

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Mécanique  
Mémoire de Master en Génie Mécanique  
Option : Mécanique des Solides

# Analyse des contraintes sur un piston par éléments finis à l'aide du logiciel ANSYS

**Présenté par :**

HASSAINE Hichem Alaa eddine

**Sous la direction de :**

Mr. Said RECHAK

Professeur

Présenté et soutenu publiquement le 28/06/2016

**Composition du Jury :**

|                       |                |            |     |
|-----------------------|----------------|------------|-----|
| Président             | M.Bouaziz      | Professeur | ENP |
| Rapporteur/ Promoteur | M. Said RECHAK | Professeur | ENP |
|                       | M. Benbraika   | Docteur    | ENP |
|                       | A.Smaili       | Professeur | ENP |
| Examineur             | M.Letrache     | Docteur    | ENP |

# إهداء

لروح من كان فداءً لهذا الوطن..... "أبي"  
لمن ربنتي وأنارت دربي وأعانتني بالصلوات والدعوات،  
إلى أغلى إنسان في هذا الوجود..... "أمي الحبيبة"  
لأقرب وأحلى أختين في حياتي..... "شناز وأحلام"  
لمن تتلمذت على أياديهم، وإلى من أمدوني بنصائحهم وتوجيهاتهم..... "أساتذتي"  
لكل أفراد دفعتي دون استثناء..... "ميكانيك سنة 2016"  
لعائلتي الكبيرة بالأخص..... "حساين وبويسري"  
لكل أصدقائي المقربين..... "وليد، رياض، أيوب، أسامة وسلمى"  
لكل هؤلاء أهدي ثمرة سنين من الجهد والعمل.

"هشام"

## **Remerciements**

*Je remercie avant tout ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Je remercie aussi mes parents et toute ma famille qui m'a encouragé soutenus pour continuer mes études.*

*Mes sincères remerciements à tous les enseignants ainsi que mon encadreur Mr Rechak pour m'avoir conseillé et dirigé pendant la réalisation de ce travail.*

*Mes remerciements vont également au centre culturel universitaire et spécialement, Mohamed Bouhaouche pour son aide à la rédaction.*

*Je remercie enfin tous Mes amis et camarades d'études ainsi que tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce projet.*

## ملخص

تحليل الإجهادات المطبقة على المكبس بطريقة العناصر المحددة تعطي حاليا نتائج دراسات جد عميقة. لذلك، هذا المشروع هو مواصلة لتحقيق لدراسة ديناميكية على الجزء المتحرك لمحرك ف4ل912 التي قمنا بها في مشروع التخرج تحت عنوان "تحويل محرك الديزل ف4ل912 إلى محرك ذو الوقود المزدوج (الديزل / الغاز الطبيعي المضغوط). هذا المشروع الذي بين أيدينا يهدف لتحليل الإجهادات المطبقة على المكبس بطريقة العناصر المحددة عبر برنامج ANSYS. للقيام بذلك، وضعنا منهجية وقمنا باعتمادها. أجرينا مراجعة لبعض أعمال الباحثين سواء كانت تطبيقية أو رقمية. أجريت الدراسة الرقمية باستخدام طريقة العناصر المحددة بواسطة ANSYS بشكل رئيسي على التحليل النمطي و الإجهادات الحرارية والميكانيكية. أظهرت الدراسة أن الاهتزازات والضغط الميكانيكي هما أهم العوامل لفشل المكبس. وتشير نتائج هذا البحث إلى أن الضغوط المتحصل عليها هي أقل من تلك الخاصة عند التصميم. وعلاوة على ذلك، توزيع درجة الحرارة هو داخل الحيز المعين.

الكلمات المفتاحية: مكبس، طريقة العناصر المحددة، الإجهادات، الحرارية، الميكانيكية، والتحليل النمطي، والاهتزاز.

## Abstract

The stress analysis of the piston by the finite element method results in studies currently more depth. For that, this project is a result of our investigation on a dynamic study already made, on the mobile coupling of F4L912 engine during our final project study entitled "Transformation of a diesel engine F4L912 to dual fuel CNG-diesel ". The project that is in our hands consists to do a stress analysis on the piston via the finite element with ANSYS software. To do this, a methodology was developed and adopted. A literature review was made on the work of researchers whether practical or numerical. The numerical study by the finite element method using the ANSYS Workbench software was carried out mainly on thermal, mechanical static and modal analysis. Modeling shows that induced vibration and mechanical stress are the two main piston failure factors. The results of this study suggest that the stresses are less than the design constraint. Moreover, the distribution of the temperature is within the prescribed limit.

**Keywords:** piston, finite element method, stress, thermal, mechanical static, modal analysis, vibration.

## Résumé

L'analyse des contraintes dans le piston par la méthode des éléments finis donne lieu actuellement à des études de plus en plus approfondies. Pour cela, le présent projet est une suite d'investigation de notre étude dynamique sur l'attelage mobile du moteur F4L912 déjà faites lors de notre projet de fin d'étude qui s'intitule « Transformation d'un moteur diesel F4L912 en dual fuel GNC-gasoil ».

Le projet qui est dans nos mains consiste donc à faire une analyse des contraintes sur le piston par éléments finis via le logiciel ANSYS. Pour ce faire, une méthodologie a été développée et adoptée. Une étude bibliographique a été faite sur les travaux des chercheurs que ce soit pratique ou numérique. L'étude numérique par la méthode des éléments finis via le logiciel Ansys Workbench a été effectuée essentiellement sur les contraintes thermiques, mécaniques statiques et analyse modale. La modélisation montre que les vibrations et les contraintes mécaniques induites sont les deux principaux facteurs de défaillance du piston. Les résultats de cette étude donnent que les contraintes sont inférieures à la contrainte de conception. En outre la répartition de la température est comprise dans la limite prescrite.

**Mots clés :** piston, méthode des éléments finis, contraintes, thermique, mécanique statique, analyse modale, vibration.

# Sommaire

Liste des tableaux

Liste des figures

Nomenclature

**Introduction générale.....9**

**Chapitre I Généralités sur le moteur F4L912 et Etude Bibliographique.....11**

Introduction.....11

I.1 Le moteur Diesel F4L912.....11

I.2 Constitution du moteur Diesel.....12

I.2.1 organes constitutifs.....12

I.2.2 Les organes annexes.....15

I.3 Le piston.....15

I.3.1 Caractéristiques.....15

I.3.2 Matériaux utilisé dans la fabrication du piston.....16

I.3.3 Morphologie du piston du moteur Diesel.....16

I.4 Etude Bibliographique.....17

Conclusion.....18

**Chapitre II Simulation thermomécanique du piston Sous logiciel Ansys.....19**

Introduction.....19

II.1 Le logiciel de calcul Ansys.....20

II.2 Méthode des éléments finis.....20

II.3 Mise en équation du problème.....20

II.4 Méthodologie de simulation de piston.....20

II.4.1 Objectifs.....20

II.4.2 Hypothèses de simulation.....21

II.4.3 Hypothèse de comportements physique.....21

II.4.4 Construction du modèle géométrique.....22

II.4.5 Conditions de chargement thermiques du piston.....22

II.4.5 Conditions de chargement mécaniques du piston.....24

II.4.7 Maillage.....25

II.5 Résolution du problème.....26

II.5.1 Répartition du champ de températures dans le piston.....26

II.5.2 Répartition des champs de contraintes mécaniques dans le piston.....27

II.5.3 Etude Modale.....28

Conclusion.....30

**Conclusion générale.....31**

**Référence Bibliographique.....32**

## *Liste des tableaux*

|  |    |
|--|----|
| Tableau (II.1). Caractéristiques mécanique et thermique du piston..... | 21 |
| Tableau (II.2). Les conditions aux limites.....                        | 24 |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| <i>Figure (I.1) Cycle moteur 4 temps</i> .....  | 12 |
| <i>Figure (I.2) Vue de droite du moteur F4L912</i> .....                                    | 13 |
| <i>Figure (I.3) Vue de gauche du moteur F4L912</i> .....                                    | 14 |
| <i>Figure (I.4) Piston</i> .....  | 16 |
| <i>Figure (II.1) Forme réelle du piston</i> .....   | 19 |
| <i>Figure (II.2) les grandeurs du piston</i> .....  | 21 |
| Figure (II.3) Initiation de projet structure statique et Thermique stationnaire.....        | 21 |
| Figure (II.4) Introduction des caractéristiques du matériau utilisé.....                    | 22 |
| Figure (II.5) la conception du piston sous solidworks.....                                  | 22 |
| Figure (II.6) Application de la pression des gaz de combustion.....                         | 25 |
| Figure (II.7) Maillage du piston d'étude.....   | 25 |
| Figure (II.8) Répartition de la température sur le piston.....                              | 26 |
| Figure (II.9) Répartition du Flux de chaleur totale.....                                    | 26 |
| Figure (II.10) Déplacement total sur le piston.....   | 27 |
| Figure (II.11) Déformation élastique équivalente sur le piston.....                         | 27 |
| <i>Figure (II.12) Répartition des champs de contraintes mécaniques dans le piston</i> ..... | 27 |
| Figure (II.13) les dix fréquences propres correspondantes à chaque mode propres.....        | 28 |
| Figure (II.14) Les dix premier modes de vibration du piston.....                            | 30 |

## *Nomenclature*

| <b>Symbole</b> | <b>Grandeur</b>                   | <b>Unité</b>           |
|----------------|-----------------------------------|------------------------|
| $T_g$          | Température                       | [C°]                   |
| h              | Coefficient d'échange thermique   | [W/m <sup>2</sup> .C°] |
| $T_{gr}$       | Température des gaz de combustion | [C°]                   |
| $h_{gm}$       | Coefficient d'échange thermique   | [W/m.C°]               |

## *Abréviations*

|            |                            |
|------------|----------------------------|
| <b>PMH</b> | Point Mort Haut            |
| <b>PMB</b> | Point Mort Bas             |
| <b>MEF</b> | Méthode des Eléments Finis |



## *Introduction générale*

L'automobile, apparue à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle en Europe, est une invention technologique majeure qui s'est progressivement imposée comme notre principal mode de transport. Elle est à la base d'une industrie figurant parmi les secteurs les plus importants et les plus influents depuis les années 1950.

