الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Mécanique
Filière : Génie Mécanique

Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
De Master en Génie Mécanique

Option : construction mécanique

Etude de la déformation d'un palier lisse sous l'effet D'un champ de pression hydrodynamique en utilisant l'analyse de Fourier.

Préparé et présenté par :

Mr: CHERGUI Ibrahim

Mr: MECHTI Mohammed amine

Proposé et dirigé par :

Dr. Djilali BOUKHELEF

2017/2018

Remerciements

Je remercie ALLAH tous puisant qui m'a donné le courage, la force et La volonté pour achever ce modeste travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur du mémoire Dr Dj.BOUKHELEF, pour le soutien moral, pour le confiance, pour les conseils judicieux qu'il m'a généreusement donné et la passion de la recherche qu'il m'a transmis.

Mes remerciements également à tous les enseignant qui ont participé a ma Formation, à tous les employés.

Mes remerciements aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Je tiens également a remercier tous mes et mes camarades de la promotion, et
tous ceux qui ont contribué de prés de loin a la bon réalisation de ce travail.

Dédicace

A ma chère Mère et mon cher Père pour l'éducation et le grand amour dont ils m'ont entouré depuis ma naissance.

A mes chers frères.

A mes chères sœurs.

A toute ma famille.

A tous mes profs qui nous ont appris.

A mes chers amis

A toutes la promo Master génie mécanique 2017/2018.

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

CHERGUI Ibrahim.

A la mémoire de ma chère Mère

A tous ceux qui me sont chers...

MECHTI Mohammed amine

Résumé :

Ce travail consiste à la détermination du champ de déformations radial dans un palier lisse en se basant sur une méthode semi analytique qui basé sur l'analyse de Fourier en utilisant le Cod Matlab.

nous avons étudié les déformations élastiques sous l'effet d'une pression hydrodynamique sur le milieu d'un palier lisse en utilisant le logiciels ANSYS APDL puis on comparent les résultats obtenu par les séries de Fourier par ces resultats

mots clées :

séries de Fourier,pression hydrodynamique,déformation élastique.

Abstract :

This work consists in the determination of the radial displacement field in a smooth bearing using a semi analytical method based on Fourier analysis by using Matlab logical.

We will study the elastic deformations under the effect of a hydrodynamic pressure on a middle of bearing, using the software ANSYS APDL than we compare the results done by Fourier analysis with this results.

Key words :

Fourier series, hydrodynamic pressure , elastic deformation.

ملخص:

يضم هذا العمل تحديد التشوهات داخل محمل اسطواني أملس بناءا على الطريقة شبه التحليلية التي تعتمد بدورها على تحليلي فورييه.

سندرس التشوه المرن تحت تأثير الضغط الهيدروديناميكي داخل المحمل الاسطواني باستخدام (انسيس ا ب د ل) ومن ثم مقارنة النتائج المتحصل عليها من طريقة تحليل فورييه بهذه النتائج.

الكلمات المفتاحية

سلاسل فورييه محمل هيدروديناميكي تشوه مرن

Table des matières

Remerciements
Dédicace
Résumé
Table des matières……..…….I
Table des figures……..…..V
Liste des tableaux…….....V III

INTRODUCTION GENERALE .

I. Introduction général : 1

CHAPITRE I :ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I. 1.Introduction 3
I. 2.HISTORIQUE : 4
I. 2.1.LA PERIODE PREHISTORIQUE : 4
I. 2.2. LA PERIODE GRECQUE ET ROMAINE.....6
I. 2.3. MOYEN AGE ET RENAISSANCE 8
I. 2.4. VERS LA RÉVOLUTIONINDUSTRIELLE 1500-1750 : 9
I. 2.5. LA RÉVOLUTION INDUSTRIELLE 9
I. 2.6. LA TRIBOLOGIE AU XXe SIÈCLE 11
I. 3.Les paliers Lisses : 13
I. 3.1.Introduction 13
I. 3.2.Classement des Paliers 14
I. 3.2.a.Paliers de roulements 14
I. 3.2.b. Paliers secs 14
I. 3.2.c. Paliers poreux 15
I. 3.2.d.Paliers magnétiques 16
I. 3.2.e.Paliers et butées fluides 16
I. 3.2.f. Paliers et butées hydrodynamiques 17
I. 3.2.g. Paliers hydrodynamiques 17
I. 3.2.h. Paliers lisses cylindriques 18
I. 3.2.i. Palier à arc partiel 18
I. 3.2.j. Paliers multilobés 19
I. 3.3.Types des paliers 19
I. 3.3.a. Palier court 20
I. 3.3.b. Palier infiniment long 20

I. 3.3.c. Palier de longueur finie 20
I. 3.4.Paliers lisses 20
I. 3.5. Principe de fonctionnement du palier : 21
I. 4.Lubrification 22
I. 4.1. Définition : 22
I. 4.2. Fonctions du lubrifiant : 22
I. 4.3. Types de lubrification : 22
I. 4.4. Rôles de la lubrification : 22
I. 4.5. Les bases lubrifiantes : 23
I. 4.6.Les différents régimes de lubrification 23
I. 4.6.a.La courbe de Stribeck : 23
I. 4.6.a.1.La lubrification limite 25
I. 4.6.a.2. La lubrification mixte 25
I. 4.6.a.3 La lubrification hydrodynamique 26
I. 4.6.a.4. La lubrification hydrodynamique non laminaire 26
I. 4.6.a.5. La lubrification hydrostatique 27
I. 4.6.a.6. La lubrification élastohydrodynamique 27
I. 4.6.b .Classification des Lubrifiants : 27
I. 4.6.b.1. Lubrifiants d'origine animale : 27
I. 4.6.b.2. Lubrifiants d'origine végétale : 28
I. 4.6.b.3. Lubrifiants d'origine minérale : (Les huiles de base) 28
I. 4.6.c. Choix d'un lubrifiant 28
I. 4.7.Proprietes des huiles. 29
I. 4.7.a.Propriétés physiques. [10] 29
I. 4.7.a.1. Densité : 29
I. 4.7.a.2.Couleur : 29
I. 4.7.a.3. Chaleur massique : 29
I. 4.7.a.4. Conductivité thermique : 30
I. 4.7.a.5. Viscosité : 30
I. 4.7.a.6.Compressibilité : 30
I. 4.7.a.7.Point d'écoulement : 30
I. 4.7.b .Propriétés chimiques. 30
I. 4.7.b.1.combustibilité, point d'éclair, point de feu : 30

I. 4.7.b.2. température d'auto-inflammation : 31
I. 4.7.b.3. Détergence, dispersivité : 31
I. 4.7.b.4.Teneur en cendres : 31
I. 4.7.b.5. Teneur en soufre : 31
I. 4.7.b.6. Teneur en eau : 31
I. 5.Conclusion. 32

table des matieres.

II.1. Introduction : 33
II.2.Equations général : 33
II.2.1. Equation de Reynolds 33
II.2.2. Hypothèse de variation axiale de la pression 35
II .2.3. Conditions aux limits 35
II.2.4. Equation de l'épaisseur du film 36
II.2.5. Les equations d'équilibre 37
II.3.Analyse de Fourier 37
II.3.1.Définition. 37
II.3.2.Détermination des coefficients de la série au moyen des formules de Fourier. 38
II .3.2.a.Calcul de a_0 38
II .3.2.b.l'ortogonalité des terms de Fourier 39
II.3.3.Séries de Fourier des fonctions paires ou impaires. 40
II.3.3.a.Fonction pair : série de Fourier cosinus. 40
II .3.3.b.Fonction impair : série de Fourier sinus. 41
II .4.Conclusion: 41

CHAPITRE III : ETUDE NUMERIQUE.

III.1. introduction : 42
III.2. Présentation du logiciel 42
III .2.1. Définition de logiciel: 42
III.2.2. Aspects techniques : 43
III.2.2.1. principaux produits : [8] 43
III.2.2.2. Environnements logiciels : [5] 43
III.3. Méthode de Calcul : 44
III.3. 1.Exécutez l'analyse ..... **Erreur ! Signet non défini.**

III.3. 1.a. Définir l'élément type :..... 46
III.3.1.b. Les propriétés du matériau de l'élément :..... 47
III.3. 1.c.Construction de la géométrie..... 48
III.3. 1. D :Construction du maillage. 49
III.3. 1. E :Conditions au limites 50
III.3. 1.f. La Solution..... 51
III.4.Présentation de Matlab..... 51
III.4.1. Introduction – Historique 51
III.5.Example..... 54
III.6.conclusion..... 56

CHAPITRE IV :MODELISATION.

IV.1. Introduction :..... 57
IV.2. Propriétés de matériaux :..... 57
IV.3. Déformation radiale : 60
IV.3. 1).Palier longueur finie L/D=1:..... 60
IV.3. 2.1.Maillage : 61
IV.3. 2.2. Application :..... 62
IV .2).Palier court L/D=0,5 :..... 65
IV .2.1.Maillage : 66
IV.2.2.Application :..... 67
IV.3. Conclusion : 71

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION.

V.1.Introduction :..... 72
V.2.Palier court L/D=0,5:..... 72
V.2. a :(e=0,5) :..... 72
V.2. b :(e=0,2) :..... 74
V.2.1.Discussion des résultats :..... 78
V.3.Palier de longueur finie L/D=1 :..... 79
V.3.a : (e=0,5) :..... 79
V.3.1Discussion des résultats :..... 85
V.4.Conclusion..... 86
Conclusion générale……87

Liste des figures :

Figure I- 1 : Crapaudine de porte, Mésopotamie 2500 ans avant J. C. 4
Figure I- 2 :Transport de statue, tombe de Tchuti Hetep, El-Bersheh, Egypte, 1880 avant J. C. 5
Figure I- 3 Chariot chinois utilisé pour s'orienter, 255 avant J. C. [2]. 6
Figure I- 4 :Chariot Celte (doc. MUSÉE NATIONAL DE COPENHAGUE). 8
Figure I- 5 : Pompe à godets entraînée par une roue à aubes (doc. musée Topkapi) 9
Figure I- 6 : Dispositifs utilisés par Coulomb pour étudier le frottement de glissement 11
Figure I- 7 :les Paliers roulement 13
Figure I- 8 :les Paliers *lisses* 14
Figure I- 9 :Paliers secs 15
Figure I- 10 :Paliers poreux 16
Figure I- 11 :Paliers magnétiques 16
Figure I- 12 :Paliers butées fluides 17
Figure I- 13 Paliers butées hydrodynamiques 17
Figure I- 14 :Paliers hydrodynamiques 18
Figure I- 15 :Paliers arc partiel 19
Figure I- 16 Figure :Paliers multilobés. 19
Figure I- 17 : Schématisation de fonctionnement d'un palier lisse.[9] 21
Figure I- 18 : Courbe de Stribeck 24
Figure I- 19 : les déférents type de lubrification[13] 24
Figure I- 20 : Lubrification limite 25
Figure I- 21 : Lubrification mixte 26
Figure II- 1 : repère cartésien [11] 33
Figure II- 2: Palier développé [11] 34
Figure II- 3 : Palier circulaire 35
Figure III- 1: Photographe représentera le symbole de logiciel ANSYS. 42
Figure III- 2: Photographe de ANSYS Mechanical APDL 45
Figure III- 3 : Définie le type de solution. 46
Figure III- 4: Définie le type de l'élément 46
Figure III- 5: Définie les propriétés de élément. 47
Figure III- 6: Entre le module de Young et coefficient de poissant. 48
Figure III- 7 : Géométrie d'un palier lisse. 48
Figure III- 8 : Les étapes de maillage. 49
Figure III- 9 : Maillage brick d'élément de 3D. 50
Figure III- 10 : Displacement 50
Figure III- 11 : solve 51
Figure III- 12 :l'environnement MATLAB (version 2013)..... 54

Figure IV- 1 :le maillage de problème axisymétrique 3D…….. 58
Figure IV- 2 :les conditions aux limites. 58
Figure IV- 3 : Déplacement axisymétrique du palier 59
Figure IV- 4 : Les déformations axisymétriques du palier 60
Figure IV- 5 : La géométrie d'une longueur finie L/D=1. 61
Figure IV- 6 : Maillage du Palier longueur finie L/D=1. 62
Figure IV- 7 : Champ de pression d'un palier à longueur finie e=0.2 64
Figure IV- 8 : Champ de pression d'un palier à longueur finie e=0.5 65
Figure IV- 9 : Le champ de pression appliquée sur le palier(e=0,2). 65
Figure IV- 10 : Le champ de pression appliquée sur le palier(e=0,5). 66
Figure IV- 11 : La géométrie d'un palier court L/D=0,5. 67
Figure IV- 12 : Maillage de palier court L/D=0,5. 67
Le graphe représenter de champ du pression applique sur le palier court (Figure IV- 13.).... 70
Figure IV- 13:Champ de pression d'un palier court (L/D=0.5 et e=0.2). 70
Figure IV- 14 :Champ de pression d'un palier court (L/D=0.5 et e=0.5). 71
Figure IV- 15 : Le champ de pression appliquée sur le palier(e=0.2) 72
Figure IV- 16 : Le champ de pression appliquée sur le palier(e=0.5) 72
Figure V- 1 : Schéma de solution sur ANSYS APDL (pour e=0.5). 72
Figure V- 2: déformation élastique au milieu d'un palier court(e=0.5) (ANSYS). 74
Figure V- 3 : Schéma de solution sur ANSYS APDL (pour e=0.2). 76
Figure V- 4 : Déformation élastique du palier court faiblement charger(ANSYS). 76
Figure V- 5: Déformation élastique du palier court faiblement charge (Séries Fourier). 77
Figure V- 6: Déformation élastique du palier court faiblement chargé (Série Fourier) et ANSYS. 77
Figure V- 7 : Schéma de déformation palier court faiblement charger (e=0.2).**Erreur ! Signet non défini.**
Figure V- 8 : Schéma de déformation palier court faiblement charger (e=0.2). 80
Figure V- 9:la déformation élastique au milieu d'un palier de longueur finie (e=0.5) (ANSYS). 81
Figure V- 10 : Schéma de solution sur ANSYS APDL 82
Figure V- 11: Déformation élastique de palier à longueur finie (e=0.2) [avec ANSYS.]..... 84
Figure V- 12 : Déformation élastique de palier à longueur finie (e=0.2)[avec les série de Fourier] 84
Figure V- 13 :Déformation élastique du palier (L/D=1, e=0,2) 85
Figure V- 14 : schéma de déformation élastique du palier à longueur finie faiblement charger(e=0.2). 86

Liste des tableaux :

tableauIV- 2 : les valeurs de déplacement suivant la direction axial du palier 59
tableauIV- 3 : Tableau de géomètre d'un palier..... 60
tableauIV- 4: les caractéristiques de maillage. 61
tableauIV- 5 : Tableau de champ pression de applique sur un palier de longueur finie 62
tableauIV- 6: Les Coefficients de Fourie 63
tableauIV- 7 : La déformation corresponde à chaque harmonique amplitude. 63
tableauIV- 8 : Tableau de géomètre d'un palier..... 63
tableauIV- 9 : la maillage d'un palier court L/D=0,5. 66
tableauIV- 10 :Tableau de champ du pression applique sur le palier court. 67
tableauIV- 11 : Le Coefficients de Fourier 68
tableauIV- 12 : La déformation corresponde à chaque harmonique amplitude. 69
Tableau V- 1: Tableau de déformation radiale au milieux du palier du palier court faiblement……..72
Tableau V- 2: Tableau de déformation radiale au milieux du palier du palier court faiblement……..75
Tableau V- 3: Tableau de déformation radiale de palier à longueur finit faiblementchargé….79Tableau V- 4: Tableau de déformation radiale de palier à longueur finit faiblement chargé……..…81

Introduction générale :

L'étude des frottements, de leurs manifestations et conséquences, ainsi que des moyens et techniques utilisés pour réduire leurs impacts sur les équipements, est la préoccupation d'une importante branche de la science, qui est la « TRIBOLOGIE ».

La Tribologie comme discipline, contribue à comprendre les interactions entre surfaces en contact et à suggérer des solutions aux problèmes fondamentaux, elle traite trois axes importants :L'étude des contacts et des frottements, L'usure et La lubrification.

Le palier est un support ou guide qui détermine la position d'une pièce mobile par rapport aux autres pièces d'une machine.

Les paliers lisses sont fréquemment utilisés; les plus simples sont constitués d'un arbre cylindrique tournant à l'intérieur d'un alésage en présence de lubrifiant. Sur certains mécanismes, ils correspondent à la meilleure solution technologique existant actuellement. On les rencontre dans les moteurs thermiques, les compresseurs, les turbomachines, les alternateurs, les réducteurs, etc…

La lubrification hydrodynamique est un domaine important de la tribologie, c'est l'étude des contacts dans lesquels un film de fluide sépare totalement les surfaces entre le rotor et le stator.

L'objectif de notre travail est de calculer les déplacements radiaux à l 'intérieure d'un palier lisse circulaire sous l'effet d'un champ de pression hydrodynamique en utilisant une approche basée sur l'analyse de Fourier pour réduire un problème global 3D en plusieurs problème axisymétrique 2D. On a retenu dans ce cas un champs de pression globale sur toute la longueur du palier, et déterminer le champs de déplacement au plan médian

Le logiciel ANSYS APDL est utilisé pour le calcul d'un champ de déformation sous l'effet d'une pression unitaire dans le plan médian du palier. tandis que le cod MATLAB est employé pour la détermination des coefficients de Fourier ainsi que le calcul du champ de déplacement sous l'effet d'une pression hydrodynamique.

Pour ce faire, nous avons divisé notre travail en cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, on a fait une étude bibliographique qui consiste à expliquer les notions de la lubrification des contacts mécaniques concernant les paliers hydrodynamiques.

Le deuxième chapitre présente les équations de base de la lubrification hydrodynamique, les équations de déformation ainsi que le principe de la méthode de séries de Fourier.

Dans le troisième chapitre présente les codes numériques de calcul utilisés qui sont ANSYS APDL et MATLAB.

Le quatrième chapitre donne la résolution numérique du problème de la déformation élastique hydrodynamique par la méthode basée sur les séries de Fourier.

Le cinquième chapitre est réservé aux résultats de déformations au centre d'un palier court et de longueur finie et la comparaison entre les résultats donné par Ansys a cèle qui donnée par les séries de Fourier.

I. 1.Introduction

Le nom tribologie, créé en 1966, vient du mot Grec "τριβειν" Tribein : frotter, et "λογος" logos : parole, étude ou science ; ainsi la tribologie est l'étude ou la science, du frottement. Plus généralement la tribologie regroupe l'étude de 1a lubrification, du frottement et de l'usure des éléments de machine.

Il faut tout d'abord remarquer que le frottement ne présente pas que des aspects négatifs, ainsi la tenue de route d'une automobile dépend directement du frottement entre les Pneumatiques et la route. De même sans l'existence du frottement, l'homme serait incapable de marcher. Enfin, si l'homme a appris à maîtriser le feu, il y a plus de 100000 ans, c'est en faisant frotter un morceau de bois dur à l'intérieur d'un morceau de bois tendre. Cependant, dès la construction des premiers mécanismes, l'homme a cherché à supprimer l'usure et à diminuer le frottement pour réduire les efforts. Pour préciser l'ampleur du problème on peut citer le cas des automobiles actuelles pour lesquelles plus du quart de la puissance indiquée du moteur est perdue en frottement dans le moteur et dans la transmission. [1].

I. 2.HISTORIQUE :

Ce chapitre reprend en les modifiant et parfois en les simplifiant quelques uns des chapitres de l'ouvrage *suivant* : « Lubrification hydrodynamique : paliers et butées »par jean frêne daniel, Nicolas, Bernard Degueurce, Daniel Berthe et Maurice Godet, collection de la direction des étude et recherches d'électricité de France, N° 72, 1990, édition eyrolles .

I. 2.1.LA PERIODE PREHISTORIQUE :

Les premiers paliers fabriqués par l'homme sont sans doute les crapaudines de porte qui consistaient en un axe en bois tournant à l'intérieur d'un creux pratiqué dans du bois ou dans une pierre. Des éléments en pierre datés de 2500 ans avant J. C. ont ainsi été retrouvés en Mésopotamie (fig. I - 1).

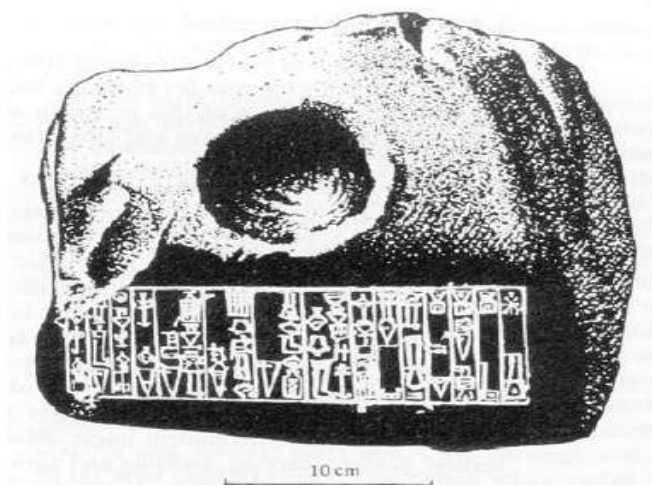


Figure I- 1 : Crapaudine de porte, Mésopotamie 2500 ans avant J. C.[1]

Dans le domaine des transports, la roue, et donc le chariot, ont été inventés vers 4000 ans avant J. C. Les roues en bois étaient pleines et parfois formées de plusieurs morceaux assemblés entre eux. Plus tard, leur périphérie a été cloutée pour réduire l'usure. Enfin, la roue à rayons est apparue vers 2000 ans avant J. C.; elle comportait tout d'abord 4, puis 6 ou 8 rayons, ce qui la renforçait considérablement.

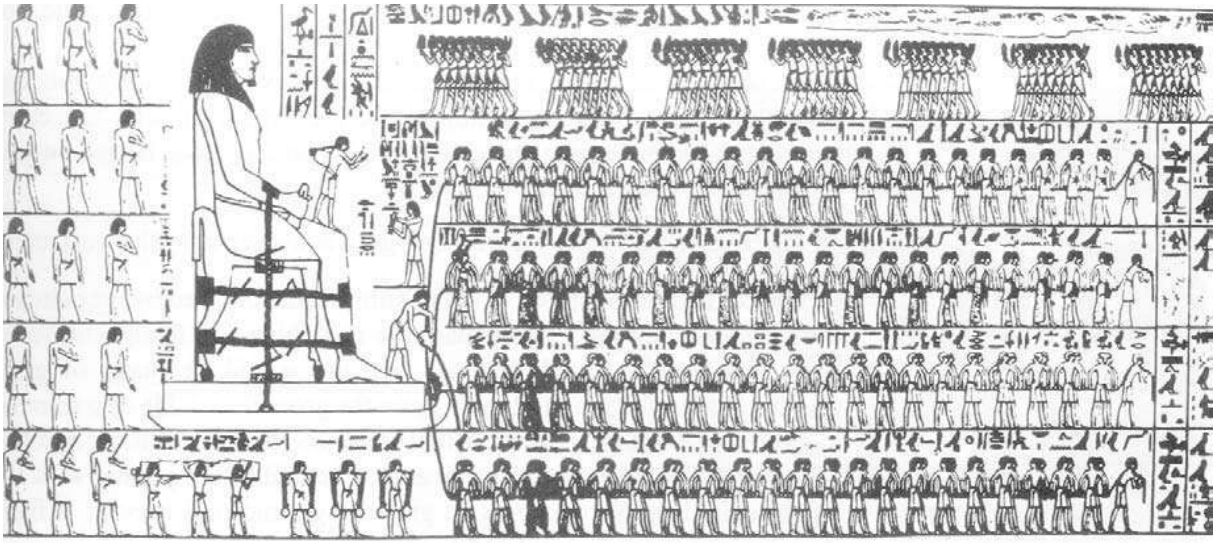


Figure I- 2 : Transport de statue, tombe de Tchuti Hetep, El-Bersheh, Egypte, 1880 avant J. C. [1].

Pour transporter les lourdes charges, les Egyptiens faisaient glisser celles-ci sur des chemins réalisés sans doute en bois, et lubrifiés abondamment à l'avant de l'objet à déplacer. Plusieurs bas-reliefs montrent cette méthode de transport. Le plus ancien provient de la tombe de Saqqara et date de 2400 ans avant J. C. et montre le déplacement de la statue de Ti. On voit très clairement un homme placé devant la statue et versant du liquide, sans doute de l'eau ou de l'huile, pour faciliter le glissement ; c'est le premier exemple connu de la lubrification. Un autre bas-relief daté de 1880 ans avant J. C., et provenant de la tombe de Tchuti Hetep à El Bersheh montre le même procédé de transport (fig. I.3). Cependant l'homme qui verse de l'eau est maintenant sur le piédestal de la statue et non plus devant où il risquait de se faire écraser ; l'importance de la lubrification est ainsi reconnue. La roue existait évidemment à la même époque en Egypte mais le chariot n'était utilisé que pour le transport des objets légers ou pour la guerre; il semble que vers 1400 ans avant J. C., la graisse de mouton ou de boeuf ait été utilisée pour lubrifier les paliers des roues de chariots.

