
Université ABBES LAGHROUR Khenchela



جامعة عباس لغرور خنشلة
Faculté de Sciences et Technologie
كلية العلوم و التكنولوجيا
Département de Génie Mécanique
قسم الهندسة الميكانيكية



Mémoire

de fin d'études pour l'obtention du diplôme
MASTER (LMD)

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Thème

**Etude du comportement
thermique du piston d'un Moteur
Diesel- effets du matériau**

Réalisé par :

— Boukhadra Monsef

Dirigé par : Dr. Chehhat Abdelmadjid

Membres de jury :

- Dr. Ghelani Laala
- Dr. Maache Mouna

Année universitaire : 2018-2019

RESUME

Ce travail s'est focalisé sur le choix du matériau du piston est un facteur prépondérant dans les étapes de conception des moteurs à combustion interne, en raison des contraintes liées aux performances et à la fiabilité. La présente étude consiste en une appréciation du choix d'une variante parmi un ensemble de matériaux utilisés dans un piston de moteur diesel à injection directe de type (MERCEDES A 170 cdi) Les matériaux utilisés sont l'acier, l'aluminium et la fonte. Elle permet de déterminer les températures caractéristiques dans le piston ainsi que la température maximale qui affecte considérablement les propriétés du matériau.

ABSTRACT

This work, which focuses on the knowledge of thermal transfer in the engine piston and is based on the selection of the appropriate material for the piston is a key factor in the design stages of internal combustion engines, due to performance constraints. This study consists of an evaluation of the alternative selection between a group of materials used in the diesel engine piston with the direct injection type of the vehicle (MERCEDES A 170 cdi). The materials used are steel, aluminum and iron. It is possible to determine the characteristic temperatures in the piston as well as the maximum temperature that significantly affects the properties of the material.

ملخص :

هذا العمل الذي يركز على معرفة الانتقال الحراري في مكبس المحرك كما يقوم على اختيار المادة المناسبة للمكبس فهو عامل رئيسي في مراحل تصميم محركات الاحتراق الداخلي، بسبب القيود المتعلقة بالأداء. تتكون هذه الدراسة من تقييم لاختيار البديل بين مجموعة من المواد المستخدمة في مكبس محرك ديزال مع نوع الحقن المباشر للمركبة (MERCEDES A 170 cdi)المواد المستخدمة هي الصلب (الفولاذ) والألومنيوم والحديد . من الممكن تحديد درجات الحرارة المميزة في المكبس وكذلك درجة الحرارة القصوى التي تؤثر بشكل كبير على خصائص المادة المدروسة .

Remerciement

*Avant toute chose, je remercie le **bon Dieu**, le tout **puissant**, pour m'avoir donné le pouvoir, la force et la patience pour réaliser ce travail.*

*Tout d'abord je remercie précisément **mes très chers parents** qui a le droit De recevoir mes chaleureux remerciements pour le courage et le sacrifice Qu'ils ont consentis pendant la durée de mon étude en leurs souhaitant Une longue vie pleine de joie et de santé.*

*Un très grand merci à mon encadreur de mémoire, Docteur **Cehhat abdelmadjid** pour ces précieuses remarques et conseils et de sa disponibilité.*

*Mes remerciements à tous les enseignants du département de génie mécanique du l'université de **ABBAS LAGRHOOR KHENCHELA**, qui de près ou de loin ont contribué à ma formation.*

Que mes amis et mes camarades de la promotion trouvent ici, l'expression de mes remerciements pour leur soutien moral.

Je dresse mes remerciements les plus chaleureux à toutes les personnes qui ont aidé de près ou de loin

♥Merci♥

DEDICACES

A mes très chers parents Aucune dédicace aussi parfaite et douce soit-elle ne saurait exprimer toute ma reconnaissance et tout l'amour que je vous porte.

Ce travail représente le fruit de votre soutien, vos sacrifices, et vos encouragements.

Jamais il n'aurait vu le jour sans les conseils que vous avez consentis pour mon éducation.

*Que Dieu vous sauve et vous donne une vie longue et bien remplie
Santé et bonheur!*

*A mon encadreur : **Chehhat abdelmadjid** pour l'encourager
Son humanité et sa gentillesse avant tout*

*- A mes membres de jury : **Mr. Ghelani laala & Mme. Maache mouna***

A mes chers frères : salah, abdeldjabar,fouad .

*A tous mes enseignants : **Mr. Groune, Mr. Brek S, et Mr. Boulahrouz S.***

*A tous mes amis et mes collègues : Sami, Hamza, Adel, Oussama, Hatem
Nessah soumia.*

A tous qui me connaisse de près ou de loin.

Boukhadra monsef

***TABLE DES
MATIERES***

TABLE DES MATIERES

Chapitre I : Généralités sur les moteurs diesel

I.1. Introduction	01
I.2. Définitions	01
I.3. Historique	01
I.5. Principales différences entre le moteur à essence et le moteur diesel	02
I.5. Définition du moteur diesel	05
I.6. Les types de moteur Diesel	05
I.6.1.Moteurs à injection indirecte	05
I.6.2. Moteurs à injection directe	06
I.6.3 Moteurs à rampe commune et injecteur Pompe	07
I.7.Principe de fonctionnement d'un moteur diesel mode dual fuel	07
I.8. Les quatre temps du moteur diesel	08
I.8.1.Cycle à quatre temps mécaniques	08
I.8.1.1. Premier temps : Admission	08
I.8.1.2. Deuxième temps : Compression	09
I.8.1.3. Troisième temps : Combustion – Détente	09
I.8.1.4. Quatrième temps : Échappement	10
I.8.2. diagramme du cycle à quatre temps	10
I.9. Caractéristiques fondamentales du cycle	10
I.9.1. Le travail (J)	11
I.9.2. Pression moyenne (N/m^2)	11
I.9.3. Rendement	12

I.9.4. Taux de compression volumétrique	12
I.9.5. Consommation spécifique (g/KWh)	12
I.9.6. Puissance effective au litre de cylindrée	13
I.9.7. Puissance massique ou volumique	13
I.10. Paramètres indiqués du cycle réel	13
I.11. Paramètres effectifs du cycle réel	13
I.12. La dégradation des moteurs diesels	14
I.13. Les émissions du moteur diesel	14
I.14. Avantages et inconvénients du moteur diesel	15
I.15. Conclusion	16

Chapitre II : Etude sur les pistons des moteurs diesel

II.1. Introduction	17
II.2. Généralités sur les pistons	17
II.2.1. Morphologie du piston de moteur diesel	18
II.2.2. Forme générale du piston	19
II.2.3. Matériaux utilisés dans la fabrication des pistons	20
II.2.4. Les critères de choix des matériaux	21
II.2.4.1. Les critères technologiques	21
II.2.4.2. Les critères économiques	21
II.3. Études expérimentales dans le piston	21
II.3.1. Champ de températures dans le piston	21
II.3.2. Flux thermiques aux parois du piston	22
II.3.3. Transfert de chaleur entre le piston et l'huile de refroidissement	22

II.3.4. Transfert de chaleur entre le piston, les segments et le cylindre	23
II.4.Modèles décrivant le champ de température dans le piston	23
II.4.1.Modèles analytiques	23
II.4.2.Modèles rhéologiques	24
II.4.2.Modèles numériques	25
II.5.Etudes des contraintes et des déformations dans les pistons	26
II.6.La distribution de la température	27
II.7.Conclusion	30

Chapitre III : Modélisation et Simulation

III.1. Introduction	31
III.2. Définition de la CAO	31
III.3. Logiciels utilisés en CAO	31
III.4. La modélisation	31
III.4.1.La modélisation numérique	32
III.4.2.La modélisation analogique	32
III.5. La simulation	32
III.6. Solidworks	33
III.6.1. Création de la forme d'un piston d'un moteur en 3D	33
III.6.2.les opérations utilisées sur Solidworks	33
III.7. COMSOL MULTIPHYSICS	36
III.7.1.Historique	36
III.7.2.principe d'utilisation	37
III.7.3. les étapes utilisées sur logiciel comsol	37

III.8. Conclusion	41
-------------------------	----

Chapitre IV : Comportement thermique du piston –résultats et discussion

IV.1. Introduction	42
IV.2.transfert de chaleur dans des solides	42
IV.3.L'étude temporel	42
IV.4.Caractéristique physique	43
IV.5. Le maillage	43
IV.5.1. Choix du type d'élément fini	43
IV.5.2. Maillage	44
IV.6. Variation temporelle de la température	44
IV.6.1. en temps (T=0.1s)	44
IV.6.2. en temps (T=0.4s)	46
IV.6.3. en temps (T=0.7s)	47
IV.6.4. en temps (T=1s)	49
IV.6.5.discussion	51
IV.7.Conclusion	51

Liste des figures

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I.1. Principaux composants d'un moteur diesel	05
Figure I.2. Les structures des préchambres de combustion	06
Figure I.3. L'injection directe	07
Figure I.4. Injecteur piezo de Siemens	07
Figure I.5. Admission	09
Figure I.6. Compression	09
Figure I.7. Détente	10
Figure I.8. Échappement	10
Figure I.9. Diagramme du cycle à quatre temps (p – v).	11

Chapitre II :

Figure II.10. Piston d'un moteur diesel avec cavité en forme oméga	17
Figure II.11. Piston	18
Figure II.12. Morphologie du piston	19
Figure II.13. Modèle thermique du piston	26
Figure II.14. Déformations thermiques radiales du piston	27
Figure II.15. Un corps 3 dimensions soumis à une température limite T_{∞} (x,y,z)	28
Figure II.16. bilan de chaleurs entrante s-sortantes d'un volume élémentaire	28
Figure II.17. Echange thermique entre le piston et son environnement	29

Chapitre III :

Figure III.18. Dessin technique d'un piston en solidworks	34
Figure III.19. Dessin technique d'un l'axe piston en solidworks	35
Figure III.20. Piston dessiné en solidworks (géométrie)	36
Figure III.21. Étape 2	37

Figure III.22. Étape 3	37
Figure III.23. Étape 4,5 et 6	38
Figure III.24. Étape 7 et 8	39
Figure III.25. Étape 9,10 et 11	40
Figure III.26. Étape 12, 13, 14,15 et 16	41
 Chapitre IV :	
Figure IV.27. Maillage	44
Figure IV.28.a. Aluminium en temps (t = 0.1s)	45
Figure IV.28.b. Acier en temps (t= 0.1 s)	45
Figure IV.28.c. Fonte en temps (t= 0.1s)	46
Figure IV.29.a. Aluminium en temps (t= 0.4 s)	46
Figure IV.29.b. Acier en temps(t = 0.4s)	47
Figure IV.29.c. Fonte en temps(t= 0.4s)	47
Figure IV.30.a. Aluminium en temps(t = 0.7s)	48
Figure IV.30.b. Acier en temps(t= 0.7s)	48
Figure IV.30. c. Fonte en temps(t= 0.7s)	49
Figure IV.31.a. Aluminium en temps(t = 1s)	49
Figure IV.31.b. Acier en temps(t= 1s)	50
Figure IV.31.c. Fonte en temps(t= 1s)	50

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I-1. Comparaison entre le Moteur à Essence et le Moteur Diesel 02

Chapitre IV

Tableau IV-1. Caractéristiques physiques (Acier Aluminium et Fonte) 43

LISTE DES ABREVIATIONS ET SIGLES

c : Course du piston

C : Couple moteur effectif

C_i : Couple moteur indiqué

C_y : Cylindrée unitaire du moteur

D : L'alésage de piston

g_e : Consommation spécifique effective

g_i : Consommation spécifique indiquée

Q_a : Quantité de chaleur apportée au cycle

PMB : Point mort bas

PMH : Point mort haut

P_a : Pression en fin d'admission

P_c : Pression vers la fin de compression

P_e : Pression moyenne effective

P_i : Pression moyenne indiquée

P_{mi} : Pression moyenne indiquée

N_e : Puissance effective

W_{cycle} : Travail du cycle

W_e : Travail effectif du moteur

W_i Travail indiqué du moteur

S : La course de piston

ε : Taux de compression

η_e : Rendement effectif

η_i : Rendement indiqué

η_{th} : Rendement du cycle théorique,

η_m : Rendement mécanique du moteur,

τ : nombre de temps du moteur

q : flux de chaleur

C_p : Capacité thermique massique (chaleur spécifique)

N_u : Nombre de Nuselt

P_r : Coefficient de Prandt

R_e : Nombre de Reynolds

H : coefficient d'échange thermique

D_H : est le diamètre de l'injecteur d'huile

E : Module de Young

T : température

t : temps

T_∞ : Température ambiante

K : coefficient de conductivité thermique

S : surface

ρ : Masse volumique

α : Coefficient de dilatation thermique

μ : viscosité dynamique

ν : Coefficient de Poisson

Introduction

Générale

Introduction générale

La thermique est le domaine de la physique qui traite des échanges thermiques (transferts de quantité de chaleur), dans un système ou entre systèmes, qui entraînent ou non une transformation du matériau et, par ses applications, s'intéresse à la génération de l'énergie thermique (chauffage ou refroidissement), son stockage et sa transmission. Dans toutes les mesures thermiques, la mesure de la température (T) est une mesure de base.

La complexité de la structure du piston exclut toute possibilité d'utilisation d'une méthode analytique pour la résolution de problème de notre étude. Pour palier à cette difficulté, nous avons opté pour l'étude temporelle. Le piston doit assumer de multiples fonctions tout en souscrivant à des impératifs particulièrement discordants

Dans cette étude, on se propose de déterminer le champ temporel de température dans le piston. Par la suite, les résultats obtenus permettent de sélectionner le matériau susceptible d'offrir le bon choix pour notre type de piston.

Le premier chapitre nous identifierons les moteurs thermiques et nous nous spécialiserons ensuite dans l'étude des types de moteurs diesel, de leur fonctionnement, des émissions résultant de ces moteurs, de leurs aspects négatifs et positifs.

Dans le deuxième chapitre, Nous débuterons ce travail par une étude bibliographique destinée à passer par quelques travaux de recherche antérieurs faites sur le piston. Nous établirons les équations générales pour le calcul des champs de température et des contraintes thermique. Ce qui permettra d'établir la formulation mathématique du problème.

Dans le troisième chapitre nous allons apprendre à travailler sur un ordinateur pour modéliser un piston pour le moteur diesel à véhicule (MERCEDES A 170 cdi), puis à déterminer les étapes du processus de simulation pour l'étude souhaitée. Ensuite la simulation numérique du problème est faite au 3^{ème} chapitre à l'aide des données thermiques qui caractérisent les trois matériaux utilisés sur la fabrication des pistons.

Dans le 4^{ème} chapitre, on représentera les résultats de la simulation suivie de leurs discussions.

Chapitre I

Généralités sur les moteurs diesel

I.1. Introduction.

Un moteur est un dispositif transformant une énergie non-mécanique (éolienne, chimique, électrique, thermique par exemple) en une énergie mécanique ou travail [1].

Les moteurs Diesel, dont la combustion est déclenchée par l'injection de gazole sous pression dans de l'air fortement comprimé, il se produit alors une auto-inflammation, ce qui signifie que le mélange s'enflamme spontanément [2]. Un moteur Diesel fonctionne différemment d'un moteur à essence. Même si leurs principaux organes sont semblables et s'ils respectent le même cycle à quatre temps, un moteur Diesel et un moteur à explosion présentent des différences sensibles, en particulier dans la façon dont le mélange carburé y est enflammé et dans la manière dont la puissance délivrée y est régulée. Dans un moteur à essence, le mélange carburé est enflammé par une étincelle électrique.

Dans un moteur Diesel, l'allumage est obtenu par une auto-inflammation du carburant à la suite de l'échauffement de l'air sous l'effet de la compression.

I.2. Définitions

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 automobile, dont le travail mécanique est obtenu par l'explosion plus détente des gaz portés à haute pression et haute température [3].

I.3. Historique

Le moteur diesel doit son nom à son inventeur, l'ingénieur allemand Rudolf Christian Karl Diesel, né le 18 mars 1858 à Paris et disparu en 1913. A l'âge de 35 ans il publia après de longues études un ouvrage intitulé : "Théorie et construction d'un moteur thermique rationnel". Dans cet ouvrage, Rudolf Diesel, qui avait l'idée de réaliser un moteur dont le cycle se rapprochait du cycle de Carnot a présenté ce nouveau moteur comme un moteur à combustion interne dans lequel a été utilisé la chaleur due à la compression de l'air pour provoquer l'allumage du combustible. Cinq mois plus tard, la Société CRUPP fait les essais du premier diesel, dans l'atelier d'Augsbourg ; le combustible injecté après pulvérisation, explosa comme prévu mais malheureusement, le moteur ne résista pas. Toutefois, le but

recherché était atteint et Rudolf Diesel ne se découragea pas : il construisit un moteur plus résistant et fit une démonstration du parfait fonctionnement de son nouveau moteur à KASSEL en 1897. A la suite de ces expériences, le Français CAPITAINE inventa, en 1918, un moteur semi-diesel ainsi nommé pour la simple raison qu'il ne comprime pas l'air jusqu'à la température d'inflammation du combustible. La mise en route s'effectue après préchauffage de la chambre de combustion dont la température est ensuite entretenue par les combustions successives. En 1925, la firme BENZ réalisa un moteur diesel à deux cylindres et GNUKERS un moteur diesel deux temps à cylindres opposés. PACKARD construisit en 1930 un moteur d'avion en étoile, à refroidissement par air. Sans les études poussées de Rudolf Diesel tous les dérivés du moteur diesel n'auraient jamais pu être réalisés. Rudolf Diesel, passionné de mécanique, a obtenu différents brevets dont un en particulier, en 1892, intitulé "procédé pour produire de la force motrice en faisant brûler un combustible". Il disparut en 1913 alors qu'il se rendait en Angleterre [4].

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

I.4. Principales différences entre le moteur à essence et le moteur diesel

On peut distinguer deux types de moteurs, le moteur à allumage commandé et le moteur à allumage par compression. Le moteur à essence et le moteur diesel font partie de la même famille de machines thermiques. Néanmoins, ils ne présentent pas les mêmes caractéristiques. La préparation du mélange carburé dans un moteur à essence est dite quantitative car la masse de charge fraîche introduite dans le cylindre moteur augmente certes quand on accélère, cependant, le rapport entre la masse d'air introduite et la masse de carburant est toujours la même. Autrement dit, le rapport Air/Fuel est constant quelque soit le régime du moteur. Par contre, la préparation de la charge fraîche dans un moteur diesel est dite qualitative car lorsque la vitesse de rotation augmente seule la quantité de carburant injectée augmente et la

masse d'air introduite dans le moteur est théoriquement la même. Ainsi, le rapport Air/Fuel, c'est-à-dire la qualité du mélange carburé, varie avec la variation du régime moteur. En outre, le moteur diesel développe un rendement thermique plus élevé que celui développé par le moteur à essence de même puissance.