Depuis ce temps-là, plusieurs inventions et technologies sont apparues dans le domaine de l'automobile. Dans nos jours, l'automobile fait partie du quotidien de la population. Pour nombre d'entre nous, elle est indispensable pour se déplacer, même lors de trajets courts, pour récupérer ses enfants à l'école, faire ses courses, partir en vacances ou assurer ses déplacements professionnels.

Un véhicule automobile comprend cinq catégories d'organes :

- Un moteur et ses organes annexes,
- Des organes de transmission et de transformation du mouvement,
- Des organes d'utilisation du mouvement,
- Un cadre ou infrastructure supportant les ensembles précédents ainsi que la carrosserie,
- Une carrosserie, venue parfois de fabrication avec le cadre support, pour les voitures de tourisme.[1]

Le plus important organe dans n'importe quelle véhicule ou machine tournante est le moteur. Le moteur est chargé de fournir la puissance nécessaire au déplacement du véhicule. Constitué par un ensemble d'éléments très divers (bielles, pistons, cylindres, vilebrequin, etc...) et organes annexes lui permettant d'assurer des différentes fonctions, il a pour but de transformer en force motrice l'énergie produite par la combustion d'un mélange carburé. Ce mélange est en générale de l'air et de l'essence ou du gasoil en proportion convenable.

Le moteur utilise la détente consécutive à l'inflammation d'un mélange gazeux combustible. La chaleur due à la combustion est transformée en mouvement par l'intermédiaire de la dilatation des gaz. Le moteur à explosion est donc un moteur thermique.

Il comprend un ou plusieurs cylindres à l'intérieur de chacun desquels se déplace un piston. Le mouvement rectiligne et alternatif du piston est transformé en un mouvement circulaire continu d'un arbre moteur ou vilebrequin, par l'intermédiaire de la bielle. Le mouvement de cet arbre est régularisé par un volant (masse en fonte ou d'acier de forme circulaire). L'entrée des gaz frais et la sortie des gaz brûlés, sont assurés par un système de distribution généralement constitué par des soupapes commandés au moyen d'un arbre à cames entraîné par le moteur.

Ce système piston-bielle-vilebrequin a été depuis toujours le souci des chercheurs et des constructeurs de machines tournantes, et cela afin d'augmenter la performance et la résistance de leur moteur en terme de contraintes et efforts agissants sur les organes mécaniques en question.

Un piston est un élément mobile qui est contenu dans un cylindre et qui est rendue étanche aux gaz par des segments de piston. Dans un moteur, le piston a pour objet de

transférer l'effort dû au gaz de combustion dans le cylindre à l'arbre de vilebrequin par l'intermédiaire de l'axe de piston et la bielle. Comme une partie importante le piston de moteur supporte les forces de pression de gaz et d'inertie cycliques et les transforme en travail et cette condition de travail peut causer des dommages amenant à la fatigue du piston. Les recherches scientifiques indiquent que les plus grandes contraintes apparaissent sur le piston. Cette dernière mène à la fatigue du piston et l'endommagement par la suite.

L'analyse des contraintes dans le piston par la méthode des éléments finis donne lieu actuellement à des études de plus en plus approfondies. C'est ainsi que nous engageons dans une suite d'investigation de notre étude dynamique sur l'attelage mobile du moteur F4L912 déjà faites lors de notre projet de fin d'étude qui s'intitule « Transformation d'un moteur diesel F4L912 en dual fuel GNC-gasoil ». Pour mener à bien notre travail, nous présentons notre étude en deux chapitres :

Le premier chapitre consiste essentiellement en des généralités où on introduit une présentation du moteur F4L912 et leur organes constitutives et plus approfondie une vue sur le piston (caractéristique, matériaux, morphologie...) par la suite une étude bibliographique a été faite sur les travaux des chercheurs sur le piston que ce soit pratique ou numérique.

Le deuxième chapitre comporte l'étude numérique par la méthode des éléments finis via le logiciel Ansys Workbench. Le travail de simulation a été divisé sur trois parties :

- La première partie concerne la détermination du champ stationnaire de température dans le modèle 3D du piston et les contraintes thermiques.
- La deuxième partie concerne la détermination du champ de contraintes mécaniques dues à la charge de pression des gaz de combustion.
- La troisième partie concerne la détermination des fréquences propres et leur déformé équivalente.

On termine le manuscrit par une conclusion résumant l'ensemble du travail réalisé et en incluant des perspectives.

# Chapitre I

## Généralités sur le moteur F4L912

### Et Etude Bibliographique

#### Introduction

3  
Les moteurs F 4 L912 refroidis par air, sont des moteurs à injection mécanique directe  
6  
fonctionnant selon le principe du cycle à 4 temps. Ils présentent des caractéristiques communes de construction et ne diffèrent, en somme, entre eux que par le nombre de leurs cylindres et les plages de régime-moteur, nous en donnerons donc une description commune.

Dans notre étude nous nous focalisons sur l'étude du piston du moteur F4L912 par la méthode des éléments finis, suivi par une simulation numérique sur le code commerciale ANSYS.

Le présent chapitre traite une vue générale sur le moteur F4L912, après nous présentons l'objet de notre étude qui est le piston avec leur différents caractéristiques et aussi nous élaborons une étude bibliographique des différents projets déjà faites sur l'étude d'un piston en utilisant la méthode des éléments finis et simulé sous ANSYS.

#### I.1 Le moteur Diesel F4L912

Le moteur F4L912 est une machine thermique constitué de plusieurs organes mécaniques qui font objet de transformer la chaleur due aux effets de la combustion en travail mécanique.

Le cycle moteur est l'ensemble des opérations qui se succèdent dans un moteur avant de se retrouver dans les conditions initiales.

Ces opérations (phases) sont réalisées dans l'ordre suivant :

- Admission
- Compression
- Combustion /Explosion et détente
- Echappement

Le cycle moteur se fait en 02 tours du vilebrequin, 01 tour de l'arbre à cames et 04 courses du piston.

Chaque piston du moteur à 4 cylindres réalise les 04 temps.

Chaque temps se fait en :

- en  $\frac{1}{2}$  tour du vilebrequin soit  $180^\circ$ ,
- en  $\frac{1}{4}$  de tour de l'arbre à cames soit  $45^\circ$ ,
- en 1 course du piston.
- le piston se déplace entre 02 points fixes :
  - PMH.
  - PMB.

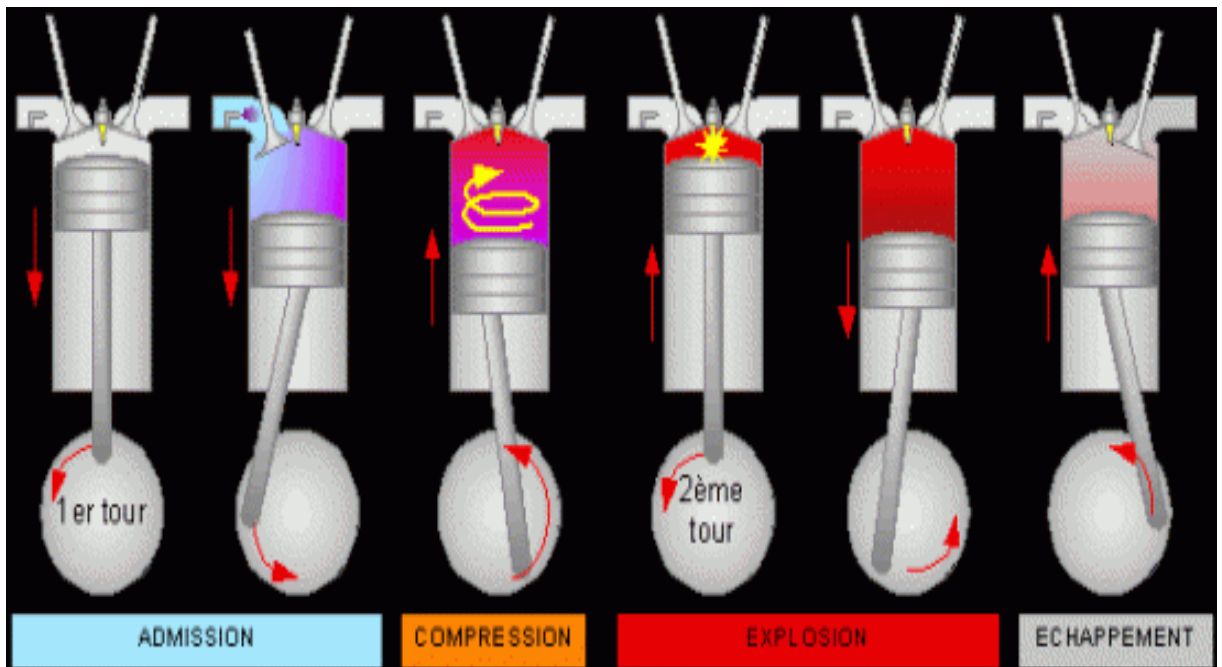


Figure (I.1) Cycle moteur 4 temps

## I.2 Constitution du moteur Diesel

Le moteur à 4 temps, qui est le moteur d'automobile, se compose d'un nombre variable d'éléments semblables jouant tous le même rôle : cylindres, pistons, ensemble bielle manivelle, etc.

### I.2.1 organes constitutifs

Les organes constitutifs comprennent :

- Les organes fixes : bloc cylindre et culasse, carter ;
- Les organes mobiles : pistons et bielles, vilebrequin, volant, soupapes et dispositif de commande.