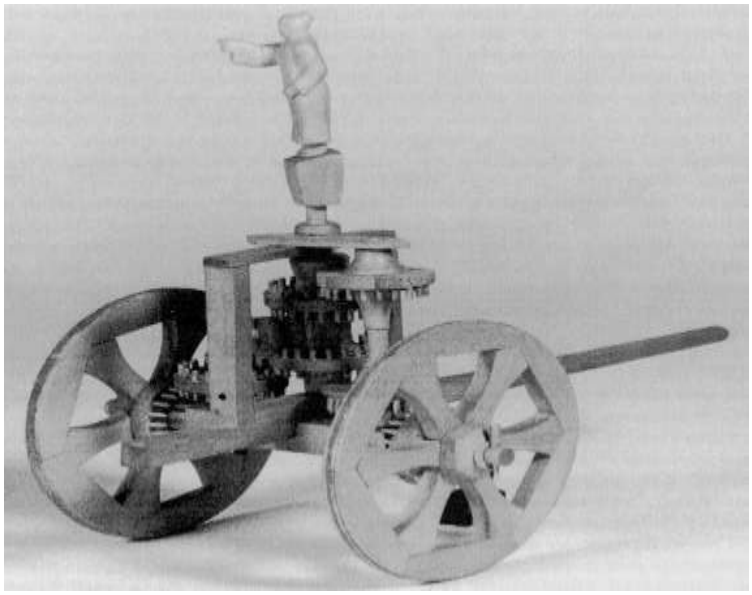


Figure I- 3 : Chariot chinois utilisé pour s'orienter, 255 avant J. C. [2].

La roue à rayons est apparue aux Indes vers 2500 ans avant J. C. et en Chine vers 1500 ans avant J. C. La copie d'un chariot chinois à roues cerclées de fer et datant de 255 ans avant J. C. est présentée dans la figure 5. Ce chariot très particulier comporte une statue dont la rotation est reliée au mouvement des roues par l'intermédiaire de 2 trains d'engrenages et d'un différentiel. L'écartement entre les roues est égal au diamètre des roues et le rapport de transmission des 2 trains d'engrenages est égal à 1. Ainsi, quel que soit le chemin parcouru par le chariot, sur un sol plat, le bras de la statue reste constamment pointé dans la même direction (le sud), sous réserve qu'il y ait roulement sans glissement entre les roues et le sol.Ce chariot était sans doute utilisé par les Chinois pour s'orienter lors de la traversée du désert de Gobi.

I 2.2. LA PÉRIODE GRECQUE ET ROMAINE

Les Grecs et les Romains ont développé l'usage de la roue; ils connaissaient l'emploi des huiles végétales et animales comme lubrifiant ainsi que celui du bitume et des huiles de pétrole.

Par ailleurs, les Grecs ont inventé l'engrenage; la vis serait due à Archytas et Aristote, Archimède et d'autres auteurs moins connus décrivent le principe de différents engrenages. De même Heron d'Alexandrie utilise l'arbre à came. En fait, les Grecs disposaient de tous les éléments nécessaires aux grands progrès techniques sauf le système bielle manivelle inventé au XIVe siècle. Cependant il n'y eut pas réellement de développement du machinisme pour différentes raisons dont les principales sont sans doute le manque de bois et d'énergie

hydraulique, les problèmes de transport liés à un réseau routier insuffisant, l'existence de l'esclavage et surtout une forme de pensée qui ne reconnaît que le raisonnement pur et la démonstration rigoureuse et ne laisse pas de place à la logique expérimentale. Les Romains ont utilisé et développé les techniques mises au point par les Grecs. Des progrès importants ont été réalisés pour produire l'huile d'olive et pour moudre le blé, ainsi les moulins à eau ont été utilisés vers 120 ans avant J. C.. Un exemple intéressant est le Trapetum dont plusieurs exemplaires ont été retrouvés dans les fouilles d'Olyntha (Ve siècle avant J. C.) et qui permettait d'écraser et de dénoyauter les olives (fig.I.4). Il comportait deux meules (orbis), hémisphériques, dressées verticalement et soutenues par un axe horizontal en bois (Cupa) tournant autour d'un pivot central (Columella). La meule gisante (Moratorium) était une cuve de pierre dont les parois épousaient la forme des meules courantes. On note aussi la présence d'une bague (Cunica) sans doute en métal qui évitait une usure trop rapide de l'arbre en bois; c'est un des premiers exemples de palier. De même pour réduire l'usure des semelles de chaussures, les Romains utilisaient des semelles cloutées de fer dont l'emploi n'a été en France abandonné que très récemment. Enfin les Romains connaissaient la butée à billes et à rouleaux coniques ainsi que les glissières à rouleaux cylindriques. Des éléments de butées ont été découverts dans une galère romaine retrouvée au fond du lac Nemi en Italie. Cette galère, coulée vers l'an 40, a été découverte en 1895 et les fouilles ont duré jusqu'en 1933 après que Mussolini ait fait assécher le lac. Les chemins de roulement étaient en bois; les billes d'une première butée et les rouleaux cylindriques étaient en bronze et comportaient des axes qui les maintenaient dans leur logement. Les rouleaux coniques d'une deuxième butée étaient en bois. L'utilisation de ces butées n'est pas connue; certains auteurs ont suggéré qu'elles étaient utilisées soit sur des treuils ou des cabestans, soit pour orienter une statue ou une horloge solaire.

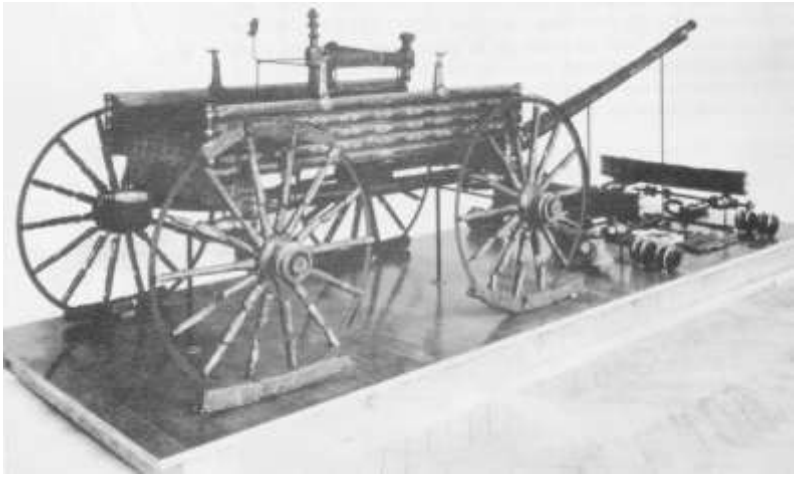


Figure I- 4 : Chariot Celte (doc. MUSÉE NATIONAL DE COPENHAGUE) [1].

I. 2.3. MOYEN AGE ET RENAISSANCE

Après la chute de l'Empire romain et jusqu'au début du Moyen Age, s'est produit une régression dans le développement de la technique et donc de la tribologie, sauf dans l'empire Ottoman et en Chine où des paliers tout en métal ont sans doute été utilisés dès l'an 900. Il semblerait que des moulins à vent aient été inventés en Perse au VIIe siècle; en tout cas, il est certain que les moulins à vent existaient en Perse au Xe siècle. De même, le fer à cheval clouté pour éviter l'usure des sabots aurait été créé à Bizance à partir du VIIe siècle. Le musée de Crécy et le musée de Saumur présentent des exemplaires de fers à cheval qui seraient du IXe siècle. La figure 8 présente une pompe à godets entraînée par une roue à aube (le boeuf est en bois, c'est un leurre); elle est tirée du livre de Razzaz el Cezeri écrit au XIIe siècle (Olaganüstü mekanik araçlarin bilgisi hakkinda kitap: [1] le livre des dispositifs mécaniques ingénieux). La plus ancienne copie de cet ouvrage est au musée Topkapi à Istanbul, elle date de 1206 et présente différents types d'automates. [1].

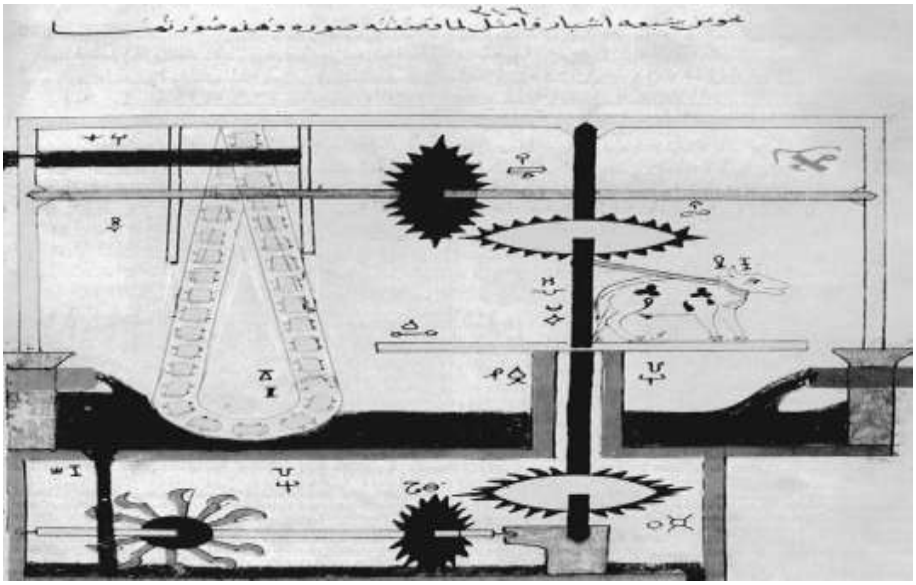


Figure I- 5 : Pompe à godets entraînée par une roue à aubes (doc. musée Topkapi) [1].

Malgré cela, il faudra généralement attendrejusqu'au XIIe siècle pour voir apparaître de nouveaux progrès .

I. 2.4. VERS LA RÉVOLUTIONINDUSTRIELLE 1500-1750 :

Au XVIe siècle, le développement agricole etartisanal conduit à la construction de machines déplus en plus complexes qui utilisent des paliers etmême dans certains cas des rouleaux métalliques pour réduire le frottement. Des exemples de différentes machines sont présentés dans de nombreux ouvrages parus à partir du milieu du XVIe siècle. Nous citerons Georgii Agricolae (1556), Errard de Bar le Duc (1584), Agostino Ramelli (1588) et Vittorio Zonca (1607). La figure 13 extraite de Agricola de Re Metallica, montre une pompe à chaînes et à godets actionnée par des hommes. On voit clairement le système de démultiplication à engrenages et les axes guidés par des paliers en métal. Dans son ouvrage intitulé «Teatro Nuevo di Machine et Edificü» Zonca préconise pour les paliers un arbre en acier et un coussinet en cuivre afin d'éviter l'usure. Cette solution est encore très largement utilisée aujourd'hui en remplaçant le cuivre par le bronze, alliage de cuivre et d'étain.

I. 2.5. LA RÉVOLUTION INDUSTRIELLE

Le début de la révolution industrielle est marqué dans le domaine de la tribologie par Charles Augustin Coulomb (1736-1806) né à Angoulême et qui présente en 1780, un mémoire intitulé: «Théorie des machines simples en ayant égard au frottement de leurs parties et à la roideur des cordages». Ce travail obtint le premier prix de l'Académie des Sciences au

Printemps 1781 et fut publié en 1782. Coulomb a construit différents dispositifs et a réalisé de nombreuses expériences afin d'étudier de façon précise l'influence des cinq paramètres suivants, sur le frottement de glissement et dans certains cas sur le frottement de roulement:

1) nature des matériaux,

2) effet d'un lubrifiant,

3) étendue de la surface de contact,

4) charge appliquée,

5) temps de repos pendant lequel les surfaces

restent en contact avant l'expérience. La figure(I- 6) montre quelques-uns des dispositifs utilisés par Coulomb pour étudier le frottement de glissement. Il a ainsi déterminé de nombreuses valeurs du coefficient de frottement statique et dynamique encore globalement valables aujourd'hui. Il a aussi montré que le frottement dépendait à la fois de l'adhésion et de la déformation des surfaces. Par ailleurs il confirme les 2 lois d'Amontons et montre que dans beaucoup de cas le coefficient de frottement est indépendant de la vitesse de glissement. Cette troisième loi qui lui a été attribuée, a été appliquée pendant plus d'un siècle, à tort dans le cas du frottement lubrifié, alors que

Coulomb était certainement conscient de ses limites. Les travaux de Coulomb ont servi de référence pendant plus de 150 ans et sont encore très utilisés aujourd'hui. Les anglo-saxons le considèrent comme l'un des plus grands tribologues de tous les temps. En 1784 Samuel Vince (1749-1821) présente devant la «Royal Society» anglaise un article intitulé: «on the motion of bodies affected by friction». Ce travail, sans doute réalisé indépendamment de celui de Coulomb, traite essentiellement des problèmes de frottement dynamique.

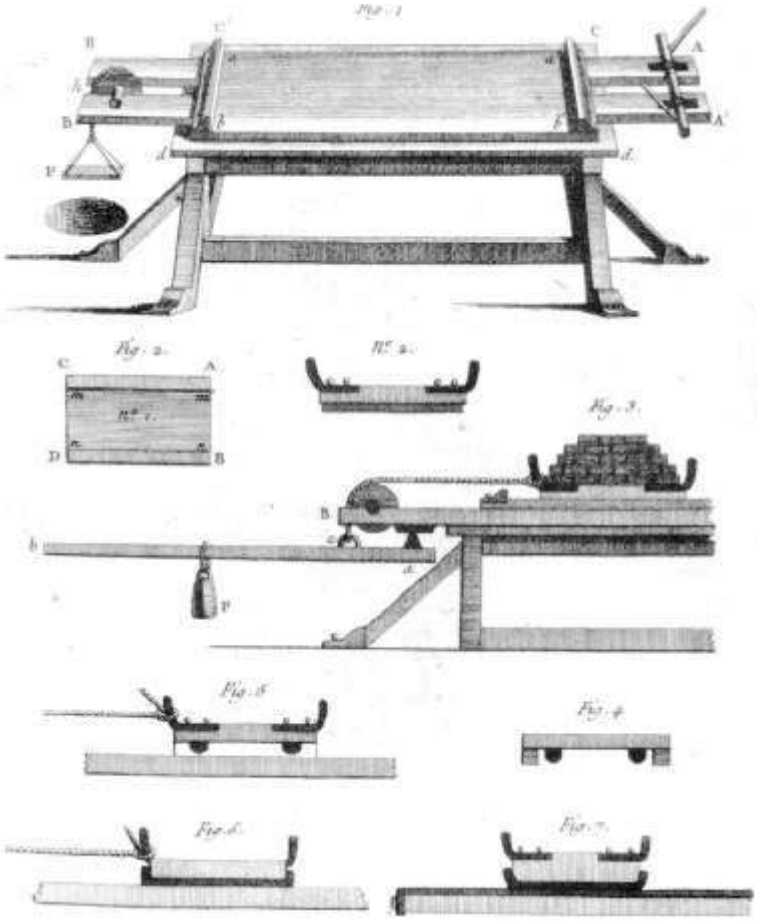


Figure I- 7 : Dispositifs utilisés par Coulomb pour étudier le frottement de glissement**[1].**

I. 2.6. LA TRIBOLOGIE AU XXe SIÈCLE

L'analyse de toutes les publications et réalisations effectuées depuis le début du siècle dans le domaine de la tribologie représente un travail considérable qui dépasse largement le cadre de cet article. Cependant, un aperçu des progrès réalisés peut schématiquement être présenté. Nous utiliserons pour cela la classification actuelle et nous parlerons successivement de la lubrification hydrodynamique, hydrostatique et élastohydrodynamique, et du frottement sec. La théorie de la lubrification hydrodynamique présentée par Reynolds en 1886, a été utilisée dès le début du XXe siècle pour le calcul des butées et des paliers. En 1905, Anthony George Maldon Michell
(1870-1959) obtient à l'aide de développements limités, la solution de l'équation de Reynolds dans le cas d'une butée de largeur finie. Il montre ainsi, la diminution de portance due aux fuites latérales du fluide. Dans le cas des paliers, les progrès ont été moins rapides. En 1904, Arnold Johannes Wilhelm Sommerfeld (1868-1951) utilise un changement de variables judicieux et présente une solution analytique à l'équation de Reynolds dans le cas du palier infiniment long $\partial p / \partial z = 0$. Cependant, les conditions aux limites proposées ne tiennent pas

compte de la rupture du film dans le palier et la pression ainsi obtenue est négative dans la zone divergente, ce qui ne correspond pas à la réalité physique. En 1914, Ludwig Karl Friedrich Gümbel (1874-1923) propose pour le calcul de la charge dans le palier de ne prendre en compte que la partie positive de la pression et de négliger toute la zone où la pression est négative. La charge ainsi calculée est évidemment erronée.

I. 3.Les paliers Lisses :

I. 3.1.Introduction

Les paliers sont des organes utilisés en construction mécanique pour supporter et guider, en rotation, des arbres de transmission.

On peut classer les paliers selon deux catégories :

- ✓ lisses où les arbres qui reposent sur des coussinets sont soumis au frottement de glissement entre les surfaces en contact.
- ✓ Roulement où le contact s'effectue par l'intermédiaire de billes ou de rouleaux contenus dans des cages. On a là un phénomène de résistance au roulement (parfois appelé improprement « frottement de roulement ») qui permet une plus grande charge sur les paliers et une plus grande vitesse de rotation.



Figure I- 8 :les Paliers roulement[14].



Figure I- 9 :les Paliers *lisses***[14].**

I. 3.2.Classement des Paliers

I. 3.2.a.Paliers de roulements

Dans un palier à roulements le glissement de l'arbre sur le coussinet est remplacé par le roulement de corps intermédiaires (billes, rouleaux et aiguilles).

Ils supportent de plus fortes charges tout en réduisant l'usure et le frottement à cause de leur coefficient de frottement très faible au démarrage. Les avantages et inconvénients des paliers à roulements sont:

I. 3.2.b. Paliers secs

Ces paliers sont généralement constitués d'une matrice (résine, métal, carbone) imprégnée de graphite. Ils sont utilisés sans apport extérieur de lubrifiant. Le frottement à sec est particulièrement dangereux pour les organes qui y sont soumis.

Le dégagement de chaleur peut provoquer une amorce de fusion entre les surfaces en contact et aboutir au grippage.

Ils ne sont utilisés que pour des systèmes fonctionnant rarement ou à vitesse réduite et faible charge, et doivent être envisagés dans toute application où la présence et le maintien du film lubrifiant est impossible (vide spatial, par exemple).



Figure I- 10 :Paliers secs[14].

I. 3.2.c. Paliers poreux

Les paliers à coussinets poreux sont dits autolubrifiants car c'est le coussinet imbibé d'huile qui joue le rôle de réservoir de lubrifiant.

La couche auto-lubrifiée est constituée par une poudre frittée à haute température (bronze, fer, cuivre).

Ces paliers comportent des pores remplis d'huile avec un volume qui représente de 16 à 36% du volume total.

Dans un palier poreux, l'huile circule d'une part dans le jeu, circonférentiellement et axialement, et d'autre part dans le coussinet, de la zone de pression élevée vers la zone de basse pression (figure I- 11).

L'huile filtre au travers de la surface interne du coussinet, du film vers le coussinet dans la zone de pression élevée, du coussinet vers le film dans la zone de pression basse. L'utilisation de ces paliers est limitée par la température de fonctionnement



Figure I- 12 :Paliers poreux[14].

I. 3.2.d.Paliers magnétiques

Les paliers magnétiques permettent de supprimer tout contact entre un arbre et un bâti, d'éliminer les lubrifiants et tous les problèmes de frottement.

Ces paliers ont une très grande précision de guidage. Ils peuvent fonctionner dans le vide et sont utilisables dans une large gamme de températures (-200°C à 450°C) avec une dissipation d'énergie mécanique pratiquement nulle



Figure I- 13 : Paliers magnétiques**[14].**

I. 3.2.e.Paliers et butées fluides

Il existe deux grandes classes de paliers et butées fluides : les paliers et butées hydrodynamiques où la portance résulte de la géométrie du film lubrifiant et de la cinématique des surfaces

Les paliers et butées hydrostatiques où la portance est principalement due à l'existence d'une source extérieure de fluide sous pression.

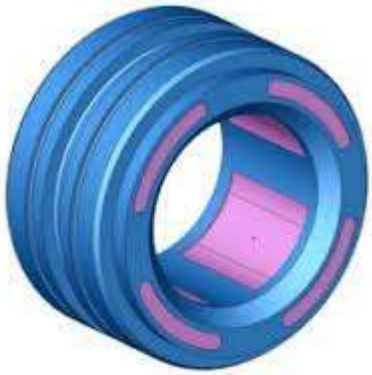


Figure I- 14 :Paliers butées fluides**[14].**

I. 3.2.f. Paliers et butées hydrodynamiques

Dans ce cas, un fluide visqueux sépare totalement les surfaces en présence.
Ce fluide peut être un liquide pratiquement incompressible ou un gaz compressible.

La pression dans le film est créée par le déplacement relatif des surfaces et la géométrie du contact.



Figure I- 15 :Paliers butées hydrodynamiques**[14].**

I. 3.2.g. Paliers hydrodynamiques

Les paliers hydrodynamiques sont fréquemment utilisés pour supporter des charges radiales, pour le guidage des rotors de dimensions importantes.

Ces paliers sont conçus pour fonctionner dans des conditions sévères (charges et fréquences de rotations élevées).

Par conséquent, pour remplir leur fonction dans de parfaites conditions, les paliers hydrodynamiques doivent être soigneusement conçus.

Il existe deux types de configuration de paliers hydrodynamiques

- ✓ Paliers à géométrie fixe;
- ✓ Paliers à géométrie variable.



Figure I- 16 :Paliers hydrodynamiques**[14].**

I. 3.2.h. Paliers lisses cylindriques

Les paliers lisses sont fréquemment utilisés, les plus simples sont constitués d'un arbre qui tourne à l'intérieur d'un coussinet complet (amplitude angulaire 360°).

Ces deux éléments sont totalement séparés par un film lubrifiant .

Dans certains mécanismes, ils correspondent à la meilleure solution technologique existant actuellement.

On les rencontre dans les moteurs thermiques, les compresseurs, les turbomachines, alternateurs, les réducteurs, ….etc

I. 3.2.i. Palier à arc partiel

Le calcul de ce type de palier est similaire à celui d'un palier circulaire complet, la pression d'entrée du palier est imposée. La figure .représente la section droite d'un palier à arc partiel, O_a et O indiquent respectivement le centre de l'arbre et le centre géométrique du palier.

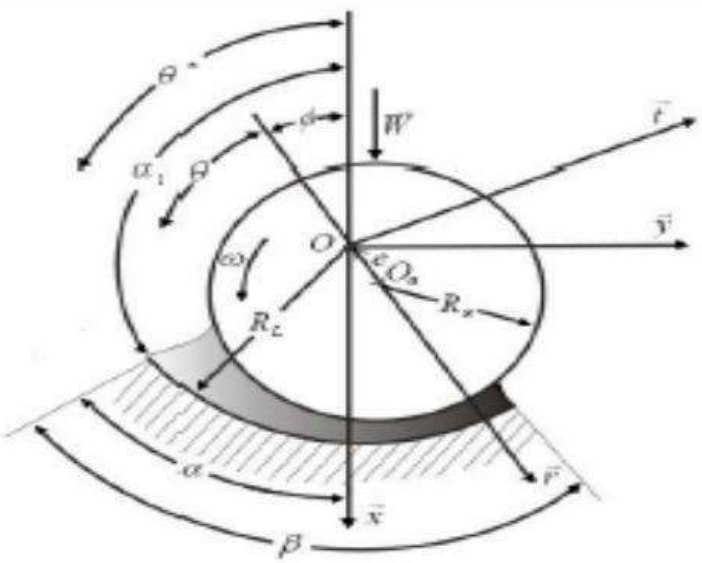


Figure I- 17:Paliers arc partiel[7].

I. 3.2.j. Paliers multilobés

Le coussinet est constitué de trois lobes d'amplitude circonférentielle β_i de longueur axiale *L*, de rayon de courbure R_L et de centre de courbure O_i.

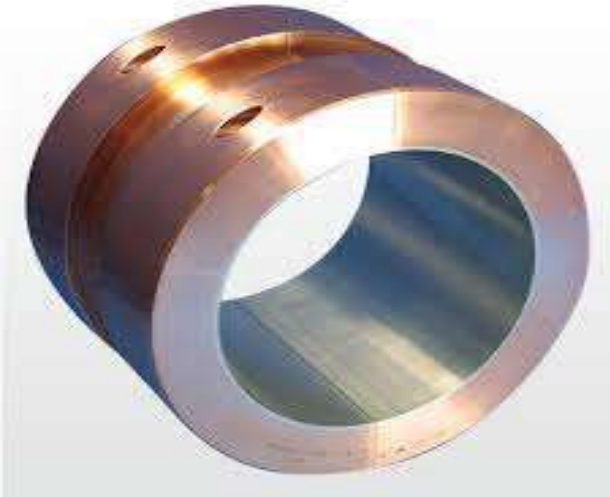


Figure I- 18 Figure :Paliers multilobés. **[14].**

I. 3.3.Types des paliers

Selon leurs diamètres les paliers lisses cylindriques sont divisés en trois types, les paliers infiniment courts, infiniment longs et les paliers de longueur finie **.**

I. 3.3.a. Palier court

Un palier est dit court lorsque le rapport (L/D) de la longueur au diamètre du palier est faible, de L/D ‹ 0,125.