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

<i>Paramètres</i>	Moteurs à Essence	Moteurs Diesel
<i>Désignation</i>	Moteur à allumage commandé par bougie	Moteur à allumage par compression
<i>Carburant</i>	A l'extérieur par carburateur, Par injection indirecte monopoint ou multipoints. A l'intérieur par injection directe.	A l'intérieur par injection directe.
<i>Allumage</i>	Explosion d'une charge homogène	Auto-inflammation d'une charge hétérogène
<i>Carburant</i>	Fractions légères d'hydrocarbures Octane C ₈ H ₁₈ , Gasoline C ₈ H ₁₇	Fractions lourdes d'hydrocarbures Dodécane C ₁₂ H ₂₆ , heptane C ₇ H ₁₆
<i>Cylindrée (cm³)</i>	800, 1000, 1100, 1200, 1400, 1600, 1800	1500, 1600, 1800, 1900, 2000, 2200,...
<i>Piston</i>	Plat	Creux
<i>Formation du Mélange</i>	Quantitative	Qualitative

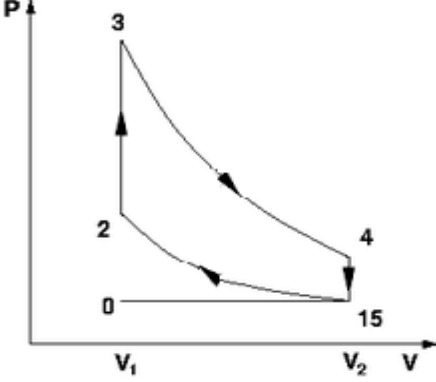
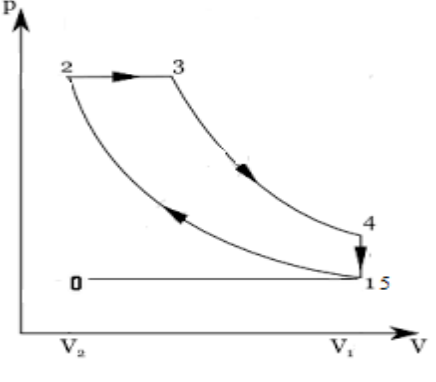
Taux de Compression	Faible entre 1 et 10	Elevé entre 15 et 23
Turbulence	A Limiter à cause de l'étincelle	A favoriser pour la préparation de la charge
Corps d'admission	Carburateur ou Papillon motorisé + Starter pour démarrage à froid	Système d'injection avec pompe à injection ou injecteur pompe.
Cycle Théorique	Otto, Beau de Rochas 	Cycle Diesel 
Coefficient d'excès d'air	Entre 0,6 et 1,3	> 1
Flamme	Pré-mélange	Diffusion
Combustion	A volume constant	A pression constante
Puissance	Varie en fonction de la masse de la charge introduite dans le cylindre	Varie en fonction de la masse de carburant injectée dans la chambre de combustion
Rendement thermique	Fonction du taux de compression	Fonction du taux de compression et du taux d'introduction
Pression en fin de compression	Varie avec la variation de la masse Introduite (10~15 bar)	Ne varie pas (moteur atmosphérique) (20~30 bar)

Tableau 1-1. Comparaison entre le Moteur à Essence et le Moteur Diesel.

I.5. Définition du moteur diesel

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

Le moteur diesel est un moteur thermique a type combustion interne développé entre 1893 et 1897 par un ingénieur allemand qui a donné son nom à l'invention : Rudolf Diesel. Il est défini par ses pièces principales.

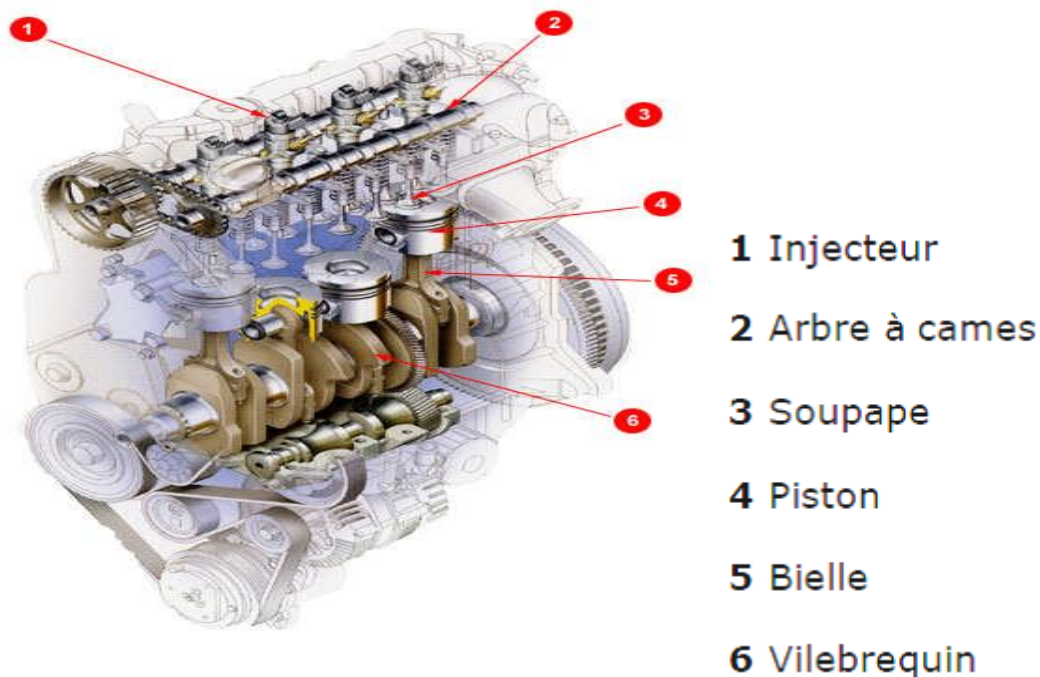


Figure I.1.Principaux composants d'un moteur diesel

I.6. Les types de moteur Diesel:

Dans le monde actuel il existe trois types de moteurs Diesel :

I.6.1.Moteurs à injection indirecte :

Pour qu'un moteur à combustion interne fonctionne avec régularité et ait un bon rendement, le carburant et l'air doivent être correctement mélangés. Les problèmes posés par le mélange air-carburant sont particulièrement compliqués dans un moteur Diesel, car ces composants y sont

introduits dans les cylindres à des moments du cycle différents. Il existe deux types d'injection : l'injection directe et l'injection indirecte [5].

Aussi, dans un moteur à injection indirecte, le carburant n'est pas injecté directement dans la chambre de combustion principale, mais il est envoyé dans une petite chambre de turbulence en spirale (appelée aussi chambre de précombustion) où s'amorce en réalité la combustion.

L'inconvénient de ce système réside dans le fait que la chambre de turbulence est en fin de compte une annexe de la chambre de combustion, avec laquelle elle constitue un ensemble de forme peu propice à l'obtention d'une combustion réellement totale et régulière, (fig. I.2).
Démontrer deux types de ces moteurs.

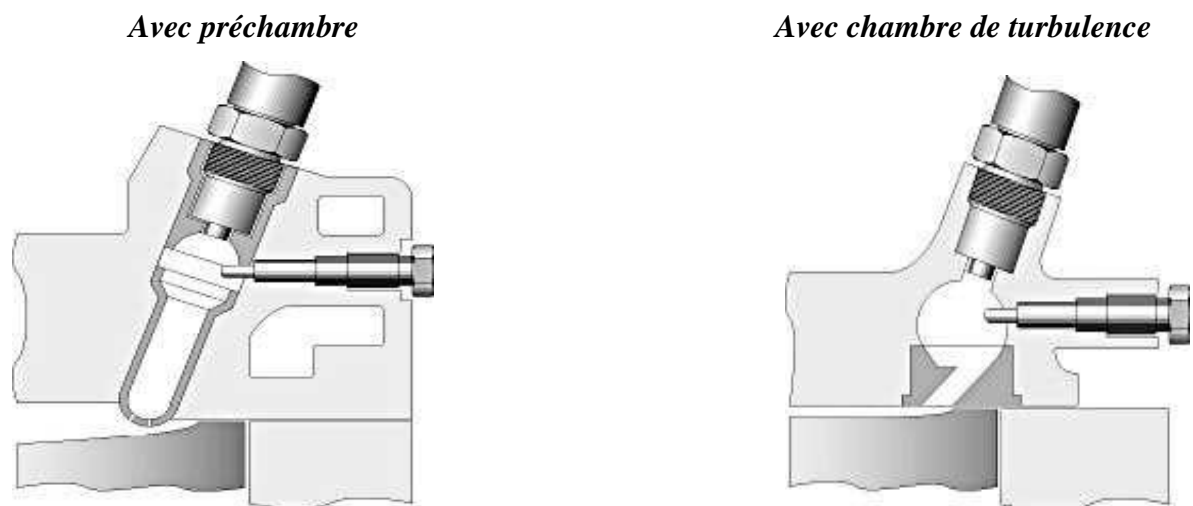


Figure I.2. Les structures des préchambres de combustion

I.6.2. Moteurs à injection directe :

Le moteur à injection directe s'impose pour son rendement supérieur à ceux des moteurs à injection indirecte. Injection de gazole à très haute pression (2000 bars) directement dans le cylindre en fin de compression.

En effet, le rapport entre la surface et le volume de la chambre de combustion est nettement plus faible pour un moteur à chambre à espace mort unique (injection directe fig. I.3.) que pour un moteur à préchambre (injection indirecte voir fig. I.2.) ; de plus, la durée de la combustion est plus courte dans un moteur à injection directe.



Figure I.3. L'injection directe

I.6.3 Moteurs à rampe commune et injecteur Pompe :

Le système d'injection haute pression à rampe commune consiste à alimenter, à l'aide d'une pompe haute pression pilotée électroniquement, une rampe commune (soit common-rail en anglais) qui assure la fonction d'accumulateur du carburant. Cette rampe est connectée à des injecteurs qui assurent une pulvérisation très fine directement dans la chambre de combustion grâce à une pression comprise entre 1350 et 1400 bars (contre 900 bars pour une pompe d'injection normale). Cette pulvérisation très fine permet d'améliorer la combustion pour plus du détail voir, [6].

Contrairement aux systèmes à pompe distributrice, la pression d'injection est indépendante de la vitesse de rotation du moteur et demeure constante pendant la phase d'injection.

Comme la rampe commune, l'efficacité du système est basée sur la haute pression. Celle-ci est provoquée mécaniquement sous la poussée d'une came spécifique placée sur l'arbre à cames traditionnel. Cette came actionne à l'aide d'un poussoir un petit piston qui augmente la pression dans l'injecteur afin de rendre plus fine la pulvérisation.



Figure I.4. Injecteur piezo de Siemens

I.7.Principe de fonctionnement d'un moteur diesel mode dual fuel

Le moteur dual-fuel utilise deux combustibles qui brûlent simultanément dans le cylindre. Il s'agit d'un combustible primaire et d'un combustible pilote. Le premier combustible correspond à la majorité de l'énergie introduite dans le moteur ; il s'agit d'un combustible gazeux [7]. Il existe deux dénominations assez proches l'une de l'autre, à savoir, le moteur bi-

fuel et le moteur dual-fuel [8]. La différence consiste dans le mode de carburation de chaque type de moteur.

I.8. Les quatre temps du moteur diesel

On désigne par moteur à combustion interne, au sens le plus large, les machines dans lesquelles la combustion s'effectue au sein du fluide moteur.

Dans les moteurs à combustion interne discontinue, la transformation de l'énergie chimique du combustible en travail mécanique résulte de la réalisation périodique dans le cylindre du moteur d'une série d'évolutions dont l'ensemble, qui se répète périodiquement dans le cylindre du moteur, porte le nom du cycle de fonctionnement du moteur.

- L'admission du mélange (l'air dans le cas d'un moteur Diesel),
- Sa compression,
- Son inflammation,
- La détente des gaz brûlés et leur expulsion.

I.8.1. Cycle à quatre temps mécaniques

Un cycle s'effectue sur 2 tours de vilebrequin, soit 720° . Le cycle mécanique avec le piston au point mort haut PMH et se réalise en (2 allers et 2 retours c'est à dire 4 courses de piston) [9] se fait en 4 temps alors que le cycle thermodynamique en comporte 5 (la combustion à volume et à pression constante). Seule la détente est motrice (fournit de l'énergie), les autres sont résistants

I.8.1.1. Premier temps : Admission

- Ouverture de la soupape d'admission au point mort haut (PMH) mise à la pression à l'entrée du cylindre,
 - Descente du piston (entraîné par l'inertie du cycle précédent),
 - Remplissage du cylindre par le mélange gazeux,
 - Fermeture de la soupape d'admission au point mort bas (PMB),
- Cycle : Augmentation du volume à pression constante (droite a-b).

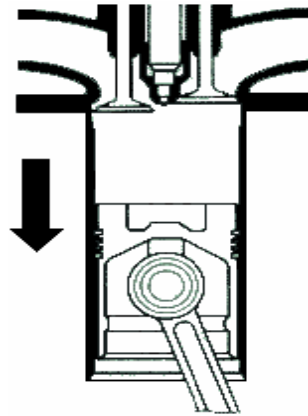


Figure I.5. Admission

I.8.1.2. Deuxième temps : Compression

- Les soupapes d'admission et de d'échappement sont fermées,
- Le piston remonte vers le point PMH d'où une forte élévation de pression (la pression de fin de compression est élevée 30bars) due à la diminution de volume accompagnée par une élévation importante de la température (celle-ci doit atteindre, au PMH, au minimum 500°C pour assurer spontanée du mélange au moment d'injection).

- Cycle : Montée en pression (courbe b-c)

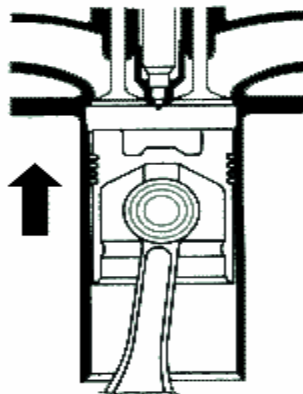


Figure I.6. Compression

I.8.1.3. Troisième temps : Combustion – Détente

- Les soupapes d'admission et d'échappement sont fermées,
- Le combustible est injecté dans le cylindre au PMH avant que la pression maximum du cycle soit atteinte,
- Temps de combustion : Au PMH, une combustion primaire à volume constant se déclenche par auto-inflammation permet d'atteindre la pression maximum dans le cylindre et qui sous laquelle se déclenche une deuxième combustion (à pression constante),

- Temps de détente : Le piston propulsé vers le bas par la forte pression fait tourner le vilebrequin (temps moteur),
- Cycle : Montée en pression à volume constant, augmentation du volume à pression constante (droite c-d), Chute de pression (détente : courbe d-e).

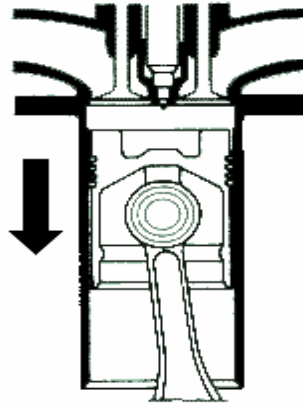


Figure I.7. Détente

I.8.1.4. Quatrième temps : Échappement

- Ouverture de la soupape d'échappement,
- Le piston remonte et chasse vers l'atmosphère les gaz brûlés.
- Cycle : Échappement primaire à volume constant (droite e-b), Échappement secondaire à pression constante (droite b-a).

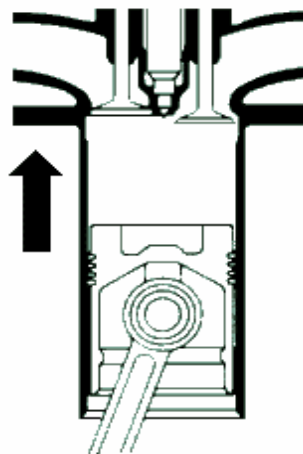


Figure I.8. Échappement

I.8.2. diagramme du cycle à quatre temps

Les caractéristiques fondamentales du cycle sont :

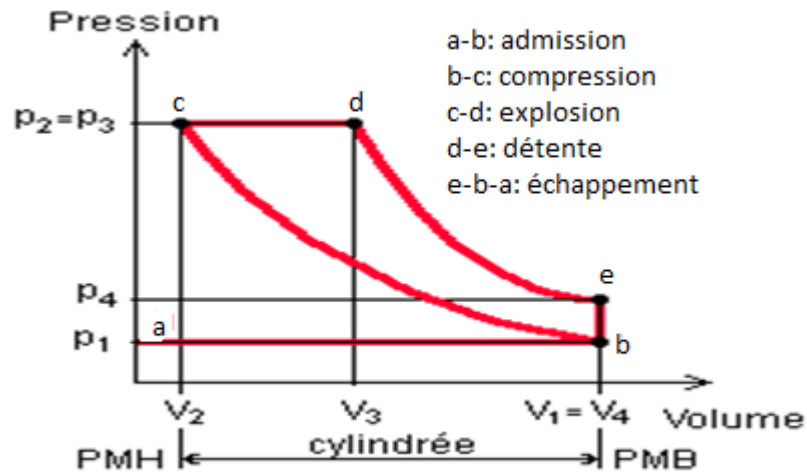


Figure I.9. Diagramme du cycle à quatre temps (p – v).

I.9. Caractéristiques fondamentales du cycle

Les caractéristiques fondamentales du cycle sont :

I.9.1. Le travail (J)

Le travail se représente en diagramme (P – V) par l'aire de la courbe comprise dans le cycle fermé. Sur (la figure I-9), le travail du cycle théorique est représenté par l'aire de la courbe pointillée. Le travail des opérations de transvasement (a – b) et (b – a) est représenté par une aire nulle.

Pour un cycle réel, on appelle W_i le travail indiqué, représenté par l'aire de la courbe continue. Les opérations de transferts de masse entre le cylindre et l'extérieur se traduisent par une aire qui n'est pas nulle mais positive (surface résistante :s) et qui vient donc se déduire de l'aire négative (surface utile : S) du travail principal du cycle.

I.9.2. Pression moyenne (N/m^2)

La pression moyenne du cycle représente le travail spécifique du moteur par unité de volume de cylindrée. C'est une valeur conditionnelle et constante de pression qui produit, pendant une seule course de piston, un travail égal au travail du cycle. La pression moyenne représente aussi un élément de comparaison commode qui permet de comparer le travail des moteurs des différentes dimensions. Elle est représentée par la formule suivante :

$$P_{\text{moy}} = \frac{W_{\text{cycle}}}{C_y} \quad (\text{I. 1})$$

La cylindrée C_y est le volume de cylindre engendré entre les deux positions extrêmes du piston : point mort haut PMH et point mort bas PMB.

I.9.3. Rendement

Le rendement du cycle théorique est le rapport entre la valeur absolue du travail du cycle et la quantité de chaleur apportée au cycle (pendant la combustion). Il est représenté par la formule suivante :

$$\eta_{th} = \frac{W_{cycle}}{Q_a} \quad (I.2)$$

Le rendement de forme du diagramme permet de juger de la qualité du cycle réel, réalisé dans le cylindre du moteur, par rapport au cycle théorique. Il est représenté par la formule suivante:

$$R_f = \frac{W_i}{W_f} = \frac{\text{Aire du cycle réel}}{\text{Aire du cycle théorique}} \quad (I.3)$$

I.9.4. Taux de compression volumétrique

Le taux de compression volumétrique ε est défini par le rapport entre le volume total de cylindre (cylindrée + volume mort) sur le volume de la chambre de combustion.

Autrement dit, c'est le rapport entre le volume total aspiré possible (cylindrée + volume mort) et le volume dans lequel on comprime le gaz et se fait la combustion (volume mort V_m). Le taux de compression est représenté par la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{C_y + V_m}{V_m} \quad (I.4)$$

Le taux de compression volumétrique influence fortement le rendement du moteur et il doit être choisi en fonction de la respiration du moteur.