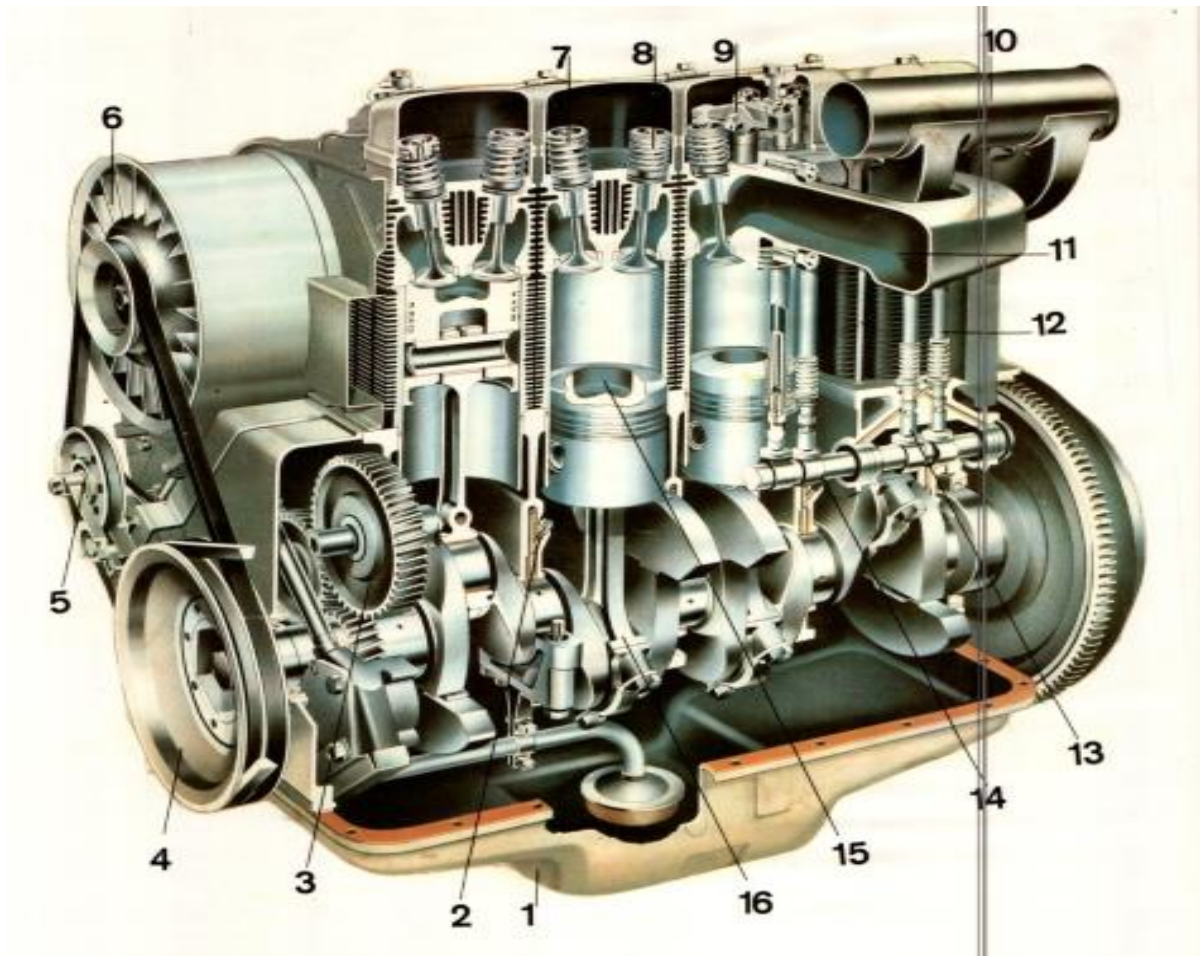
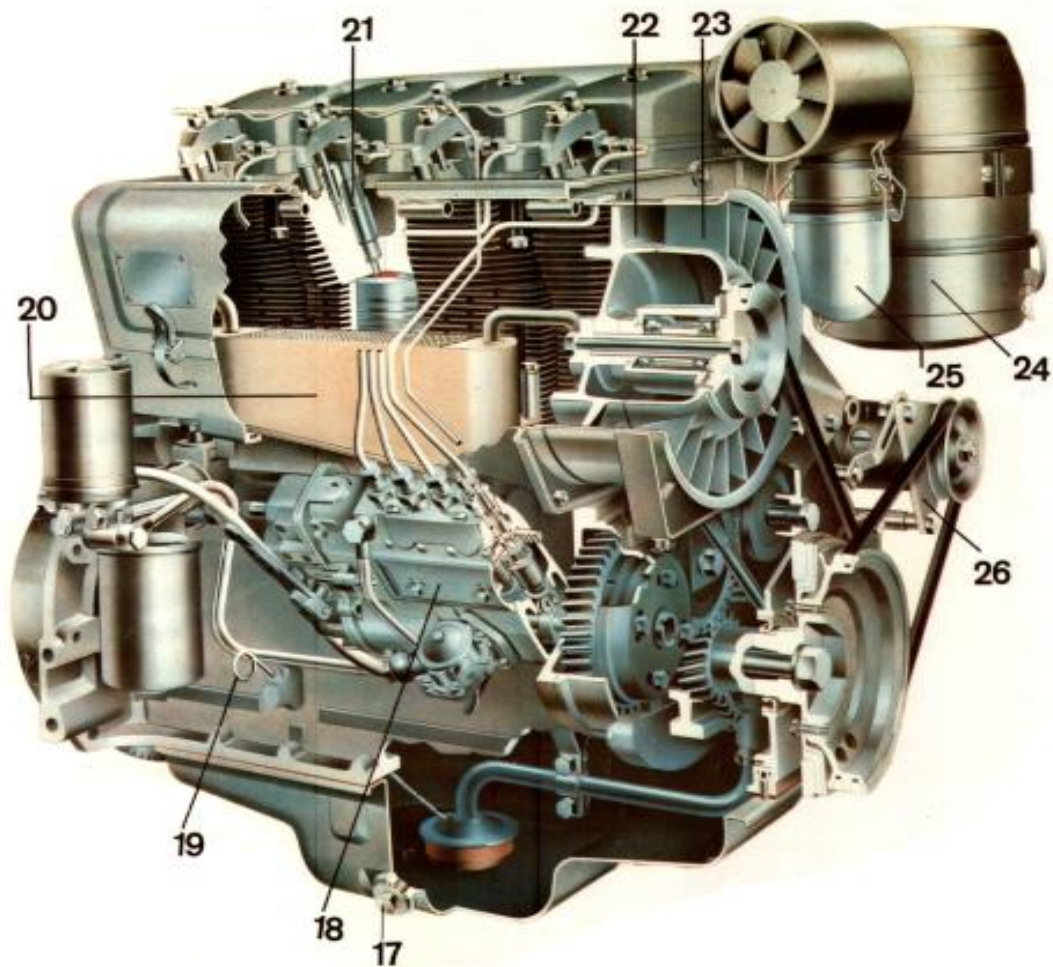


Figure (I.2) Vue de droite du moteur F4L912

- |  |   |
|--|---|
| 1) Carter d'huile  | 9) Culbuteur                                  |
| 2) Gicleur chargé par ressort pour refroidissement du piston | 10) Collecteur d'admission                    |
| 3) Engrenage de distribution                                 | 11) Collecteur d'échappement                  |
| 4) Poulie a gorge pour l'entrainement de la soufflante       | 12) Tige de culbuteur avec tube de protection |
| 5) Galet tendeur de courroie                                 | 13) Poussoir                                  |
| 6) Soufflante de refroidissement                             | 14) Arbre à came                              |
| 7) Soupape d'échappement                                     | 15) Chambre de combustion                     |
| 8) Soupape d'admission                                       | 16) Bielle                                    |



*Figure (I.3) Vue de gauche du moteur F4L912*

- 17) Bouchon de vidange
- 18) Pompe d'injection
- 19) Jauge d'huile
- 20) Radiateur d'huile monobloc
- 21) Injecteur
- 22) Turbine de soufflante
- 23) Pales directrice de soufflante
- 24) Epurateur d'air
- 25) Séparateur d'air a bain d'huile
- 26) dynamo

### I.2.2 Les organes annexes

Les organes ou systèmes annexes quoique sans rapport direct avec l'effort moteur sont néanmoins primordiaux. Ils comprennent :

- Une pompe d'injection qui a pour rôle de fournir le combustible nécessaire au niveau des injecteurs.
- Une tuyauterie d'admission dirigeant le mélange gazeux vers les différents cylindres.
- Une tuyauterie d'échappement dirigeant les gaz brûlés vers l'extérieur.
- Un système de graissage chargé d'assurer le bon fonctionnement des différentes pièces métalliques en mouvement les unes sur les autres, par l'interposition entre elles d'une couche d'huile constamment entretenue ;
- Un système de refroidissement chargé d'empêcher la température générale du moteur d'atteindre une valeur pour laquelle l'huile de graissage se décompose et perd ses qualités lubrifiantes.
- Eventuellement, un système de régulation, pour éviter que, dans certaines conditions d'utilisation, le moteur ne puisse dépasser le régime admissible pour sa sécurité.

On trouve enfin sur le moteur un démarreur et une dynamo, nécessaires pour la mise en marche et pour la recharge des accumulateurs.

Les figures I.2 et I.3 montrent la disposition de ces organes dans le moteur F4L912.

### I.3 Le piston

#### I.3.1 Caractéristiques

Le piston est l'organe mobile qui constitue l'une des parois de la chambre de combustion (cylindre). 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 la compression puissent avoir lieu de bonnes conditions, il faut que le piston forme, avec le cylindre, un espace parfaitement clos.

L'usinage et le montage du piston doivent en conséquence répondre à un certain nombre de qualités essentielles :

- Bonne étanchéité, malgré le jeu nécessaire entre le piston qui n'est pas refroidi et le cylindre qui l'est par la circulation d'air ;
- Résistance et rigidité pour supporter les pressions qui agissent sur lui ;
- Légèreté pour présenter le moins d'inertie possible lors du perpétuel changement de sens de ses déplacements<sup>1</sup> ;
- Graissage suffisant, pour diminuer les résistances dues aux frottements ;
- Ajustage correct dans le cylindre ;
- Guidage bien assuré ;
- Grande conductibilité.

---

<sup>1</sup> Pour un moteur de 100 millimètres de course, tournant à 3000 tours par minute, la vitesse linéaire du piston est de 600 mètres par minute, soit 10 mètres par seconde et le piston change 1500 fois de sens à la minute, soit 25 fois par seconde.