Dans ce type de palier, on pose l'hypothèse d'un gradient de pression circonférentiel négligeable, ce qui simplifie considérablement les calculs.

I. 3.3.b. Palier infiniment long

Lorsque le rapport L/D de la longueur au diamètre de palier est grand, on peut négliger le débit axial. L'écoulement est donc purement circonférentiel. En pratique, ce calcul s'applique aux paliers tels que L/D › 4.

Dans ce type des paliers, on pose l'hypothèse d'un gradient de pression axial négligeable devant le gradient de pression circonférentiel.

I. 3.3.c. Palier de longueur finie

Dans le cas où le rapport L/D est compris entre(0.125 < 4), le palier est considéré de longueur finie. Les deux types de palier précédent constituent les configurations extrêmes, l'infiniment long et l'infiniment court le palier de longueur finie donne une configuration réelle du palier. Les résultats obtenus par ce type de palier sont plus réels que ceux des deux types précédents, car dans ce type de palier on ne tient pas compte des hypothèses simplificatrices précédentes.[5]

I. 3.4.Paliers lisses

Les paliers sont les composantes mécaniques conçus pour soutenir les arbres. Le mot *palier* est un nom générique qui désigne un montage mécanique destiné à accommoder le mouvement relatif entre une pièce en mouvement et un bâti ou un châssis de machine immobile. Le rôle des paliers est d'assurer le positionnement dans l'espace et de permettre le mouvement libre des arbres et des essieux en rotation ou en translation. En même temps, les paliers reprennent les charges du système et les transmettent à la partie fixe de la machine. Les paliers sont généralement utilisés pour monter des pièces rotatives sur des essieux fixes, comme par exemple les poulies, roues, engrenages, etc. La transmission des charges à la partie fixe de la machine se réalise par l'intermédiaire des surfaces en contact : la surface extérieure de l'axe supporté et la surface intérieure de l'alésage du palier utilisé. Les différents types de mouvement relatif des paliers sont illustrés à la (Figure I.17) Ces mouvements

peuvent être du type suivant : • Translation (palier linéaire communément appelé glissières); • Rotation (palier rotatif); • Translation et rotation (palier mixte).[7].

I. 3.5. Principe de fonctionnement du palier :

Le fonctionnement du palier repose sur le débit du film. Dans le cas de la lubrification hydrodynamique, la génération de la pression se fait par conservation du débit dans la portance et le frottement. Dans le cas d'un palier hydrodynamique, la portance recherchée et le frottement sont une conséquence. Pour que le fluide soit une interface efficace, il faut que le champ de pression soit suffisant pour équilibrer la charge normale en fonction de l'aire du contact disponible, mais aussi que l'épaisseur minimale du film soit supérieure aux éventuels défauts géométriques des surfaces. [8]

La figure si dessu (Fig. I.17) présente les trois phases que l'on observe lors de la mise en route d'un palier sous chargement.

(a): À l'arrêt, l'arbre et le coussinet sont en contact, la génératrice commune est opposée à la charge et la distance O1O2 est égale au jeu radial J.

(b): Au démarrage, l'arbre roule en glissement à l'intérieur de coussinet, le régime de lubrification est dit mixte, le lubrifiant est entrainé dans l'espace convergent formé par l'arbre et le coussinet.

(c): Au fonctionnement, Dés que la vitesse de rotation devient suffisante, il y a présence d'un champ de pression hydrodynamique qui supporte la charge P constante, le centre de l'arbre O1 occupe une position fixe à l'intérieur du coussinet. Si le tonseur de forces extérieur se réduit à une force unique P qu'agit dans les plans de la section médiane du palier. .[9]

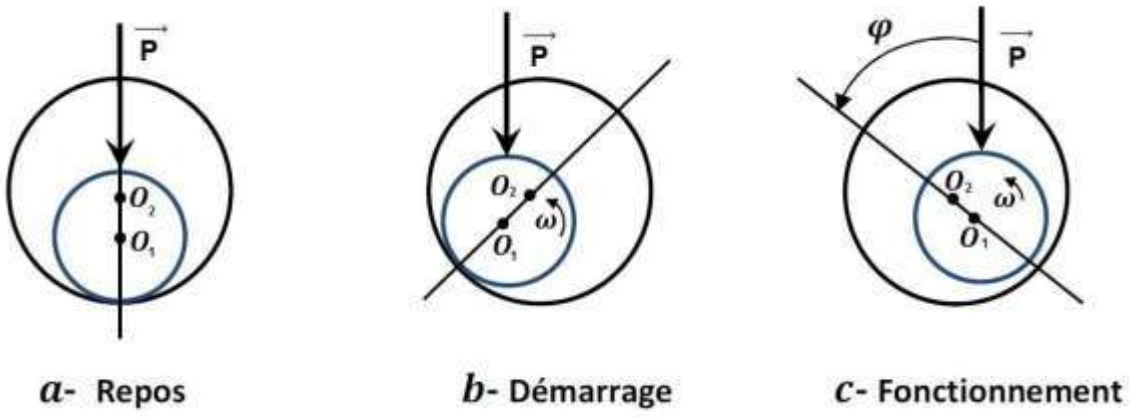


Figure I- 19 : Schématisation de fonctionnement d'un palier lisse.[9]

I. 4.Lubrification

I. 4.1. Définition :

Procédé par lequel la friction entre deux pièces en mouvement est réduite (introduction d'un fluide séparant les deux surfaces). [4]

I. 4.2. Fonctions du lubrifiant :

- ✓ Réduire la friction (frottement ou déformation),
- ✓ réduire l'usure des pièces .
- ✓ absorber / atténuer les chocs.
- ✓ réduire / contrôler la température.
- ✓ protéger de la corrosion.
- ✓ isoler les composantes de la contamination.
- ✓ nettoyer / enlever les contaminants. [4]

I. 4.3. Types de lubrification :

- ✓ Hydrodynamique : séparation de deux surfaces par un film relativement épais, par un mouvement dynamique de la pièce en mouvement.
- ✓ Hydrostatique : introduction de lubrifiant sous pression entre les surfaces en mouvement (source de pression).
- ✓ Elastohydrodynamique : semblable à hydrodynamique mais une des surfaces roule (roulement, dent profilée d'engrenage). [4]

I. 4.4. Rôles de la lubrification :

Les lubrifiants ont pour rôle de réduire les frottements entre pièces en mouvement, ou de diminuer la résistance passive de pièces fixes. Ils sont obtenus par raffinage des fractions lourdes du pétrole brut. Les lubrifiants peuvent être liquides ou fluides (huiles), consistants (graisses ou gel de silicone), ou solides (graphite, téflon). Les performances et caractéristiques diffèrent d'un lubrifiant à l'autre, leur seul point commun est qu'ils sont tous composés d'un

constituant principal appelé « base lubrifiante », qui représente 75 à 85% de l'huile ou d'une graisse et qui peut être d'origine pétrolière ou synthétique. [4]

I. 4.5. Les bases lubrifiantes :

Les bases minérales sont fabriquées à partir du pétrole brut. Elles sont de très loin les plus utilisées, aussi bien dans les applications automobiles qu'industrielles. Ce sont des mélanges d'hydrocarbures ayant subi de nombreuses opérations de raffinage. [4]

I. 4.6.Les différents régimes de lubrification

I. 4.6.a.La courbe de Stribeck :

Cette courbe a permis de déférence trois principaux mode de fonctionnement ou régime de lubrification d'un paliers. Ceux-ci sont identifiés en fonction du type d'interaction de contacte qui survient entre la surface du matériaux antifriction et la surface antagoniste.

- ✓ la region 1 est définie comme étant de lubrification limite .
- ✓ la région 2 correspond à un régime de lubrification dite mixte .
- ✓ la région 3 est dite : lubrification hydrodynamique. [4]

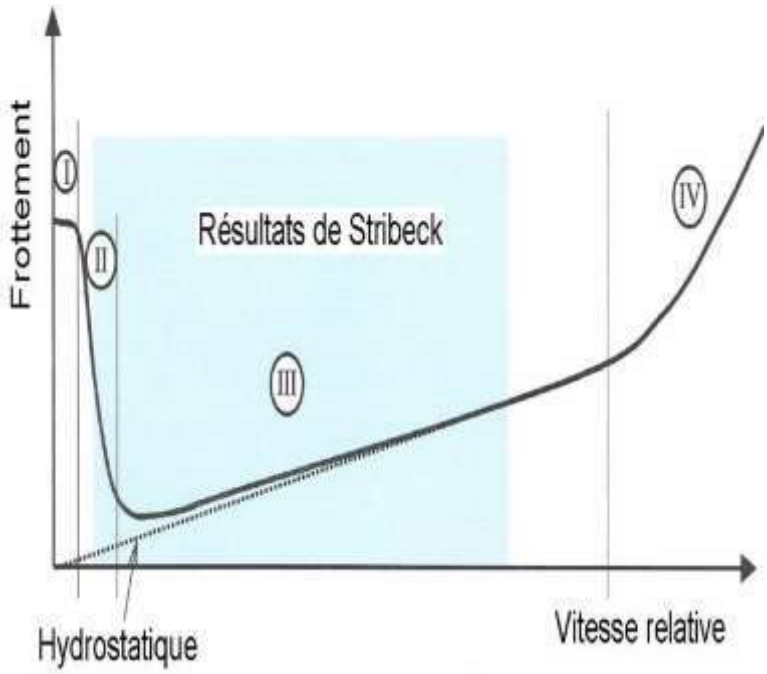


Figure I- 20 : Courbe de Stribeck**[4].**

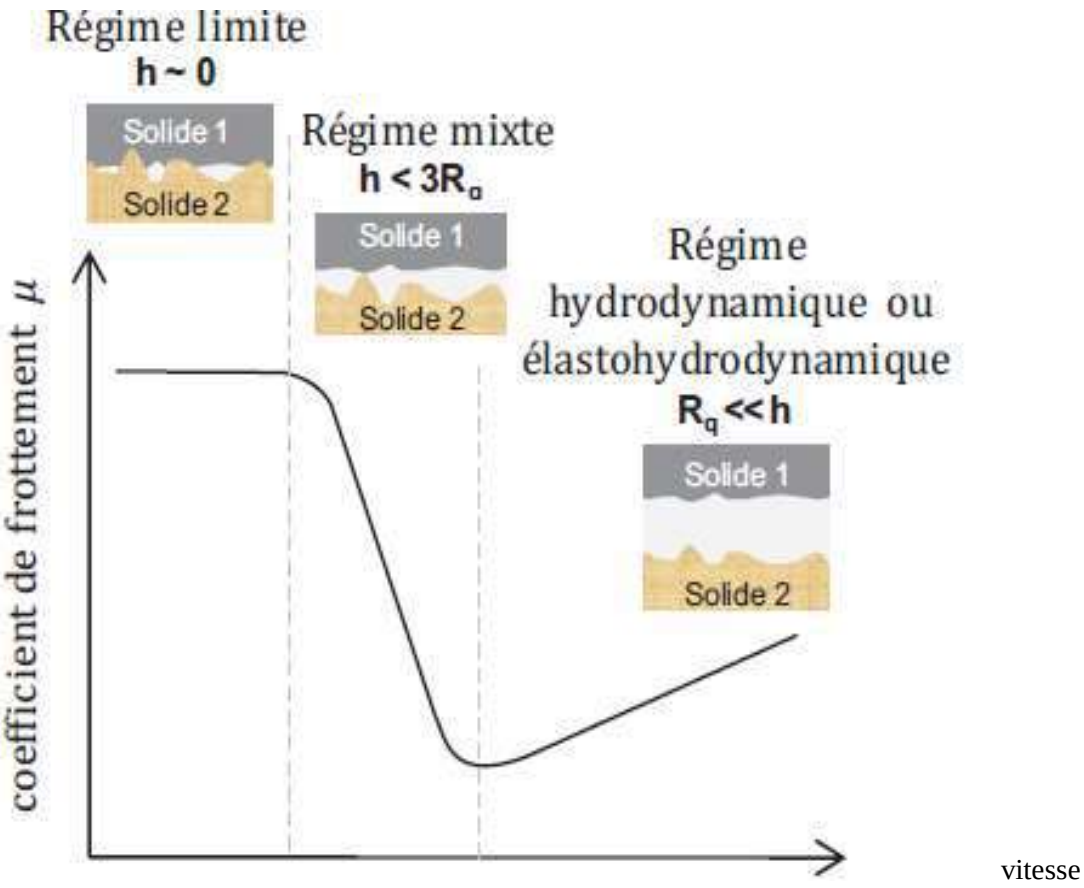


Figure I- 21 : les déférents type de lubrification[13]

I. 4.6.a.1.La lubrification limite

A faible vitesse et pour des pressions de contact modérées, la séparation des surfaces est essentiellement due aux molécules d'huile adsorbées. Ce type de lubrification qui correspond à la zone I de la courbe Stribeck est assuré par des molécules d'huile polaire qui « s'accrochent » aux surfaces (Figure I- 20). Les liaisons ne correspondent pas à de véritables réactions chimiques.En fait les molécules lubrifiantes forment soit des monocouches épilâmes de substances polaires (acides gras ou savons) qui adhèrent aux surfaces par adsorption ou par chimisorbsion soit des colloïdes compacts (carbonate de calcium amorphe par exemple) qui forme un film qui sépare les surfaces [1, 2]. Ce type de lubrification concerne directement la physico-chimie des surfaces et des lubrifiants. L'épaisseur des couches adsorbées de lubrifiant est de l'ordre de quelques centaines d'Angstrom (~ 10-8 m). Le frottement est relativement important, le coefficient de frottement est compris entre 0.05 et 0.15, selon la nature du lubrifiant et les matériaux qui forment le contact. Ce type de lubrification se rencontre dans les petits mécanismes comme les serrures, les machines à coudre …etc.[4]

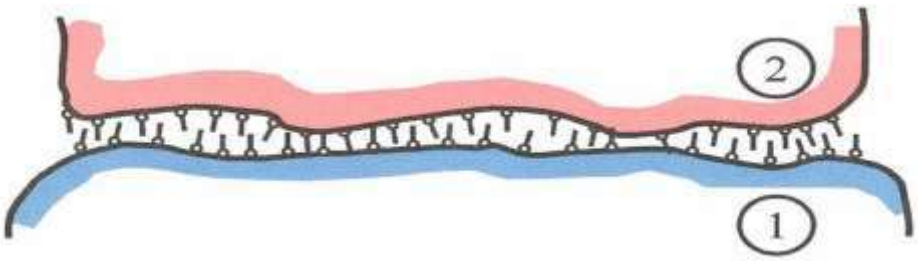


Figure I- 22 : Lubrification limite**[4].**

I. 4.6.a.2. La lubrification mixte

La zone II correspond à la lubrification mixte. Cette lubrification peut être considérée comme une transition entre la lubrification limite et la lubrification hydrodynamique qui correspond à la zone III de la courbe de Stribeck. Ce phénomène est due généralement à la rugosité des surfaces il existe des zones convergentes dans le film fluide qui permettent la génération de pression hydrodynamique. Ainsi une partie de la charge est supportée par des zones fluides et l'autre partie par des zones où le contact est en lubrification limite (Figure I-21). Dans les zones fluides, le frottement, dû au cisaillement du fluide, est directement proportionnel à la viscosité du lubrifiant. Généralement ce frottement est nettement plus faible

que le frottement existant en lubrification limite. Ainsi lorsque la vitesse augmente, les zones de lubrification hydrodynamique se développent et celles en lubrification limite se réduisent ce qui entraîne une diminution du frottement.[4]

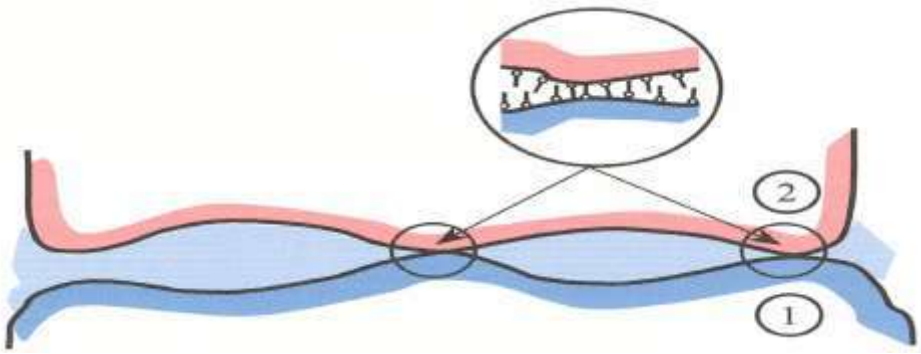


Figure I- 23 : Lubrification mixte**[4].**

I. 4.6.a.3 La lubrification hydrodynamique

La zone III est une représentation de la lubrification hydrodynamique. Le lubrifiant visqueux est entraîné dans le contact qui forme un espace convergent dans lequel se développe une pression hydrodynamique. Cette pression permet la séparation totale des surfaces antagonistes en contact et équilibre la charge [1, 2]. Dans le cas où le film lubrifiant est très faible, il est possible de tenir compte des rugosités des surfaces ce qui permet de prévoir le fonctionnement du mécanisme lorsqu'il existe encore quelques contacts entre les aspérités des surfaces. De façon générale en lubrification hydrodynamique, il existe une dissipation d'énergie dans le film qui se traduit par une force ou un couple de frottement. Cependant le coefficient de frottement n'est pas utilisé car selon les conditions de fonctionnement, il peut varier entre 10-3 et une valeur quasi infinie. On lui préfère soit le couple adimensionné, soit le nombre de frottement [3]

I. 4.6.a.4. La lubrification hydrodynamique non laminaire

Lorsque la vitesse du fluide dans le contact est très grande ou lorsque le fluide est très peu visqueux, ou pour des mécanismes de très grandes dimensions, l'écoulement dans le film lubrifiant change de régime, l'écoulement n'est plus décrit par l'équation de Reynolds en régime laminaire [1, 2]. Selon le type de mécanisme, des tourbillons se développent dans le

film lorsque le nombre de Taylor pour un palier ou le nombre de Reynolds pour une butée atteint une certaine valeur critique.[4]

I. 4.6.a.5. La lubrification hydrostatique

Dans les zones III et IV de la courbe de Stribeck les surfaces sont totalement séparées par un film fluide et la durée de vie du mécanisme peut dépasser les 50000 heures. Les seules avaries possibles sont dues à une érosion éventuelle liée aux impuretés en suspension dans le lubrifiant, aux phénomènes de cavitations qui peuvent exister dans le film sous charges dynamiques, ainsi que sous l'effet de températures trop élevées et à des piqûres par décharges électriques s'il existe une différence de potentiel entre les deux surfaces du contact.

Dans les zones I et II c'est-à-dire pour la lubrification limite et la lubrification mixte, il existe toujours une certaine usure abrasive et selon les conditions de fonctionnement il peut se produire du grippage. Si on veut une sécurité de fonctionnement importante avec une réduction du frottement, il est possible de séparer totalement les surfaces en injectant du fluide sous pression dans le contact [4]

I. 4.6.a.6. La lubrification élastohydrodynamique

La zone III correspond à la lubrification élastohydrodynamique pour laquelle le lubrifiant sépare totalement les surfaces, Figure1.5. La détermination des caractéristiques du mécanisme est obtenue par la résolution simultanée de l'équation de Reynolds dans le film et des équations de l'élasticité dans les matériaux formant le contact en tenant compte du comportement rhéologique du lubrifiant.

I. 4.6.b .Classification des Lubrifiants :

On peut distinguer les lubrifiants selon leur origine : animale, végétale, minérale ou synthétique, ou selon leur présentation, liquide, pâte ou solide.

I. 4.6.b.1. Lubrifiants d'origine animale :

Ils sont constitués essentiellement d'esters résultant de la combinaison d'acides gras avec la glycérine. Ce sont souvent des *« ancêtres »* mais certains entrent encore dans diverses compositions.

I. 4.6.b.2. Lubrifiants d'origine végétale :

Ce sont en général des combinaisons d'acides gras peu ou pas estérifiés. Certains sont encore largement utilisés en addition dans les huiles de pétrole ou dans les graisses

I. 4.6.b.3. Lubrifiants d'origine minérale : (Les huiles de base)

Les huiles minérales proviennent de la distillation du pétrole brut. D'un prix peu élevé, elles présentent des performances *« moyennes »*.

Le procédé d'obtention de ces huiles n'est pas parfait : les molécules obtenues sont de tailles différentes, ce qui nuit à l'homogénéité de l'huile et limite ses possibilités d'application. Des produits indésirables restent également dans cette huile de base *(paraffines, solvants légers…).*

Les huiles minérales sont, et de très loin, les plus utilisées aussi bien dans les applications automobiles qu'industrielles.

I. 4.6.c. Choix d'un lubrifiant

C'est une question très complexe et l'on peut dire qu'à chaque sorte de contact mécanique correspond une composition de lubrifiant optimale (ou moins mauvaise que les autres ...) S'il existe dans une machine 50 sortes de contacts différents, il faudrait idéalement utiliser 50 lubrifiants différents, et l'on devine facilement l'étendue des problèmes pratiques que cela pourrait poser. On ne lubrifie pas dans les mêmes conditions les organes d'une machine produite en très grande série, comme une automobile, et les roulements spéciaux d'une installation industrielle très spécifique, Dans le premier cas, on fera nécessairement appel à des lubrifiants disponibles dans le commerce, dans le second, on n'hésitera pas à créer une formule très spécifique et il est évident que le coût de l'opération n'est pas exactement celui d'une simple vidange. Le nombre des lubrifiants dans une automobile est beaucoup plus élevé qu'il n'y paraît généralement. L'huile destinée au moteur doit être changée périodiquement, car en dépit de tous les progrès de la chimie, on ne sait pas lui donner la même durée de vie que le moteur. Les huiles destinées à la boîte de vitesses et le cas échéant au pont arrière sont renouvelées beaucoup moins souvent et la tendance actuelle est de lubrifier ces deux éléments « à vie ». Les roulements des roues sont graissés à vie depuis quelques dizaines d'années, de même que ceux des multiples moteurs utilisés pour les essuie-glaces, les ventilateurs, les lève-vitres, etc., et généralement ils le sont avec des graisses différentes. D'autres produits lubrifiants très spécialisés peuvent être rencontrés dans les

compresseurs des systèmes de climatisation. En dressant l'inventaire, on arriverait facilement à plusieurs dizaines de produits.[4].

I. 4.7.Proprietes des huiles.

I. 4.7.a.Propriétés physiques. [10]

I. 4.7.a.1. Densité :

-Elle se mesure à 15 °C par rapport à l'eau à 4 °C, à l'aide d'un densimètre plongeant dans un tube à essais. Les valeurs courantes pour les huiles de pétrole varient de 0,85 à 0,95 et dépendent de l'origine des produits. La densité diminue avec la température selon des lois complexes, mais en première approximation on peut la diminuer de 0,00062 par kelvin.

- Certains lubrifiants synthétiques ont des densités bien plus élevées, jusqu'à 1,5. La comparaison de la densité d'une huile usagée avec celle de l'huile neuve permet de détecter d'éventuelles pollutions. [10]

I. 4.7.a.2.Couleur :

Pour les huiles de pétrole, elle varie généralement du blanc pur au rouge foncé en passant par le jaune citron et le jaune orange, on l'évalue par comparaison avec des verres étalons numérotés en colorations NPA (National Petroleum Association). La couleur foncée d'un lubrifiant usagé peut être un assez bon moyen d'apprécier son altération, de même qu'un aspect laiteux peut indiquer la présence d'eau. La présence d'additifs oblige à la prudence et ette propriété à beaucoup perdu de son intérêt aujourd'hui. [10]

I. 4.7.a.3. Chaleur massique :

Elle s'exprime en Joules par kilogramme fois kelvin (J/kg.K). Elle augmente avec la température, d'environ 20 % pour 100 °C, et diminue avec la densité. Aux environs de 100 °C, on peut prendre comme base 2 kJ/kg.K. [10]

I. 4.7.a.4. Conductivité thermique :

Elle définit le flux thermique passant à travers un corps sous l'effet d'un gradient thermique(en watts par mètre par kelvin). On peut prendre comme valeur moyenne pour les huiles minérales 0,14 W/m.K. [10]

I. 4.7.a.5. Viscosité hydrodynamique:

C'est une des propriétés capitales des huiles de graissage, qui conditionne leur emploi dans la majorité des cas. Plus grande est la viscosité d'un liquide, plus grande est la durée de son écoulement, par exemple. La notion de viscosité implique donc celle de mouvement. En fait, on peut dire que la viscosité est la résistance qu'oppose un fluide au glissement de ses molécules les unes sur les autres, autrement dit, sa résistance à la déformation. [10]

I. 4.7.a.6.Compressibilité :

Le module de compressibilité est de l'ordre de 6*105en régime isotherme, par conséquent la diminution de volume est d'environ 2 % à 350 bar et 4 % à 700 bars. Les huiles sont d'autant moins compressibles que la pression est plus forte, la viscosité plus faible et la température plus basse. [10]

I. 4.7.a.7.Point d'écoulement :

Suffisamment refroidies, toutes les huiles minérales s'épaississent jusqu'à prendre l'apparence de solides plus ou moins rigides. Il ne s'agit pas d'une congélation, laquelle n'a de sens que pour un corps pur passant de l'état liquide à l'état solide à température constante : on le sait, les huiles de graissage sont des mélanges.