Le taux de compression réel est à peu près égal au précédent multiplié par $\frac{3}{2}$, car la compression des gaz s'accompagne d'une dilatation [10].

I.9.5. Consommation spécifique (g/KWh)

La consommation spécifique du moteur définit la qualité de la transformation de l'énergie au sein du moteur. Cette grandeur est proportionnelle à l'inverse du rendement.

C'est la quantité de combustible, d'un pouvoir calorifique donné, qui doit être dépensée pour la production d'une unité d'énergie, par exemple d'un KWh. La consommation spécifique (donc aussi le rendement) dépend, d'une part, de la forme du cycle thermodynamique décrit dans le moteur, d'autre part, des valeurs extrêmes de la température et de la pression atteintes par le gaz.

I.9.6. Puissance effective au litre de cylindrée

C'est la puissance spécifique en KW/litre de cylindrée. Elle permet de comparer, entre eux, des moteurs de cylindrée et de conception différente.

I.9.7. Puissance massique ou volumique

C'est la puissance du moteur rapportée à sa masse (KW/Kg) ou à sa volume (KW/m³). Dans ce dernier cas, le volume peut comprendre, ou non, le volume nécessaire au démontage du moteur et à son entretien. Ces puissances spécifiques permettent de comparer des moteurs dans le cadre de l'endroit où ils devraient être installés.

I.10. Paramètres indiqués du cycle réel

Les principaux paramètres indiqués caractérisant le fonctionnement du moteur sont :

- La pression moyenne indiquée P_{mi}
- La puissance indiquée P_i
- Le couple moteur indiqué C_i
- Le rendement indiqué η_i
- La consommation spécifique indiquée g_i

Les paramètres indiqués caractérisent l'organisation réelle du cycle considéré. Ils tiennent compte seulement des pertes de chaleur ayant lieu dans le cycle réel. Ces pertes sont dues :

- À la transmission de chaleur à travers les parois,
- À une combustion incomplète dans les zones riches (dans les moteurs Diesels la combustion est toujours complète).
- À la dissociation des molécules de CO_2 à haute température en absorbant de la chaleur.
- Aux fuites du fluide-moteur.

Les pertes de chaleur dues à la réalisation du cycle réel atteignent de 10 à 30 % de toute la chaleur utilisée dans le cycle thermodynamique identique ce qui indique la possibilité d'améliorer au futur le rendement indiqué des moteurs.

I.11. Paramètres effectifs du cycle réel

Une partie du travail indiqué effectué par les gaz est perdue sous forme de différentes pertes mécaniques. Ces pertes comportent le travail dépensé pour vaincre les frottements, le travail dépensé pour entraîner les mécanismes auxiliaires (pompe à eau, pompe à huile, ventilateur, générateur, etc.) et le travail perdu à l'échange gazeux dans les phases des transvasements (admission et échappement). Les frottements, notamment entre piston et cylindre constituent la majeure partie de toutes les pertes mécaniques (jusqu'à 70%).

Pour passer des paramètres indiqués aux paramètres effectifs du moteur il faut tenir compte de la partie du travail indiqué perdue pour récompenser les pertes mécaniques.

Ces pertes sont évaluées par un paramètre que l'on appelle rendement mécanique η_m . Comme η_m est toujours inférieur à un, les paramètres effectifs sont toujours inférieurs à ceux indiqués (sauf la consommation spécifique effective est supérieure de celle indiquée). D'après la définition, tout paramètre effectif peut être déterminé en fonction du paramètre indiqué correspondant :

$$W_e = \eta_m - W_i \quad (\text{I. 5})$$

$$P_e = \eta_m - P_i \quad (\text{I. 6})$$

$$P_{me} = \eta_m - P_{mi} \quad (\text{I. 7})$$

Avec :

$$W_e = W_i - W_m \quad (\text{I. 8})$$

$$P_e = P_i - P_m \quad (\text{I. 9})$$

$$P_{me} = P_{mi} - P_{mm} \quad (\text{I. 10})$$

Où W_m , P_m et P_{mm} sont respectivement le travail, la puissance et la pression moyenne des pertes mécaniques.

I.12. La dégradation des moteurs diesels

La dégradation des moteurs thermiques diesels est liée à plusieurs facteurs, tel que une mauvaise combustion, une mauvaise conduite, une mauvaise lubrification et graissage, un mauvais refroidissement, un frottement excessif, ...etc. Dans cette partie on commence par l'étude du phénomène du frottement qui est considéré comme le facteur important sur la dégradation des moteurs, il représente en générale 20 à 25% des pertes des performances [11].

I.13. Les émissions du moteur diesel

Après avoir identifié le dioxyde carbonique (CO₂) comme un gaz à effet de serre, contribuant au réchauffement climatique, les moteurs Diesel sont apparus comme un concurrent très puissant aux moteurs à essence à cause de leurs faibles consommations de combustible et leurs bons rendements thermiques. Bien que les émissions du monoxyde de carbone (CO) sont négligeables dans les moteurs diesel dus au fonctionnement pauvre, ainsi que la possibilité de gérer les émissions des hydrocarbures non brûlés par des catalyseurs

d'oxydation, les émissions des oxydes d'azote (NOx) et des particules (PM) restent une principale préoccupation.

HC, CO, NOx et Suie représentent les émissions considérées par des normes. Les mécanismes principaux pour leur formation sont décrits par Heywood [12] et sont liés aux caractéristiques de mélange et de température de flamme.

I.14. Avantages et inconvénients du moteur diesel

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

- Le rendement est élevé.
- Le combustible employé pour les moteurs Diesel est relativement bon marché.
- Les gaz d'échappement sont moins toxiques
- Les dangers d'incendie sont réduits. En effet, le gas-oil ne produit des vapeurs inflammables que chauffé aux environs de 80°C, soit à une température nettement supérieure à celle de l'été. Par contre, l'essence produit des vapeurs inflammables à une température bien inférieure.

Cependant le moteur Diesel présente les inconvénients suivants :

- Les organes du moteur sont soumis à des pressions et des températures élevées donc à des efforts considérables, si bien que la construction de ces moteurs pose des problèmes mécaniques plus complexes que ceux des moteurs à explosion. Les hautes températures sont indispensables pour enflammer spontanément le carburant injecté, ce qui nécessite des matériaux ayant une bonne tenue aux températures élevées.
- Les pressions en cours de combustion normale sont élevées et augmentent s'il se produit des "ratés d'inflammation". En effet, au combustible non brûlé à la sortie de l'injecteur, s'ajoute le combustible injecté au cycle suivant, l'inflammation s'accompagne alors d'une élévation de pression considérable.

En conséquence :

- 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 [13].

I.15.Conclusion

Ce chapitre reprend une vue sur le principe de fonctionnement de moteur diesel à injection directe et injection indirecte, la structure, les éléments principaux, les différents types de moteur diesel et actionneurs, avec indication des différentes caractéristiques.

Enfin on peut dire que le moteur diesel à injection directe, alimenté par un système d'injection haute pression à gestion électronique, offre un rendement supérieur à tous les autres moteurs thermiques, avec une diminution de la consommation et une réduction des émissions polluantes.

Chapitre II

Etude sur les pistons des moteurs diesel

II.1. Introduction

Le piston a fait l'objet de nombreuses études dont la plupart concerne les moteurs diesel, lesquels sont plus sollicités thermiquement et mécaniquement que les moteurs à essence. Nous allons dans un premier temps examiner les études expérimentales concernant le piston. Nous examinerons ensuite les travaux portant sur les échanges thermiques, spécifiques au piston. Nous détaillerons les études faites sur la modélisation du champ de température dans le piston.

II.2. Généralités sur les pistons

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



Figure II.10. Piston d'un moteur diesel avec cavité en forme oméga.

II.2.1. Morphologie du piston de moteur diesel

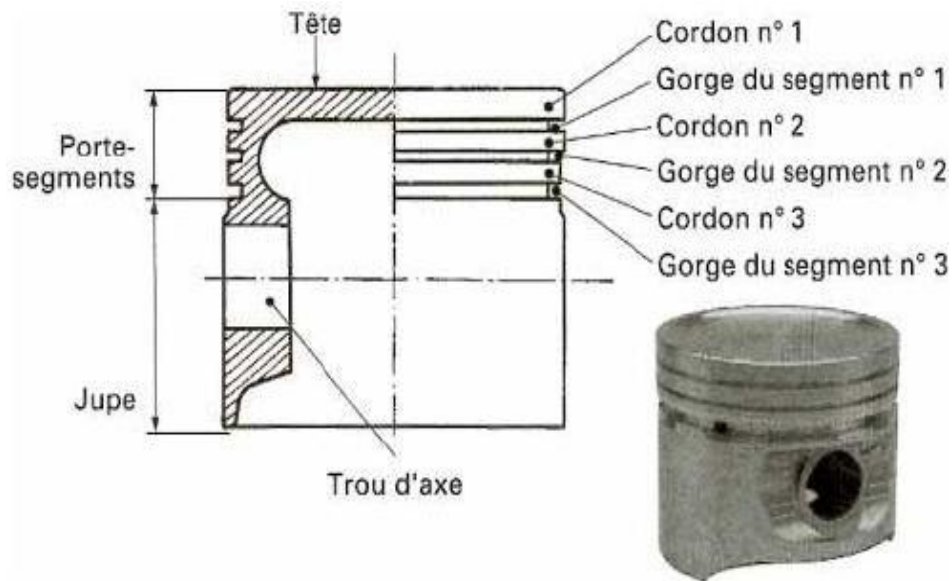


Figure II.11. Piston

- **La tête d'un piston:** elle se compose d'un fond et d'une couronne porte-segment.

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 un composant (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.

- **La couronne porte-segments** dissipe une partie d'énergie calorifique qui entre par le fond et assure l'étanchéité au gaz et à l'huile.

L'étanchéité aux gaz :

- assure la compression de l'air.
- limite les fuites de gaz de combustion (donc les pertes d'énergie d'huile).
- évite que les gaz refoulant l'huile, ne provoquent le dommage des segments, le grippage au niveau de la jupe et les fumées au reniflard (évacuation des vapeurs

présentes dans le carter d'huile).

- **La Jupe**, ou partie frottante, assure:
 - l'appui latéral du piston sur la chemise; la répartition de l'effort global, croissant d'une part avec l'obliquité de la bielle.
 - le guidage du déplacement du piston et surtout de la couronne porte-segment dans la chemise, qui motive un allongement de cette dernière lorsque la masse de la tête du piston croît.
 - l'évacuation d'une partie de la quantité de chaleur à l'entrée de la tête.
- **Logement d'axe (trou d'axe)**

II.2.2. Forme générale du piston

Du fait des déformations lors de la montée en température dans le piston, les formes à froid (figure 10) d'un piston sont loin d'être cylindriques. En effet, le piston est:

- en **tonneau** dans le sens vertical avec une décroissance en tête de quelques dixièmes (0,4 mm à 0,5 mm)
- **oval**, vu de dessus avec un oval de quelques dixièmes également (environ 0,5 mm au niveau du diamètre d'appariement qui est le diamètre le plus élevé du piston).

Les jeux piston/chemise qui doivent être précis, conduisent à un appariement entre piston et chemise. Les jeux peuvent être de 20 à 40 μm dans certains moteurs et de 90 à 110 μm dans d'autres.

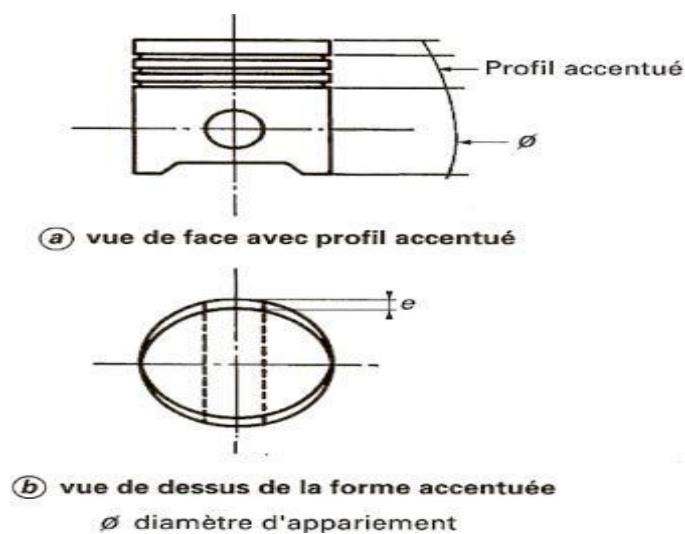


Figure II.12. Morphologie du piston

II.2.3. Matériaux utilisés dans la fabrication des pistons

Parmi les matériaux que l'on peut utiliser dans la fabrication du piston, on cite:

- **Alliages d'aluminium**

Les alliages d'aluminium au cuivre (2 à 10% de Cu) ductiles et forgeables possèdent des caractéristiques mécaniques importantes à froid mais qui se dégradent rapidement à chaud.

On préfère, en conséquence les alliages au silicium (12% de Si) car :

- Ils se comportent moins mal à chaud.
- Ils possèdent un coefficient de dilatation moins élevé ($20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).
- Ils offrent de meilleures qualités de frottement.

- **Acier**

L'acier est le métal industriel possédant les meilleures caractéristiques. Mais du fait de sa mauvaise conductivité thermique, il ne peut être utilisé que dans les cas de piston refroidi.

- **Fonte**

La fonte possède un faible allongement A% avant l'apparition de fissure, ce qui l'handicape dans son emploi lorsque le moteur est soumis à de fréquentes et brutales variations de régime.

Par ailleurs son gain de poids moins accusé que dans la solution acier (E plus faible), incite à limiter son emploi au moteur semi-lent.

Remarque

Les principales propriétés ayant une influence sur le comportement des pistons sont les suivantes:

- ✓ La densité
- ✓ Les propriétés mécaniques des matériaux aux températures de fonctionnement
- ✓ Conductivité thermique
- ✓ Coefficient de dilatation
- ✓ Qualités de frottement, de résistance à l'usure

II.2.4. Les critères de choix des matériaux

Les propriétés des matériaux de fabrication des pistons sont souvent contradictoire (on trouve pas un parmi tous les matériaux répondant à toutes les conditions demandées). Il faut respecter des critères pour tirer un matériau qui offre le bon choix.

II.2.4.1. Les critères technologiques**• Sollicitation dans la masse**

- ✓ Sollicitations statiques: traction (compression), flexion, torsion
- ✓ Sollicitations dynamiques: fatigue, résilience

• Sollicitations de surface (superficielles)

- ✓ usure
- ✓ fatigue
- ✓ frottements

II.2.4.2. Les critères économiques

- ✓ importance de la série
- ✓ environnement technologique
- ✓ prix de revient des matériaux
- ✓ coût des moyens d'obtention

II.3. Études expérimentales dans le piston**II.3.1. Champ de températures dans le piston**

Dès 1939, Eichelberg [14] 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 [15], 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, sont précis mais résistent mal aux régimes de rotation élevés et exigent le plus souvent un carter spécial.

II.3.2. Flux thermiques aux parois du piston

De nombreux auteurs ont mesuré les flux thermiques aux parois du piston de moteurs à combustion interne [16]. Les mesures sont le plus souvent effectuées au moyen de fluxmètre utilisant le principe du thermocouple de surface développé par Bendersky [17]. Le but de ces études est d'évaluer l'influence des principaux paramètres de fonctionnement du moteur sur le flux thermique instantané aux parois et ses disparités locales. Ces travaux permettent de mieux appréhender les phénomènes complexes régissant les transferts de chaleur dans la chambre. Ils procurent également une base de données concernant les valeurs des flux de chaleur, radiatif et convectif, pour différents types de moteur. Ils présentent enfin un aperçu complet des techniques de mesures de flux dans les chambres de moteur à combustion interne.

II.3.3. Transfert de chaleur entre le piston et l'huile de refroidissement

En 1966, SOTTER [18], étudie expérimentalement les modes de refroidissement des pistons. Il a mesuré les flux convectifs échangés entre l'huile et la voûte du piston pour les types de refroidissement suivants : projection de gouttelettes, par l'intermédiaire de pied de bielle, par jet d'huile, ou par galerie "effet shaker".

French [19], a publié en 1972, une étude expérimentale portant sur le refroidissement des pistons. Il a comparé les résultats mesurés des pistons munis de galerie, à ceux obtenus, en utilisant des corrélations établies pour des conduites lisses, il constate des écarts importants. Il propose ainsi de modéliser l'échange dans une galerie "shaker" au moyen de la relation :

$$Nu = 1.6 Re^{0.54} Pr^{0.14} \left(\frac{\mu_H}{\mu_W} \right)^{0.14} \left(\frac{a}{b} \right)^{0.33} \quad (\text{II. 11})$$

Où a et b sont respectivement le diamètre et la hauteur de la cavité sous le piston. Le calcul du nombre de Reynolds est basé sur le diamètre caractéristique a et sur la vitesse incidente de l'huile.

En 1971, Seale et Taylor [20], ont étudié expérimentalement les flux thermiques échangés entre le piston et les gaz de combustion. Ils ont déduits de la mesure des températures dans les pistons, une corrélation empirique destinée au calcul du coefficient d'échange thermique par jet d'huile :

$$H = 68.2 \sqrt{\frac{c_{pH} \omega_v D_H}{2\mu_H}} \quad (\text{II. 12})$$

Où D_H est le diamètre de l'injecteur d'huile.

Les auteurs n'ont pas observé de disparités significatives d'échange sur la voûte de piston.

L'étude en cuve rhéologique réalisée par Woshni & Fieger [21], en 1979 montre une évolution de l'échange thermique entre l'huile et la voûte du piston croissante depuis le sommet de la voûte vers la jupe. La valeur minimale du coefficient d'échange thermique est de l'ordre de $100 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$, derrière le troisième segment. Les résultats proposés ne recouvrent malheureusement pas la jupe.

II.3.4. Transfert de chaleur entre le piston, les segments et le cylindre

En 1982, Li [22] a utilisé une description fine de transferts piston-segment- cylindre, utilisant l'analogie thermique-électrique. La valeur des résistances de contact était choisie par l'auteur et est calculée selon les conditions de fonctionnement. Ce calcul une lacune majeure : Li ne modélise pas le cylindre mais se contente de calculer une conductance globale entre un point du piston et le liquide de refroidissement. Il néglige en effet la conductance qui existe entre ce même point et les gaz de combustion par l'intermédiaire du cylindre, ce qui revient à considérer la température du cylindre comme homogène.

En 1992, Habchi [23] a étudié les transferts de chaleur en contact lubrifié, existant entre l'ensemble piston-segment et le cylindre dans un moteur diesel. La partie expérimentale de son étude est fondée sur une maquette reproduisant les phénomènes observés dans un moteur. Les résultats obtenus sont confrontés à un modèle basé sur la méthode des différences finies, de la maquette. L'auteur suppose que les échanges thermiques entre le piston, les segments et le cylindre sont conductifs. Il utilise un coefficient de répartition de flux de 0,5 pour tous les frottements à contact lubrifié et démontre analytiquement la validité de cette valeur en régime hydrodynamique.