### I.3.2 Matériaux utilisés dans la fabrication du piston

Pendant longtemps les pistons furent uniquement en fonte, ce qui présentait des avantages de prix de revient peu élevé, d'usure réduite en raison des propriétés auto-lubrifiantes de ce métal et de coefficient de dilatation égal à celui des cylindres.

La fonte, par contre est d'un poids excessif (entraînant des forces d'inertie incompatibles avec l'équilibrage des moteurs modernes à régimes élevés), est quelque peu fragile aux efforts accrus des moteurs à taux de compression élevé et présente une conductibilité thermique médiocre favorisant les auto-allumages.

Actuellement les pistons sont généralement fabriqués en alliage léger, principalement à base d'aluminium. Les alliages de magnésium sont extrêmement légers mais d'un prix trop élevé ; quant à l'acier il est rarement utilisé parce que trop difficile à usiner.

Toutefois, il y a lieu de signaler un certain retour aux pistons en fonte notamment aux Etats-Unis, et l'emploi de piston « bi-métal » dont la jupe est en fonte et la tête en aluminium.

La composition des alliages d'aluminium employés varie avec les divers fabricants ou constructeurs. On s'attache, actuellement, à réaliser des alliages ayant un coefficient de dilatation aussi voisin que possible de celui des cylindres, en dehors, naturellement, de toutes les autres qualités requises.

Parmi les alliages d'aluminium l'Alpax, qui contient 13% de silicium, est l'un des plus employés.

On réalise également des pistons dans lesquels ont été noyées pendant la coulée des plaquettes de métal (acier invar) judicieusement disposées pour conférer un coefficient de dilatation optimum, ou des pistons en alliage à haute teneur de silicium permettant la réalisation d'un piston rigide et monobloc [2].

### I.3.3 Morphologie du piston du moteur Diesel

Le piston peut être décomposé en trois parties principales ; tête, jupe et logement d'axe (trou d'axe) (fig. I.4).

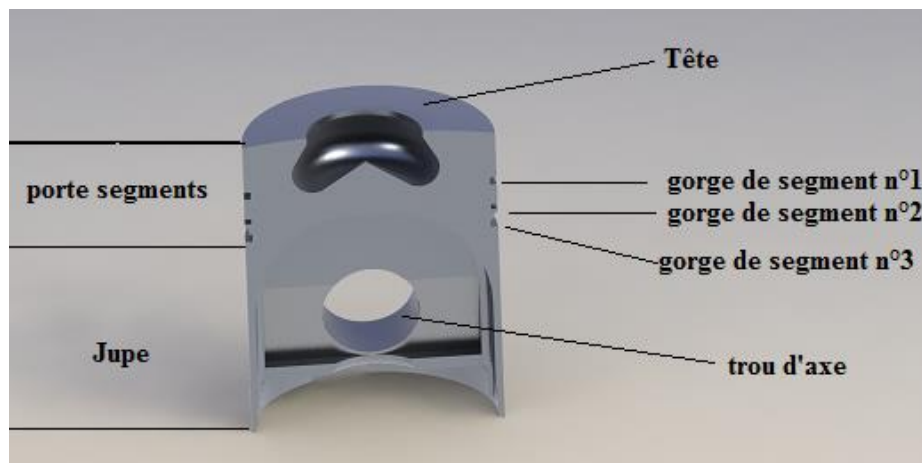


Figure (I.4) Piston



Le fond reçoit les efforts nés de la combustion. Son épaisseur, inversement proportionnelle au module d'élasticité du matériau, à la température de fonctionnement, doit croître avec la pression maximale des gaz avec l'alésage, pour que l'allongement n'atteigne la valeur A% du matériau à la température du matériau considérée.

Le fond est également la surface d'entrée des flux thermiques qui traverseront le piston. Lorsque ce piston doit concourir à l'établissement d'une turbulence du mélange (air-combustible), ce qui est fréquent en diesel, sa surface n'est plus plate et devient plus ou moins tourmentée. Il s'ensuit que le flux thermique pénétrant dans le piston s'accroît puisque la surface d'échange croît et le coefficient de transfert thermique augmente.[3]

### **I.4 Etude Bibliographique**

De nombreux travaux pratiques sur le piston ont été faits depuis des décennies, la première étude était réalisée par Eichelberg en 1939, [4] où il a mesuré le champ de température dans des pistons de gros moteurs diesel fonctionnant à faible régime (moins de 250 tr/min dans ce cas). Il utilise des thermocouples cuivre-constantin, reliés à une chaîne de mesure au moyen de fils fixés le long de la bielle et guidés aux articulations. Par la suite, sont apparues d'autres méthodes permettant d'assurer la transmission de l'information en dehors du piston. Chacune de ces méthodes est un compromis entre la qualité du signal, le nombre de voies, la durée de transmission et les limites de fonctionnement (température, régime moteur).

La transmission par contact mécanique [5], [6] ou induction au point mort bas, nécessite un dispositif volumineux qui limite le nombre de voies transmissibles. Les systèmes utilisant un bras articulé fixé sur la tête de bielle [7], [8], [9], sont précis mais résistent mal aux régimes de rotation élevés et exigent le plus souvent un carter spécial.

Les dispositifs basés sur une transmission de signal par onde radio [10], [11], ou plus récemment par signal infrarouge [12], [13], voient leur fonctionnement limité par la durée de vie du générateur de puissance embarqué.

Les résultats les plus remarquables ont été publiés par Seal et Taylor [14], pour des moteurs diesel de moyenne cylindrée, et Foruhama, pour les diesel rapides. Le plus souvent, ces mesures sont confrontées à des résultats de calcul.

En 1990, Morel & Keribar [15] ont élaboré un modèle tridimensionnel de piston, intégrant les interactions entre le piston et les composants de la chambre de combustion (cylindre, culasse et soupapes). Le champ de température est résolu de façon simplifiée dans l'ensemble de la chambre, de façon plus fine dans le piston. Les conditions aux limites thermiques ont fait l'objet d'une attention inégale : les transferts gaz-paroi utilisent des modèles convectifs et radiatifs distincts, développés par les auteurs ; la température instantanée de gaz de combustion est calculée au moyen d'un simulateur de cycle ; l'apport de chaleur par frottement est calculé, bien qu'aucun détail ne soit communiqué quant à la méthode employée. Les échanges thermiques entre les fluides de refroidissement, huile ou eau et les parois, sont modélisés au moyen de coefficients d'échange constants choisis a priori. La comparaison avec les résultats expérimentaux est satisfaisante, même si les différences de température peuvent aller jusqu'à 20°C dans le deuxième cordon.

L'analyse des déformations dans les pistons par la méthode des éléments finis donne lieu actuellement à des études de plus en plus approfondies. C'est ainsi qu'un grand nombre de chercheurs se sont penchés sur l'étude des déformations par des méthodes numériques perfectionnées, C. H.Li, R. Brun et R.V. Hugues. Des travaux intéressants ont été menés ces dernières années ; l'analyse et le développement de pistons légers, de pistons de moteurs diesel rapides à injection directe HSDI et de pistons de moteurs diesel à injection directe HDI.

Le piston est une des pièces les plus chargées du moteur, il a pour fonction de transmettre l'énergie mécanique au vilebrequin via la bielle. Il est muni de trois segments qui lui permettent d'assurer l'étanchéité aux gaz de combustion.

C. H.Li, a utilisé un modèle en trois dimensions d'éléments finis d'un piston de moteur diesel d'aluminium pour calculer la température de fonctionnement. Il a montré que les contours de la jupe ont joué un rôle important dans la réduction des frottements et de friction [16].

PM Pierz a étudié le développement de revêtement de barrière thermique pour piston moteur diesel en aluminium, il a constaté que les températures résultantes prédit et les contraintes sur le piston, ainsi que les matériaux qui compose le piston, sont la principale cause de l'échec de revêtement. Cela résulte de la fatigue due aux fléchissements sur le piston localisé lorsque le revêtement est chaud et en compression. La portée principale de ce travail est de réduire la contrainte mécanique. [17].

Ashwani Kumar, Shaik Iman Behmad & Pravin.P.Patil ont mené une investigation suivie d'une analyse sur la distribution des contraintes mécanique et thermique sur un piston en carbure de silicium SiC renforcé par un matériau composite ZrB2 et cela en utilisant la méthode des éléments finis sous logiciel Ansys 14. Les fréquences propres et les modes vibratoires ont été obtenus et qui ont montré après analyse quelles varient entre  $1,28 \cdot 10^{-5}$  Hz et 274,44 Hz. [18]

En Septembre 2001 le groupe de Miloud Tahar Abbes, Mohamed Hadj Miloud, Patrick Maspeyrot, ils ont étudiées Un modèle thermique de piston 120 x125 à jupe solide de moteur Diesel type F8L413 à injection directe. L'étude thermique a été toujours difficile à mettre en œuvre. Cela est dû à la complexité de l'environnement où évolue le piston où différentes interactions fluide-paroi du piston sont mises en jeu. Des modèles simplifiés évolutifs sont nécessaires pour comprendre le comportement thermique du piston. [19] Ce qui fera un bon objet pour notre étude vue que notre piston est celui du moteur Diesel Deutz type F4L912.

## **Conclusion**

Il y est bien clair que le moteur F4L912 se distingue par sa conception extrêmement compact et sa construction robuste. Néanmoins, il faut bien solliciter une étude approfondie sur l'attelage mobile composé essentiellement du piston-bielle-vilebrequin. Pour cela on a mené une investigation sous forme d'une étude bibliographique pour comparer avec ce que les chercheurs ont contribués.