I. 4.7.b .Propriétés chimiques.

I. 4.7.b.1.combustibilité, point d'éclair, point de feu :

À partir d'une certaine température, les constituants volatils de l'huile peuvent brûler au contact d'une flamme : c'est le point éclair.

Si on chauffe davantage, il arrive un moment où la combustion devient permanente : c'est le point de feu.

I. 4.7.b.2. température d'auto-inflammation :

C'est la température à partir de laquelle se produit une oxydation spontanée dans l'air (environ 400 °C). Cette température est nettement supérieure à celle du point d'éclair.

I. 4.7.b.3. Détergence, dispersivité :

Cela concerne surtout les huiles pour moteurs. Il faut éliminer les résidus de combustion qui se condensent à basse température et les produits de la dégradation de l'huile à haute température. La détergence et la dispersivité constituent en fait un ensemble de propriétés physicochimiques particulièrement difficiles à évaluer.

I. 4.7.b.4.Teneur en cendres :

On compare le résidu de la calcination de l'huile à la masse initiale. Pour une bonne huile minérale pure, on trouve en général une teneur en cendres variant de 0,001 à 0,05 %. Cette teneur peut être beaucoup plus élevée, et sa mesure devient alors compliquée, si l'huile contient des additifs organométalliques ou autres.

Une teneur en cendres élevée pose des problèmes dans les moteurs thermiques modernes car les résidus de combustion de l'huile tendent à se déposer dans les filtres à particules.

I. 4.7.b.5. Teneur en soufre :

Il n'y a normalement plus de soufre libre dans les lubrifiants après le raffinage, mais on en trouve souvent à l'état combiné dans des composés tels les mercaptans. On ajoute parfois du « soufre actif » sous forme d'additifs améliorant les propriétés anti-soudure ou anti-grippage. Si l'huile se décompose, et selon que l'on se trouve en milieu réducteur ou oxydant, on peut assister à un dégagement toujours malvenu de sulfure d'hydrogène ou de dioxyde de soufre.

I. 4.7.b.6. Teneur en eau :

L'eau est l'un des principaux ennemis des lubrifiants. Dans les environnements humides, lorsqu'un lubrifiant reçoit de l'eau directement ou par condensation de vapeur, ses

performances sont en général fortement diminuées. La sensibilité à l'eau est très variable selon le produit utilisé, relativement faible pour les glycols, beaucoup plus élevée pour les oléfines. Une teneur en eau trop élevée est un sérieux signal d'alerte avant une prochaine défaillance du mécanisme concerné. [10]

I. 5.Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes du développement de la tribologie et les types des paliers.

et en fin de ce chapitre on a présentée la classification des types lubrifications et lubrifiants.

II.1. Introduction :

Pour étudier la déformation d'un palier circulaire sous l'effet du champ de pression hydrodynamique, il est nécessaire de connaitre les équations de base qui gouvernent le problème de lubrification.

Dans ce chapitre on présentera l'équation de base de lubrification hydrodynamique, les hypothèses de Reynolds associés à ce problème et d'autre part l'équation de déformation élastique.

II.2.Equations général :

L'analyse hydrodynamique d'un contact lubrifie s'effectue à partir des équations qui décrivent le comportement des milieux continus et les équations du filme mince visqueux

Ceux-ci sont déduite de la théorie des milieux continus en tenant compte de quelques hypothèses propres au problèmes de la lubrification. Les hypothèses généralement adoptées pour la modélisation théorique de la lubrification sont les suivantes : [11]

- ✓ L'épaisseur du film est faible devant son étendue,
- ✓ la courbure des surfaces peut être négligée,
- ✓ le fluide est newtonien,
- ✓ les forces d'inertie et de pesanteur sont négligeables,
- ✓ l'écoulement est laminaire,
- ✓ le milieu est continu,
- ✓ le fluide adhère parfaitement aux parois.

II.2.1. Equation de Reynolds

L'équation de lubrification de Reynolds peut être déduite des équations de la mécanique des milieux continus et la loi de comportement de fluides newtoniens, en tenant compte de la forme particulière du film lubrifiant, pour lequel l'épaisseur est très faible devant la largeur et la longueur du contact.

Elle est traduit la loi de concentration du débit dans le contact [11]

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial z}\right)$$
$$=6(U_1-U_2)\frac{\partial h}{\partial x}+6(W_1-W_2)\frac{\partial h}{\partial z}+6h\frac{\partial}{\partial x}(U_1+U_2)+6h\frac{\partial}{\partial z}(W_1+W_2)$$
$$+12V_2 \qquad (2.1)$$

où U_1 , U_2 , V_2 , W_1 , W_2 sont les vitesses des surfaces (1) et (2) selon les axes x, y, z ; h est l'épaisseur du film ; p est la pression hydrodynamique et μ est la viscosité du lubrifiant.

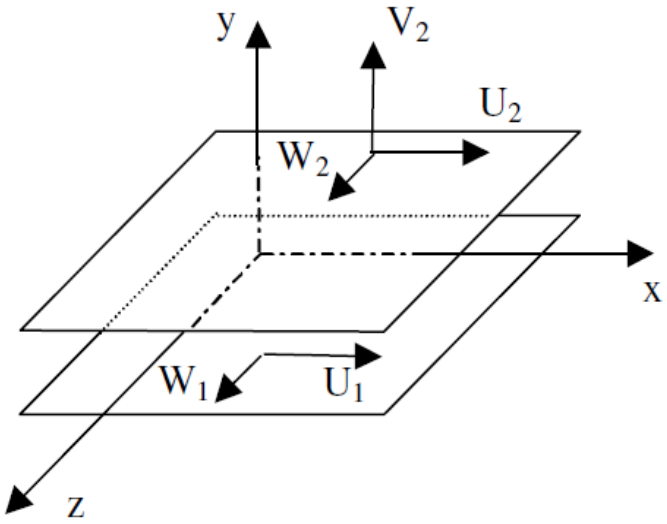


Figure II- 1 : repère cartésien [11].

La Figure II- 2 présente le repère utilisé et les vitesses des surfaces. Dans le cas d'un palier lise les vitesses (W_1),(W_2) sont égales à zéro et la vitesse (V_2) peut être exprimée par $V_2 = U_2\ \partial h/\partial x + \partial h/\partial t$. Si nous considérons le repère de la (Figure II- 3) où l'origine *O* est liée à l'arbre le long de Ox et au coussinet le long de Oy, alors l'équation de Reynolds devient :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial x}\right)=6U\frac{\partial h}{\partial x}+12\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (2.2)$$

Le palier développé peut être présenté comme dans la Figure II- 4

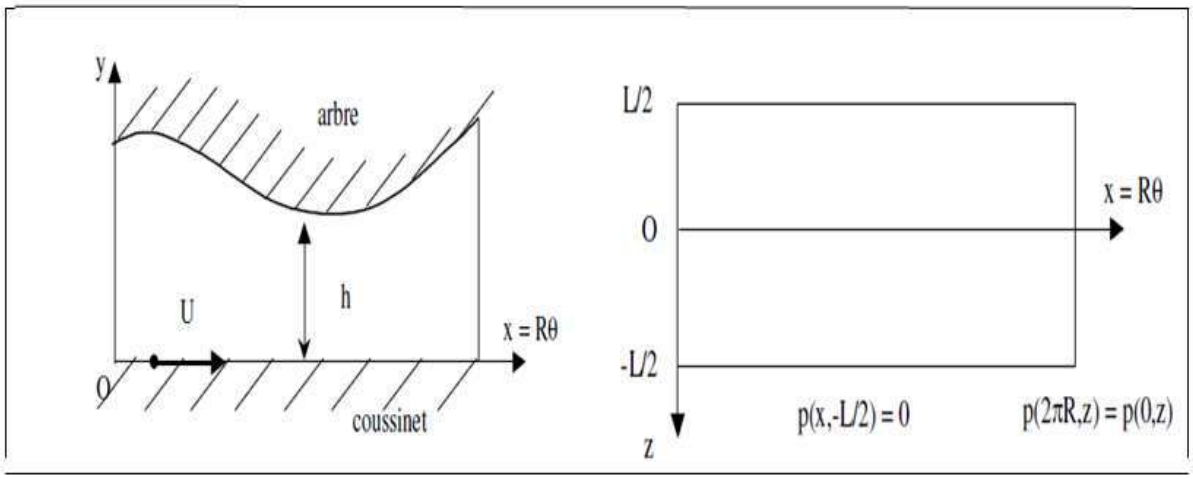


Figure II- 5: Palier développé [11]

II.2.2. Hypothèse de variation axiale de la pression

Pour diverses raisons une équation de Reynolds plus simple peut très bien convenir du point de vue de la précision. Ces motifs sont d'une part,

. Afin de simplifier l'équation de Reynolds, nous

Considérons l'hypothèse d'une variation parabolique de la pression dans la direction axiale. Ainsi, la pression a une variation de la forme :

$$p(x,z) = p_{max}(x)\left(1 - \frac{4z^2}{l^2}\right) \qquad (2.3)$$

où *p*max (*x*) est la pression dans le plan médian de la bielle. Cette Hypothèse à été introduite pour la première fois par Rhode et Li (1980) et conduit à des résultats d'une bonne précision pour un rapport L/D inférieur à 1/3. Si de plus nous considérons que l'épaisseur *h* et la viscosité μ ne varient pas selon Oz, étant seulement fonctions de *x*, l'équation de Reynolds devient :

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h^3}{\mu}\frac{\partial p}{\partial x}\right) - \frac{8h^3}{\mu l^2}\, p = 6U\frac{\partial h}{\partial x} + 12\frac{\partial h}{\partial t} \qquad (2.4)$$

où nous avons remplacé *p*max par p . Nous avons de cette manière une modélisation quasi unidimensionnelle des phénomènes hydrodynamiques [11].

II .2.3. Conditions aux limits

Les conditions aux limites utilisées pour la résolution de l'équation de Reynolds sont basées sur la séparation des zones actives et inactives. C'est dans la zone active que la pression monte et que l'équilibre avec la charge appliquée se réalise. La zone inactive sera

décrite et analysée en détail au paragraphe suivant. Elle est caractérisée par une pression nulle.

En conséquence, les conditions aux limites sur la valeur de la pression sont :

$p = 0$ dans la zone inactive,

$p > 0$ dans la zone active

La condition de Reynolds sur la dérivée de la pression à la frontière de rupture du film complet s'énonce comme suit :

$\frac{\partial p}{\partial n} = 0$ p où n est la normale à la frontière entre les zones active et inactive.

En général, le palier comporte une alimentation en lubrifiant. Cette alimentation peut être réalisée soit par un canal d'arrivée d'huile dans l'arbre, comme dans le cas des paliers de tête de bielle, soit par des trous percés dans l'épaisseur du coussinet, comme dans le cas des paliers de pied de bielle. Ce ne sont pas les seuls types d'alimentation des paliers, il peut y avoir des rainures circonférentielles totales ou partielles (paliers de tourillon), des rainures axiales ou tout simplement, l'alimentation peut s'effectuer pour des paliers courts par les bords du palier. Les conditions aux limites d'alimentation sont donc :

$a\ p = p$, avec $a\ p$ étant la pression d'alimentation en lubrifiant.

Il ne faut pas oublier que pour un palier développé $p(0, z) = p(2\pi R, z)$.[11]

II.2.4. Equation de l'épaisseur du film

Pour un palier rigide comme celui de la Figure II-3 l'épaisseur du film est définie par une équation géométrique :

$$h_0(\theta) = C - e_x cos(\theta) - e_y sin(\theta) \qquad (2.5)$$

où C = Rc − Ra est le jeu radial, ex , ey les coordonnées du centre de l'arbre par rapport au centre de l'alésage et q la position angulaire du point considéré.

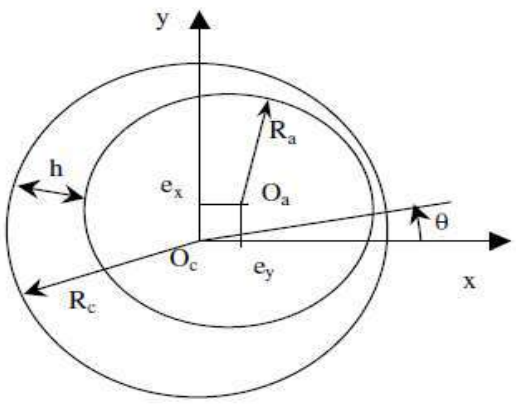


Figure II- 6 : Palier circulaire

Pour des pressions importantes, les surfaces ne sont plus rigides et les paliers peuvent être considérés élastiques. Pour un palier élastique l'épaisseur de film tient compte de la déformation des surfaces sous l'effet de la pression hydrodynamique. L'épaisseur totale de film s'écrit dans ce cas :

$$h(z,\theta) = h_0(\theta) + h_e(z,\theta) \qquad (2.6)$$

L'épaisseur élastique *he* (z,q) *e* est fonction de la pression dans tout le film. C'est pour cela que *he* (z,q) *e* dépend de la coordonnée axiale. Etant donné le fait que nous voulons appliquer cette théorie aux paliers de bielles nous ne prenons pas en compte les désalignements. C'est la raison pour laquelle l'épaisseur nominale ne dépend pas de *z* [11].

II.2.5. Les equations d'équilibre :

Le système doit être en équilibre à chaque moment du cycle. Cet équilibre peut s'écrire vectoriellement en prenant en compte les forces extérieures agissant sur le palier, la force résultante des actions de la pression hydrodynamique et les forces d'inertie des solides en mouvement. Dans le cas d'un palier, les forces extérieures agissant sur la bielle sont constituées par les la résultante de la pression des gaz de combustion dans les cylindres et des forces d'inertie des pièces en mouvement. Dans le système d'axes de la Figure II-3 cet équilibre se traduit par deux équations :

$$\left\{\int_s p\cos\theta \; d\theta = F_x\right.$$

$$\left\{\int_s p\sin\theta \; d\theta = F_y\right.$$

avec Fx , Fy les résultantes suivant Ox et Oy des forces extérieures et des forces d'accélérations [11].

II.3.Analyse de Fourier.

II.3.1.Définition.

On appelle série trigonométrique ou série de Fourier la fonction de la forme

$$a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} = (a_n \cos nx \; + b_n \sin nx \,) \qquad (2.7)$$

Les constantes a_0, a_n et b_n($n = 1, 2 \ldots$) sont les coefficients de la série trigonométrique. Si la série (2.1) converge, sa somme est une fonction périodique f (x) de période 2π :

$$f(x) = f(x + 2\pi). \qquad \textbf{(2.8)}$$

Comme indiqué dans l'introduction, on suppose le problème suivant : étant une fonction périodique f (x) de période 2π, on se demande pour quelles conditions imposées `a f (x), il existe une série trigonométrique convergeant vers f (x) .[10]

II.3.2.Détermination des coefficients de la série au moyen des formules de Fourier.

On suppose que la fonction f (x), périodique et de période 2π, peut être présentée par une série trigonométrique convergeant vers f (x) dans l'intervalle $(-\pi, \pi)$, c'est-`a-dire que l'on peut écrire.[10]

$$f(x) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos nx + b_n \sin nx) \qquad \textbf{(2.9)}$$

La série (2.1) (qui figure au second membre de l'équation (2.9)) est appelée série de Fourier de f (x). Les coefficients a_n et b_n sont les coefficients de Fourier de f (x).

II .3.2.a.Calcul de a_0

On suppose que la série (2.1) (second membre de l'équation (2.3)) peut être intégrée terme à terme. C'est par exemple le cas si la série numérique formée avec les coefficients de la série trigonométrique converge absolument, c'est-`a-dire si la série numérique positive suivante converge .[10]

$$\left|\frac{a_0}{2}\right| + |a_1| + |b_1| + \cdots + |a_n| + |b_n| + \cdots$$

La série (2.1) est alors majoral et peut être intégrée terme à terme. On en déduit l'égalité.

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\,dx = \pi a_0, \qquad \textbf{(2.10)}$$

qui fournit une expression de a_0.

$$a_0 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\,dx \qquad \textbf{(2.11)}$$

II .3.2.b.l'ortogonalité des terms de Fourier

Pour obtenir les autres coefficients de la série, on calcule d'abord les intégrales auxiliaires suivantes, dans lesquelles n et k sont des entiers strictement positifs : .[10]

$$\int_{-\pi}^{\pi} \cos nx \cos kx \, dx = \begin{cases} 0, & n \neq k \\ \pi, & n = k \end{cases}$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} \cos nx \sin kx \, dx = 0 \qquad \textbf{(2.12)}$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} \sin nx \sin kx \, dx = \begin{cases} 0, & n \neq k \\ \pi, & n = k \end{cases}$$

Pour déterminer a_k pour k > 0 donné, on multiplie les deux membres de l'égalité (2.9) par cos kx

$$f(x)\cos kx = \frac{a_0}{2}\cos kx + \sum_{n=1}^{\infty}(a_0 \cos nx \cos kx + b_n \sin nx \cos kx)$$

(2.13)

La série du second membre est major able et peut donc être intégrée terme à terme. On obtient ainsi l'égalité.

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\cos kx dx = \pi a_k \qquad \textbf{(2.14)}$$

qui fournit une expression de a_k. :

$$a_k = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x) cosKxdx \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (\mathbf{2.15}).$$

De même, en multipliant les deux membres de l'Egalite (2.3) par sin kx et en intégrant sur x, on obtient l'égalité.

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\sin kx dx = \pi b_k \qquad \textbf{(2.16)}$$

qui fournit une expression de b_k.

$$b_k = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x)sinKxdx \qquad (\mathbf{2.17})$$

II.3.3.Séries de Fourier des fonctions paires ou impaires :

On considère une fonction f (x) définie sur l'intervalle (−π, π). Cette fonction est paire si :

f (x) = f (−x). **(2.18)**

Elle est impaire si :

f (x) = −f (−x). **(2.19)**

Toute fonction peut être écrite comme la somme d'une fonction paire et d'une fonction impaire.

Les intégrales sur des intervalles symétriques de fonctions de parité définie peuvent être simplifiées. On a en effet, si f est paire. .[10]

$$\int_{-\pi}^{\pi} f\ (x)dx\ = 2\int_{-\pi}^{\pi} f\ (x)dx\ . \qquad \mathbf{(2.20)}$$

Et, si f est impaire :

$$\int_{-\pi}^{\pi} f\ (x)dx\ = 0. \qquad \mathbf{(2.21)}$$

II.3.3.a.Fonction pair : série de Fourier cosinus.

Si f (x) est paire, f (x) sin kx est impaire et f (x) cos kx est paire. Par suite, on

$$a_{0=}\ \frac{2}{\pi}\int_{0}^{\pi} f\ (x)dx \qquad \mathbf{(2.22)}$$

$$a_k = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} f\ (x)\cos kx dx \qquad \textbf{(2.23)}$$

$$b_k = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f\ (x)\sin kx dx\ = 0. \qquad \textbf{(2.24)}$$

Le développement en série de Fourier d'une fonction paire ne contient que des cosinus (c'est le cas de la fonction de l'exemple 2). On dit alors que l'on a une série de Fourier cosinus. .[10]

II .3.3.b.Fonction impair : série de Fourier sinus.

Si f (x) est impaire, f (x) sin kx est paire et f (x) cos kx est impaire. Par suite on a :

$$a_0 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f\ (x)dx\ = 0. \qquad \textbf{(2.25)}$$

$$b_0 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f\ (x)\cos kx dx\ = 0. \qquad \textbf{(2.26)}$$

$$b_k\ = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f\ (x)\sin kx dx\ = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} f\ (x)\sin kx dx\ . \qquad \textbf{(2.27)}$$

Le développement en série de Fourier d'une fonction impaire ne contient que des. sinus (c'est le cas des fonctions des exemples 1 et 3). C'est une série de Fourier sinus. .[10]

II .4.Conclusion:

La résolution de ce problème est basée essentiellement sur la décomposition d'un champs de pression engendré dans le palier a une somme des fonctions trigonométriques selon l'analyse de Fourier afin de transformer un problème tridimensionnel (3D) a une séries des problèmes bidimensionnel (2D).

III.1. introduction :

Dans ce jour l'étude numérique comme une simulation très réal est très importante et économique pour résoudre les problèmes technologiques.

Dans ce chapitre, nous représentons un logiciel numérique connu par le nom ANSYS, qui est parmi les premiers éditeurs mondiaux dans le domaine du calcul par éléments finis,

Les outils proposés permettent de résoudre les problèmes de validation produits de manière efficace et d'optimiser le processus de conception (gain de temps).

Aussi,nous allons présenté le logiciel MATLAB utilisé pour la programmation du calcul de déformation.

III.2. Présentation du logiciel

.2.1. Définition de logiciel III:

ANSYS, est un éditeur de logiciels spécialisé en simulation numérique crée en 1970 à Canonsburg. L'entreprise a son siège à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis.

Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. La société possède de nombreuses filiales à travers le monde, notamment en Europe et en Asie[6].

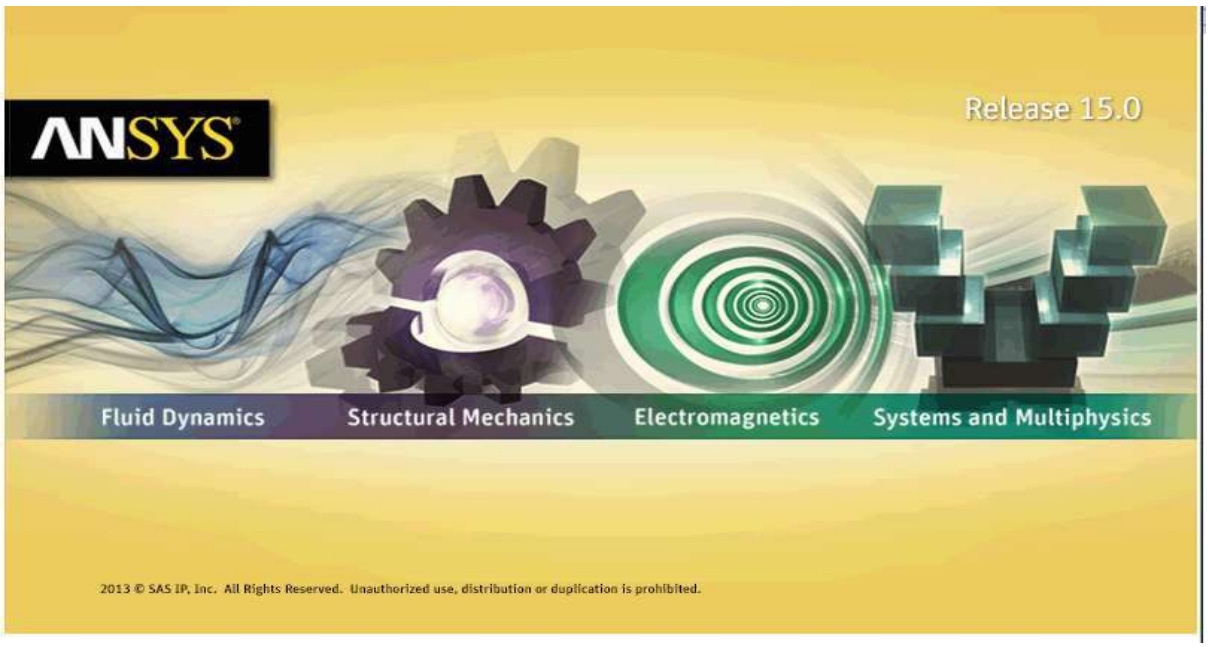


Figure III- 1: Photographe représentera le symbole de logiciel ANSYS.

III.2.2. Aspects techniques :

III.2.2.1. principaux produits : [8]

ANSYS Structural : Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont :

- ✓ l'analyse statique
- ✓ l'analyse modale
- ✓ l'analyse harmonique (réponse forcée)
- ✓ l'analyse temporelle
- ✓ la gestion de différentes situations non-linéaires (contacts, plasticité matériaux, grands déplacements ou grandes déformations).

ANSYS Mechanical : Ce produit dispose des mêmes capacités qu'ANSYS structural, en y ajoutant notamment un solveur thermique, avec modélisation du rayonnement.

ANSYS CFX et **Fluent** : Ces deux logiciels permettent d'effectuer des simulations en matière de mécanique des fluides. Fluent est un solveur très utilisé dans l'industrie et la R&D à travers le monde. Il est souvent considéré comme une référence dans le domaine de la modélisation fluide.

ANSYS AUTODYN et **ANSYS LS-DYNA** : Ces logiciels possèdent des solveurs utilisant les formulations explicites des équations à résoudre, contrairement aux produits précédemment cités. Leur domaine d'application est réservé aux modélisations mettant en jeu des situations mécaniques aux très larges déformations.

ANSYS Electromagnetics et **Ansoft** : Ce produit permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques.

ANSYS Multiphysics : Ce produit rassemble l'ensemble des capacités d'ANSYS en matière de simulation numérique implicite.