II.4. Modèles décrivant le champ de température dans le piston

II.4.1. Modèles analytiques

Les premières tentatives de résolution du champ de température ont été effectuées analytiquement, en supposant la solution axisymétrique. Dès 1939, Eichelberg a calculé les températures au sein du piston, de la culasse et des soupapes de gros moteurs Diesel. Il a ainsi dégagé les paramètres thermiques prépondérants (régime de rotation, charge ...), et a obtenu

une première quantification des échanges de chaleur entre les constituants de la chambre de combustion.

On utilisé un modèle analytique très simple pour effectuer une étude de sensibilité très complète. Le piston est représenté par un disque de faible épaisseur; l'environnement thermique est géré par un ensemble de conditions aux limites, basées sur des valeurs expérimentales ou issues de la bibliographie. Gr ce à ce modèle, Pachernegg a évalué l'influence des conditions de fonctionnement du moteur, pour divers paramètres affectant la combustion, du mode de refroidissement du piston, et de plusieurs critères géométriques simples ( paisseur de fond, diamètre....)

En 1971, Kruggel, propose une modélisation plus fine du piston et de ses interactions avec le cylindre. Le piston est considéré comme un corps de révolution constitué de deux parties : La partie supérieure, correspondant au premier cordon, est représentée par un cylindre plein, tandis que la partie inférieure est modélisée au moyen d'un cylindre creux. Les transferts thermiques entre le piston, les segments et le cylindre sont calculés au moyen d'un réseau électrique équivalent. Le champ de température est alors résolu analytiquement dans chacun des deux corps.

II.4.2. Modèles rhéologiques

Le calcul prédictif du champ de température dans les pistons nécessite la prise en compte de géométries complexes. Les premières résolutions ont été obtenues au moyen de modèles rhéologiques bidimensionnels pendant les années 60, le piston est représenté par une cuve d'électrolyte de même forme, les conditions aux limites sont modélisées au moyen de potentiomètres en contact avec l'électrolyte. La mesure du potentiel électrique en un point de la cuve permet de déterminer la température au point correspondant du piston. Dotés d'une excellente précision géométrique, ces modèles permettent, moyennant certaines hypothèses concernant les conditions aux limites, de calculer le champ de température dans le piston et d'évaluer les disparités d'échanges thermiques sur la tête ou la voûte du piston. En 1979, Woschni & Fieger ont calculé le champ de température dans un piston de moteur diesel à injection directe. Par une comparaison avec des mesures expérimentales, ils ont quantifié les transferts thermiques aux frontières d'un piston de moteur diesel à injection directe, pour différentes configurations : avec ou sans galerie de refroidissement, avec ou sans jet d'huile, en éliminant le deuxième ou le troisième segment ou encore en isolant le premier cordon.

II.4.2. Modèles numériques

Les modèles rhéologiques ont été remplacés au début des années 1980 par des modèles numériques, plus accessibles à l'utilisation.

En 1980, Ball & Sinha [24] ont appliqué la méthode des éléments finis à une modélisation tridimensionnelle complexe d'un piston de moteur diesel de moyenne cylindrée. Les conditions aux limites thermiques employées étaient composées d'un ensemble de couples (coefficient d'échange, température).

Les coefficients d'échange concernant les faces exposées aux gaz de combustion et à l'huile de refroidissement sont calculés au moyen de corrélations trouvées dans la bibliographie. Pour le reste du piston, les auteurs ont utilisé des valeurs choisies a priori. L'écart de température maximal observé avec les résultats expérimentaux était de 20°C, dans la partie supérieure du piston où la température peut atteindre 300°C.

Li [22] a étudié en 1982 les déformations thermiques des pistons de moteurs d'automobiles. Il a utilisé pour cela une modélisation par éléments finis, comparable à celle proposée par Ball & Sinha. L'accent a été mis sur la description des transferts thermiques entre le piston et le liquide de refroidissement, calculés au moyen d'un réseau de conductances thermiques.

Le même auteur a développé en 1987, un modèle de comportement de la jupe du piston et a appliqué ses travaux aux pistons d'aluminium de moteurs diesel,

En 1990, Morel & Keribar [25] 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.

En 2007, Piotr Gustof faite une description mathématique caractérisant l'échange thermique des différentes surfaces d'un piston de moteur diesel avec son environnement. La computation numérique de son modèle pour le calcul de la distribution du champ de température est faite à l'aide de la méthode des éléments finis (Fig II.13) [26]

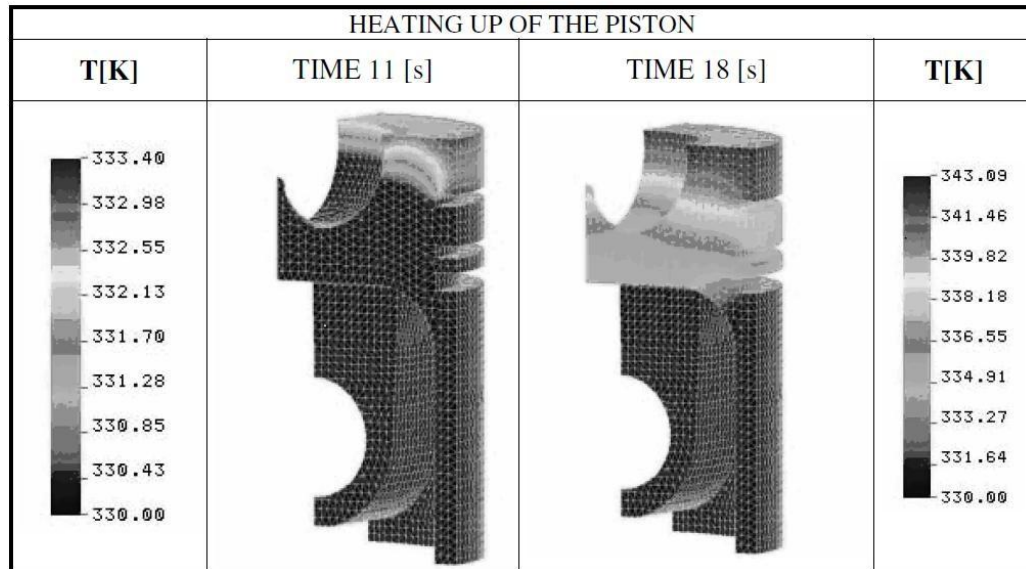


Figure II.13. Modèle thermique du piston

II.5. Etudes des contraintes et des déformations dans les pistons

Dans les moteurs à injection directe, un problème particulier, non rencontré dans les moteurs à essence, est l'apparition des fissures dans la tête du piston qui diminuent sa longévité. Ces fissures sont aggravées par les contraintes thermiques et ce phénomène a fait l'objet de plusieurs études.

En 1971, Hughes & Al [27], dans une étude complète d'un moteur V compact équipé de piston de type VALENTA, ont calculé les différents types de contraintes : les contraintes mécaniques dues à la pression des gaz de combustion et les contraintes thermiques.

En 1987 Li dans son étude du comportement thermoélastique d'un piston en aluminium d'un moteur diesel à injection directe, a calculé les contraintes thermiques considérées par l'auteur comme résultat de la distribution non uniforme de la température. La moitié du piston a été discrétisée à l'aide d'un modèle 3D. La méthode des éléments finis a été utilisée pour résoudre le problème, en vue de déterminer le champ de température, les déformations (Fig. II.14.) et les contraintes thermiques.

Des contraintes de l'ordre de 50 MPa ont été observées au niveau de la gorge du 2^{ème} segment. Les calculs ont donné des valeurs élevées dans la gorge du segment de feu, dues essentiellement à la différence des dilatations thermiques entre le corps du piston en aluminium et l'anneau de la gorge en acier.

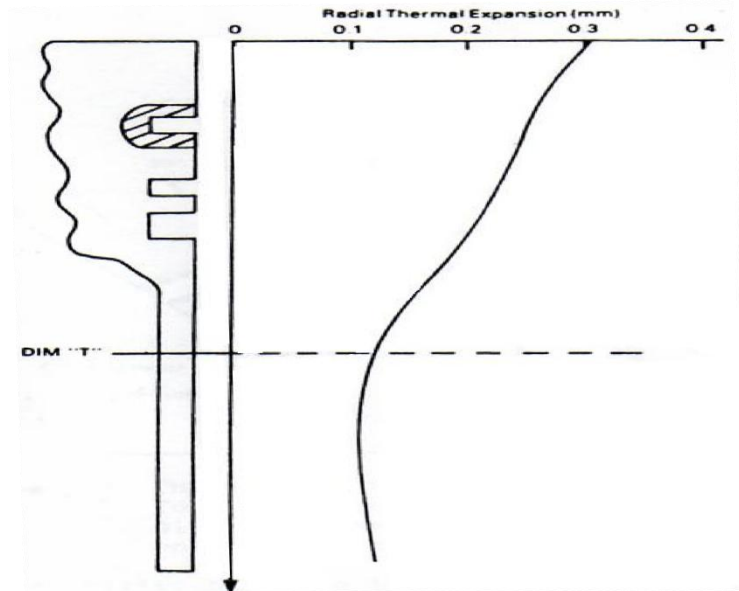


Figure II.14. Déformations thermiques radiales du piston

II.6.La distribution de la température

Avant de déterminer la distribution de la température dans le piston, on suppose que les échanges thermiques sont purement convectifs avec son environnement. L'étude sera limitée au cas stationnaire.

Le piston est traité comme un système tridimensionnel isolé, (Fig. II.15) en équilibre avec son environnement. Le flux thermique résultant des gaz de combustion, est transféré par convection au fond du piston puis traverse le piston par conduction.

La distribution de la température dans le piston est donnée par la loi de Fourier

$$\vec{q} = -k \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{II. 13})$$

Avec :

K : coefficient de conduction de la chaleur à travers le piston

\vec{q} : Vecteur de flux de chaleur.

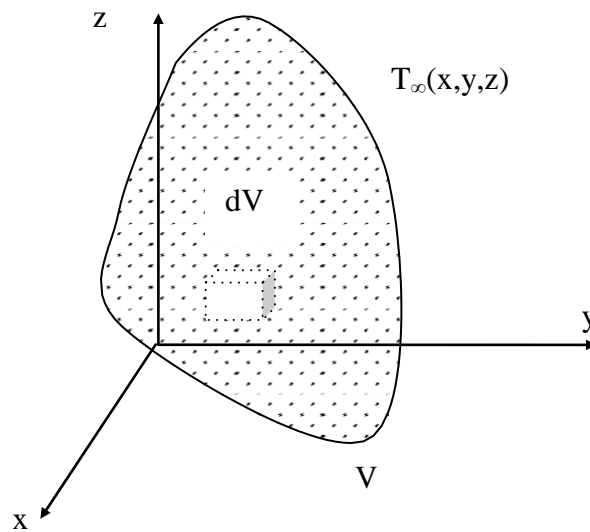


Figure II.15. Un corps 3 dimensions soumis à une température limite $T_\infty (x,y,z)$

En générale le corps génère une quantité de chaleur volumétrique interne Q . les entrées et les sorties des chaleurs dans un cube élémentaire de dimensions dx, dy , et dz sont données dans la (Fig II.16)

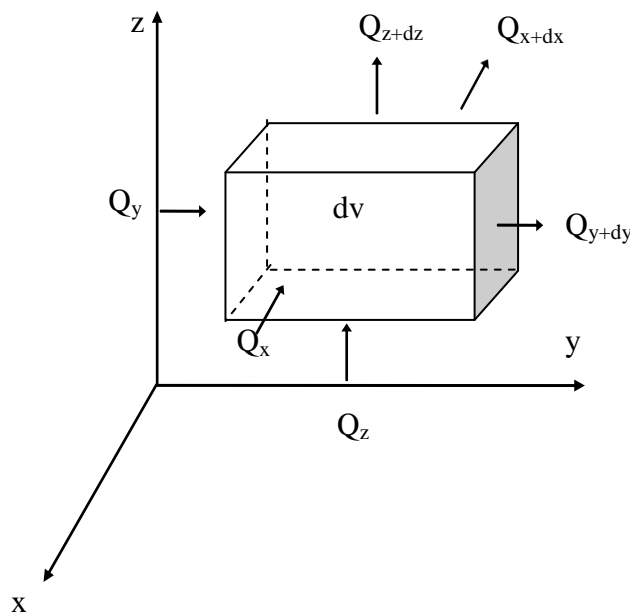


Figure II.16. bilan de chaleurs entrante s-sortantes d'un volume élémentaire

Les chaleurs entrantes dans l'élément de volume dv plus la chaleur Q générée par le volume V , sont égales aux chaleurs sortantes. On écrit :

$$Q_x + Q_y + Q_z + QV = Q_{x+dx} + Q_{y+dy} + Q_{z+dz} \quad (\text{II. 14})$$

Les chaleurs entrantes dans l'élément de volume dv suivant les directions x, y, z , peuvent être exprimées en taux de flux de chaleur, telles que :

$$Q_x = dz \cdot dy \cdot q_x \quad (\text{II. 15})$$

$$Q_y = dz \cdot dx \cdot q_y \quad (\text{II. 16})$$

$$Q_z = dx \cdot dy \cdot q_z \quad (\text{II. 17})$$

Supposons le coefficient de conductivité thermique $k = k_x = k_y = k_z$ constant (matériau isotrope), l'équation devient :

$$\vec{\nabla}(k\vec{\nabla}T) + Q = 0 \quad (\text{II. 18})$$

Cette équation est résolue en appliquant les conditions aux limites et les conditions initiales appropriées.

Pour un problème stationnaire et sans source interne, cette équation se réduit à :

$$\vec{n} \cdot k\vec{\nabla}T = 0 \quad (\text{II. 19})$$

Sur les surfaces frontières (fig. II.17), le piston est soumis aux échanges thermiques par convection, dues aux gaz de combustion, à la lubrification et au refroidissement. Ces échanges qui se font sur les surfaces frontières et faisant intervenir des coefficients de convection h_i , correspondent à chacune des surfaces.

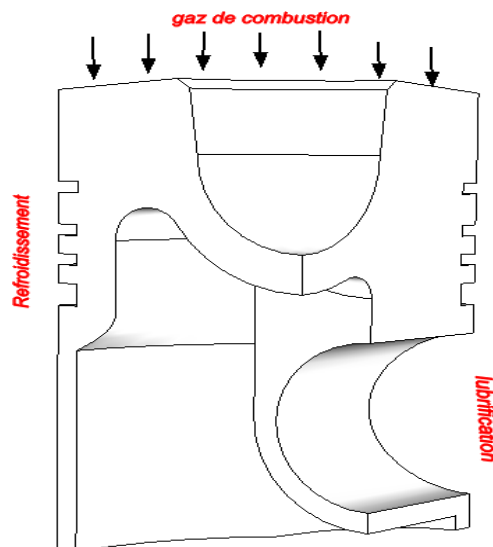


Figure II.17. Echange thermique entre le piston et son environnement

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons appris à connaître les généraux à propos du piston du moteur et de ses pièces et de certains métaux de base en étant fabriqués, en plus de connaître le champ thermique et certaines relations mathématiques qui nous permettent de calculer.

Chapitre III

Modélisation et Simulation

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons apprendre à travailler sur un ordinateur pour modéliser un piston pour le moteur diesel à véhicule (MERCEDES A 170 cdi), puis à déterminer les étapes du processus de simulation pour l'étude souhaitée.

III.2. Définition de la CAO

Nous pouvons définir la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) par l'ensemble des outils logiciels et des techniques informatiques qui permettent d'assister les concepteurs lors de la conception et la mise au point d'un produit.

III.3. Logiciels utilisés en CAO

Un programme en général de type industriel doit être capable de résoudre des problèmes variés de grandes tailles (de mille à quelques centaines de milliers de variables). Ces programmes complexes nécessitent un travail d'approche non négligeable avant d'espérer pouvoir traiter un problème réel de façon correcte. Citons à titre d'exemple quelques noms de logiciels : SOLID WORKS (COSMOS WORKS), KATIA, ABAQUS, ANSYS.... Etc. les possibilités offertes par de tels programmes sont nombreuses :

- Analyse statique ou dynamique.
- Prise en compte de lois de comportement complexe.
- Prise en compte de phénomènes divers (élasticité, thermique, ...).
- Problèmes d'optimisation, etc. L'utilisation de tels programmes nécessite une formation de base minimale.

L'utilisation de tels programmes nécessite une formation de base minimale.

III.4. La modélisation

La modélisation est la conception d'un modèle. Selon son objectif et les moyens utilisés, la modélisation est dite mathématique, géométrique, 3D, mécaniste (ex : modélisation de réseau trophique dans un écosystème), cinématique... Elle nécessite généralement d'être calée par des vérifications, lesquelles passent par le paramétrage et le calibrage des « modèles » utilisés.

On peut identifier 3 étapes de la modélisation :

1. Le modèle interprétatif. Il s'agit de décrire avec ses propres mots en langage naturel l'objet.
2. Le modèle fonctionnel. Il s'agit de la description atomique, de l'identification des éléments unitaires et des rapports précis. Le but est de rendre le modèle interprétatif calculable. On passe alors dans la calculabilité.

3. Le modèle physique. On implémente le modèle fonctionnel dans une machine pour calculer. Dans un ordinateur par exemple, qui est une machine de Turing réelle.

La modélisation est la représentation d'un système par un autre, plus facile à appréhender. Il peut s'agir d'un système mathématique ou physique. Le modèle sera numérique ou analogique.

III.4.1. La modélisation numérique

La modélisation numérique consiste à construire un ensemble de fonctions mathématiques décrivant le phénomène. En modifiant les variables de départ, on peut ainsi prédire les modifications du système physique.

III.4.2. La modélisation analogique

La modélisation analogique consiste à construire un système physique qui reproduit plus ou moins un phénomène que l'on souhaite étudier. L'observation du comportement du modèle permet de tirer des enseignements sur le phénomène d'intérêt.

III.5. La simulation

La simulation est un outil utilisé par le chercheur, l'ingénieur, le militaire, etc. pour étudier les résultats d'une action sur un élément sans réaliser l'expérience sur l'élément réel.

Lorsque l'outil de simulation utilise un ordinateur on parle de simulation numérique. Il a également existé des simulateurs analogiques et il a été envisagé dans les années 1970 d'en construire des stochastiques.

Le moyen le plus simple serait de tenter l'expérience, c'est-à-dire d'exercer l'action souhaitée sur l'élément en cause pour pouvoir observer ou mesurer le résultat. Dans de nombreux cas l'expérience est irréalisable, trop chère ou contraire à l'éthique. On a alors recours à la simulation :

- Rechercher un élément qui réagit d'une manière semblable à celui que l'on veut étudier et qui permettra de déduire les résultats.

Les simulateurs hybrides analogiques - numériques avec homme dans la boucle, sont de plus en plus utilisés pour l'enseignement ou l'entraînement. Leur coût relativement élevé les a d'abord réservés aux professions les plus en pointe ou à risque (pilotage d'un aéronef, commande d'une centrale nucléaire, engagement armé, etc.). La diminution du prix des systèmes vidéo permet d'envisager aujourd'hui des applications à la conduite des camions voire des automobiles.

III.6. Solidworks

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

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

III.6.1. Création de la forme d'un piston d'un moteur en 3D

Création d'un piston pour moteur (MERCEDES A 170 cdi) volumique à partir de plusieurs sections par Solidworks.

On utilise les fonctions élémentaires de création d'un objet mais aussi spline, base bossage lissé, enlèvement de matière par révolution, congé de face.