# *Chapitre II*

## **Simulation thermomécanique du piston Sous logiciel Ansys**

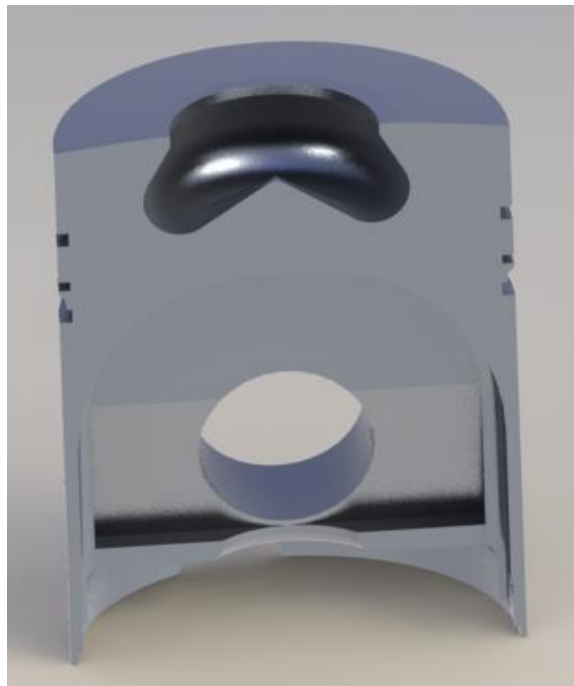
### **Introduction**

La méthode des éléments finis est un outil très performant pour l'analyse des systèmes physiques. Elle s'applique dans divers domaines (mécanique, thermique, génie civil, etc. . .).

La structure du piston est le siège de contraintes mécaniques et thermiques. Les contraintes mécaniques résultent de la pression de combustion et celles thermiques sont dues aux différences de température (donc de dilatation) régnant entre les divers points de la structure. Les équations de base pour le calcul thermomécanique sont :

- L'équation régissant le champ de température dans le piston.
- L'équation régissant le champ de contraintes thermomécaniques dans le piston.

Dans ce chapitre nous appliquons la méthode des éléments finis sous Ansys. Cette étude est faite sur le piston du moteur Deutz F41912 équipant le Groupe Electrogène GE, fabriqué par l'entreprise des Moteurs de Constantine (Algérie). La forme réelle est présentée (fig II.1).



*Figure (II.1) Forme réelle du piston*

## **II.1 Le logiciel de calcul Ansys**

Ansys, est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique. Fondé en 1970 à Canonsburg en Pennsylvanie aux Etats-Unis. Ces produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommée mondiale dans tous les secteurs industriels et domaines physiques (mécanique, thermique, électrique et problèmes couplés).

## **II.2 Méthode des éléments finis**

En analyse numérique, la méthode des éléments finis (MEF ou FEM pour Finite element method en anglais) est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, acoustiques, etc.).

Concrètement, la MEF permet de résoudre de manière discrète et approchée un problème physique, cela permet par exemple de calculer numériquement le comportement d'objets même très complexes, à condition qu'ils soient continus et décrits par une équation aux dérivées partielles linéaire : mouvement d'une corde secouée par l'un de ses bouts, comportement d'un fluide arrivant à grande vitesse sur un obstacle, déformation d'une structure métallique, etc.

## **II.3 Mise en équation du problème**

L'étude a été sous le logiciel Ansys Workbench. Le travail est divisé en trois parties :

- La première partie concerne la détermination du champ stationnaire de température dans le modèle 3D du piston et les contraintes thermiques.
- La deuxième partie concerne la détermination du champ de contraintes mécaniques dues à la charge de pression des gaz de combustion.
- La troisième partie permet de déterminer les modes propres vibratoires de différentes fréquences propres correspondantes.

## **II.4 Méthodologie de simulation de piston**

### **II.4.1 Objectifs**

Le travail de simulation est divisé en trois parties :

- La première partie concerne la détermination du champ stationnaire de température dans le modèle 3D du piston et les contraintes thermiques.
- La deuxième partie concerne la détermination du champ de contraintes mécaniques dues à la charge de pression des gaz de combustion.
- La troisième partie concerne la détermination des fréquences propres et leur déformé équivalente.

### II.4.2 Hypothèses de simulation

Dans cette étude de simulation, on prend les hypothèses suivantes :

- Nous travaillons avec le système d'unités SI (Kg, m, s, N, K).
- Une seule pièce, configuration d'assemblage n'est pas importante.
- Le système de coordonnées est lié directement à la géométrie de la pièce.
- La modélisation du phénomène en 3D.
- les grandeurs caractéristiques de la pièce sont données dans la (fig. II.2), par la suite ce modèle sera conçu sous Solidworks.

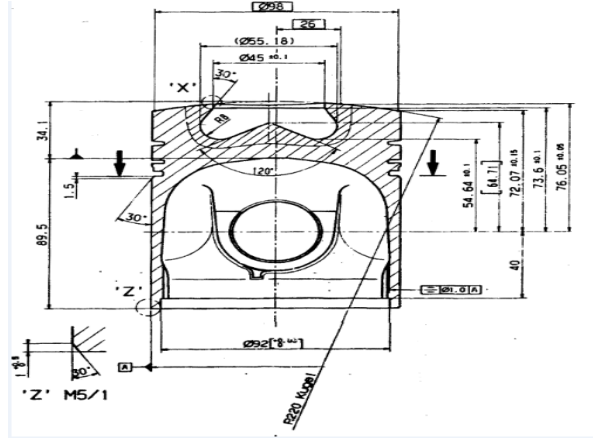


Figure II.2 les grandeurs du piston

### II.4.3 Hypothèse de comportements physique

- Le type de matériau qui compose le piston est l'acier austénitique dont les propriétés thermique et mécanique nous sont fournies par le tableau (II.1).

| Caractéristiques   | Acier Austénitique |
|--|--------------------|
| Module de Young (GPa)  | 190                |
| Coefficient de Poisson   | 0.33               |
| Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )                                     | 7800               |
| Conductivité thermique (W/m.K)   | 20                 |
| Coefficient de dilatation thermique (10 <sup>-6</sup> .K <sup>-1</sup> ) | 12                 |

Tableau (II.1). Caractéristiques mécanique et thermique du piston.

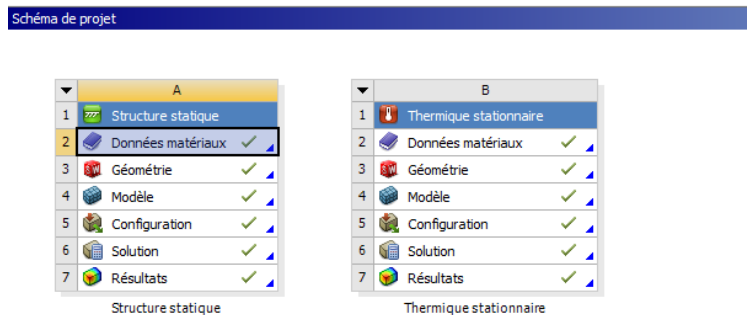


Figure (II.3) Initiation de projet structure statique et Thermique stationnaire

- Le comportement mécanique de matériaux est considéré comme linéaire, élastique et isotrope.

| 1 | Propriété   | Valeur                            | Unité              |  |  |
|---|---|-----------------------------------|--------------------|--|--|
| 2 | Masse volumique                                     | 7800                              | kg m <sup>-3</sup> |  |  |
| 3 | Coefficient isotrope sécant de dilatation thermique |                                   |                    |  |  |
| 4 | Coefficient de dilatation thermique                 | 1,2E-05                           | K <sup>-1</sup>    |  |  |
| 5 | Température de référence                            | 22                                | C                  |  |  |
| 6 | Elasticité isotrope                                 |                                   |                    |  |  |
| 7 | Dériver de  | Module de Young et coefficient... |                    |  |  |
| 8 | Module de Young                                     | 1,9E+11                           | Pa                 |  |  |
| 9 | Coefficient de Poisson                              | 0,33                              |                    |  |  |

Figure (II.4) Introduction des caractéristiques du matériau utilisé

- Lors de la modélisation 3D, nous aurons des sections 3D avec matériaux homogènes.
- Le piston n'est constitué que d'un seul matériau, assigné à toute la pièce.

### II.4.4 Construction du modèle géométrique

La construction du modèle géométrique du piston se fera sur le logiciel Solidworks. Sa conception est représentée sur la figure II.3

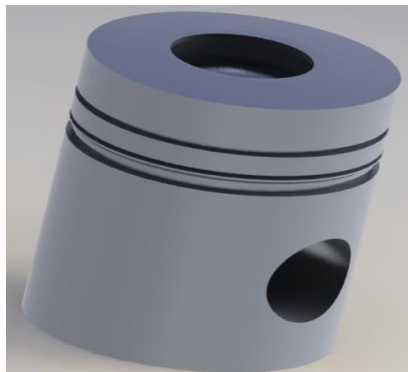


Figure (II.5) la conception du piston sous solidworks

### II.4.5 Conditions de chargement thermiques du piston

La combustion produit une quantité importante d'énergie calorifique. Le piston reçoit une partie de cette chaleur qui est transféré par convection vers la tête puis traverse l'intérieure du piston par conduction. Cette quantité de chaleur est fonction de la température des gaz de combustion et du coefficient de transfert thermique.

En régime établi du moteur, le champ de température est considéré comme stationnaire (température constante, charges constantes).

On peut modéliser le transfert de chaleur entre le piston et son environnement de deux manières :

- 1) A l'aide d'un coefficient de transfert thermique global calculé par des formules semi-empiriques [8]. La température moyenne des gaz de combustion prise en compte étant une température calculée à l'aide de la formule suivante [16] :

$$\bar{T}_g = \frac{1}{4\pi\bar{H}_g} \int_0^{4\pi} h_g T_g \cdot d\psi$$

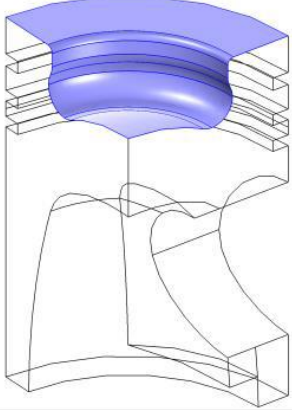

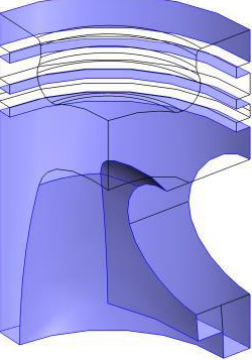
Où  $H_g$  représente le coefficient d'échange thermique moyen, calculé sur un cycle complet à l'aide de la formule suivante :

$$\bar{h}_g = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} h_g \cdot d\psi$$

$H_g$  : Coefficient de transfert thermique spécifique à chaque phase du cycle.

2) A l'aide des mesures expérimentales relevées de la littérature.