III.2.2.2. Environnements logiciels : [5]

Deux environnements logiciels permettent de mettre en oeuvre le logiciel ANSYS :

ANSYS Classic : Chronologiquement, c'est la première solution logicielle développée par le constructeur. Elle est destinée à la construction de modèles éléments

finis à la géométrie simple, facilement constructible à l'aide d'opérations basiques. À partir de cet environnement, l'utilisateur construit directement un modèle éléments finis en utilisant le langage de script APDL *(ANSYS Parametric Design Language*). ANSYS classic est donc destiné à des utilisateurs compétents dans le domaine de la simulation numérique.

ANSYS Workbench : Cette plate-forme propose une approche différente dans la construction d'un modèle en réutilisant le code ANSYS initial. Elle est particulièrement adaptée au traitement de cas à la géométrie complexe (nombreux corps de pièces) et aux utilisateurs non confirmés dans le domaine du calcul. Dans cet environnement, l'utilisateur travaille essentiellement sur une géométrie et non plus sur le modèle lui-même. La plate forme est donc chargée de convertir les requêtes entrées par l'utilisateur en code ANSYS avant de lancer la résolution. Le modèle éléments finis généré reste néanmoins manipulable en insérant des commandes propres au code ANSYS.

III.3. Méthode de Calcul :

Dans ce projet, nous utilisons ANSYS Mecanical APDL (classique) pour résoudre le problème des paliers hydrodynamique. Ceci est un petit exemple pour utiliser le programme et certaines des étapes importantes qui nous suive. Premièrement, ouvrir le logiciel de l'ANSYS APDL (la version ANSYS 12.1 a été utilisée pour ce projet) montrez-nous une fenêtre (Fig. contient plusieurs barre :

- ✓ ANSYS menu bar.
- ✓ ANSYS toolbar.
- ✓ ANSYS command prompt.
- ✓ ANSYS main menu.

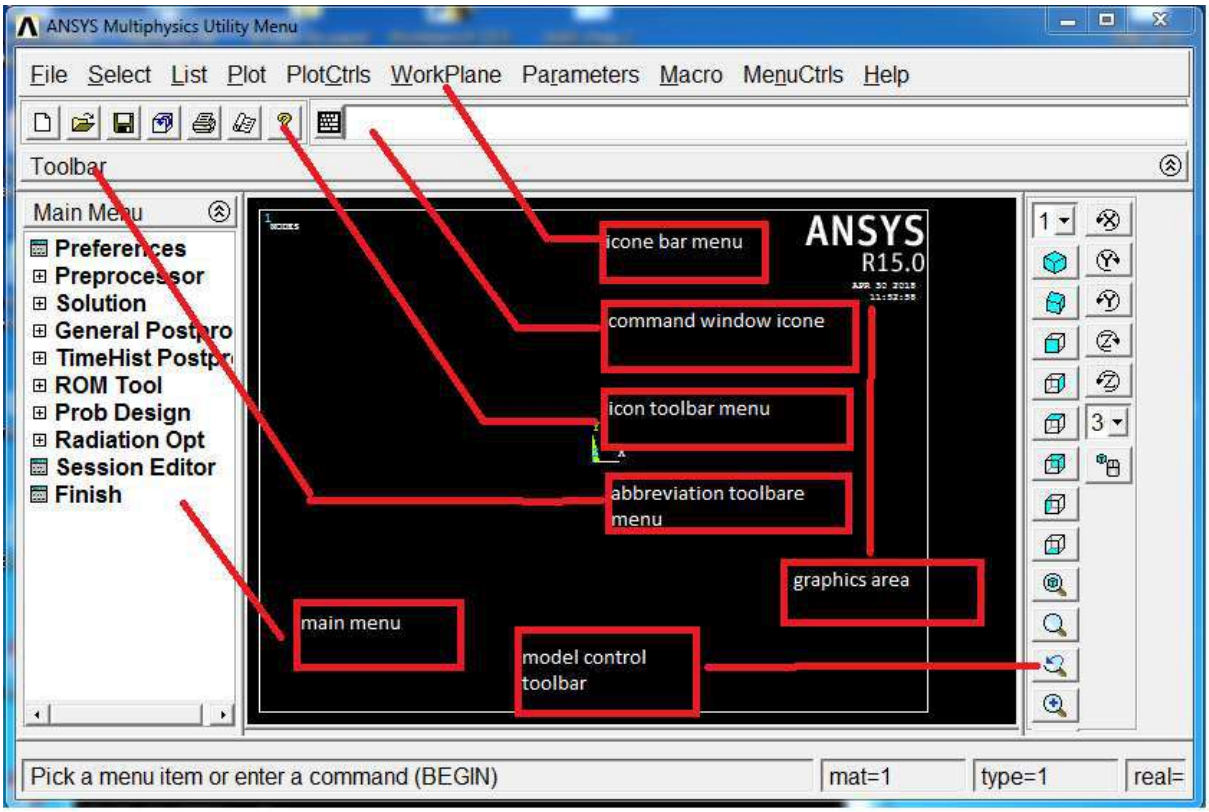


Figure III- 2: Photographe de ANSYS Mechanical APDL

III.3. 1.Exécutez l'analyse

Dans le menu bar clique **file> clear and start new** pour supprime tous qui est avant, après on a clique 2éme fois sur **file> change title** pou enregistre le travail.

Le projet contient l'étude de structure d'un palier donc nous clique sur **préférences** et choisir **structural** et presse **ok** (Figure III.3).

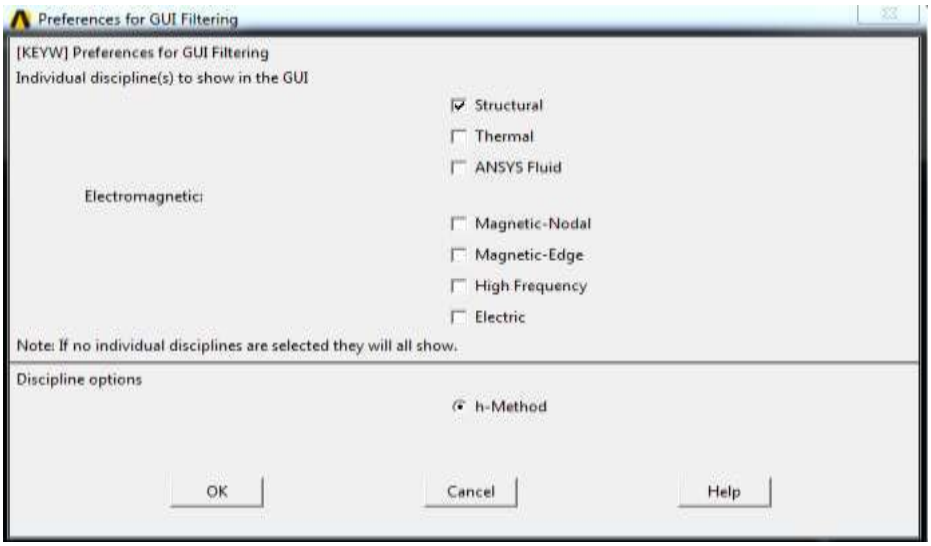


Figure III- 3 : Définie le type de solution.

Pour résoudre un problème dans l'ANSYS vous avez besoin au moins six étape :

III.3. 1.a. Définir l'élément type :

Cette étape très important dans ce programme pour savoir quel type d'élément à utiliser pour notre problème.

Dans la **main menu** choisir **preprocessor**, clique sur **Elemet Type> Add/Edit/Delete>Add**. la fenêtre suivante apparaît alors (Figure III.4)

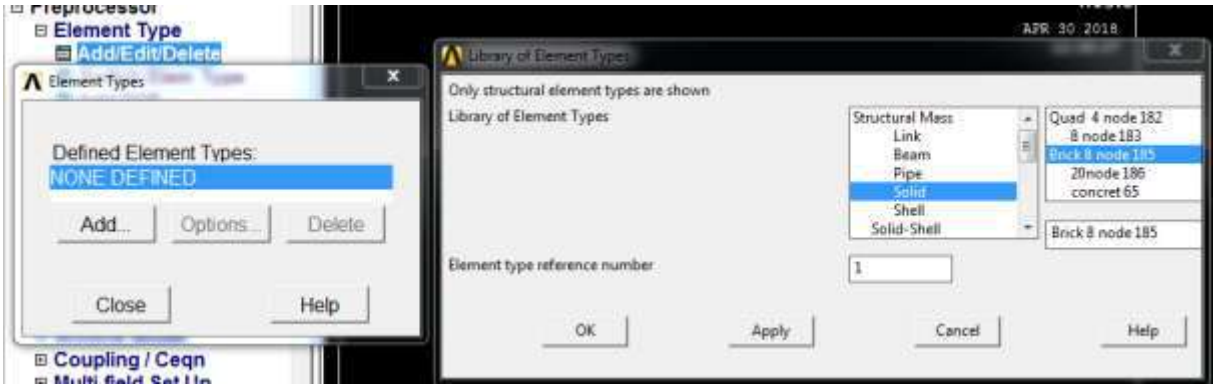


Figure III- 4: Définie le type de l'élément

Par exemple, je vais utiliser la **solid> Brick8 node185** pour un problème de 3D et clique sur ok

III.3.1.b. Les propriétés du matériau de l'élément :

Nous allons spécifier les propriétés des matériaux pour trouver real résultat. Dans la main menu aller à **preprocessor> Material props> Material Models.** la fenêtre suivante apparaît alors (Figure III.5) :

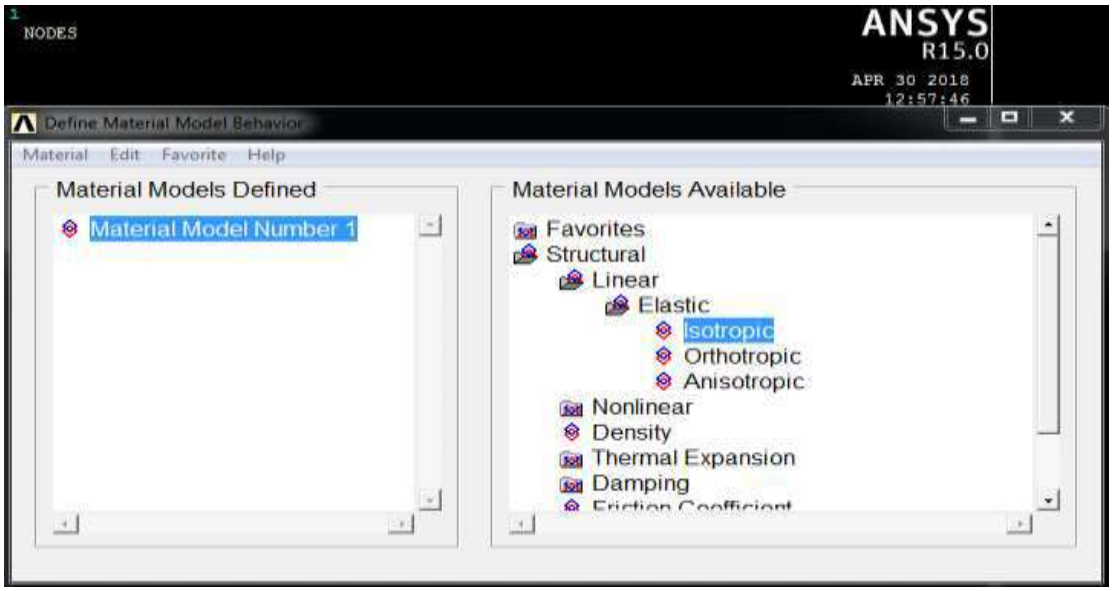


Figure III- 5: Définie les propriétés de élément.

Double clique sur **Structural> Linear> Elastic> Isotropic**, la fenêtre suivant apparaît pour enter les propriétés du matériau comme density, module de Young (EX) et le coefficient de puissance (PRXY). La figure III.6:

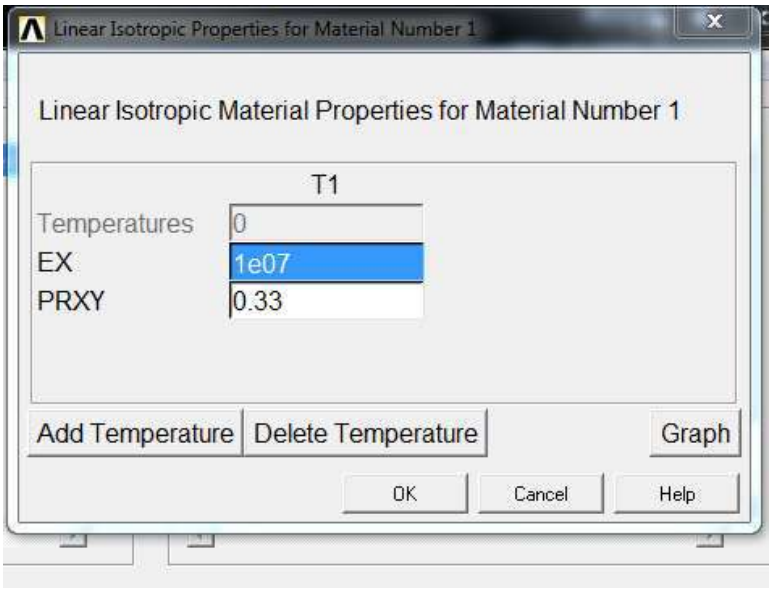


Figure III- 6: Entre le module de Young et coefficient de poissant.

III.3. 1.c.Construction de la géométrie.

Main Menu>Preprocessor>Modeling>Create>volume> Cylinder> Hollow cylinder,

Entrez dans la boite de dialogue les coordonnées des

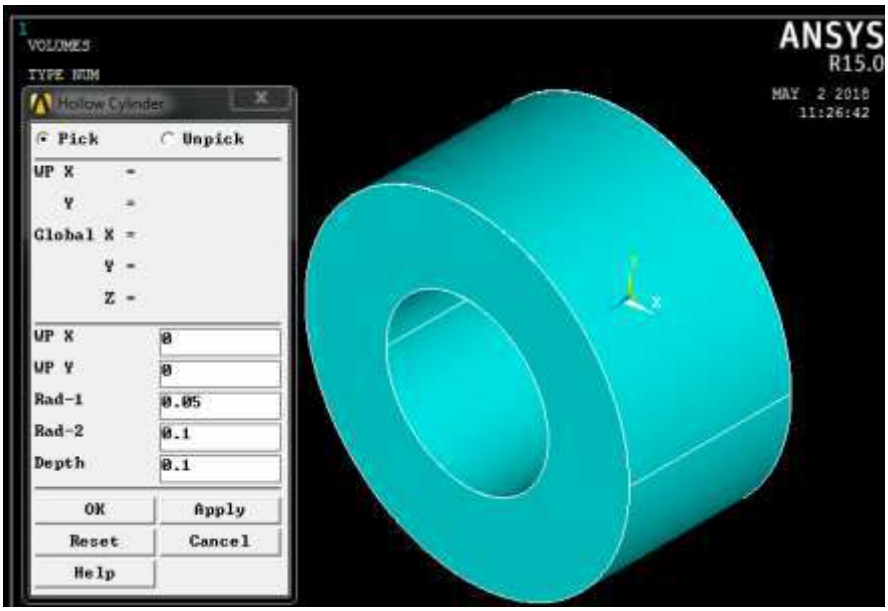


Figure III- 7 : Géométrie d'un palier lisse**.**

III.3. 1. D :Construction du maillage.

a)Main menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Tool> Lines(set) .

Sélectionner les lignes L01…L16 et imposer 05 éléments réguliers.

Sélectionner les lignes L17…L20 et imposer 07 éléments réguliers.

b)Main menu>Preprocessor>Meshing>Mesh Tool>Area(set)

Sélectionner les areas 1,2 et imposer 0.0166m.

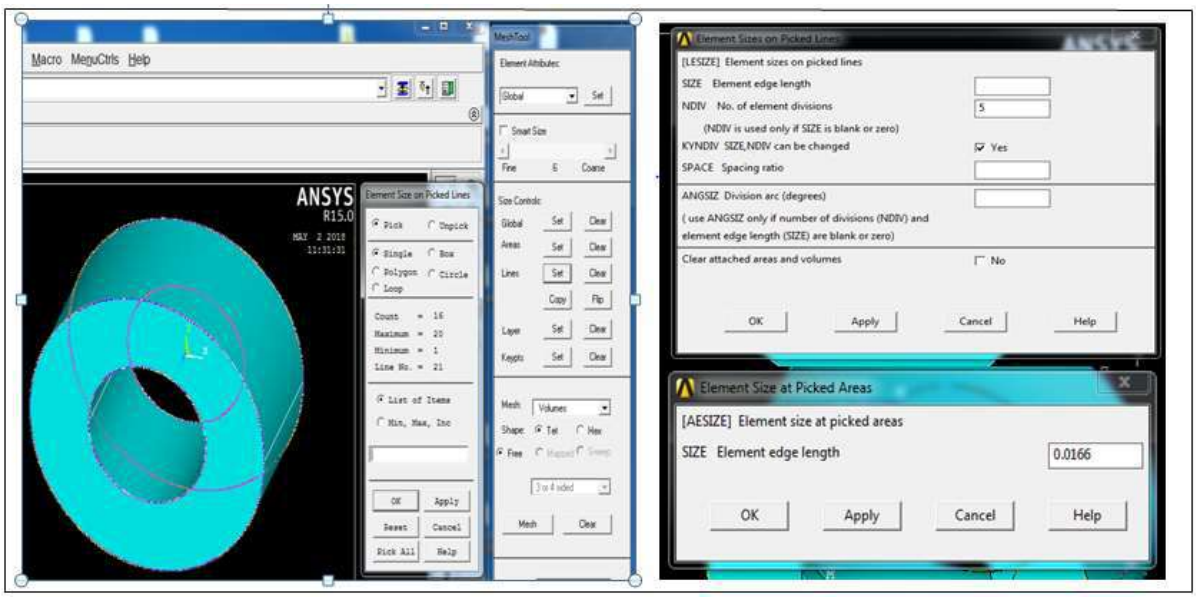


Figure III- 8 : Les étapes de maillage.

En peut choisie le maillage ce que nous voulons (Figure III.9).

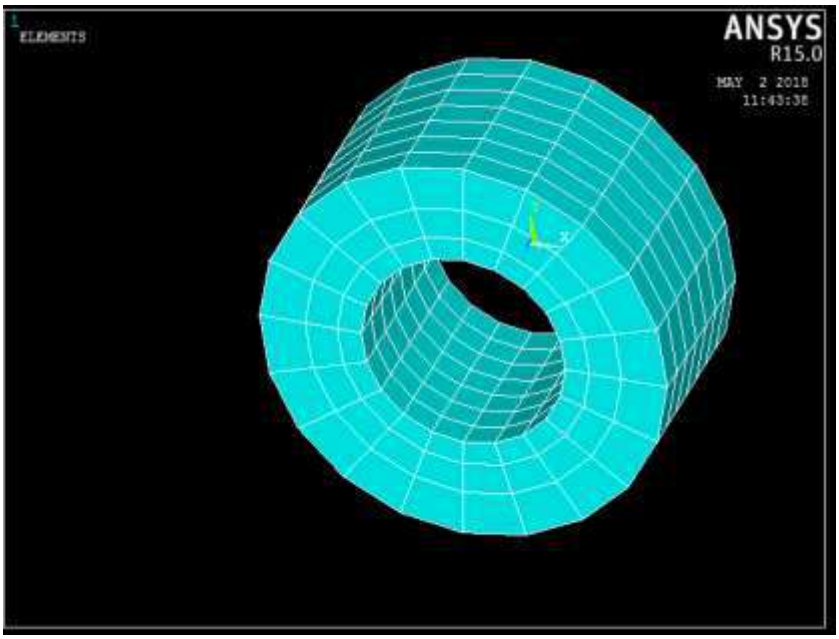


Figure III- 9 : Maillage brick d'élément de 3D.

III.3. 1. e.Conditions aux limites.

Pour faire applique les forces ou pression ou contrainte on a deux façons :

Preprocessor> Load> Define load> Apply> Stuctural après choisir soit déplacement, force, pression… etc.

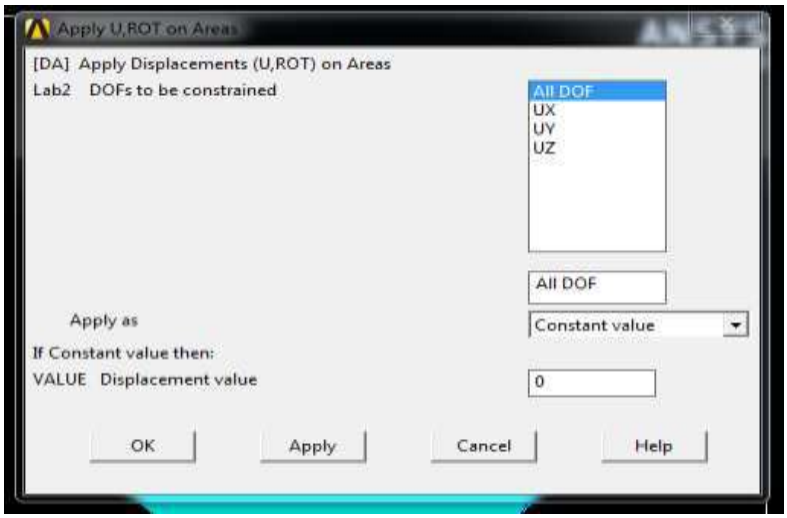


Figure III- 10 : Displacement

III.3. 1.f. La Solution :

La dernier étape, sur l'ANSYS est la solution et exploiter les résultats de problème. Alors nous allons clique sur : **Main Menu > Solution > Solve > Current LS**

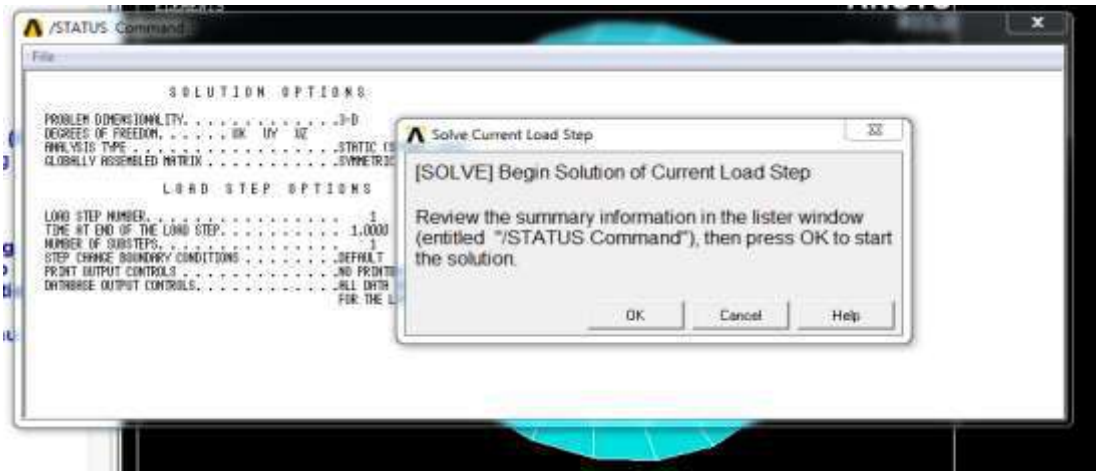


Figure III- 11 : solve.

III.4.Présentation de Matlab

III.4.1. Introduction – Historique

MATLAB est une abréviation de Matrix LABoratory. Écrit à l'origine, en Fortran, par C. Moler, MATLAB était destiné à faciliter l'accès au logiciel matriciel développé dans les projets LINPACK et EISPACK. La version actuelle, écrite en C par the MathWorks Inc., existe en version professionnelle et en version étudiant. Sa disponibilité est assurée sur plusieurs platesformes : Sun, Bull, HP, IBM, compatibles PC (DOS, Unix ou Windows), Macintoch, iMac et plusieurs machines parallèles. MATLAB est un environnement puissant, complet et facile à utiliser destiné au calcul scientifique. Il apporte aux ingénieurs, chercheurs et à tout scientifique un système interactif intégrant calcul numérique et visualisation. C'est un environnement performant, ouvert et programmable qui permet de remarquables gains de productivité et de créativité. MATLAB est un environnement complet, ouvert et extensible pour le calcul et la visualisation. Il dispose de plusieurs centaines (voire milliers, selon les versions et les modules optionnels autour du noyeau Matlab) de fonctions mathématiques, scientifiques et techniques. L'approche matricielle de MATLAB permet de traiter les données

sans aucune limitation de taille et de réaliser des calculs numériques et symboliques de façon fiable et rapide. Grâce aux fonctions graphiques de MATLAB, il devient très facile de modifier interactivement les différents paramètres des graphiques pour les adapter selon nos souhaits. L'approche ouverte de MATLAB permet de construire un outil sur mesure. On peut inspecter le code source et les algorithmes des bibliothèques de fonctions (Toolboxes), modifier des fonctions existantes et ajouter d'autres. MATLAB possède son propre langage, intuitif et naturel qui permet des gains de temps de CPU spectaculaires par rapport à des langages comme le C, le TurboPascal et le Fortran. Avec MATLAB, on peut faire des liaisons de façon dynamique, à des programmes C ou Fortran, échanger des données avec d'autres applications (via la DDE : MATLAB serveur ou client) ou utiliser MATLAB comme moteur d'analyse et de visualisation. MATLAB comprend aussi un ensemble d'outils spécifiques à des domaines, appelés Toolboxes (ou Boîtes à Outils). Indispensables à la plupart des utilisateurs, les Boîtes à Outils sont des collections de fonctions qui étendent l'environnement MATLAB pour résoudre des catégories spécifiques de problèmes. Les domaines couverts sont très variés et comprennent notamment le traitement du signal, l'automatique, l'identification de systèmes, les réseaux de neurones, la logique floue, le calcul de structure, les statistiques, etc. MATLAB fait également partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal. En complément du noyau de calcul MATLAB, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- ✓ une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes)
- ✓ Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation de systèmes dynamiques linéaires et non linéaires
- ✓ Des bibliothèques de blocs Simulink spécialisés (Blocksets)
- ✓ D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur,...
- ✓ Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

Quelles sont les particularités de MATLAB ? MATLAB permet le travail interactif soit en mode commande, soit en mode programmation ; tout en ayant toujours la possibilité de faire des visualisations graphiques. Considéré comme un des meilleurs langages de programmations (C ou Fortran), MATLAB possède les particularités suivantes par rapport à ces langages :

- ✓ la programmation facile,
- ✓ la continuité parmi les valeurs entières, réelles et complexes,

- ✓ la gamme étendue des nombres et leurs précisions,
- ✓ la bibliothèque mathématique très compréhensive,
- ✓ l'outil graphique qui inclus les fonctions d'interface graphique et les utilitaires,
- ✓ la possibilité de liaison avec les autres langages classiques de programmations (C ou Fortran).