III.6.2.les opérations utilisées sur Solidworks

Pour dessiner un piston sur Solidworks on applique les étapes suivant :

Etapes 1. Ouvrir le modéleur Solidworks

Etapes 2. Dessiner la forme de piston on 2D avec les dimensions réels en mm (fig. III.18).et l'axe piston (fig. III.19).

- la forme de piston on 2D

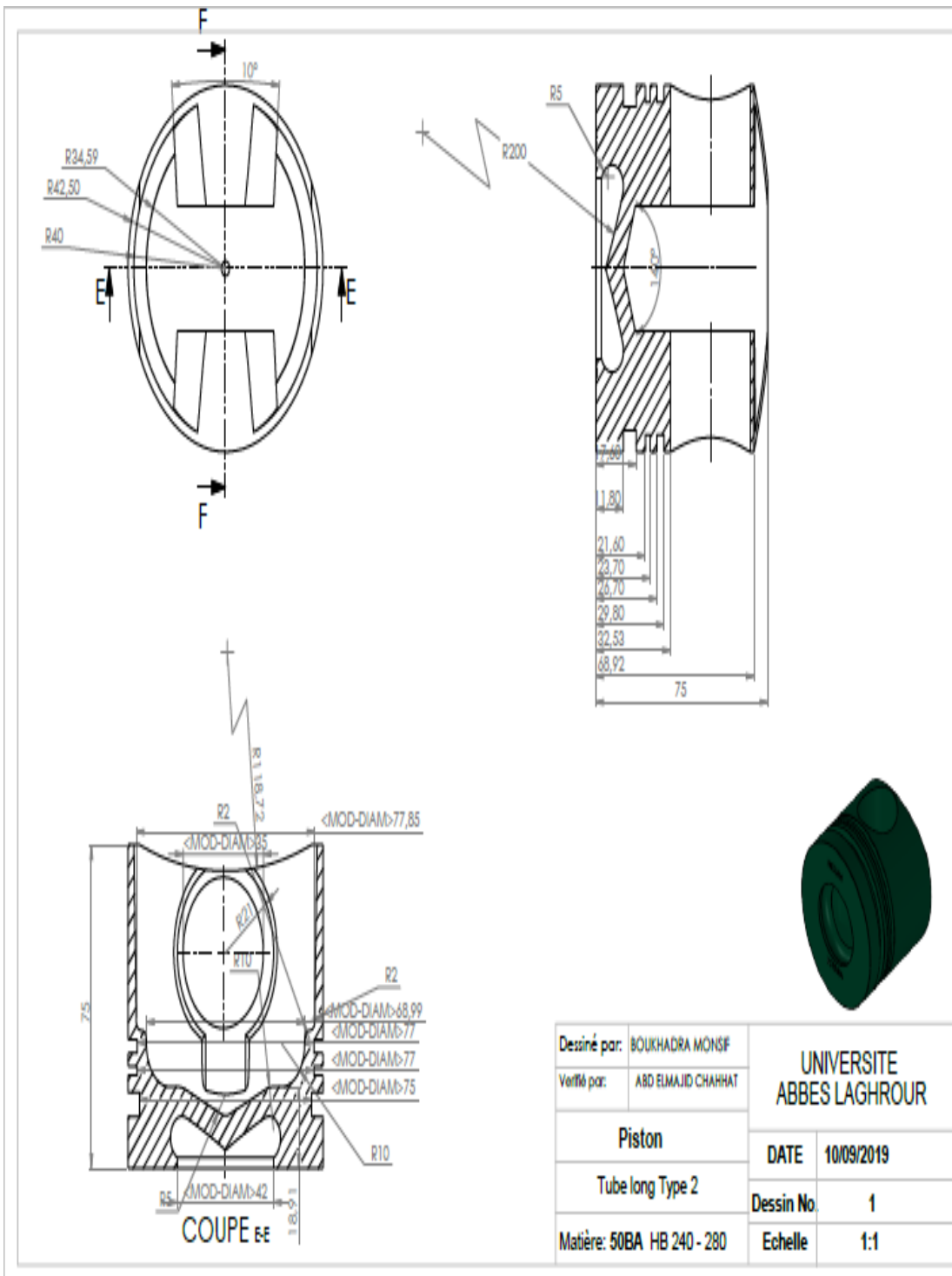


Figure III.18. Dessin technique d'un piston en solidworks

➤ L'axe d'un piston

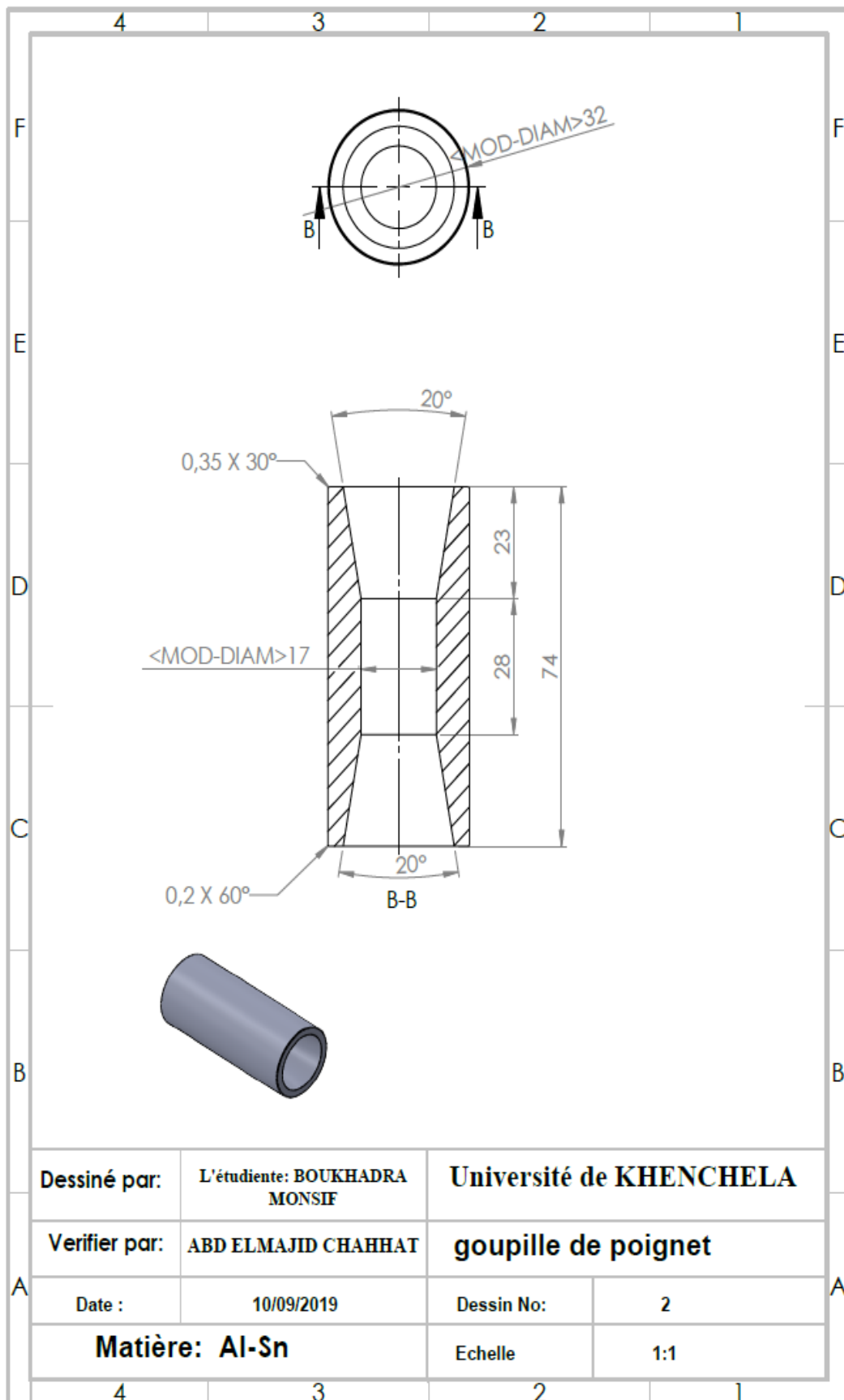


Figure III.19. Dessin technique d'un l'axe piston en solidworks

Etapes 3. Congé les faces et les angles être sélectionné.

Etapes 4. Révolution cette forme sur l'axe de rotation z avec un angle 360 degrés.

Etapes 5. On obtenir la géométrie on 3D (fig. III.20).

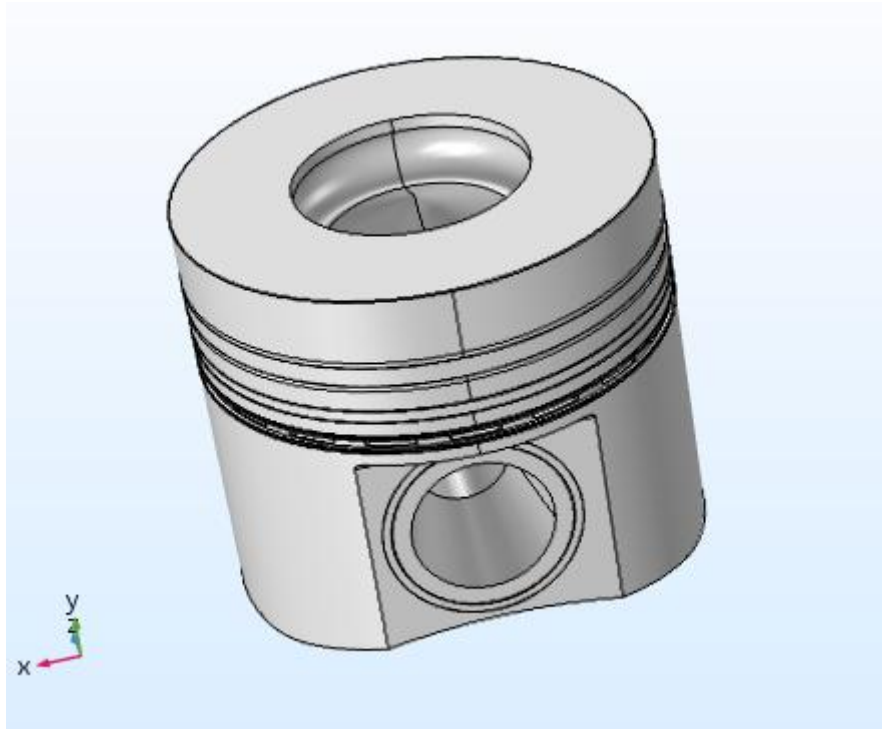


Figure III.20. Piston dessiné en solidworks (géométrie)

III.7. COMSOL MULTIPHYSICS

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi- physiques.

III.7.1.Historique

Le logiciel COMSOL et la société correspondante ont été créés en 1986 par des étudiants de ,Germund Dahlquist dans la suite de son cours consacré à la simulation numérique à l'institut royal de technologie (KTH)¹ à Stockholm en Suède. La première version de COMSOL Multiphysics est sortie en 1998.

La version initiale (avant 2005) de COMSOL Multiphysics s'appelait FEMLAB.

III.7.2.principe d'utilisation

L'utilisateur définit ses couplages ou sélectionne les interfaces prédéfinies. Les différentes étapes du processus de modélisation- définir la géométrie, les propriétés matériaux, le maillage, choisir la ou les physiques, résoudre et afficher les résultats - sont intégrées dans une seule interface. Des modules d'applications optionnels offrent des interfaces spécialisées notamment en mécanique linéaire et non linéaire, acoustique, écoulement, transfert de chaleur, génie de chimique, géophysique, électromagnétisme, basse et haute fréquence ,corrosion, plasma suivi de particules, optimisation, MEMS, ainsi qu'avec les logiciels de CAO et Matlab.

III.7.3. les étapes utilisées sur logiciel comsol

Pour étudier les résultats d'un piston a moteur diesel on a appliquer les étapes suivant :

Etape 1.ouvrir logiciel de simulation numérique comsol

Etape 2.choisir Assistant de modélisation

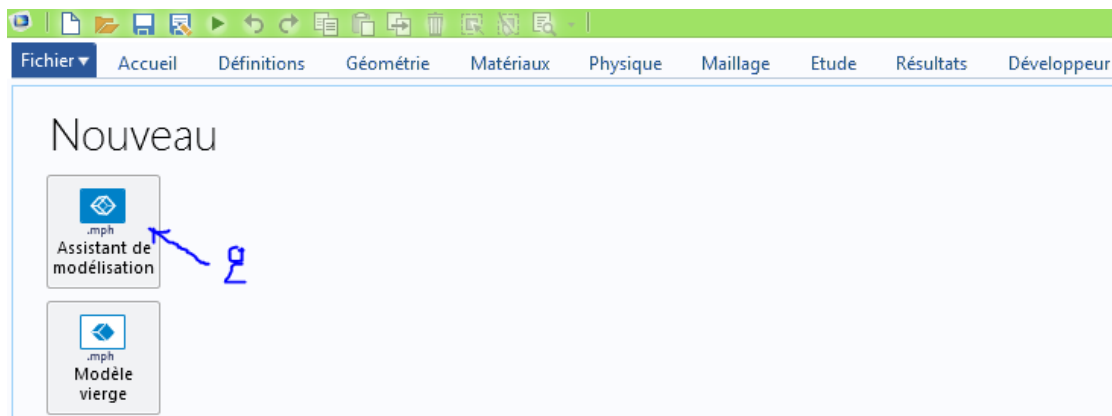


Figure III.21. Étape 2

Etape 3. Choisir la dimension d'espace 3D

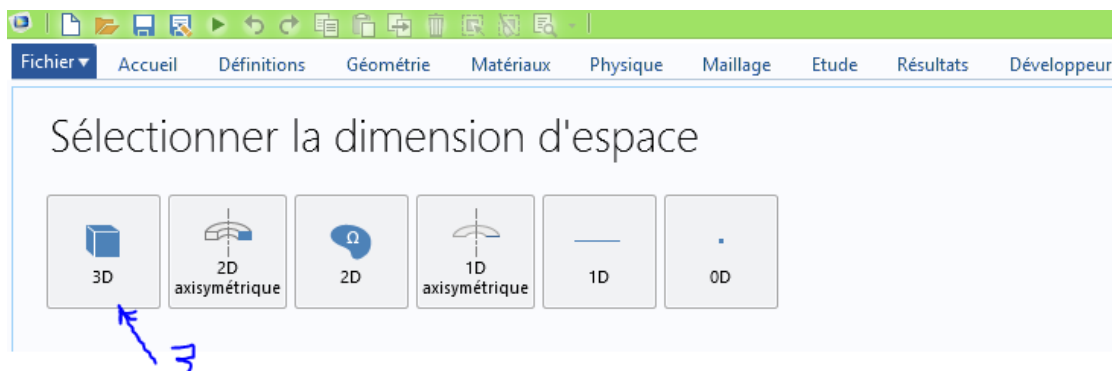


Figure III.22. Étape 3

Etape 4. Sélectionner la physique nous avons choisit l'étude que appliquée (choisir transfert de chaleur dans des solides

