation. Représenter par Dr Chehhat Abdelmadjid, page 6
- [10] Cours Moteurs à Combustion Interne. Dr Tayeb OUKSEL
- [11] <http://www.motorlegend.com/entretien-reparation/moteur-voiture/l-arbre-a-cames/9,11653.html>. (Fr)Technique : L'arbre à cames, page 2 - Motorlegend, 2 août 2005, accès le 02/05/2022
- [12] <http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=73426156>, accès le 11/05/2022
- [13] http://lpjp.moto.free.fr/images/file/MA/distribution_commande_prof.pdf, accès le 17/05/2022
- [14] <https://www.aurel-automobile.fr/fr/l-arbre-a-cames-dans-le-moteur-automobile>, accès le 17/05/2022
- [15] Ornikar, Arbre à cames : définition et fonctionnement, accès le 22/05/2022 : <https://www.ornikar.com/code/cours/mecanique-vehicule/moteur/arbre-cames>
- [16] Came (mécanique) : définition de Came (mécanique) et synonymes de Came (mécanique) (français) (leparisien.fr), accès le 25/05/2022
- [17] <https://www.dekmake.com/fr/un-guide-rapide-pour-un-arbre-%C3%A0-cames>, accès le 28/05/2022
- [18] N. S. Chatane, K. Devade, Modeling and Analysis of Camshaft, International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology 9 (7) 2020
- [19] <https://fr.wikipedia.org/wiki/FreeCAD>, accès le 29/05/2022.

- [20] A. Barua, S. Jeet, B. Parida, A. Samantray, D. K. Bagal, Comparative Evaluation and Optimization of 4-Cylinder CI Engine Camshaft Material Using Finite Element Analysis: ..., Int. J. of Tech. Innovation in Modern Eng. & Sc. 4 (11) 2018.
- [21] H. Jasdanwalla, S. Mulla, A. M. Salman, Design and Analysis of Camshaft using FEA, Int. Res. J. of Eng. and Tech. 7 (6) 2020.

ملخص

الغرض من البحث هو نمذجة تصميم وتحليل عمود الحدبات. تم إنشاء النموذج من خلال الاحتياجات الأساسية للمحرك مع البيانات الأساسية المتاحة مثل الطاقة المراد نقلها، والقوى التي تعمل على عمود الحدبات عن طريق مجموعة الصمامات أثناء التشغيل بأقصى سرعة. يتحكم عمود الحدبات والأجزاء المرتبطة به في فتح وغلق الصمامات. الأجزاء المرتبطة بها هي غمازات، وأذرع هزازة، ونوابض صمام وغمازات. في هذا العمل، تم تصميم عمود الحدبات لمحرك متعدد الأسطوانات، وتم إنشاء نموذج ثلاثي الأبعاد لعمود الحدبات باستخدام برنامج النمذجة FreeCAD. تم إنشاء النموذج في FreeCAD لتحليل FEA ثم أكمل خصائص العنصر، واختار المواد لعمود الحدبات والشبكة والقيود التي يتم فيها تطبيق الأحمال على عمود الحدبات. تم أخذ النتائج عند الإجهاد والضغط الحراري وفقد فون للضغط للحالة الثابتة لعمود الحدبات. يتم تطبيق الحمل على مواد مختلفة.

RÉSUMÉ

Le but de la recherche est de modéliser la conception et l'analyse d'un arbre à cames. Le modèle est créé par les besoins de base d'un moteur avec les données de base disponibles telles que la puissance à transmettre, les forces agissant sur l'arbre à cames au moyen d'un train de soupapes tout en fonctionnant à la vitesse maximale. L'arbre à cames et ses pièces associées commandent l'ouverture et la fermeture des soupapes. Les pièces associées sont les poussoirs, les culbuteurs, les ressorts de soupapes et les poussoirs. Dans ce travail, un arbre à cames est conçu pour un moteur multicylindre et un modèle 3D de l'arbre à cames est créé à l'aide du logiciel de modélisation FreeCAD. Le modèle a été créé dans FreeCAD pour l'analyse FEA puis a complété les propriétés de l'élément, choisi le matériau pour l'arbre à cames, le maillage et les contraintes auxquelles les charges sont appliquées sur l'arbre à cames. Les résultats ont été pris à la déformation, aux contraintes thermiques et aux contraintes de von mises pour l'état statique de l'arbre à cames.

ABSTRACT

The purpose of the research is to model the design and analysis of a camshaft. The model is created by the basic needs of an engine with the basic data available such as the power to be transmitted, the forces acting on the camshaft by means of a valve train while operating at maximum speed. The camshaft and its associated parts control the opening and closing of the valves. Associated parts are tappets, rocker arms, valve springs and tappets. In this work, a camshaft is designed for a multi-cylinder engine and a 3D model of the camshaft is created using FreeCAD modelling software. The model was created in FreeCAD for the FEA analysis then completed the properties of the element, chose the material for the camshaft, the mesh and the constraints at which the loads are applied on the camshaft. The results were taken at strain, thermal stresses and von misses stresses for the static condition of the camshaft. Load is applied on different materials.