Dans MATLAB, aucune déclaration n'est à effectuer sur les nombres. En effet, il n'existe pas de distinction entre les nombres entiers, les nombres réels, les nombres complexes et la simple ou double précision. Cette caractéristique rend le mode de programmation très facile et très rapide. En Fortran par exemple, une subroutine est presque nécessaire pour chaque variable simple ou double précision, entière, réelle ou complexe. Dans MATLAB, aucune nécessité n'est demandée pour la séparation de ces variables. La bibliothèque des fonctions mathématiques dans MATLAB donne des analyses mathématiques très simples. En effet, l'utilisateur peut exécuter dans le mode commande n'importe quelle fonction mathématique se trouvant dans la bibliothèque sans avoir à recourir à la programmation. Pour l'interface graphique, des représentations scientifiques et même artistiques des objets peuvent être créées sur l'écran en utilisant les expressions mathématiques. Les graphiques sur MATLAB sont simples et attirent l'attention des utilisateurs, vu les possibilités importantes offertes par ce logiciel. MATLAB peut-il s'en passer de la nécessité de Fortran ou du C ? La réponse est non. En effet, le Fortran ou le C sont des langages importants pour les calculs de haute performance qui nécessitent une grande mémoire et un temps de calcul très long. Sans compilateur, les calculs sur MATLAB sont relativement lents par rapport au Fortran ou au C si les programmes comportent des boucles. Il est donc conseillé d'éviter les boucles, surtout si celles-ci est grande. 2. Démarrage de MATLAB Pour lancer l'exécution de MATLAB :

- ✓ sous Windows, il faut cliquer sur Démarrage, ensuite Programme, ensuite MATLAB,
- ✓ sous d'autres systèmes, se référer au manuel d'installation. L'invite '>>' de MATLAB doit alors apparaître, à la suite duquel on entrera les commandes. La fonction "quit" permet de quitter MATLAB : >>quit

La commande "help" permet de donner l'aide sur un problème donné. Exemple : >> help cos COS Cosine. COS(X) is the cosine of the elements of X. Autres commandes :

- ✓ what : liste les fichiers *.m et *.mat dans le directory utilisé

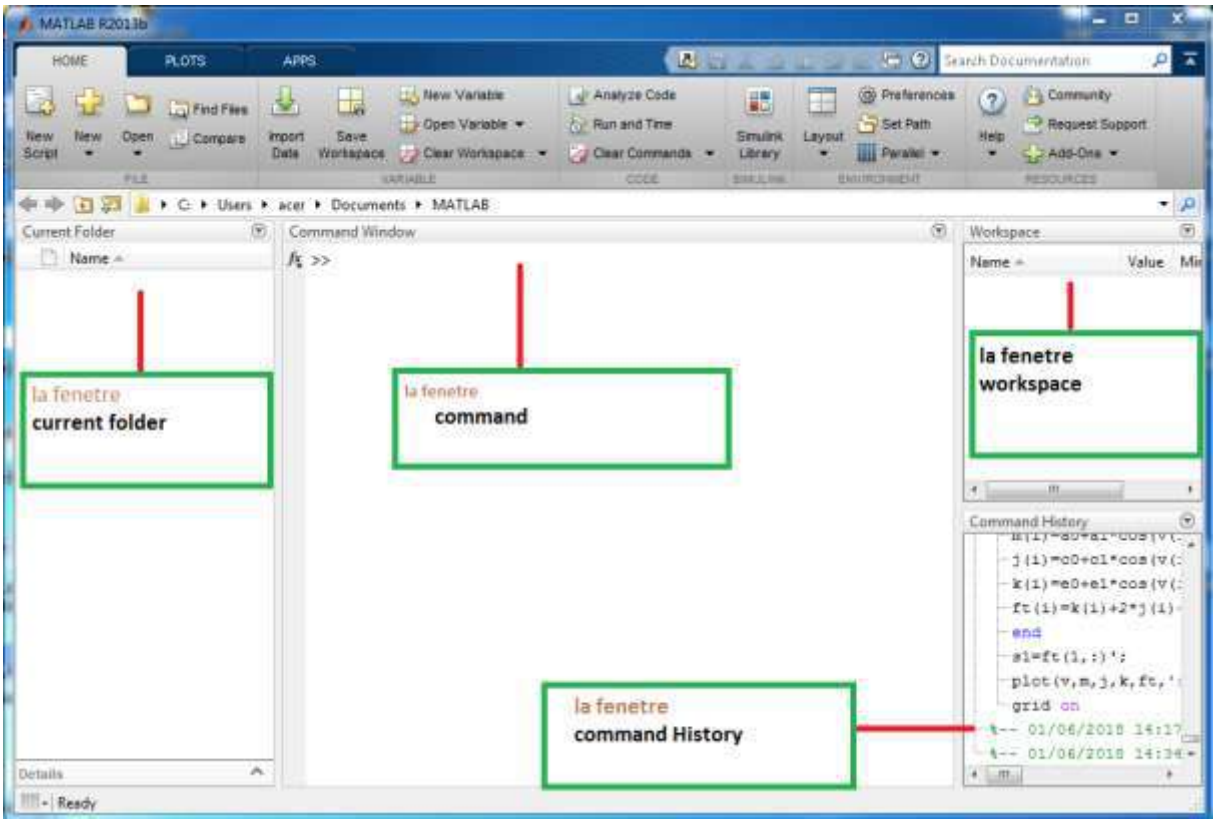


Figure III- 12 :l'environnement MATLAB (version 2013).

III.5.Example

```
clear all % effacer les variable du workspace
clc; %efacer la fenetre des commandes
format long;
v=linspace(0,2*pi,21); % 20 points entre 0 et 2*pi
l=length(v) ;% longeur du vecteur ' nombre des elemenst
%% les donnees
a0=[a0,a0',a0''];
a1=[a1,a1',a1''];
b1=[b1,b1',b1''] ;
a2=[a2,a2',a2''];
b2=[b2,b2',b2''];
a3=[a3,a3',a3''];
b3=[b3,b3',b3''];
```

```
%% la matrice f(3x21)
for j=1:3
for i=1:1
f(j,i)=a0(j)+a1(j)*cos(v(i))+b1(j)*sin(v(i))+a2(j)*cos(2*v(i))
+b2(j)*sin(2*v(i))+a3(j)*cos(3*v(i))+b3(j)*sin(3*v(i));
end
end
s1=f(1,:)';%% la premiere ligne de la matrice f transposé
s2=f(2,:)';
s3=f(3,:)';
for i=1:1
    ft=2*s1+2*s2+s3 ;
end
st=ft(1,:)';


%% le tracage
figure
%subplot(1,3,1);
plot(v,s1,'r');
xlabel('angle');
ylabel('deplacement');
%title('systeme 1')
hold on
%figure
%subplot(1,3,2)
%plot(v,s2,'b');
xlabel('angle');
ylabel('deplacement');
title('systeme 2')
hold on
%figure
%subplot(1,3,3);
%plot(v,s3,'k');
```

```
xlabel('angle');
ylabel('deplacement');
title('systeme 3')
hold on
plot('v,s1,'r:*',v,s2,'b:*',v,s3,'k:^')

grid on
plotyy(t,y,t,y,'plot','stem')
```

III.6.Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les moyens softwares utilisés dans notre travail ANSYS APDL pour le calcul de déformation direct sous l'effet d'un chargement axisymétrique unitaire et MATLAB en utilisant l'analyse de Fourier.

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons exercer la pression hydrodynamique sur un palier court, un palier infiniment long et un palier longueur finie, et on va présenter pour chaque cas son géométrie en utilisant le logiciel ANSYS APDL.

IV.2. Propriétés de matériaux :

Le matériau de coussinets est généralement l'Acier. Le tableau ci-dessous représente les caractéristiques physique et géométrique d'un palier en Acier:

tableauIV- 1 : Tableau de propriété du palier**.**

Acier	Valeur	Unité
Module de Young	**1e007**	**Pa**
Coefficient du poisson	**0.33**	**/**
Viscosité	**0.02**	**Pa.s**
Vitesse de rotation	**1000**	**tr/min**
Jeu radial	**0.0001**	**[m]**
Excentricité	**(2 E-005),(5 E-005)**	**[m]**

Ces valeurs restent constantes pour tous les exemples afin de faciliter la comparaison. Mais d'abord nous représentons un exemple d'étude de déformation d'un palier hydrodynamique soumis à un chargement axisymétrique.

Exemple : sur un chargement axisymétrique appliqué sur un palier hydrodynamique :

Pour un problème axisymétrique, on a besoin d'une structure de trois dimensions (3D), voir la figure ci-dessous :

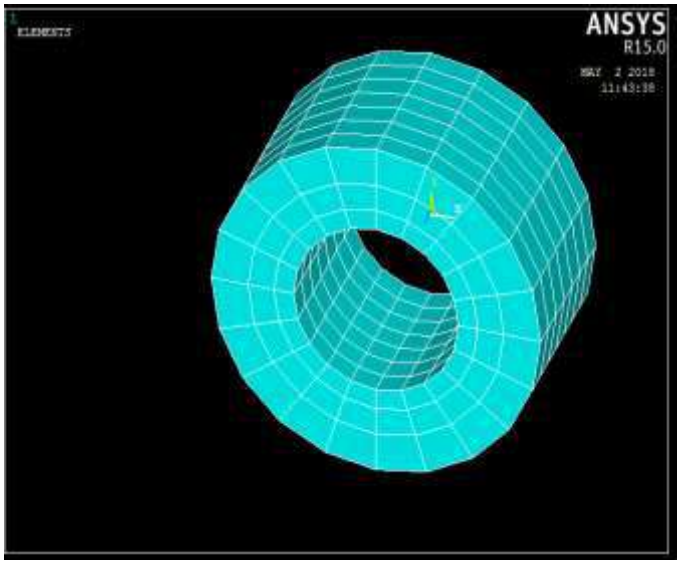


Figure IV- 1 :le maillage de problème axisymétrique 3D.

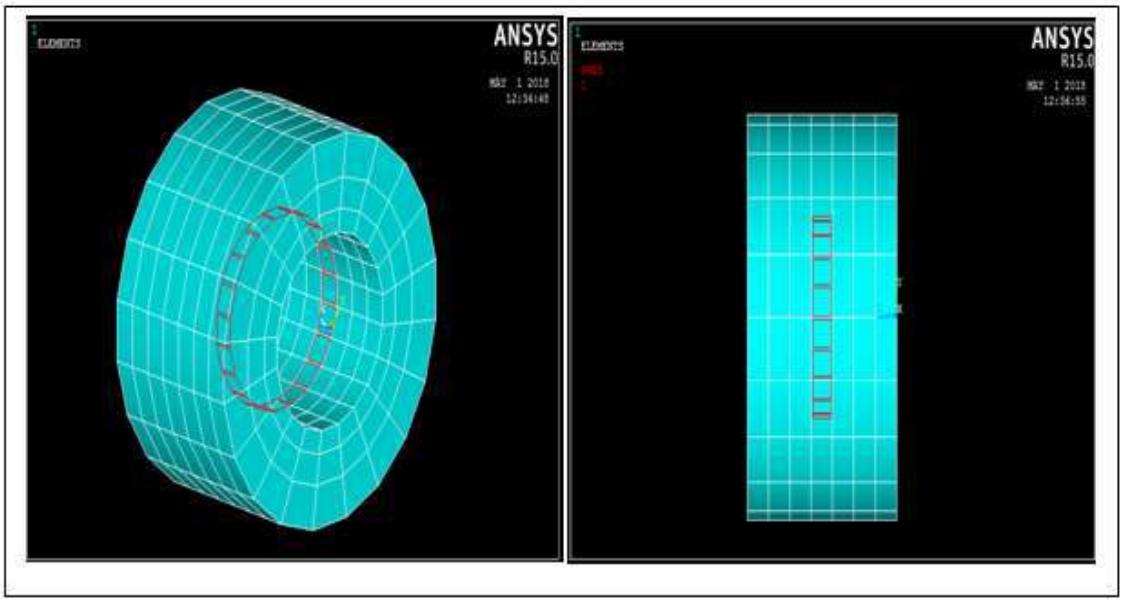


Figure IV- 2 :les conditions aux limites.

D'où on a obtenu la solution de déformation pour chaque noeud. le tableau suivant donne les valeurs de déplacement suivant la direction axial du palier

tableauIV- 2 : les valeurs de déplacement suivant la direction axial du palier

Position des noeuds	déplacement (mm)
1	0.65994E-10
2	0.11227E-09
3	0.24993E-09
4	0.12358E-08
5	0.12358E-08
6	0.24993E-09
7	0.11227E-09
8	0.65994E-10

Le graphe représenter de déplacement axisymétrique du palier (L/D=1)

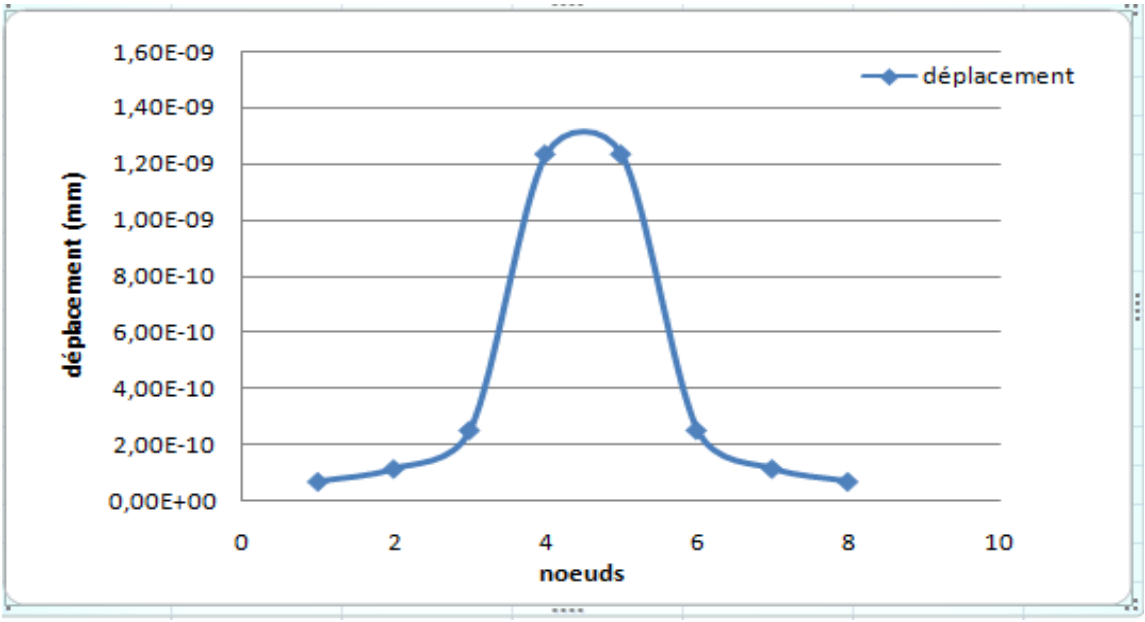


Figure IV- 3 : Déplacement axisymétrique du palier

On observe ici que comme le palier est homogène donc le déplacement axisymétrique maximal est au milieu. Def max=**0.12358E-08 (mm)**

On remarque un graphe qui est symétrique, qui nous donne deux points max de déplacement aux noeuds 4et5 **0.12358E-08(mm)**

Le schéma ci-dessous représente les conteurs de déformation axisymétrique du palier

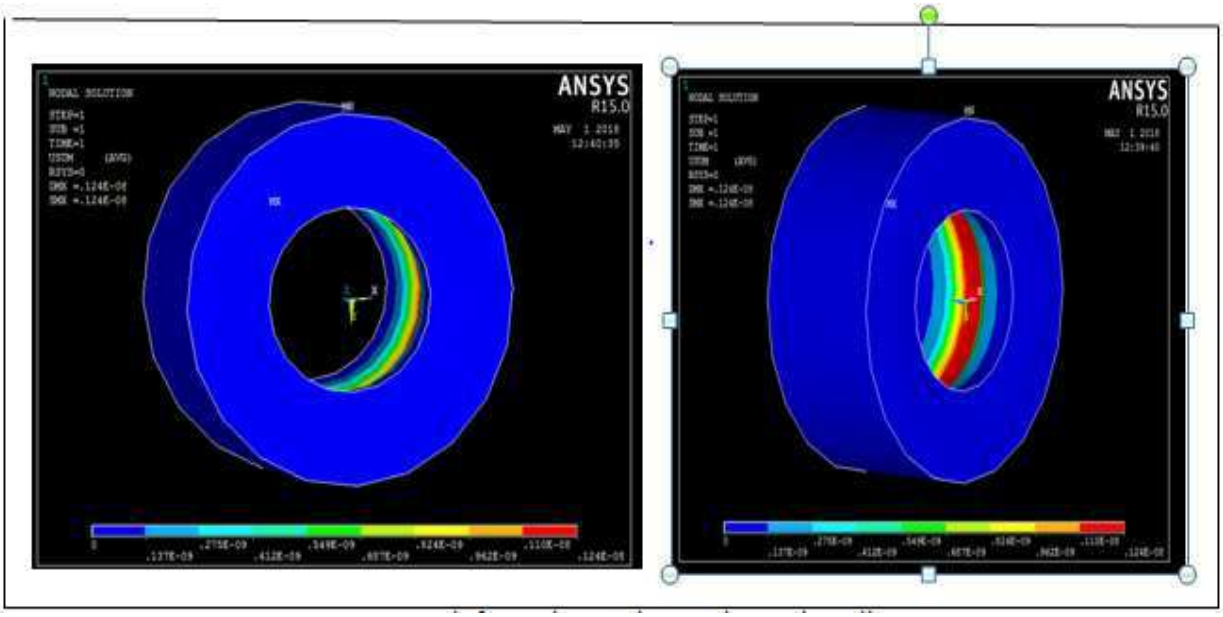


Figure IV- 4 : Les déformations axisymétriques du palier

IV.3. Déformation radiale :

Dans cet exemple en exploiter les déformations radiales à partir d'un palier court et à longueur finie et long

IV.3. 1).Palier longueur finie L/D=1:

Les dimensions géométriques du palier**:**

tableauIV- 3 : Tableau de géomètre d'un palier

Diameter intérieur	**0,1**	**[m]**
Diameter extérieur	**0,2**	**[m]**
Longueur	**0,1**	**[m]**
Rayon extérieur	**0,1**	**[m]**
Rayon intérieur	**0,05**	**[m]**

La conception sur logiciel ANSYS APDL, la figure ci-dessous montre les différents vues de la structure :

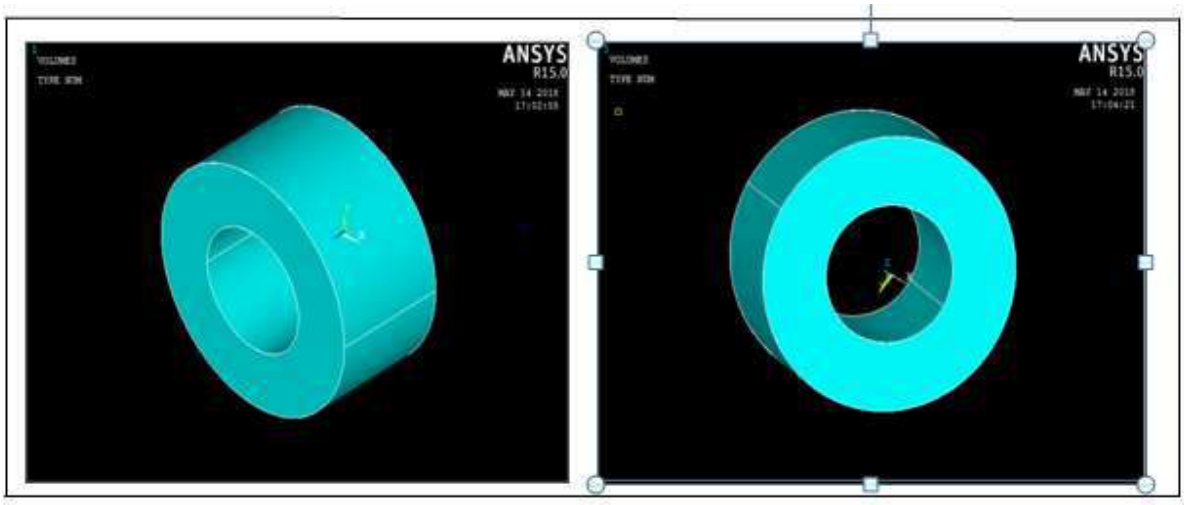


Figure IV- 5 : La géométrie d'une longueur finie L/D=1.

IV.3. 2.1.Maillage :

Après la conception on va faire le suivant les caractéristiques-ci :

tableauIV- 4: les caractéristiques de maillage.

Suivant le rayon	**R : 3 éléments.**
Suivant l'angle	**θ : 20 éléments.**
Suivant la longueur	**L :7 éléments**

Le maillage est dans la fig. IV.6 dessous :

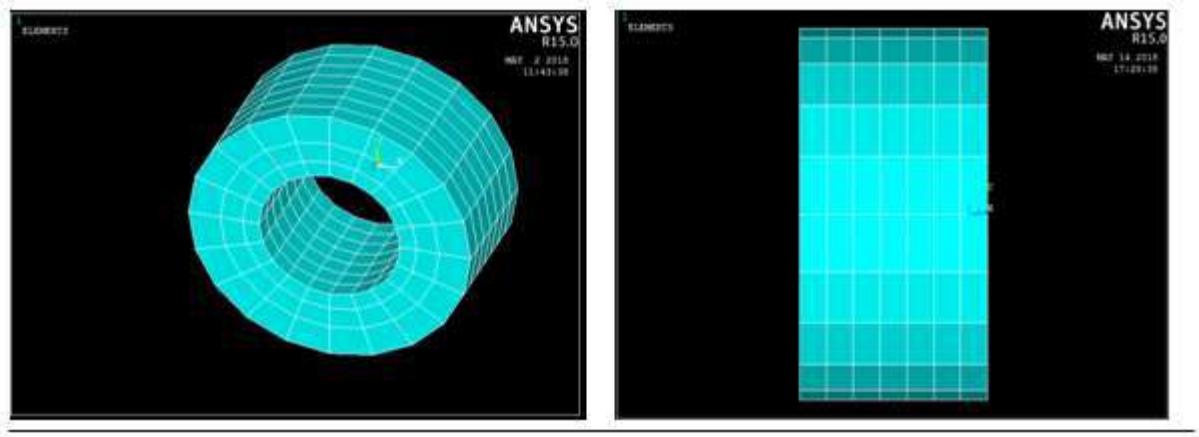


Figure IV- 6 : Maillage du Palier longueur finie L/D=1.