Etape 5. Cliquée sur ajouter

Etape 6. Cliquée sur étude

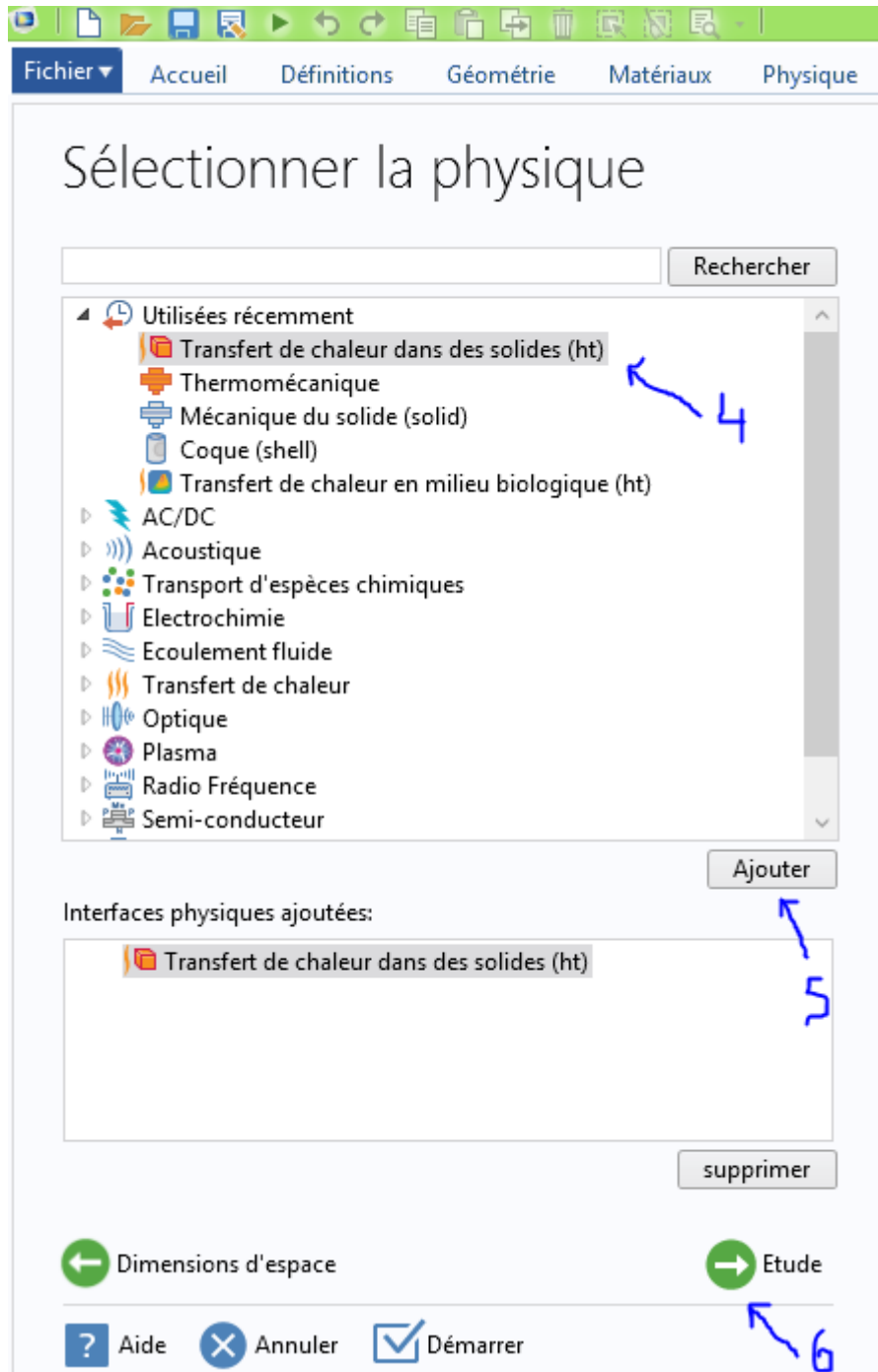


Figure III.23. Étape 4,5 et 6

Etape 7. sélectionner le type de l'étude

Etape 8. Cliquée sur démarrer

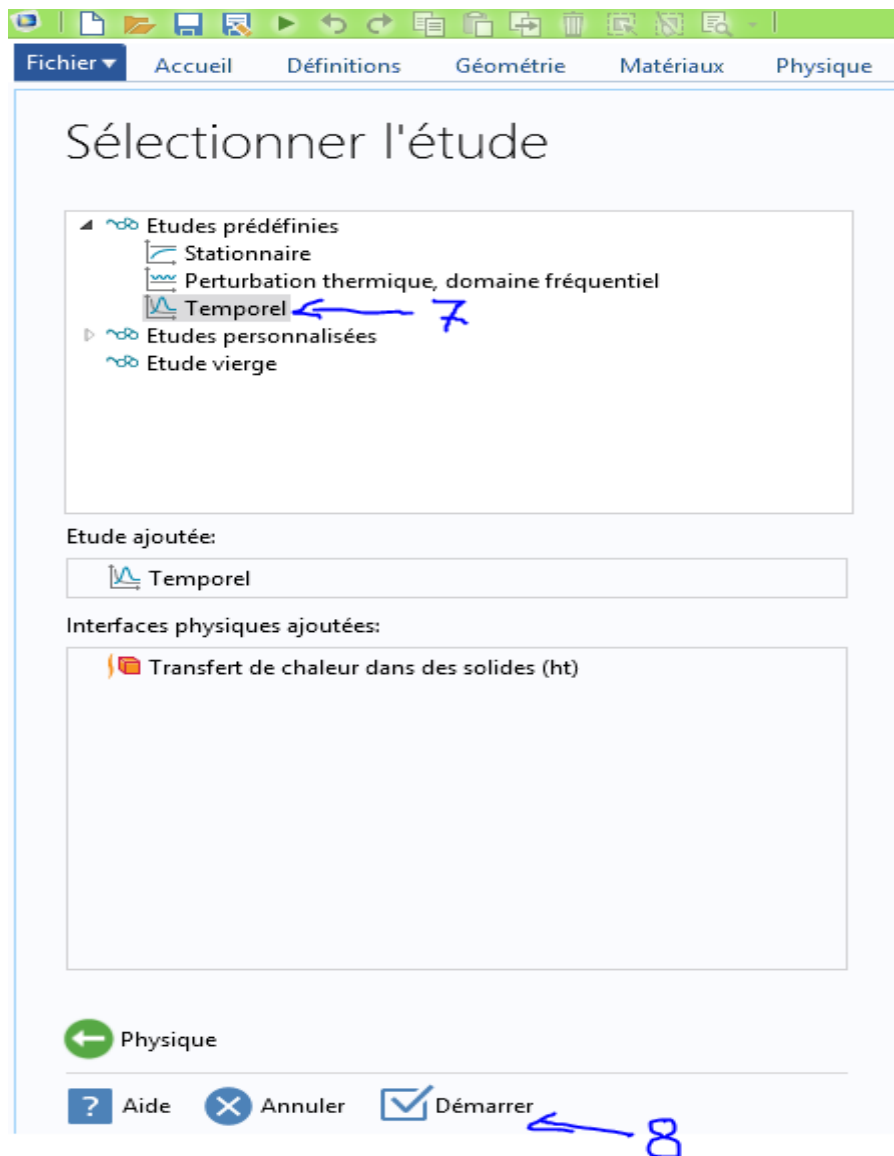


Figure III.24. Étape 7 et 8

Étape 9. Cliquée sur géométrie

Étape 10. Cliquée sur parcourir et choisir le modèle de piston a simuler par solidworks

Étape 11. Importer la géométrie

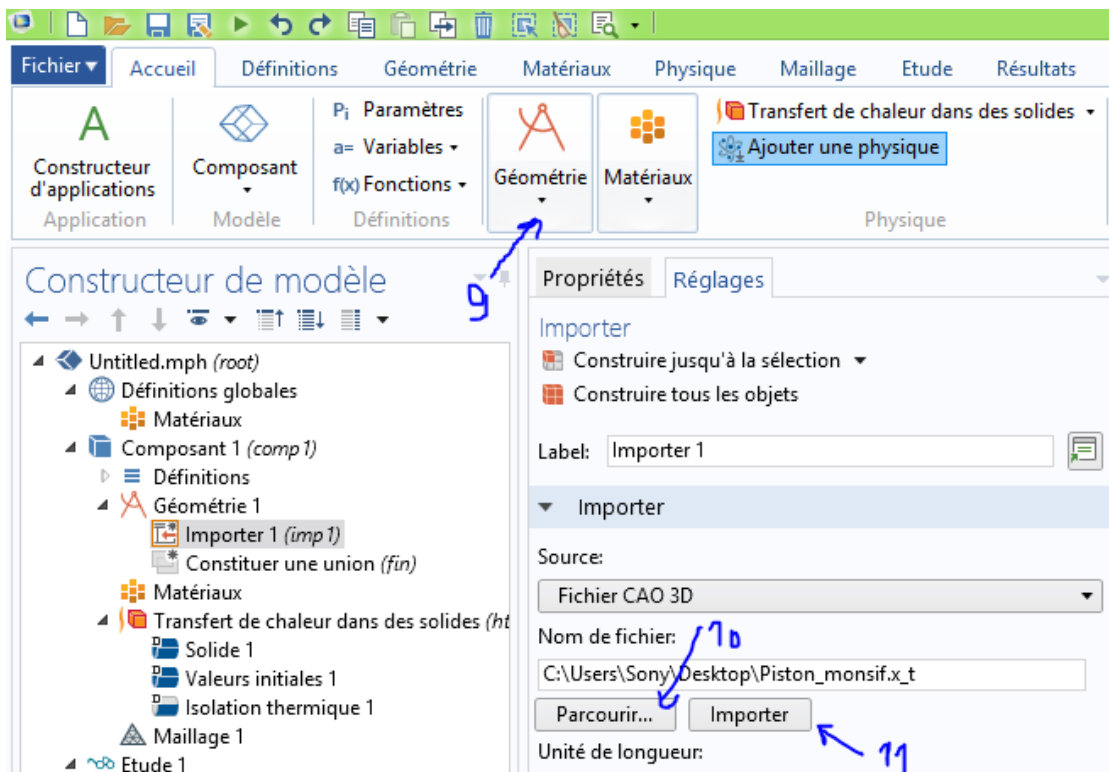


Figure III.25. Étape 9,10 et 11

Etape 12. on a choisir le type de matériaux

Etape 13. cliquée sur solide 1

Etape 14. Et écrire les températures en kelvin (la température que appliquée sur la surface de piston en chambre de combustion égale 1200° donc $T=1200+273.15=1473.15$ K

Etape 15. Cliquée sur maillage

Etape 16. Cliquée sur calculer

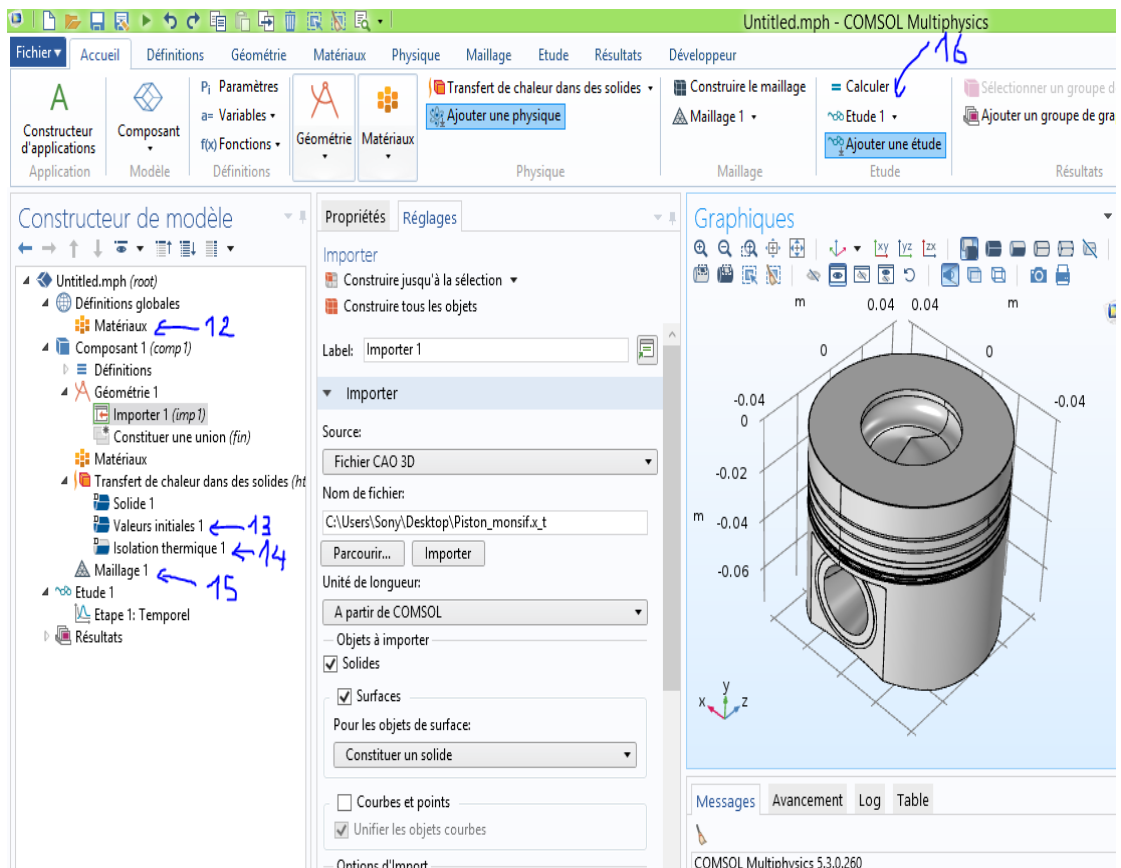


Figure III.26. Étape 12, 13, 14,15 et 16

III.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons découvert les programmes les plus importants utilisés dans la construction mécanique pour la construction de certains objets, dans lesquels nous avons présenté les étapes permettant de créer un modèle pour un piston spécial de type automobile (MERCEDES A 170 cdi) Nous avons ensuite simulé ce piston pour identifier Sur les résultats souhaités dans le chapitre suivant.

Chapitre IV

**Comportement
thermique du piston –
résultats et discussion**

IV.1. Introduction

Cette étude met en évidence le comportement thermique du piston a travers la variation temporelle de la température le long de la géométrie 3D du piston, pour ce ci le modèle physique choisi est “ «**transfert de chaleur dans des solides** » en cas « **temporel** ».

Traduit par le modèle mathématique suivant :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad (\text{IV. 20})$$

$$q = -k \nabla T \quad (\text{IV. 21})$$

IV.2.transfert de chaleur dans des solides

L'interface transfert de chaleur dans les solides est utilisée pour modéliser le transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement. Un modèle solide est actif par défaut sur tous les domaines, toutes les fonctionnalités permettant d'inclure d'autres types de domaines, tels qu'un domaine de fluide, sont également disponibles. L'interface transfert de chaleur dans les solides est utilisée pour modéliser le transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement. Un modèle solide est actif par défaut sur tous les domaines. Toutes les fonctionnalités permettant d'inclure d'autres types de domaines, tels qu'un domaine de fluide, sont également disponibles.

L'équation de température définie dans les domaines solides correspond à la forme différentielle de la loi de Fourier pouvant contenir des contributions supplémentaires telles que des sources de chaleur, la modélisation stationnaire, temporelle et fréquentielle est prise en charge dans toutes les dimensions de l'espace.

IV.3. L'étude temporelle

L'étude en fonction du temps est utilisée lorsque les variables de champ changent avec le temps.

Exemples: en électromagnétique, il est utilisé pour calculer les champs électromagnétiques transitoires, y compris la propagation des ondes électromagnétiques dans le domaine temporel. En transfert de chaleur, il est utilisé pour calculer les changements de température dans le temps. En mécanique des solides, il est utilisé pour calculer la déformation et le mouvement dans le temps, de solides soumis à des charges transitoires. En acoustique, il est

Chapitre IV Comportement thermique du piston –résultats et discussion

utilisé pour calculer la propagation des ondes de pression en fonction du temps. En écoulement de fluide, il est utilisé pour calculer les champs de flux et de pression instables. Dans le transport des espèces chimiques, il est utilisé pour calculer la composition chimique au fil du temps. Dans les réactions chimiques, il est utilisé pour calculer la cinétique de la réaction et la composition chimique d'un système réactif.

IV.4.Caractéristiques physiques

La simulation est faite pour trois matériaux différents (Acier, Aluminium et Fonte), dont les caractéristiques physiques sont indiquées sur le tableau suivant :

Caractéristiques	Acier	Aluminium	Fonte
Module de Young E (Gpa)	200	70	200
Coefficient de Poisson ν	0.30	0.33	0.29
Masse volumique ρ (Kg/m ³)	7850	2700	7870
Conductivité thermique (W/m.K)	44.5	238	76.2
Coefficient de dilatation thermique α (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	12.3	23	12.2
capacité thermique massique (J kg ⁻¹ K ⁻¹) C_p	475	900	440

Tableau IV-1. Caractéristiques physiques (Acier Aluminium et Fonte)

IV.5. Le maillage

Un maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu, ou aussi, une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés finis et bien définis. L'objet d'un maillage est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques.

IV.5.1. Choix du type d'élément fini

En raison de la géométrie complexe du piston (déjà conçu en SolidWorks) et dans le but de réaliser une simulation suffisante on opte pour l'élément fini tétraèdre à 4 nœuds.

IV.5.2. Maillage

Le maillage effectué à l'aide des éléments tétraédriques donne un nombre de 14911 éléments (Fig. IV.27). La figure suivante illustre le maillage de la pièce étudiée.

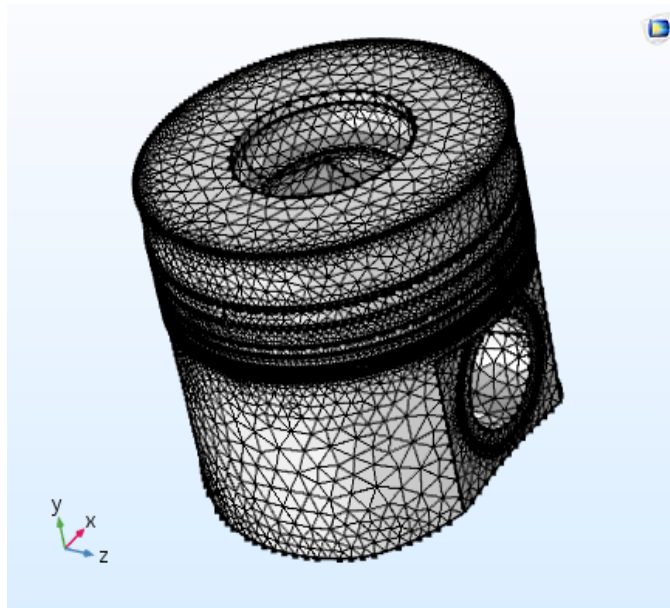


Figure IV.27. Maillage (Acier Fonte Aluminium)

IV.6. Variation temporelle de la température

La variation temporelle exprimée en °C ou K caractérise la précision de la régulation d'un émetteur. Plus cette valeur est faible, plus la valeur de la température ambiante s'approche de celle de la consigne. Il est possible d'assimiler la variation temporelle à une hystérésis, c'est-à-dire une différence de température entre la température de consigne et les températures auxquelles le régulateur détecte un écart. Ce paramètre impacte principalement les consommations de chauffage et la consommation des auxiliaires de distribution dans une moindre mesure.

IV.6.1. Au temps (t=0.1s)

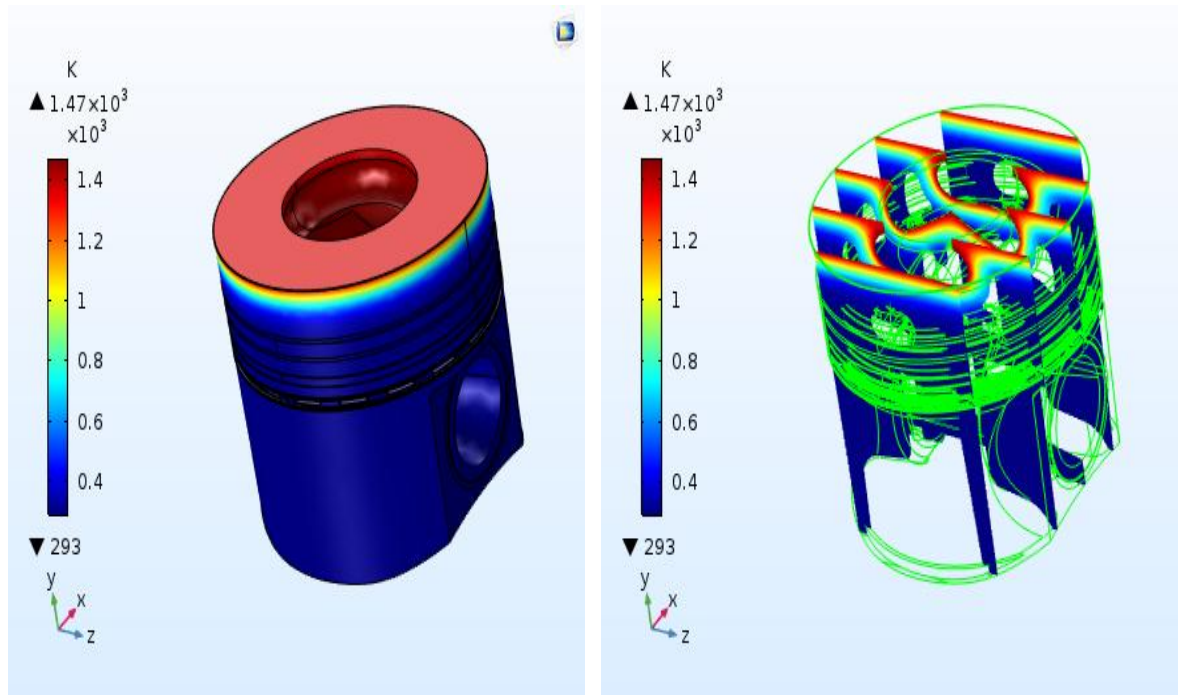


Figure IV.28.a. Aluminium en temps (t = 0.1s)