Pour notre étude nous avons opté pour la deuxième car elle est plus proche de la réalité et elle prend en considération la disparité de flux thermique dans les différents points de la surface de la tête de piston.

| Les conditions aux limites des transferts de chaleur correspondant  | Les conditions aux limites mécaniques   |
|---|---|
|  <p><math>T_{gr} = 1000 \text{ }^\circ\text{C}</math><br/> <math>h_{gm} = 800 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}}</math></p> |  <p>Pression des gaz de combustion</p> <p>Force due à la bielle dans l'axe de piston</p> |
|  <p><math>T_{gr} = 80 \text{ }^\circ\text{C}</math><br/> <math>h_{gm} = 700 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{C}}</math></p>  |   |

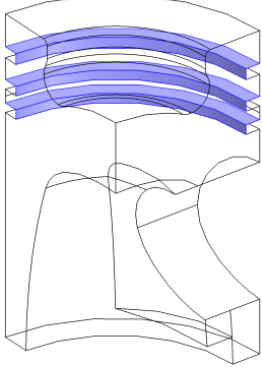
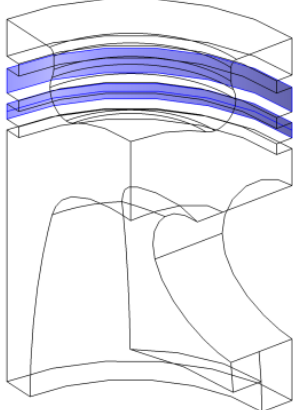
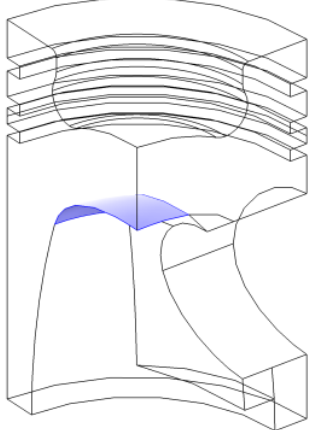
|   |  |
|---|--|
|  $T_{gr} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $h_{gm} = 500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}}$    |  |
|  $T_{gr} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $h_{gm} = 250 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}}$   |  |
|  $T_{gr} = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$ $h_{gm} = 1500 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{ }^{\circ}\text{C}}$ |  |

Tableau (II.2). Les conditions aux limites

### **II.4.5 Conditions de chargement mécanique du piston**

La pression agissant sur le fond du piston, due à l'action des gaz de combustion, est supposée uniformément répartie avec une valeur de 52.5 Bar (Fig II.4). Tous les nœuds qui se trouvent au niveau de l'axe du piston sont fixés en translation et en rotation.



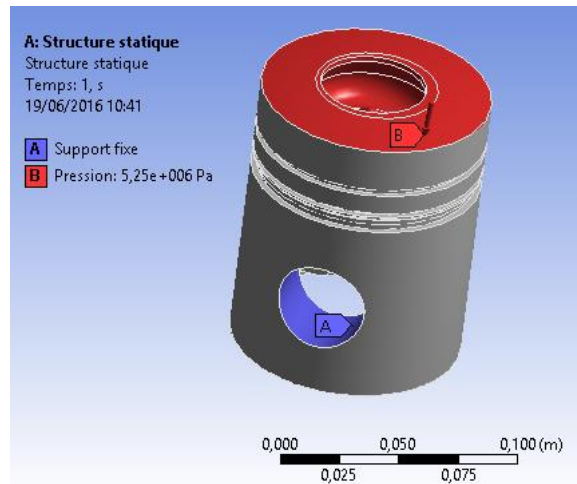


Figure (II.6) Application de la pression des gaz de combustion

### II.4.7 Maillage

Le but de cette étude étant d'obtenir une bonne approximation des déplacements et contraintes en élasticité linéaire. Nous choisissons dans un premier temps des éléments tétraédriques quadratiques.

Nombre totale des nœuds = 17966  
Nombre totale des éléments = 10155

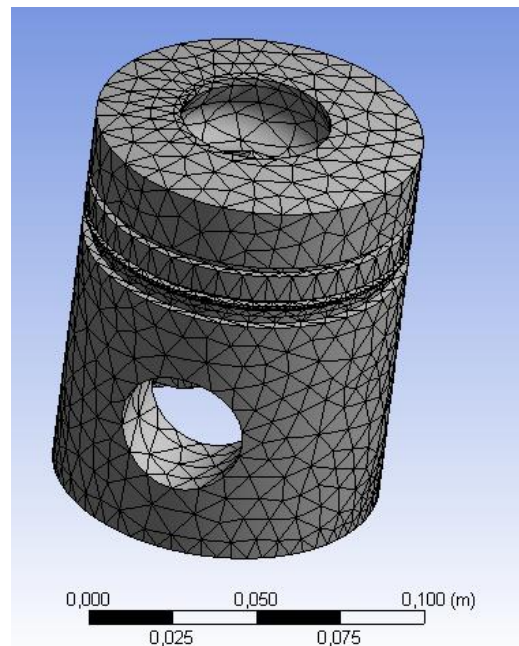


Figure (II.7) Maillage du piston d'étude

## II.5 Résolution du problème

### II.5.1 Répartition du champ de températures dans le piston

On voit que la température sur la partie latérale de la tête augmente jusqu'à la cavité, où elle prend sa valeur maximale puis elle diminue progressivement du coté intérieur de la cavité. Les deux figures (II.7) et (II.8) montrent que le champ de températures décroît progressivement de la tête du piston vers le bas du piston.

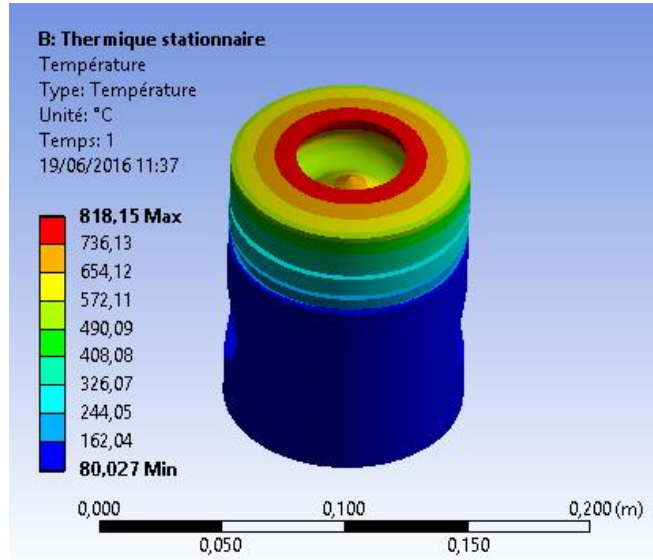


Figure (II.8) Répartition de la température sur le piston

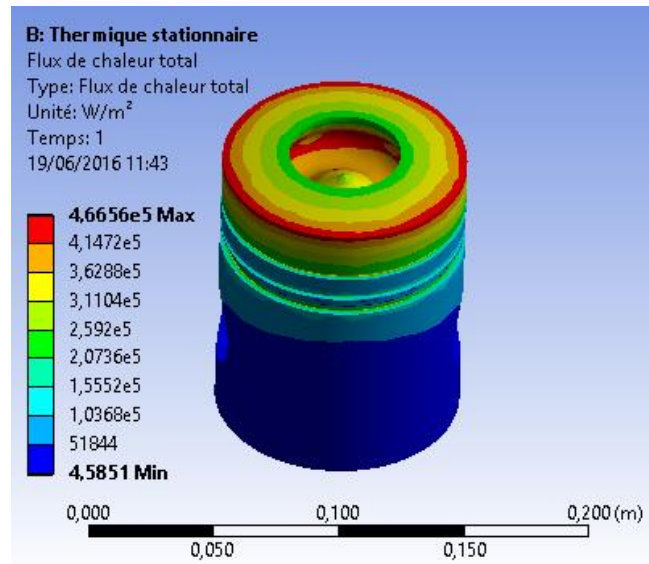


Figure (II.9) Répartition du Flux de chaleur totale

### II.5.2 Répartition des champs de contraintes mécaniques dans le piston

La figure (II.9) montre que la valeur maximale du déplacement totale se situe sur le plan de l'axe, au niveau du point le plus haut du fond du piston. Les figures (II.10) et (II.11) montrent qu'une concentration des contraintes mécaniques proche des chanfreins de la cavité et sur les points d'assemblage des nervures avec la partie intérieure de la tête du piston.

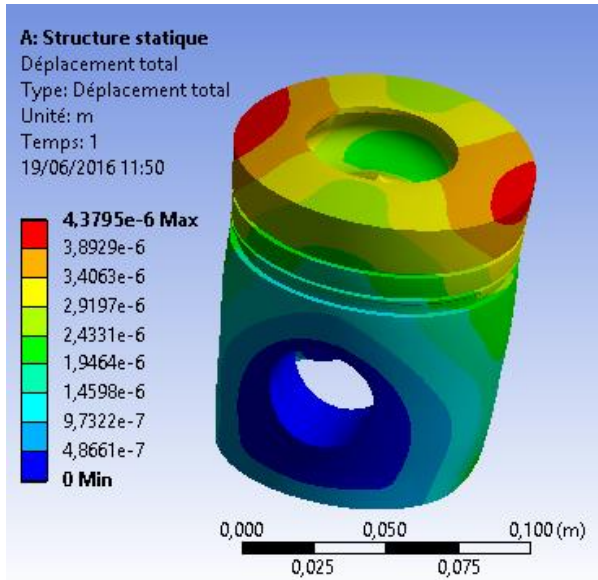


Figure (II.10) Déplacement total sur le piston.