IV.3. 2.2. Application :

Pour obtenir les résultats des déformations élastiques sur un palier ,Nous allons dans cette exemple fixer la surface extérieur du palier court (supprime les degrés de liberté du surface extérieure) après applique le champ de pression hydrodynamique suivant l'angle θ

Il Ya deux type de champ de pression sur cette application :

- Palier faiblement charger ou l'excentricité est petite (e=0.2).
- Palier fortement chargé avec une excentricité grande (e=0.5)

Le tableau suivant représente les champs de pression applique sur un palier fortement est faiblement charger simultanément.

tableauIV- 5 : Tableau de champ pression applique sur un palier de longueur finie [3].

angle(⁰)	Pression(e=0.2) (MPa)			Pression= (e=0.5) (MPa)		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
0	0	0	0	0	0	0
0,314	2.16E+004	3.48E+004	3.92E+004	3.42E+004	5.56E+004	6.28E+004
0,628	4.57E+004	7.27E+004	8.16E+004	7.43E+004	1.19E+005	1.34E+005
0,942	7.10E+004	1.12E+005	1.25E+005	1.23E+005	1.97E+005	2.21E+005
1,256	9.64E+004	1.51E+005	1.69E+005	1.86E+005	2.95E+005	3.31E+005
1,57	1.19E+005	1.87E+005	2.09E+005	2.69E+005	4.23E+005	4.72E+005
1,884	1.37E+005	2.13E+005	2.38E+005	3.76E+005	5.83E+005	6.50E+005
2,198	1.43E+005	2.23E+005	2.48E+005	4.97E+005	7.64E+005	8.48E+005
2,512	1.33E+005	2.07E+005	2.31E+005	5.94E+005	9.04E+005	1.00E+006
2,826	1.03E+005	1.62E+005	1.81E+005	5.74E+005	8.73E+005	9.65E+005
3,14	6.09E+004	9.81E+004	1.10E+005	3.62E+005	5.66E+005	6.32E+005
3,454	1.90E+004	3.45E+004	4.00E+004	7.75E+004	1.52E+005	1.79E+005
3,768	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
4,082	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
4,396	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
4,71	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
5,024	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000

5,338	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
5,652	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
5,966	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
6,28	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000

tableauIV- 6: Les Coefficients de Fourie

	Coefficients (e=0.2)		
A0	1,500 E+000	2,34 E+001	2,62 E+001
A1	-1,03 E+001	-1,61 E+001	-1,80 E+001
A2	-1,10 E+000	-1,62 E+000	-1,77 E+000
A3	-0.45 E+000	-0,83 E+000	-0,97 E+000
B1	1,50 E+001	2,34 E+001	2,62 E+001
B2	-5,58 E+000	-8,52 E+000	-9,44 E+000
B3	9,52 E-002	4,89 E-002	2,12 E-002

tableauIV- 7 : La déformation corresponde à chaque harmonique amplitude**.**

	Coefficients (e=0.2)		
A0	9,01E-009	1,13E-008	2,32 E-008
A1	-6.19 E-009	-7,79E-009	-1,60 E-008
A2	-6,61 E-010	-7,83 E-010	-1,57 E-009
A3	-2,70 E-010	-4,01 E-010	8.62 E-010
B1	9,01E-009	1,13E-008	2,32 E-008
B2	3,35E-009	-4,12E-009	8.39 E-009
B3	5,72E-011	2,36 E-011	1.88 E-011

Champ de pression (e=0.2) la Figure

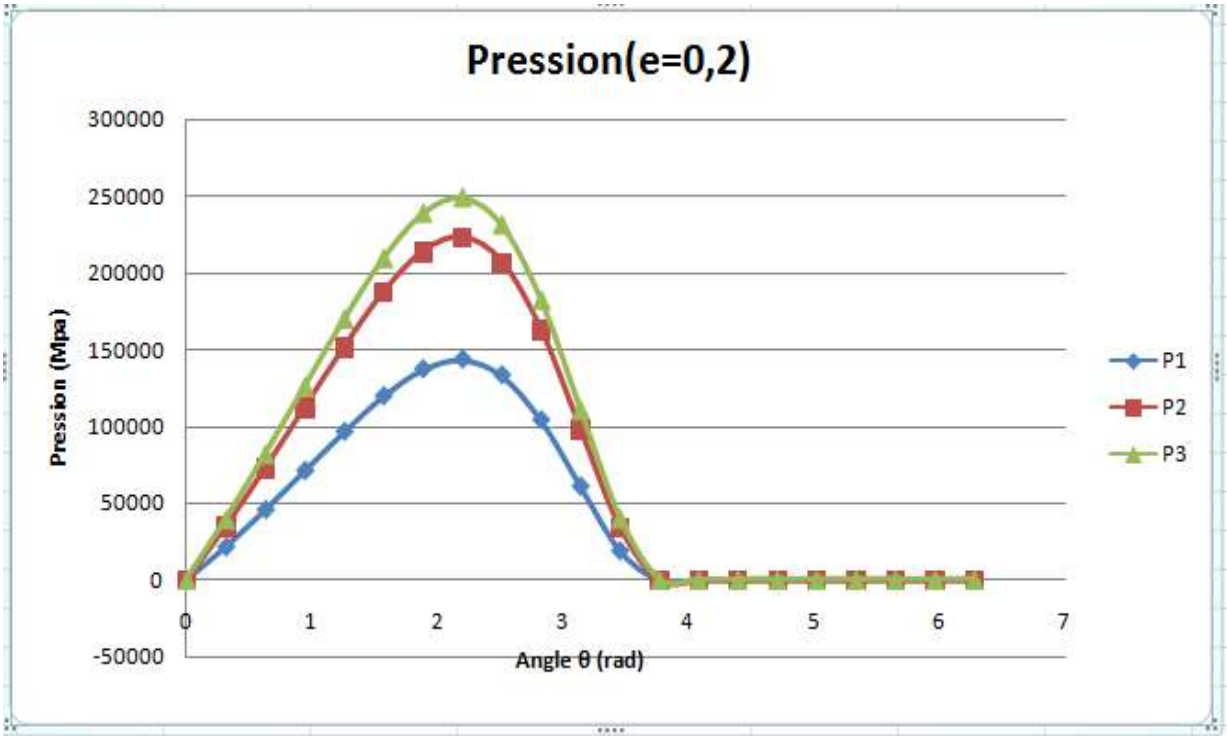


Figure IV- 7 : Champ de pression d'un palier à longueur finie e=0.2

Champ de pression e=0.5 la Figure.

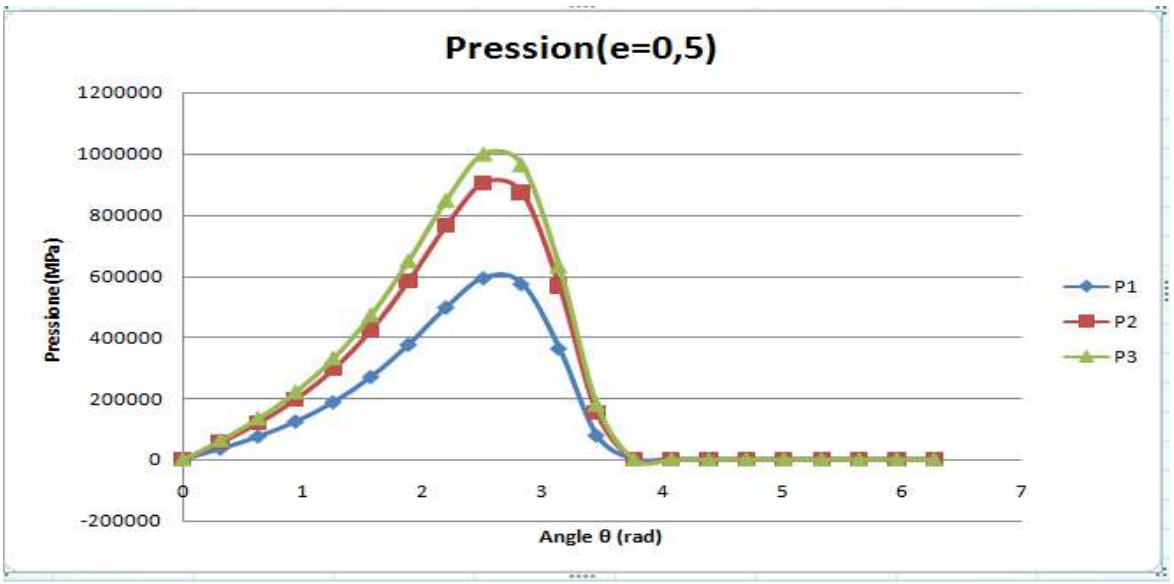


Figure IV- 8 : Champ de pression d'un palier à longueur finie e=0.5

On remarque ici que la pression maximale du palier faiblement chargé très petite par rapport à celle du palier fortement chargé.

Le champ de pression hydrodynamique applique sur le palier à longueur finie dans le logiciel ANSYS APDL doivent maintenant apparaitre comme indiqué ci-dessous :

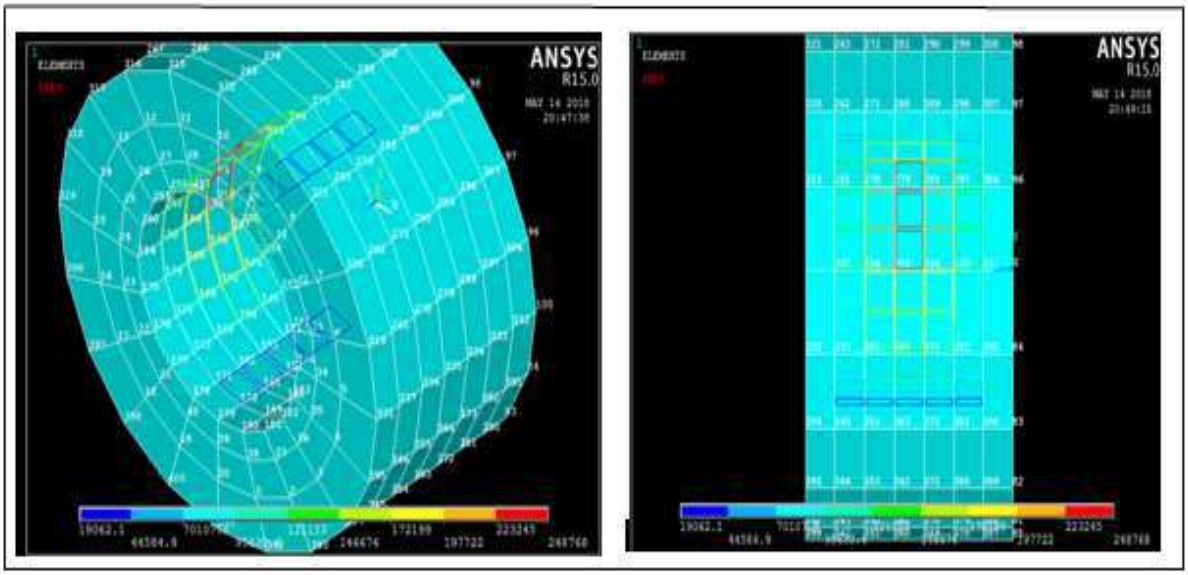


Figure IV- 9 **:** Le champ de pression appliquée sur le palier(e=0,2).

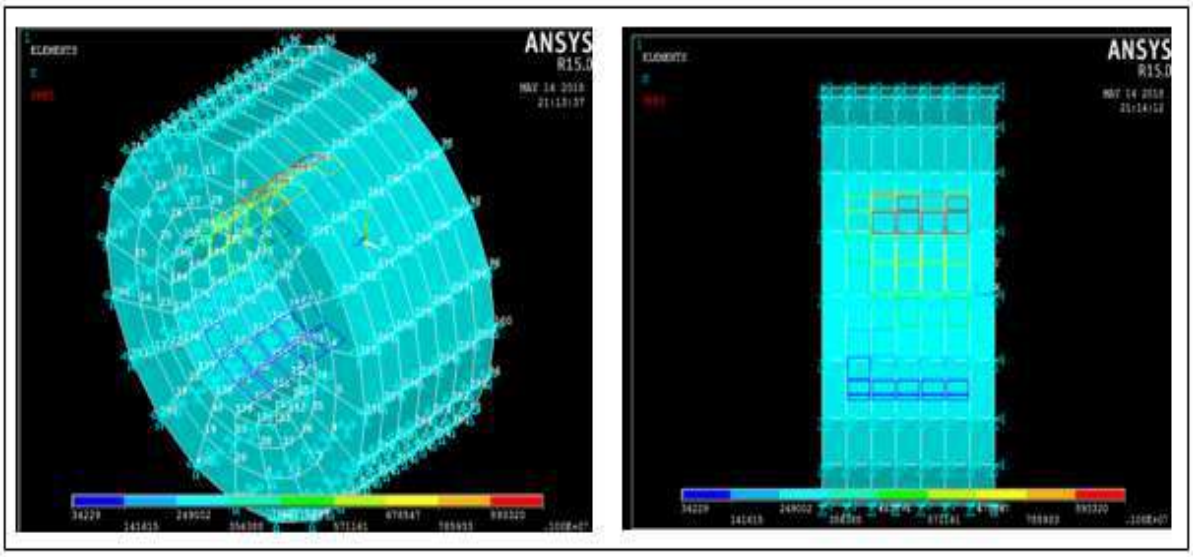


Figure IV- 10 **:** Le champ de pression appliquée sur le palier(e=0,5).

IV .2).Palier court L/D=0,5 :

tableauIV- 8 : Tableau de géomètre d'un palier

Diamètre extérieur	**0,2**	**[m]**

Diamètre intérieur	**0,1**	**[m]**
Longueur	**0,05**	**[m]**
Rayon extérieur	**0,1**	**[m]**
Rayon intérieur	**0,05**	**[m]**

La conception sur logiciel ANSYS APDL, la figure ci-dessous montre les différents vues de la structure :

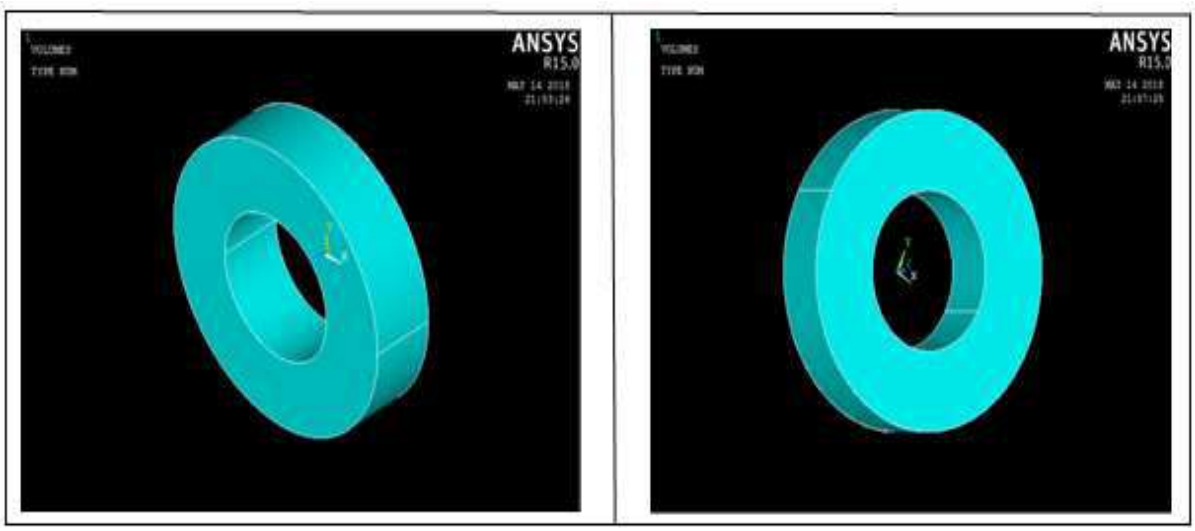


Figure IV- 11 : La géométrie d'un palier court L/D=0,5.

IV .2.1.Maillage :

Après la conception on va faire le maillage suivant les caractéristiques-ci :

tableauIV- 9 : la maillage d'un palier court L/D=0,5.

Suivant la longueur	**L :7 éléments**
Suivant le rayon	**R : 3 éléments.**
Suivant l'angle	**θ : 20éléments.**

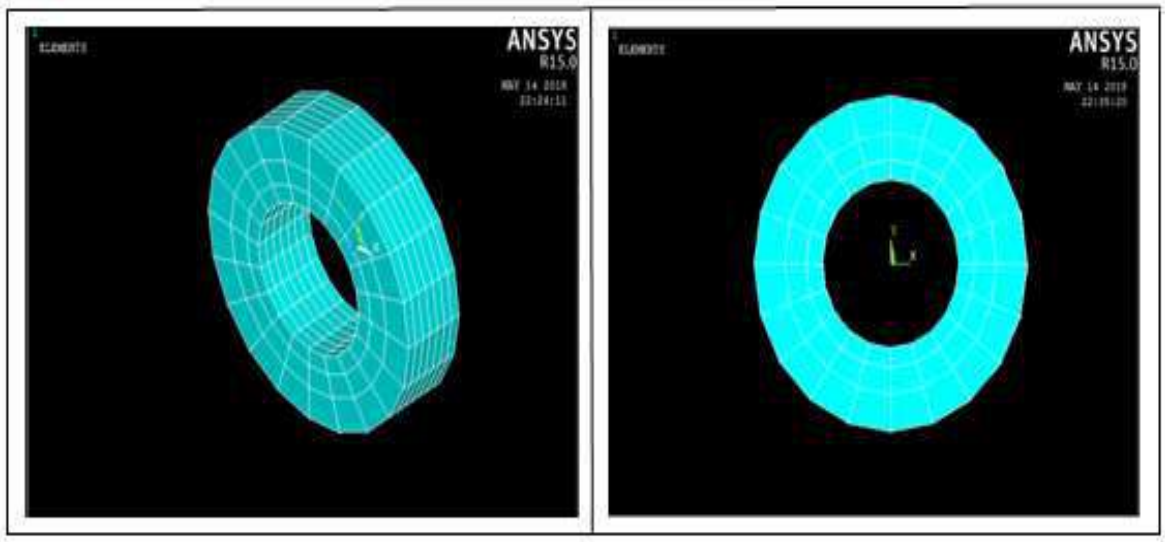


Figure IV- 12 **:** Maillage de palier court L/D=0,5.

IV.2.2.Application :

Pour obtenir les résultats des déformations sur le palier court, nous allons tout d'abord fixer la surface extérieur du palier court. Ensuite nous allons appliquer un champ de pression hydrodynamique suivant l'angle θ

Il Ya deux type de champ de pression sur cette application :

- Palier faiblement charger ou l'excentricité est petite (e=0.2).
- Palier fortement chargé avec une excentricité grande (e=0.5)

Le tableau suivant représente les champs de pression applique sur un palier fortement et faiblement charger simultanément :

tableauIV- 10 : Tableau de champ du pression applique sur le palier court [3].

angle(⁰)	Pression(e=0,2) (MPa)			Pression(e=0,5) (MPa)		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
0	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
0.314	5.35E+003	8.70E+003	9.83E+003	7.59E+003	1.23E+004	1.40E+004
0.628	1.23E+004	1.98E+004	2.23E+004	1.82E+004	2.94E+004	3.31E+004
0.942	2.01E+004	3.22E+004	3.62E+004	3.25E+004	5.22E+004	5.88E+004
1.256	2.83E+004	4.52E+004	5.08E+004	5.25E+004	8.41E+004	9.46E+004

1.57	3.62E+004	5.77E+004	6.48E+004	8.13E+004	1.29E+005	1.45E+005
1.884	4.26E+004	6.77E+004	7.59E+004	1.21E+005	1.93E+005	2.16E+005
2.198	4.53E+004	7.19E+004	8.06E+004	1.71E+005	2.71E+005	3.04E+005
2.512	4.20E+004	6.66E+004	7.46E+004	2.16E+005	3.39E+005	3.79E+005
2.826	3.13E+004	4.97E+004	5.57E+004	2.10E+005	3.30E+005	3.69E+005
3.14	1.50E+004	2.43E+004	2.75E+004	1.16E+005	1.85E+005	2.07E+005
3.454	1.59E+002	1.46E+003	2.07E+003	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
3.168	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
4.082	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
4.396	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
4.71	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
5.024	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
5.338	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
5.652	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
5.966	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
6.28	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000

tableauIV- 11 : Le Coefficients de Fourier

	Coefficients (e=0.2)		
A0	2,28 E+000	3,63 E+000	4,08 E+000
A1	-1,55 E+000	-2,56 E+000	-2,77 E+000
A2	-2,36 E-001	-3,70 E-001	-4,13 E-001
A3	1,15 E-002	1,33 E-002	1,29 E-002
B1	2,28 E+000	3 ,63 E+000	4,08 E+000
B2	-9,89 E-001	-1,55 E+000	-1,73 E+000

tableauIV- 12 : La déformation corresponde à chaque harmonique amplitude.

	Coèfficients (e=0.2)		
A0	**4,93 E-010**	**1,00 E-009**	**5,04 E-009**
A1	**-3,35 E-010**	**-6,78 E-010**	**-3,43 E-009**
A2	**-5,10 E-010**	**-1,02 E-010**	**-5,10 E-010**
A3	**2,48 E-012**	**3,66 E-012**	**1,59 E-011**
B1	**4,93 E-010**	**1,00 E-009**	**5,04 E-009**
B2	**-2,14 E-011**	**-4,27E-010**	**-2,13 E-009**
B3	**1,62 E-011**	**2,97 E-011**	**1,44 E-010**

Le graphe représenter de champ du pression applique sur le palier court (Figure IV- 13**.)**

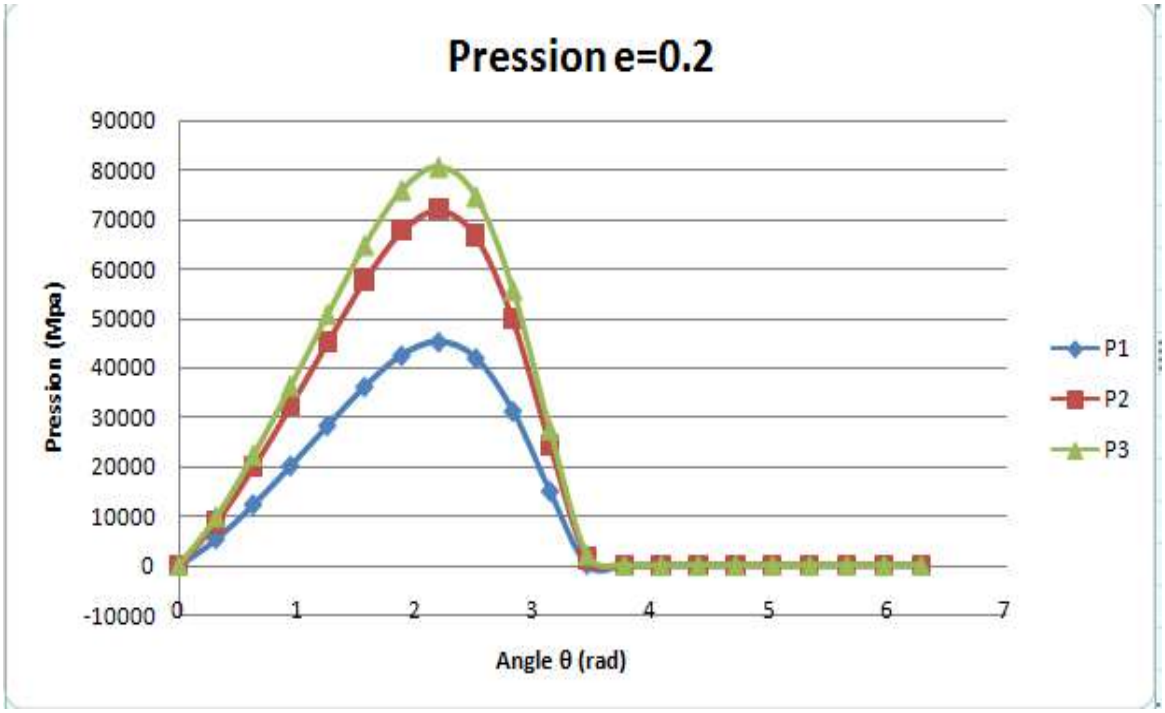


Figure IV- 14**:**Champ de pression d'un palier court (L/D=0.5 et e=0.2).

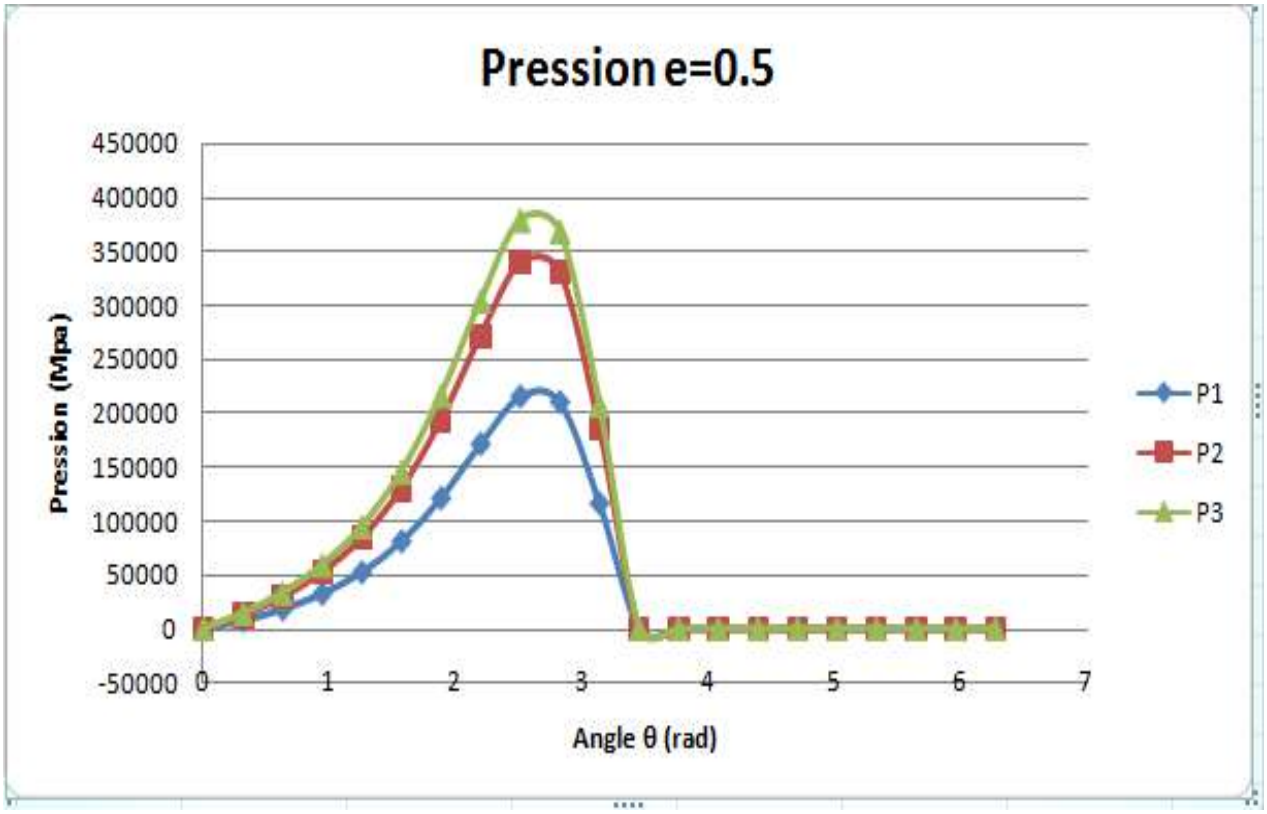


Figure IV- 15 :Champ de pression d'un palier court (L/D=0.5 et e=0.5).