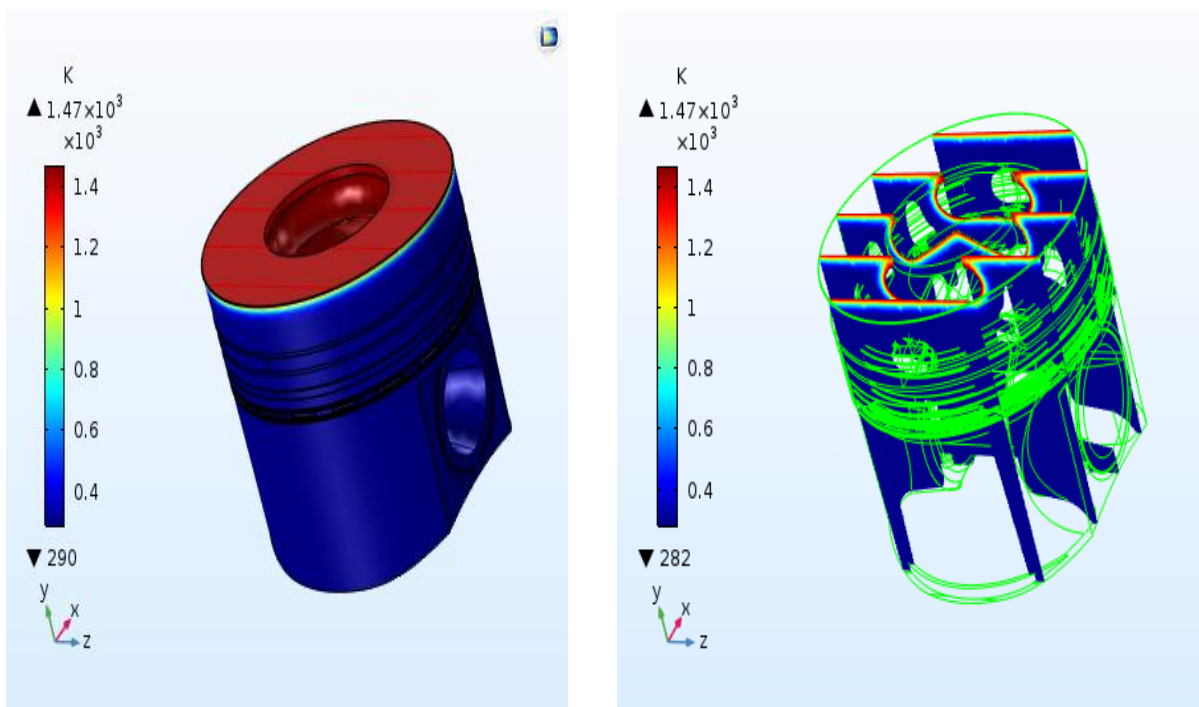


Figure IV.28.b. Acier en temps (t= 0.1 s)

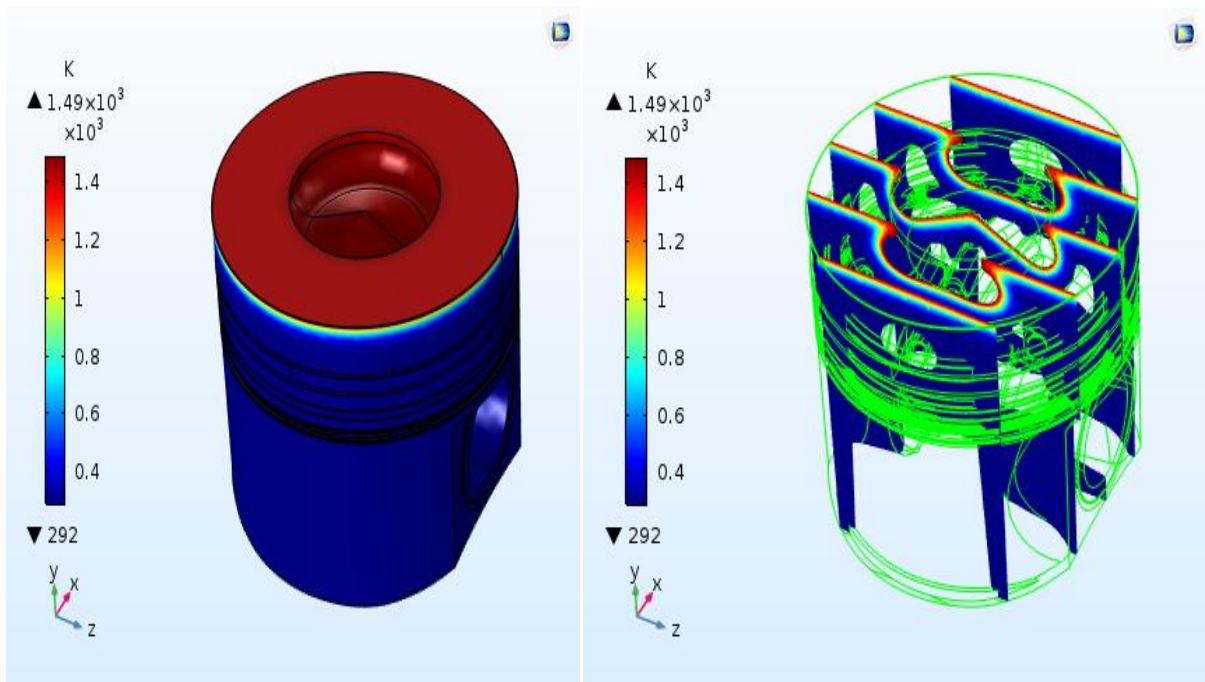


Figure IV.28.c. Fonte en temps ($t= 0.1s$)

IV.6.2. Au temps ($t=0.4s$)

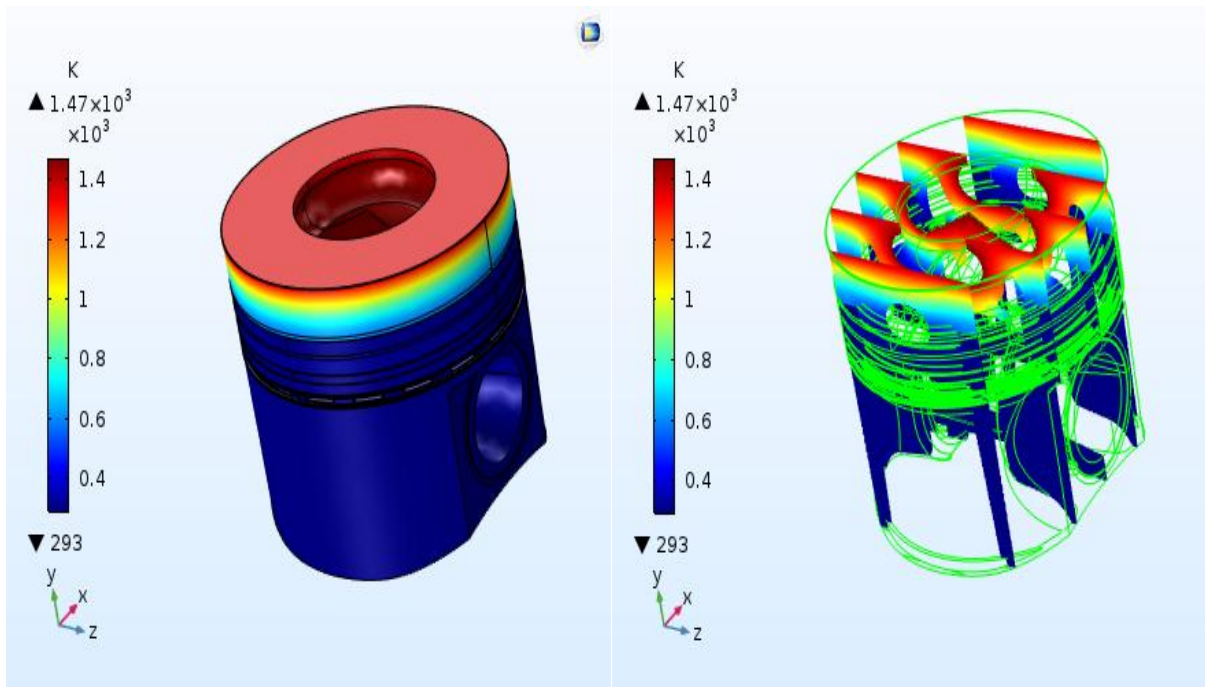


Figure IV.29.a. Aluminium en temps ($t= 0.4 s$)

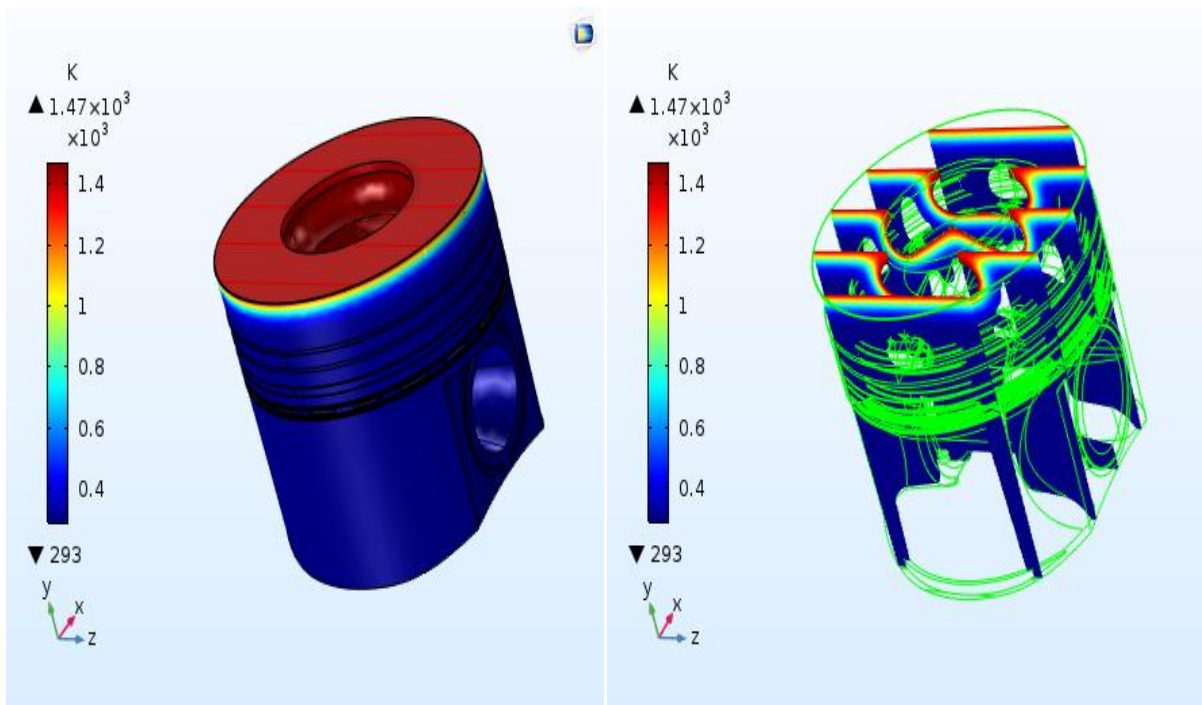


Figure IV.29.b. Acier en temps($t = 0.4s$)

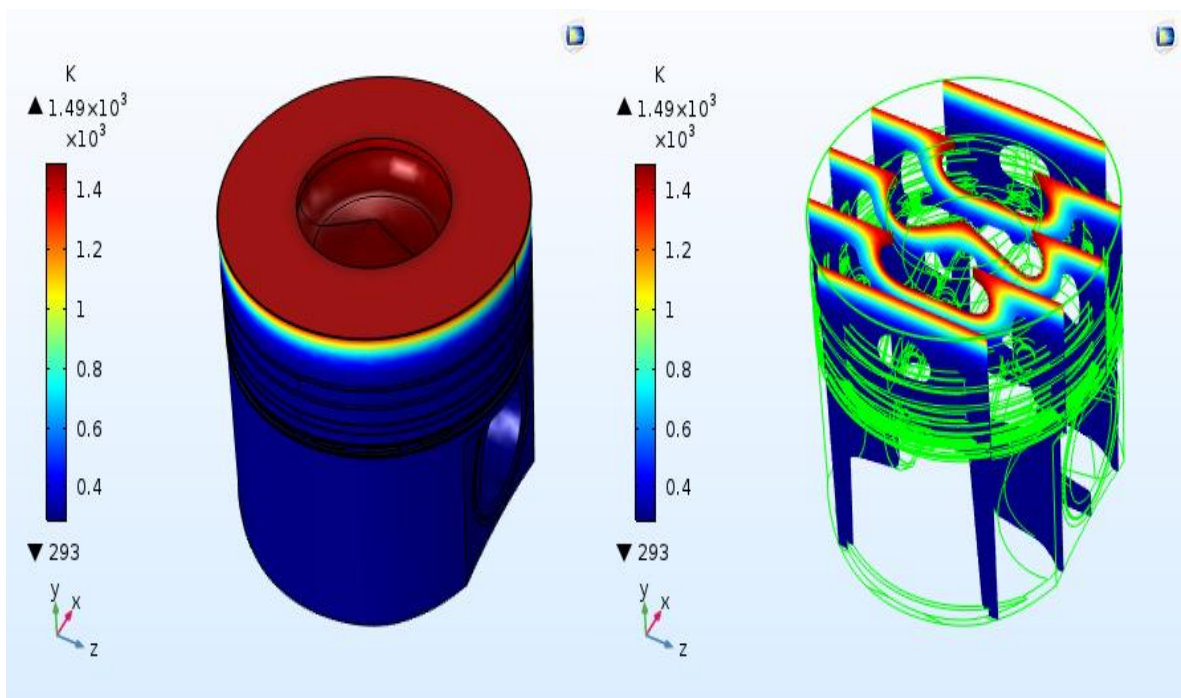


Figure IV.29.c. Fonte en temps($t= 0.4s$)

IV.6.3. Au temps (t=0.7s)

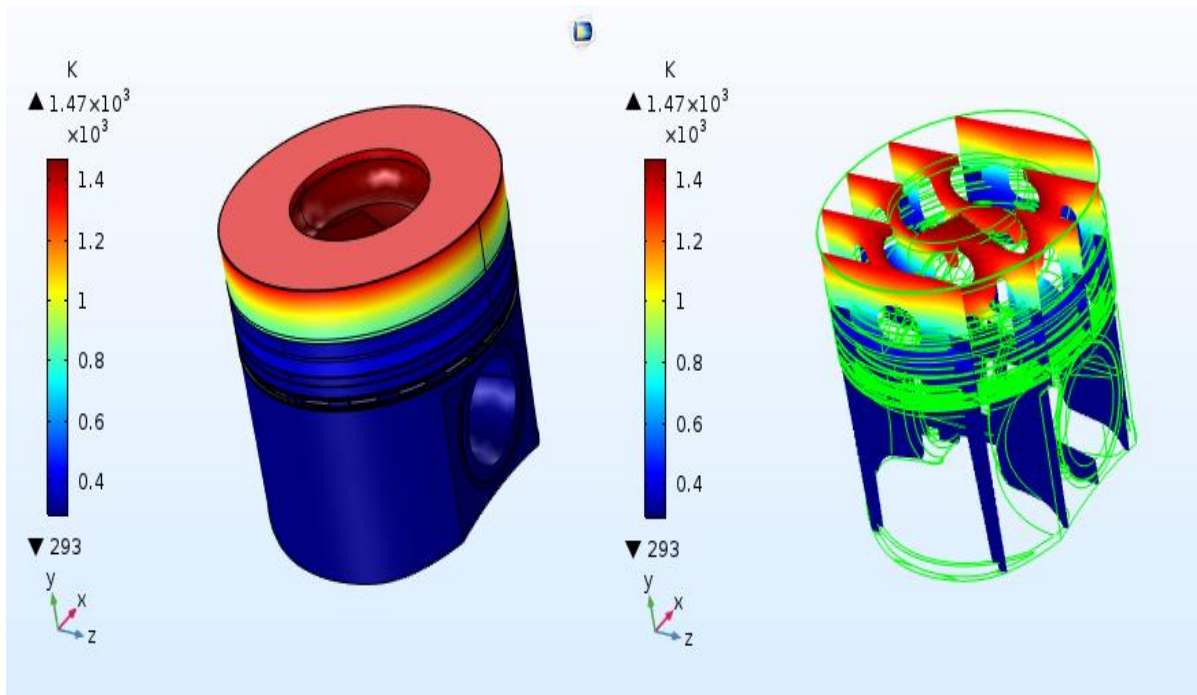


Figure IV.30.a. Aluminium en temps(t = 0.7s)

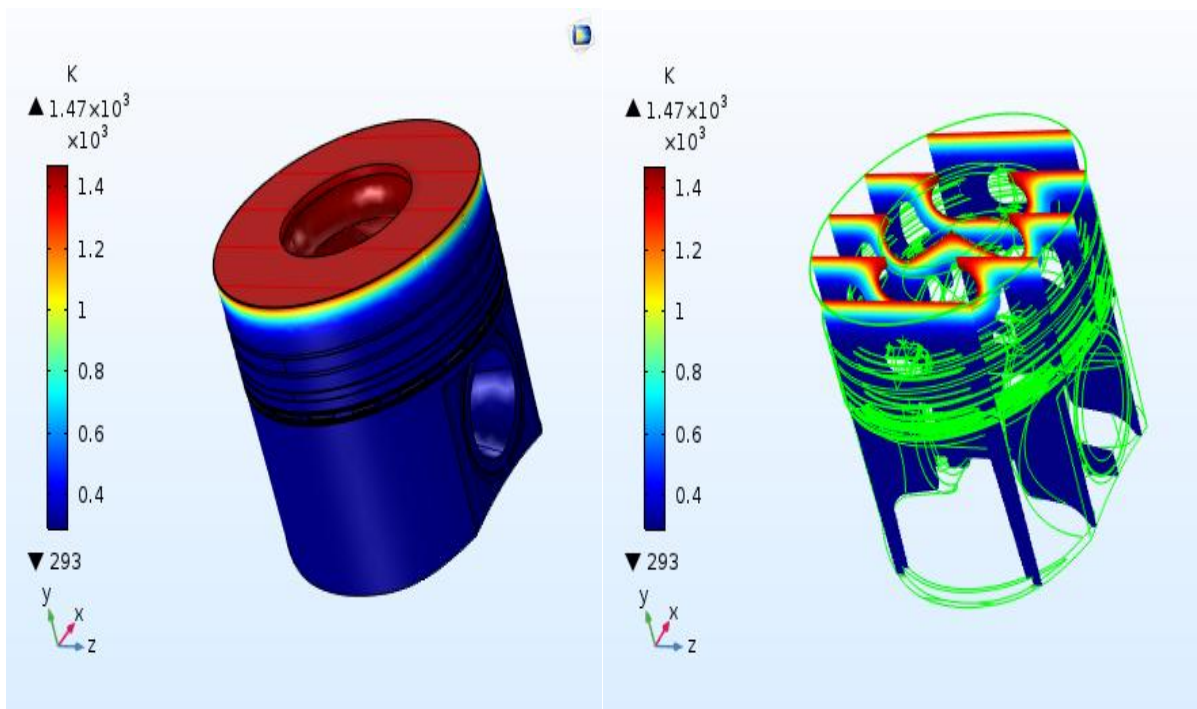


Figure IV.30.b. Acier en temps(t= 0.7s)