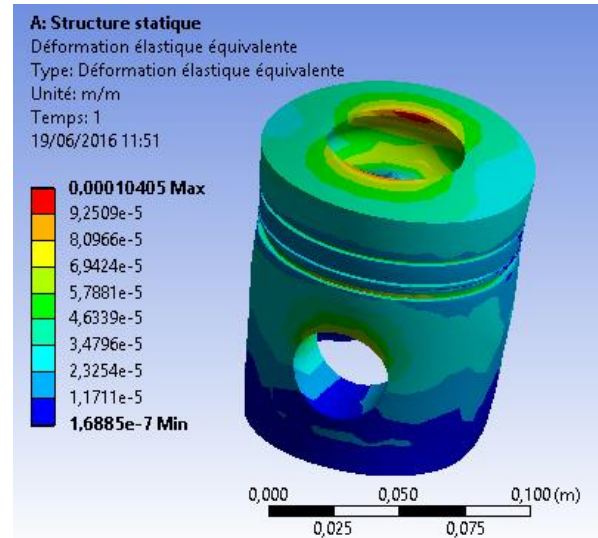


Figure (II.11) Déformation élastique équivalente sur le piston.

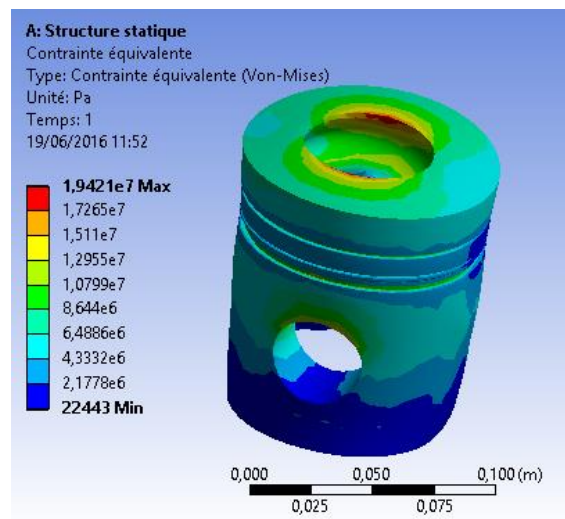


Figure (II.12) Répartition des champs de contraintes mécaniques dans le piston.

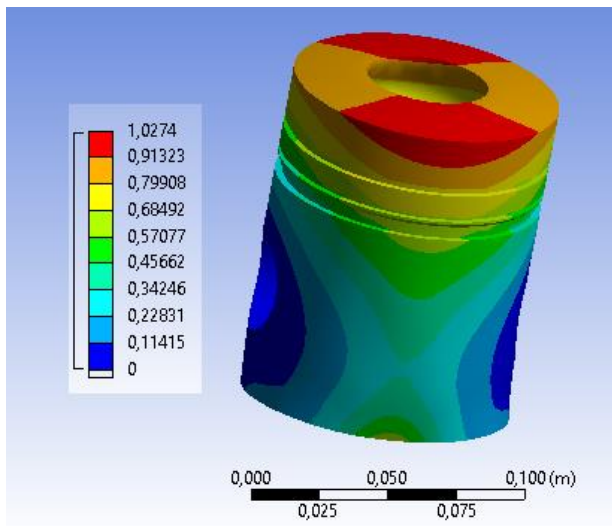
### II.5.3 Etude Modale

Dans le but de comprendre le comportement dynamique de la structure, une analyse modale a été faite en utilisant la MEF (Méthode des éléments finis) via le logiciel Ansys 15.0. Une plateforme de calcul et une analyse des vibrations libres (des fréquences et modes propres) permet l'obtention des résultats de déplacements pour chaque mode. Ces fréquences ont été choisies par le programme automatiquement.

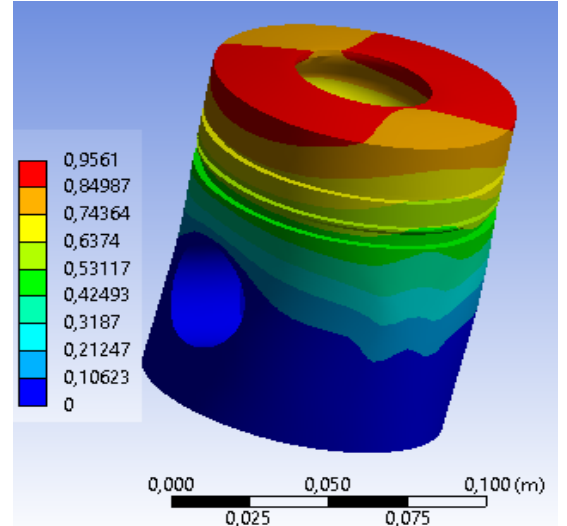
| Données tabulaires |      |                |
|--------------------|------|----------------|
|                    | Mode | Fréquence [Hz] |
| 1                  | 1,   | 5186,6         |
| 2                  | 2,   | 6656,7         |
| 3                  | 3,   | 8665,1         |
| 4                  | 4,   | 10875          |
| 5                  | 5,   | 11038          |
| 6                  | 6,   | 12437          |
| 7                  | 7,   | 12451          |
| 8                  | 8,   | 12527          |
| 9                  | 9,   | 13661          |
| 10                 | 10,  | 14754          |

Figure (II.13) les dix fréquences propres correspondantes à chaque mode propres

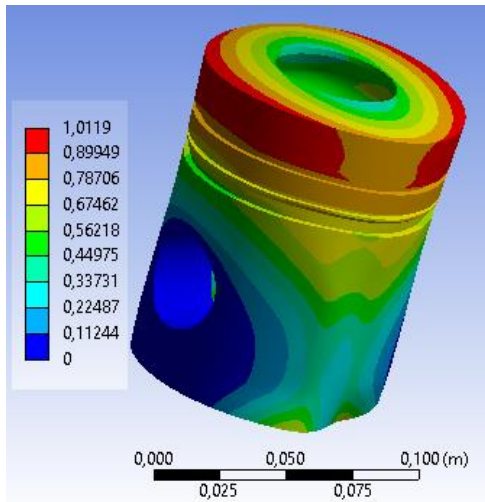
Les dix premiers modes propres de vibration du piston qui sont présentés dans la figure (II.13)



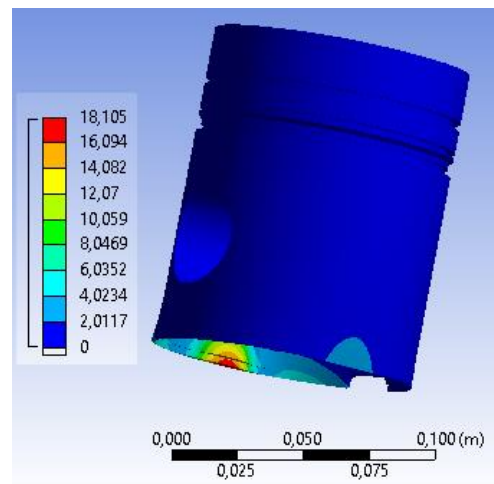
(a) Premier mode de vibration **5186.6 Hz**



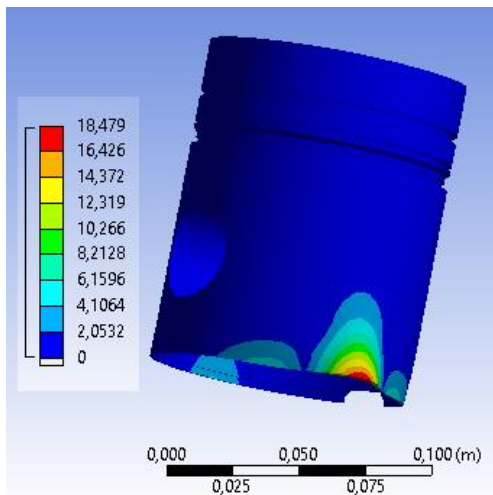
(b) Deuxième mode de vibration **6656,7 Hz**



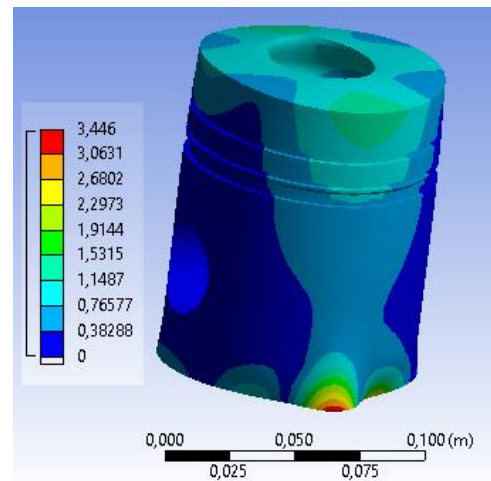
(c) Le troisième mode de vibration **8665,1 Hz**



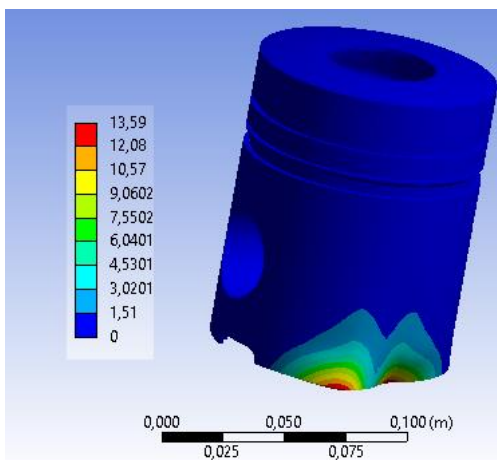
(d) Le quatrième mode de vibration **10875 Hz**



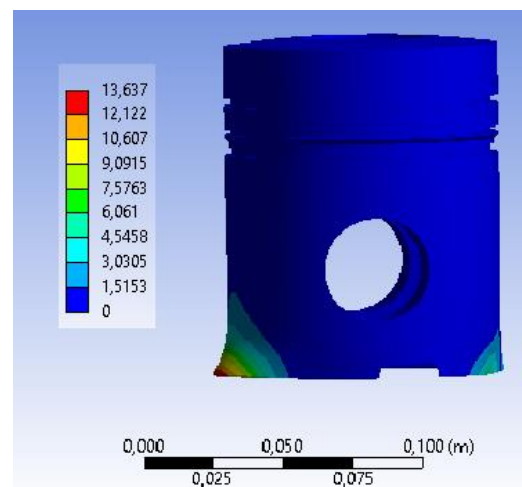
e) le cinquième mode de vibration **11038 Hz**