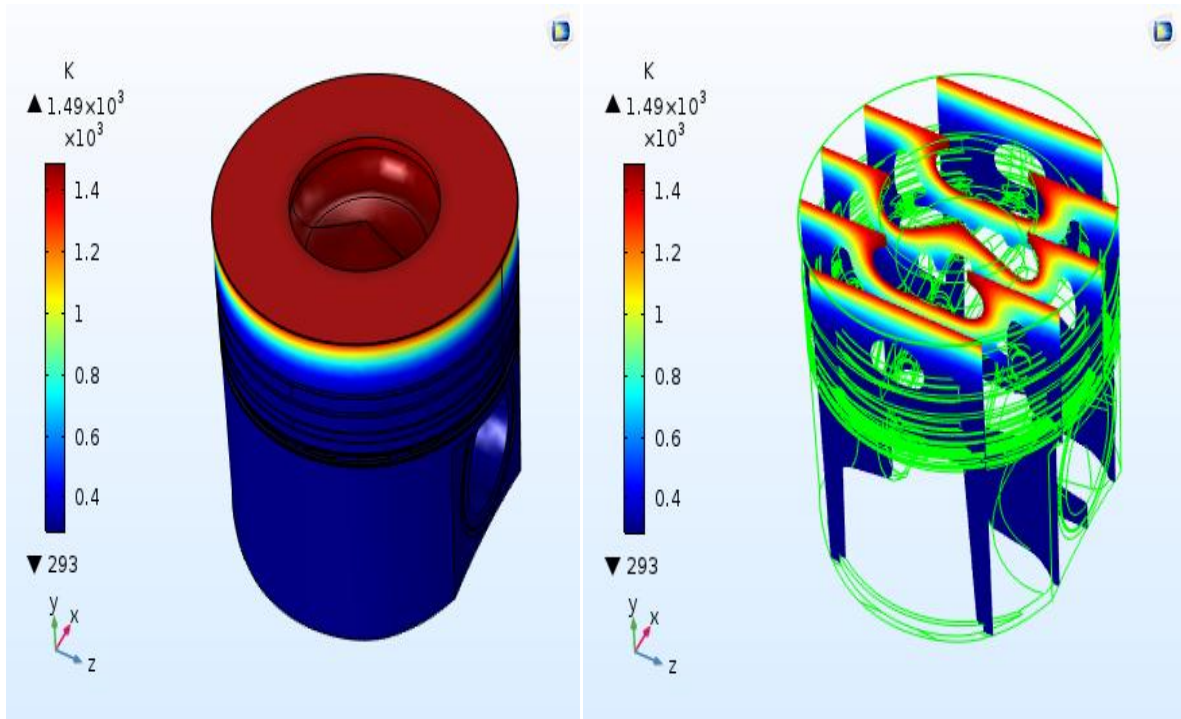


Figure IV.30.c. Fonte en temps($t= 0.7s$)

IV.6.4. Au temps ($t=1s$)

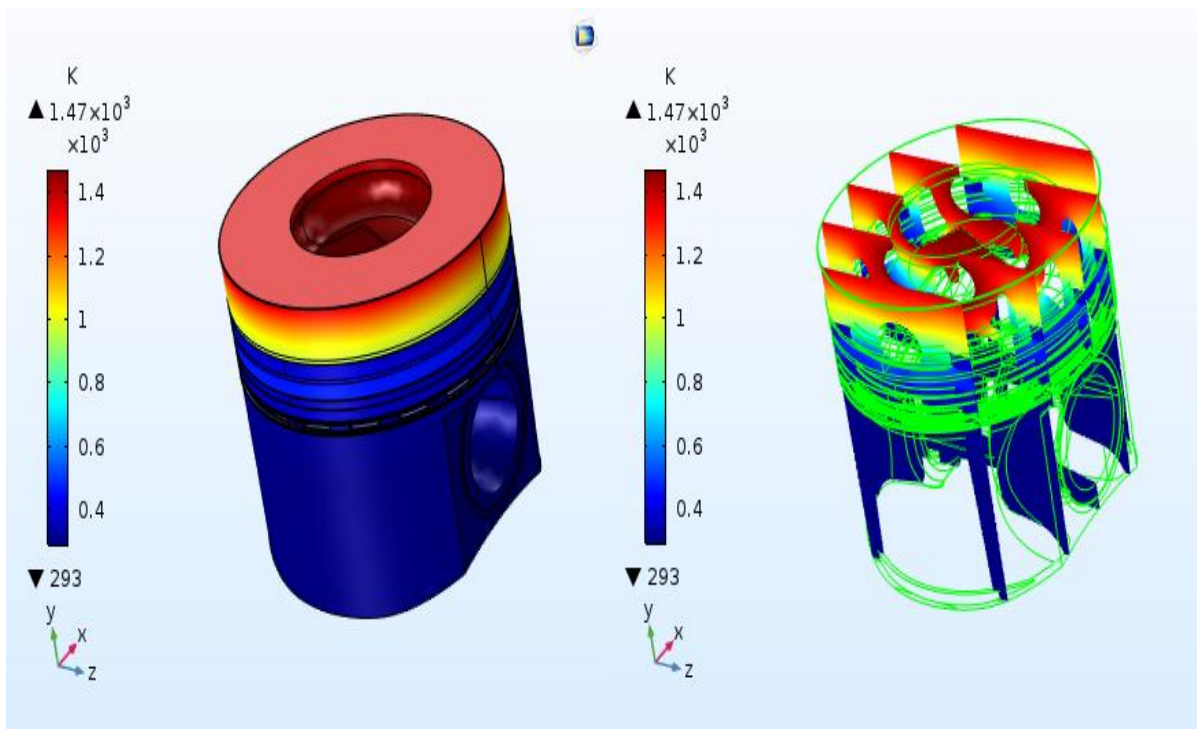


Figure IV.31.a. Aluminium en temps($t = 1s$)

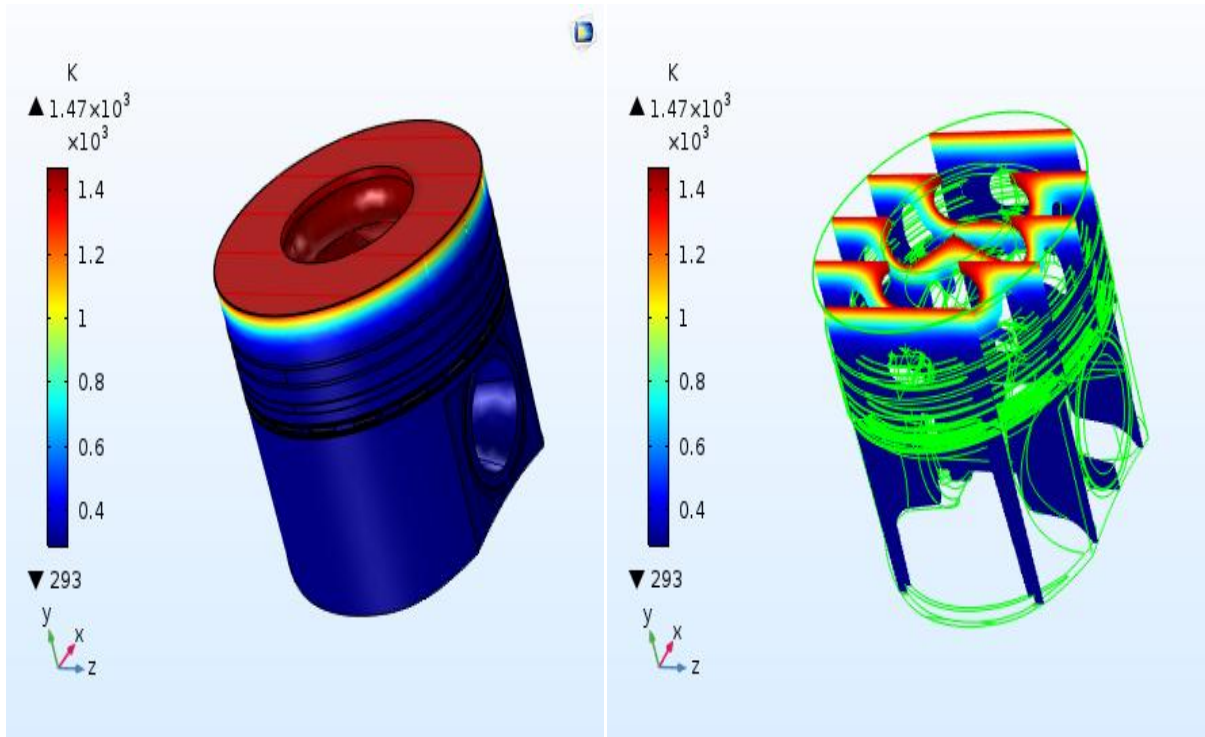


Figure IV.31.b. Acier en temps(t= 1s)

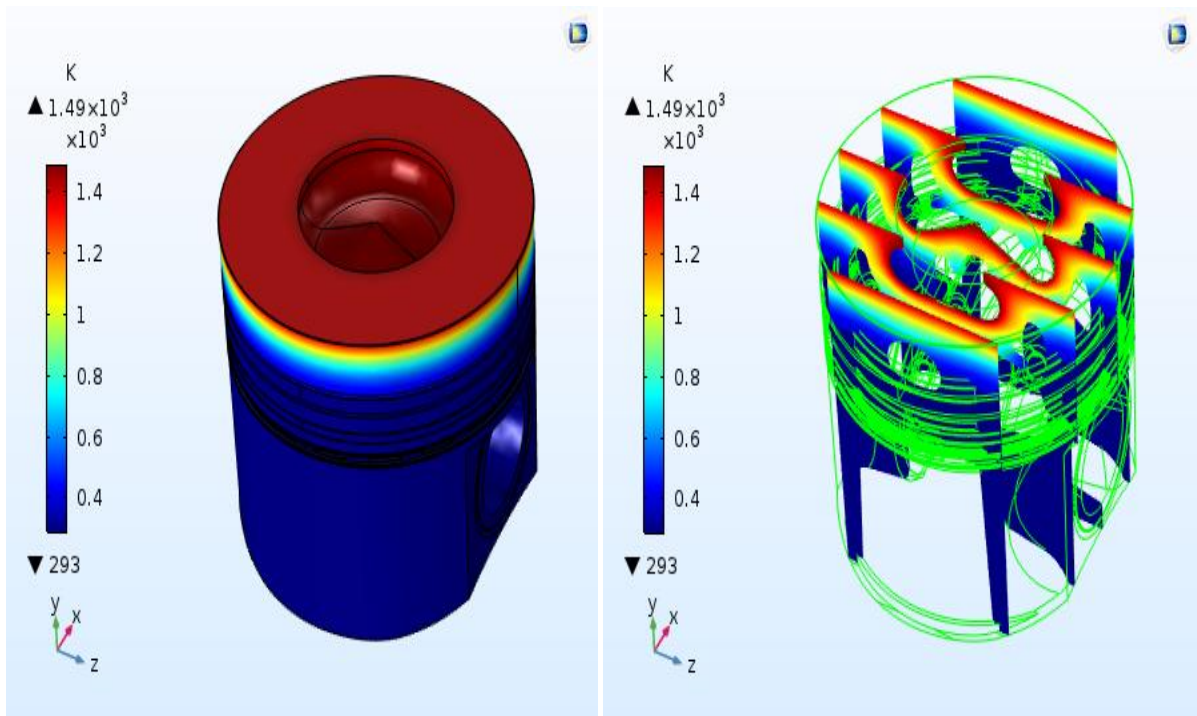


Figure IV.31.c. Fonte en temps(t= 1s)

IV.6.5. discussion

Sur les figures IV.28 (a)(b) et(c) sont représentées les isothermes réparties dans le piston au temps ($t=0.1s$). La répartition des isothermes montre que la chaleur commence à se diffuser légèrement dans les trois pistons. En comparant les trois figures 28.(a) pour l'Aluminium et 28.(b) pour l'acier et 28.(c) pour la fonte, on peut déjà (pour ce petit intervalle de temps), constater que la diffusion de chaleur est plus importante dans le piston en Aluminium que dans les deux autres (Acier et Fonte)et ceci s'explique par le fait que la conductivité thermique de l'aluminium est plus importante que celles des deux autres matériaux(voir tableau (IV.1.)).

Au fur et à mesure que le temps augmente, la diffusion de la chaleur augmente, ce qui est visualisé sur les figures IV.29. (a)(b)(c) isothermes à($t=0.4s$) et sur les figures IV.30. (a)(b) (c) isothermes à ($t=0.7s$).Jusqu'au temps $t=0.7s$, il n'est clair que la très bonne conductivité de l'Aluminium. Ce n'est que lorsque t atteigne $1s$ que la supériorité de la conductivité de la fonte devienne claire. L'épaisseur des isothermes en rouge (fortes températures) pour la fonte (figure IV 31.c) est plus grande que celle qui correspond à l'acier (figure IV 31.c).

IV.7.Conclusion

Cette étude présente les résultats du modèle de piston que nous avons simulé via le programme COMSOL, ainsi que le degré de variation de la couleur (qui représente la diffusion thermique interne du piston) pour chaque métal utilisé pendant chaque période étudiée.

Il est clair que l'aluminium est le matériau le plus conducteur de chaleur (et son mélange à faible teneur en cuivre est le plus utilisé dans la fabrication des pistons en raison de sa légèreté et de sa facilité de transition), suivi de fonte et l'acier.

Conclusion
Générale

Conclusion générale

Cette étude constitue une contribution assez importante à la modélisation et la simulation du piston pour l'analyse par l'étude temporel de l'influence de l'effet thermique.

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

Le choix du matériau du piston est un facteur prépondérant dans les étapes de conception des moteurs à combustion interne, en raison des contraintes liées aux performances et à la fiabilité. La présente étude consiste en une appréciation du choix d'une variante parmi un ensemble de matériaux utilisés dans un piston de moteur diesel à injection directe de type (MERCEDES A 170 cdi) Les matériaux utilisés sont l'acier, l'aluminium et la fonte. Un maillage structuré en éléments tétraédriques est créé pour la totalité du piston. Un premier calcul purement thermique est effectué en mode conduction non stationnaire dans le but de déterminer le champ de température.

Le mode conduction-convection, ainsi que la considération des contraintes thermiques peut faire l'objet d'un futur travail visé comme perspective de cette étude.

Références

- [1]. **01 Ritter, X.** (2006). Modélisation de la distribution d'un moteur à arbre à cames en tête (Doctoral dissertation, Villeurbanne, INSA).
- [2]. **G. Maillard,** Technologie de l'automobile, juin 1986
- [3].**P. Arques,** Moteurs alternatifs à combustion interne, Edition Masson, février 1987.
- [4]. Orville L. Adams, Traité élémentaire du moteur Diesel, Traduit Par Ch.Schimpf, EditeurDunod, 1960.
- [5]. **Guy.Fillettaz,** « classification des moteurs Diesel ».Document de la société Delphi 2002.
- [6].Serge Picard, « L'injection Diesel haute pression à rampe commune»,Dossier technique A.N.F.A « Association Nationale pour la Formation Automobile »édition 2001.
- [7]. **MESHACK H.O.,** Performance and emission Characteristics of a modified direct Injection diesel engine running on Diesel-biogas fuel. Master of Science (Mechanical Engineering), Jomo Kenyatta University of Agriculture and technology, 2014.
- [8]. **BILCAN.A.,** Contribution à l'étude du cycle thermodynamique de moteur fonctionnant en dual-fuel .Thèse de Doctorat : énergétique. Ecole Doctorale Mécanique, thermique et génie civil de Nantes, 2003.
- [9].Détermination du couple moteur Diesel 2.2dci monté sur les véhicules de marque RENAULT Page6 ,8.
- [10]. **M. LEMAIRE,** « Moteurs À Combustion Interne », Polycopié du cours des moteurs thermiques, École Centrale de Nantes, Nantes 2003.
- [11]. **R. Brun,** science et technique du moteur diesel industriel et de transport, tom1, édition 1981.
- [12]. **Laguitton. O:** Advanced Diesel combustion for Ultra-Low Emissions, Doctorate of philosophy thesis, University of Brighton-School of Engineering- in collaboration with Ricardo UK, October 2005.
- [13]. H.M.Chollet, Cours pratique pour mécaniciens d'automobiles, Editions Spes Vevey, 1979.
- [14].**Echelberg G.,** 'Some new investigation on old combustion engineproblem,' Engineering, vol. 148, 1939.

- [15]. **Iida Y, Tanaka K. and Fuse S.**, ‘ Contact point method for measuring sliding face temperature and its application’, SAE Paper n° 830311, 1983.
- [16]. **Alkidas A. C.**, ‘Heat transfer characteristics of spark ignition engine Journal of heat transfer, Vol. 102, pp. 189-193, May 1980
- [17]. **R.V Hugues, W.R.Dingle, M.F. Clover and J.R.Towers.**, ‘Designing a compact engine for 4.5 BHP/SQ inch of piston area’, CIMAC (A16), pp.20 et 32, 1972.
- [18]. **Sotter A.**, ‘heat transfer in piston cooling’, SAE paper N°660757, 1967
- [19]. **French C.C.J.**, ‘Taking the heat off the highly boosted Diesel’, SAE Paper n°690463, 1969.
- [20]. **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.
- [21]. **Woschni G. and Fieger J.**, ‘Determination of local heat transfer coefficients at the piston of a high speed Diesel engine by evaluation of measured temperature distribution ’ , SAE Paper n°790834, 1979.
- [22]. **Li C.H.**, ‘Piston thermal deformation and friction consideration’, SAE Paper n°820086, 1982.
- [23]. **Habchi F.**, ‘Etude expérimentale et numérique des transferts de chaleur en contact lubrifié localisé en vue d'une application aux moteurs’, Thèse de Doctorat de l'Université de Paris, Spécialité mécanique-énergétique, 1992.
- [24]. **Ball K and Sinha S. K.**, ‘Prediction of the temperature of pistons of some highly rated medium speed Diesel engines’, GEC Journal of science & technology , Vol. 46, N°2, pp.61-66, 1980.
- [25] **Morel T., Keribar R. and Harman S. T.**, ‘Detailed analysis of heat flow pattern in a piston’, Proceedings of the international symposium COMMODIA 90, Tokyo, pp 309-314, 1990.
- [26]. **Piotr GUSTOF***, ‘modelling of the heat load in the piston of turbo diesel engine – continuation’, Tom 2 Zeszyt 4, Krasińskiego St. 8, 40-019 Katowice, Poland, 2007.
- [27]. **J.N. Reddy.**, ‘ Finite element method introduction’, Edition Mc Graw-Hill 1993.

RESUME

Ce travail s'est focalisé sur le choix du matériau du piston est un facteur prépondérant dans les étapes de conception des moteurs à combustion interne, en raison des contraintes liées aux performances et à la fiabilité. La présente étude consiste en une appréciation du choix d'une variante parmi un ensemble de matériaux utilisés dans un piston de moteur diesel à injection directe de type (MERCEDES A 170 cdi) Les matériaux utilisés sont l'acier, l'aluminium et la fonte. Elle permet de déterminer les températures caractéristiques dans le piston ainsi que la température maximale qui affecte considérablement les propriétés du matériau.

ABSTRACT

This work, which focuses on the knowledge of thermal transfer in the engine piston and is based on the selection of the appropriate material for the piston is a key factor in the design stages of internal combustion engines, due to performance constraints. This study consists of an evaluation of the alternative selection between a group of materials used in the diesel engine piston with the direct injection type of the vehicle (MERCEDES A 170 cdi). The materials used are steel, aluminum and iron. It is possible to determine the characteristic temperatures in the piston as well as the maximum temperature that significantly affects the properties of the material.

ملخص :

هذا العمل الذي يركز على معرفة الانتقال الحراري في مكبس المحرك كما يقوم على اختيار المادة المناسبة للمكبس فهو عامل رئيسي في مراحل تصميم محركات الاحتراق الداخلي، بسبب القيود المتعلقة بالأداء. تتكون هذه الدراسة من تقييم لاختيار البديل بين مجموعة من المواد المستخدمة في مكبس محرك ديزال مع نوع الحقن المباشر للمركبة (MERCEDES A 170 cdi)المواد المستخدمة هي الصلب (الفولاذ) والألومنيوم والحديد . من الممكن تحديد درجات الحرارة المميزة في المكبس وكذلك درجة الحرارة القصوى التي تؤثر بشكل كبير على خصائص المادة المدروسة .