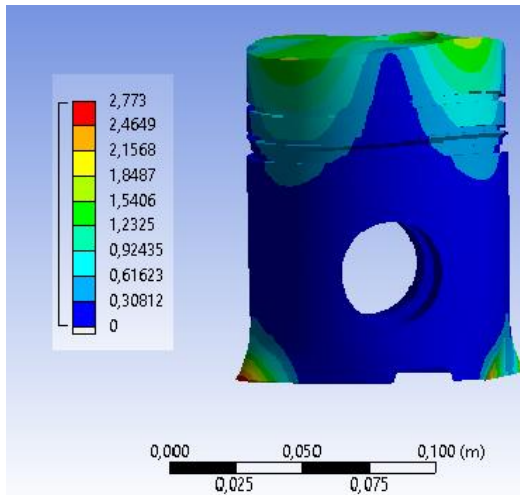
(f) le sixième mode de vibration **12437 Hz**



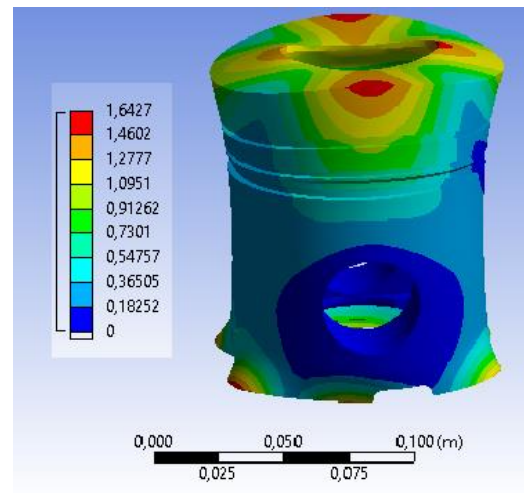
(g) le septième mode de vibration **12451 Hz**



(h) le huitième mode de vibration **12527 Hz**



(i) Le neuvième mode de vibration **13661 Hz**



(j) Le dixième mode de vibration **14754 Hz**

Figure (II.14) Les dix premier modes de vibration du piston

### Commentaires :

- plus le nombre de fréquence naturelle fondamentale est grand, meilleur est la rigidité de la structure.
- Les déformations sont très grandes essentiellement sur la tête du piston et sur le bas du piston des petites déformations et cela est dû aux grands efforts appliqués lors de la descente et aussi la grande vibration qui s'en suit de ces efforts.
- La comparaison de nos résultats avec celle faites par [20], [21], [22], [23] donne lieu à de bons résultats.

### Conclusion

On observe que les vibrations et les contraintes mécaniques induites sont les deux principaux facteurs de défaillance du piston. Les résultats de cette étude montrent que les contraintes sont inférieures à la contrainte de conception. En outre la répartition de la température est comprise dans la limite prescrite. Le matériau du piston peut conserver ses propriétés à température élevée (1 273 K) et de pression (5,25 MPa). La production totale de flux de chaleur est très faible et la déformation thermique se situe dans la limite prescrite. Le logiciel Solidworks a une puissante fonction de modélisation des solides et le logiciel ANSYS a des capacités d'analyse énormes. Ils sont adaptés pour l'analyse par éléments finis pour les pièces de forme complexe. Le modèle solide 3D d'un piston est conçu sous le logiciel Solidworks et sera par la suite transféré au logiciel ANSYS via l'interface dans le présent document. Les dix premiers ordres de fréquence naturelle du piston et de son mode de vibration montrent bien leur déformés correspondantes.

## *Conclusion générale*

Cette étude constitue une contribution assez importante à la modélisation du piston par éléments finis afin d'observer l'influence de l'effet des contraintes thermiques, mécaniques et vibratoires (Analyse Modale) correspondantes pour chaque fréquence propre en faisant une comparaison avec les résultats ressortissant de l'étude bibliographique.

Elle permet de déterminer les températures caractéristiques dans le piston ainsi que la température maximale qui affecte considérablement les propriétés du matériau.

Cette température augmente la vulnérabilité à la fissuration des têtes de piston, compte tenu du niveau élevé des contraintes.

On a déterminé les valeurs maximales des contraintes de Von mises dans le but d'apprécier le comportement du matériau et s'assurer de la fiabilité du piston utilisé.

La déformation maximale dans le plan de poussée maximale, se trouve au niveau de la tête du piston. Ce qui nous permet de prévoir le jeu entre le piston et la chemise.

On a pu trouver des résultats sur la température et sur les dilatations, comparables à ceux obtenues par C.H.Li [15]. Ce qui donne un sens plus réaliste à cette étude.

On observe que les vibrations et les contraintes mécaniques induites sont les deux principaux facteurs de défaillance du piston. Les résultats de cette étude montrent que les contraintes sont inférieures à la contrainte de conception. En outre la répartition de la température est comprise dans la limite prescrite. Le matériau du piston peut conserver ses propriétés à température élevée (1 273 K) et de pression (5,25 MPa). La production totale de flux de chaleur est très faible et la déformation thermique se situe dans la limite prescrite. Le logiciel Solidworks a une puissante fonction de modélisation des solides et le logiciel ANSYS a des capacités d'analyse énormes. Ils sont adaptés pour l'analyse par éléments finis pour les pièces de forme complexe. Le modèle solide 3D d'un piston est conçu sous le logiciel Solidworks et sera par la suite transféré au logiciel ANSYS via l'interface dans le présent document. Les dix premiers ordres de fréquence naturelle du piston et de son mode de vibration montrent bien leur déformés correspondantes.

Comme perspectives, les essais pratique seront un bon avantage pour notre étude, nous recommandons des études comparatives entre plusieurs type de matériau de piston ainsi pour tirer celui qui donne de meilleurs performances.

## Référence Bibliographique

- [1] **Benabdallah Abdelkrim.**, 'Technologie Automobile de Base', Tome 1, Le moteur, édition Dar El Gharb.
- [2] **J.Chargette.**, 'Technique automobile', Tome 1, Le moteur, édition Dunod, Paris. 1965.
- [3] **Mechalikh Mustapha.**, 'Simulation thermomécanique d'un piston de moteur diesel à injection directe par le logiciel abaqus: Influence du matériau', Mémoire de Magistère, Université Hassiba Benbouali Chlef, 2010.
- [4] **Eichelberg G.**, 'Some new investigation on old combustion engine problem 'Engineering, vol. 148, 1939.
- [5] **Iida Y, Taiiaka K. and Fuse S.**, ' Contact point method for measuring sliding face temperature and its application', SAE Paper n° 830311, 1983.
- [6] **kazaclikov R. J.**, 'Measurement of the piston temperature of high speed internal combustion engines ', Izmeritelnaya, N° 5, Mai 1960.
- [7] **Furuhama S. and Enotomo Y.** ' Piston temperature of automobile gasoline engine in driving on the road', Belletin of JSME, Vol. 16, N°99, P. 324, Sept. 1973.
- [8] **Furuhama S. and Suzuki H.**, ' Temperature distribution of piston rings and piston in high speed diesel engine', Bulletin of JSME, Vol. 22 N° 147-1788, Dec.1973.
- [9] **Munro R., Laws A.M et Rhodes L.P.**, ' Techniques de recherche et développement concernant les pistons et les segments', Ingénieur de l'automobile', N°42', pp. 536-579,1979.
- [10] **Lawrason G.C and Rollwitz W.L.**, ' A temperature telemetry technique for reciprocating engines', SAE Paper n°670026,1967.
- [11] **Westbrook M.H.**, 'A telemetry system for piston engine research ', international telemetring conference, Vol.1pp, 154-161, 1963.
- [12] **Barna G.L., Brumm D.B., and Aderson C.L.**, ' An infraredtelemetry technique for making piston temperature in measurement', SAE paper N°91 0051,1991.
- [13] **Assanis D.N., and Friedmann F.**, ' An telemetry linkage system for piston temperature measurement in a diesel engine', SAE paper N°910299, 1991.
- [14] **Seal W.J., and Taylor D.H.C.**, ' Spacial variation of heat transfer to piston and liners of some medium speed diesel engines', Proc. inst.Mech.Eng., Vol 185 17/71, pp. 203 -218,1970.
- [15] **Morel T., Keribar R. and Hariman S. T.**, 'Detailed analysis of heat flow pattern in a piston', Proceedings of the international symposium COMMODIA 90, Tokyo, pp 309-314, 1990.
- [16] **C.H. Li**, 'Thermoelastic behavior of an aluminium diesel engine piston', General Motors Research Labs, Warren, SAE paper 860163, 1986.
- [17] **P.M. Pierz**, 'Thermal barrier coating development for diesel engine aluminium pistons', 1993.
- [18] **Ashwani Kumar, Shaik Imran Behmad, Pravin P.Patil**, 'Thermo-Mechanical and Vibration Analysis of the I.C. Engine Piston made of SiC reinforced ZrB2 composite using Finite Element Method (ANSYS), *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)*, PP 19-23, 2014.
- [19] **Redouane ZELLAGUI**, 'Etude et modélisation thermomécanique d'une bielle d'un moteur à combustion interne', Magister en Génie Mécanique, Université MENTOURI Constantine, 2010.



- [20] **Venkata Suresh Amara, T. Anand Babu.**, ‘Thermal and Mechanical analysis of piston by using composite materials’, Department of Mechanical Engineering, Chirala Engineering College, International Journal of Engineering Research-Online, Vol.3., Issue.6., (Nov.-Dec.), Chirala, India, 2015.
- [21] **Lokesh Singh, Suneer Singh Rawat, Taufeeque Hasan, Upendra Kumar.**, ‘Finite Element Analysis of Piston in Ansys’, International Journal of Modern Trends in Engineering and Research, *Department of Mechanical and Automation Engineering, Amity University, India, 2015.*
- [22] **Ch.Venkata Rajam, P.V.K.Murthy, M.V.S.Murali Krishna, G.M.Prasada Rao.**, ‘Design Analysis and Optimization of Piston using CATIA and ANSYS’, *International Journal of Innovative Research in Engineering & Science ISSN 2319-5665, volume 1, India, 2013.*
- [23] **Swati S Chougule, Vinayak H Khatawate.**, ‘Piston Strength Analysis Using FEM’, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), Vol. 3, Issue 2, pp.1724-1731, Mumbai University, India, 2013.