On remarque ici que la pression maximale du palier faiblement chargé très petite par rapport à celle du palier fortement chargé.

On remarque que le graphe de la pression est au point max (Θ=**2.512**rad), une pression maximale: **P MAX=3.79E+005Mpa**.

Le champ de pression hydrodynamique applique sur le palier logiciel ANSYS APDL doivent maintenant apparaitre comme indiqué ci-dessous :

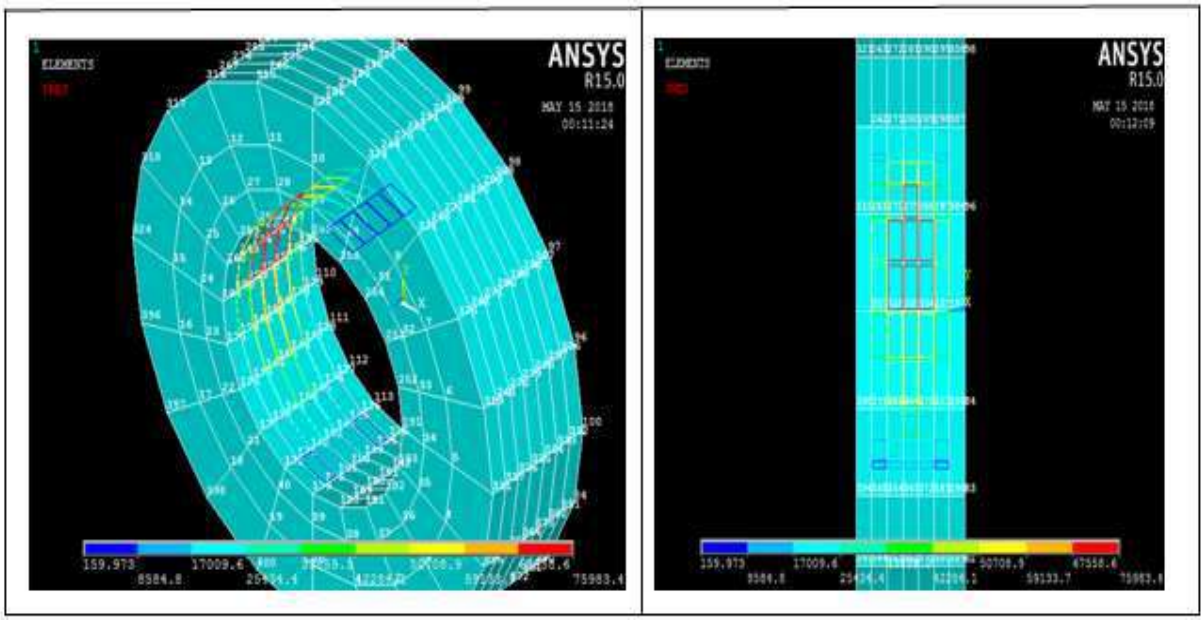


Figure IV- 16 : Le champ de pression appliquée sur le palier(e=0.2)

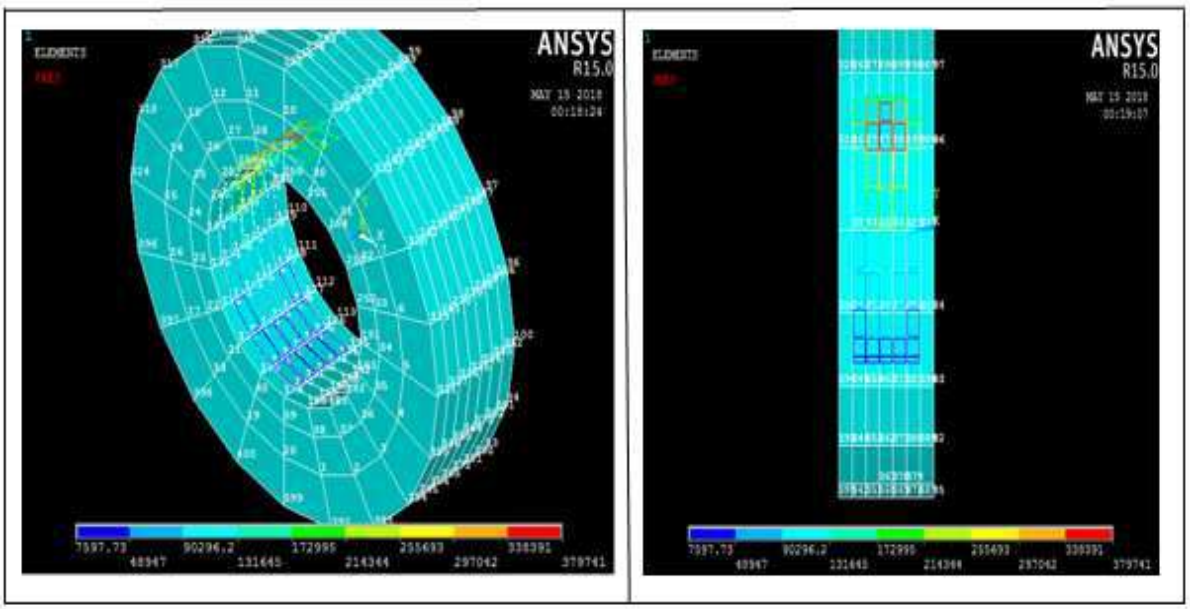


Figure IV- 17 : Le champ de pression appliquée sur le palier(e=0.5)

IV.3. Conclusion :

On a présenté dans ce chapitre la procédure d'application le champ de pression sur les paliers qui nous concernent, et on a préparé tous qui est nécessaire pour le chapitre suivant.

V.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous allons analyser les résultats qui représentent les déformations élastiques sur les différents types paliers étudiés sollicité par des pressions hydrodynamiques. Et on va comparer les résultats obtenus par ANSYS avec lesquelles obtenus par MATLAB.

V.2.Palier court L/D=0,5:

V.2. a :(e=0,5) :

Ce champ de pression a été introduit dans le logiciel ANSYS APDL pour déterminer le champ de déformation élastique on obtient ainsi le schéma de la solution suivante.

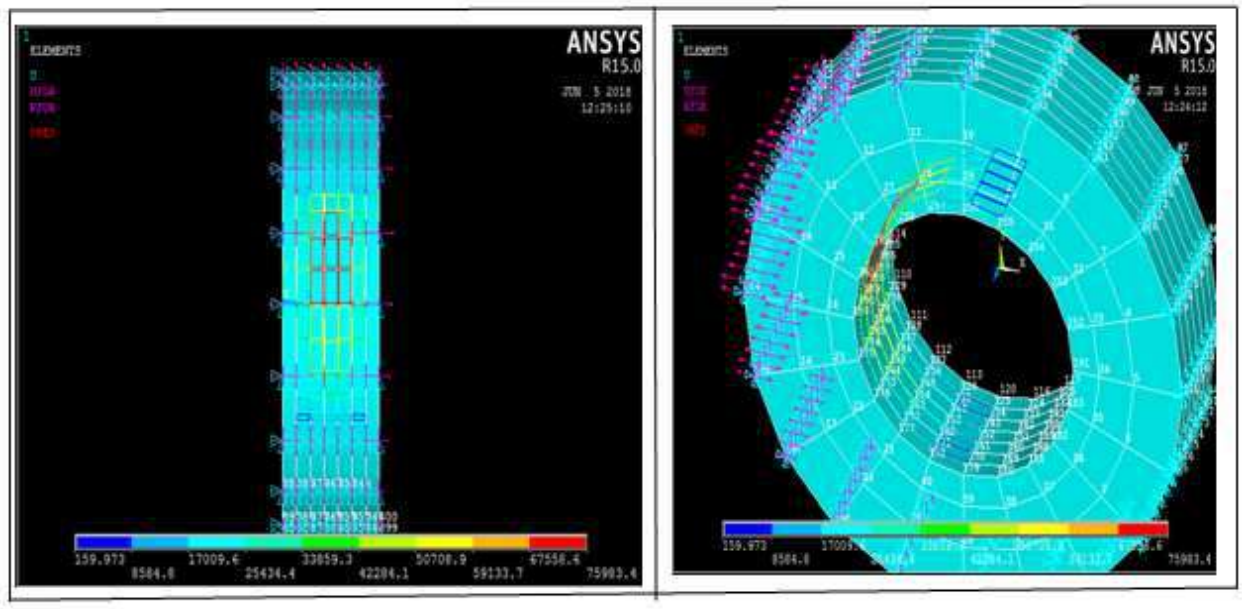


Figure V- 1 : Schéma de solution sur ANSYS APDL (pour e=0.5).

Lorsque nous allons appliquer un champ de pression globale sur toute la longueur du palier on a considéré la surface extérieure comme support fixe, la déformation de résultante est symétrique par rapport aux centre de palier.

Les résultats de déplacement max ((centre de palier)) sur le tableau ci-dessous varient suivant l'angle θ.

Tableau V- 1 : Tableau de déformation radiale au milieux du palier du palier court faiblement.

angleΘ(rad)	Déplacement (e=0.5) [mm]Ansys
0	3,05E-009
0,314	7,13- E-009
0,628	1,30 E-008
0,942	2,15 E-008
1,256	3,37 E-008
1,57	5,09 E-008
1,884	7,26 E-008
2,198	9,39 E-008
2,512	1,01 E-007
2,826	7,97 E-008
3,14	3,60 E-008
3,454	1,21 E-008
3,768	4,87 E-009
4,082	1,94 E-009
4,396	6,31 E-010
4,71	2,36 E-010
5,024	1,00 E-010
5,338	1,86 E-010
5,652	5,03 E-010
5,966	1,27 E-009
6,28	3,05E-009

Figure .V. 2:.représenté la déformation élastique au milieu d'un palier court (e=0.5) (ANSYS).

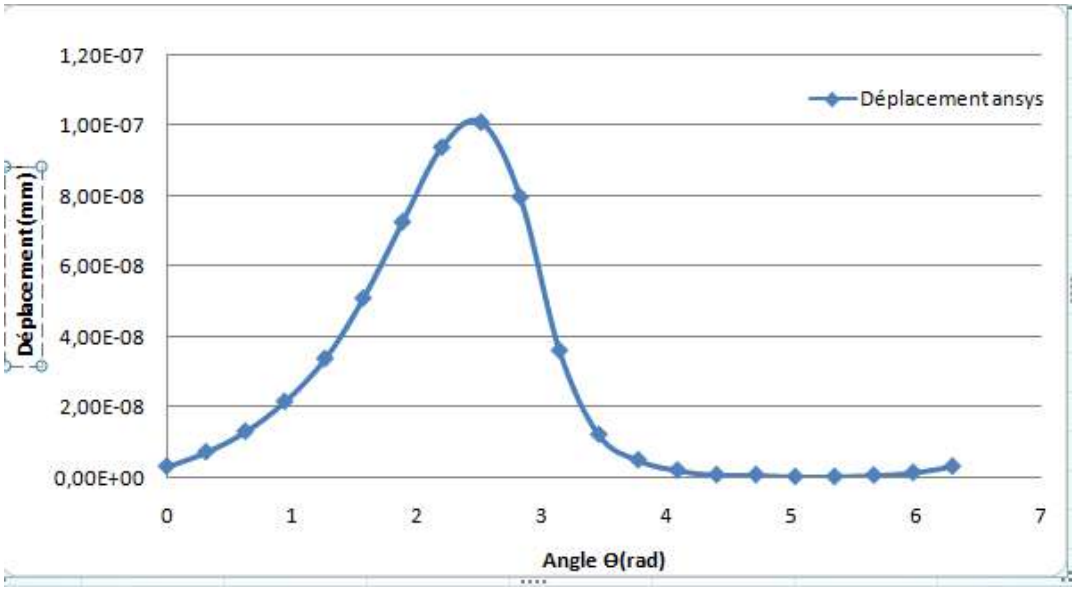


Figure V- 2: déformation élastique au milieu d'un palier court(e=0.5) (ANSYS).

V.2. b :(e=0,2) :

Ce champ de pression a été introduit dans le logiciel ANSYS APDL pour déterminer le champ de déformation élastique on obtient ainsi le schéma de la solution suivante.

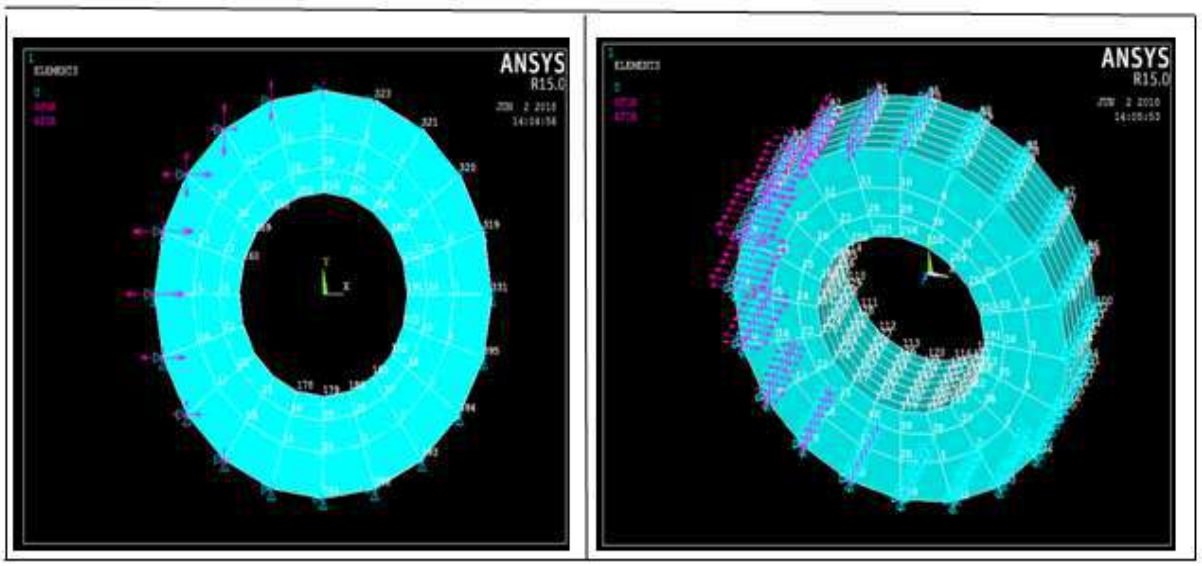


Figure V- 3 : Schéma de solution sur ANSYS APDL (pour e=0.2).

Lorsque nous allons appliquer un champ de pression globale sur toute la longueur du palier on a considéré la surface extérieure comme support fixe, la déformation de résultante est symétrique par rapport aux centre de palier

Les résultats de déplacement max ((centre de palier)) sur le tableau ci-dessous varient suivant l'angle θ.

Tableau V- 2: Tableau de déformation radiale au milieux du palier du palier court faiblement.

angleϴ(rad)	Déformation (e=0.2)[mm] (ANSYS)	Déplacement (e=0.2)[mm] (Serie Fourier)
0	2,00E-09	2,20E-09
0,314	4,70E-09	3,81E-09
0,628	8,20E-09	6,68E-09
0,942	1,20E-08	1,08E-08
1,256	1,58E-08	1,56E-08
1,57	1,92E-08	2,05E-08
1,884	2,11E-08	2,42E-08
2,198	2,08E-08	2,58E-08
2,512	1,78E-08	2,47E-08
2,826	1,18E-08	2,09E-08
3,14	5,25E-09	1,55E-08
3,454	1,89E-09	9,93E-09
3,768	7,69E-10	5,37E-09
4,082	3,02E-10	2,54E-09
4,396	1,03E-10	1,39E-09
4,71	4,03E-11	1,31E-09
5,024	3,96E-11	1,57E-09
5,338	1,22E-10	1,68E-09

5,652	**3,13E-10**	**1,59E-09**
5,966	**7,84E-10**	**1,61E-09**
6,28	**2,00E-09**	**2,20E-09**

Figure .V. 2:.représenté la déformation élastique au milieu d'un palier court faiblement chargé (e=0.2) (ANSYS).

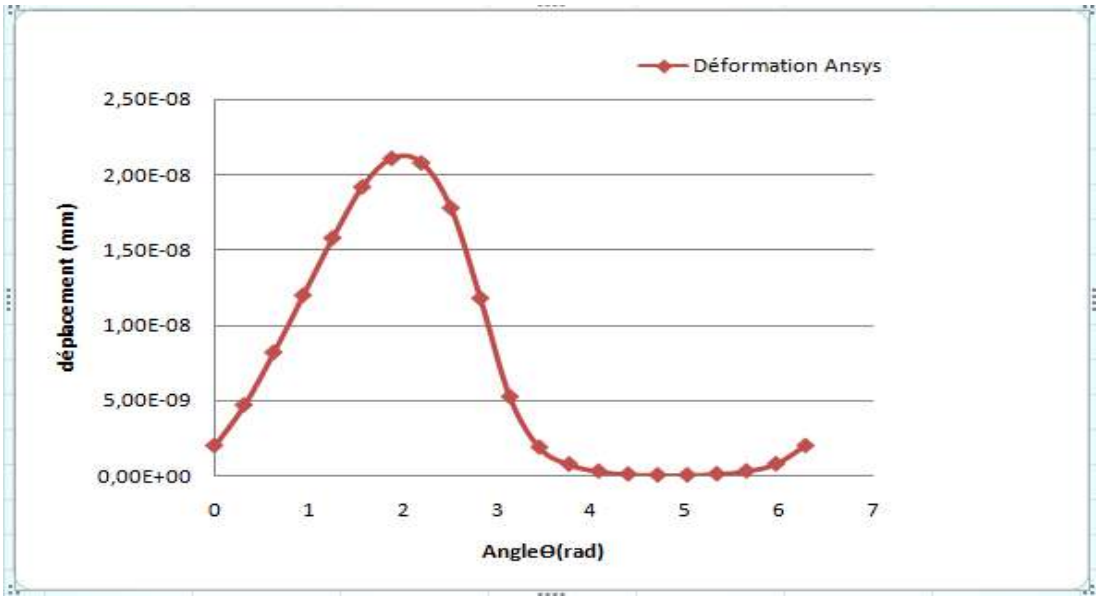


Figure V- 4 : Déformation élastique du palier court faiblement charger(ANSYS).

La Figure (V-5) Représente la déformation élastique au milieu d'un palier court faiblement chargé (e=0.2) Séries Fourier.

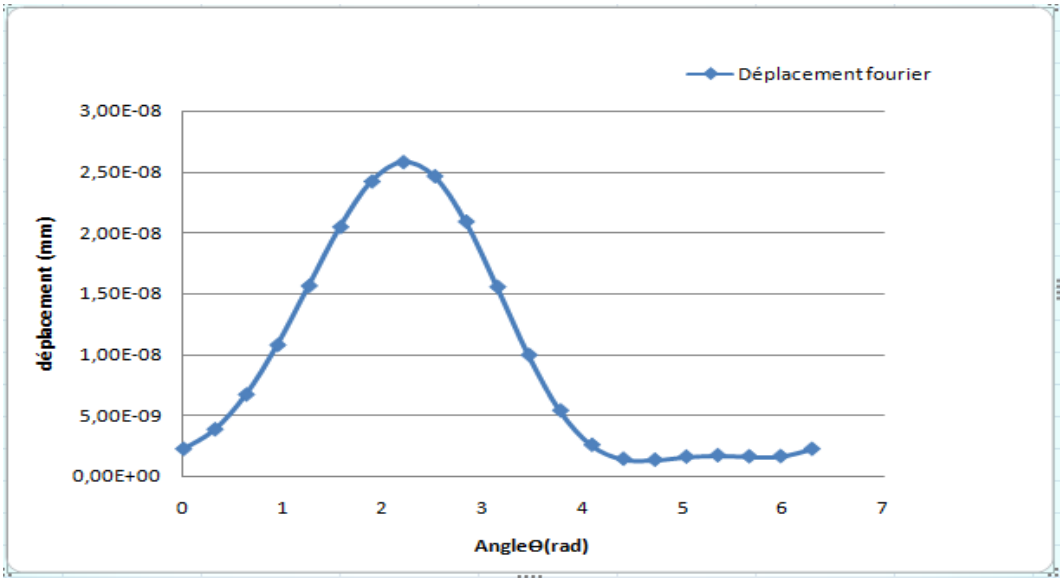


Figure V- 5: Déformation élastique du palier court faiblement charge (Séries Fourier).

La figure .V.6 suivante représente la déformation élastique au milieu d'un palier court faiblement chargé (e=0.2) Séries Fouriers et ANSYS

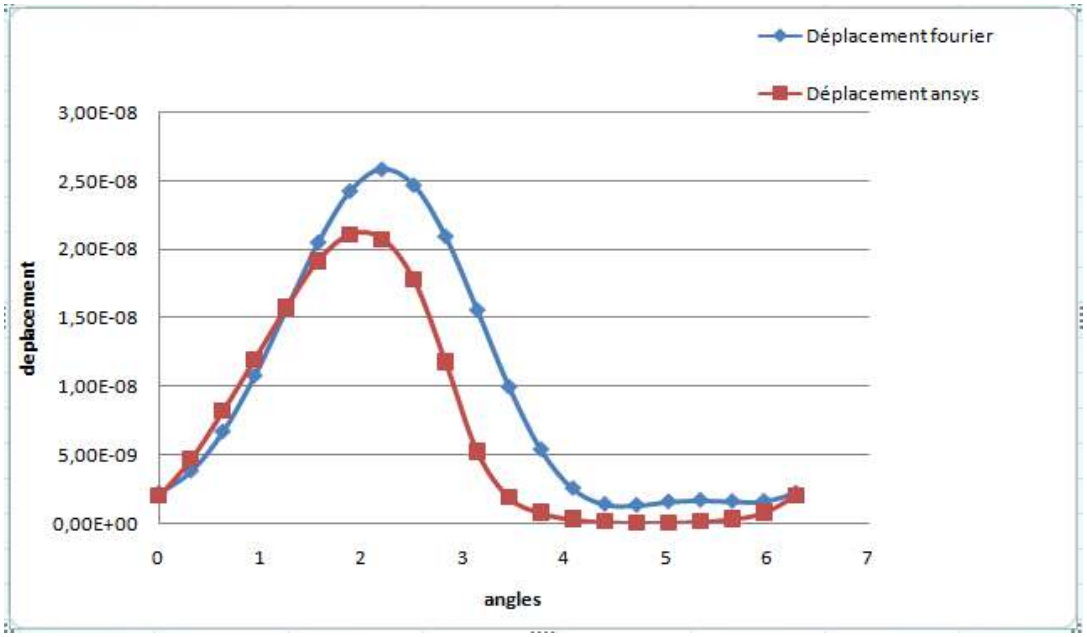


Figure V- 6: Déformation élastique du palier court faiblement chargé (Série Fourier) et ANSYS.

V.2.1.Discussion des résultats :

La figure (V.2) représentent les déplacements élastiques au milieu d'un palier court faiblement chargé en utilisant le logiciel ANSYS APDL, Les déplacements nodales sont répartie suivant la direction circonférentielle **(1,01 E-007<déplacement max >7,97 E-008),** et dans l'intervalle **2,512 (Rad) <θ<2,826 (Rad)**

Les figures (V.3) et (V.4), représentent les déplacements élastiques au milieu d'un palier court faiblement chargé en utilisant le logiciel ANSYS APDL et l'analyse de Fourier.

Les déplacements nodales sont répartie suivant la direction circonférentielle **(2,11E-08< déplacement max >2,08E-08),** et dans l'intervalle **1,884 (Rad) <θ<2,198 (Rad)** en utilisant le logiciel ANSYS. Tandis que ceux issus de l'analyse de Fouriers sont répartis de la manière suivante :
déplacement maximal **(2,58E-08< déplacement max >2,47E-08).**Dans l'intervalle **2,198 (Rad) <θ<2,512 (Rad**).

On remarque que les deux résultats sont proches mais on peut obtenir des résultats plus préciser si on augmentant le nombre de termes de Fourier.

La figure suivante représente les contours de la déformation d'un palier court faiblement chargé obtenus par le logiciel ANSYS APDL :

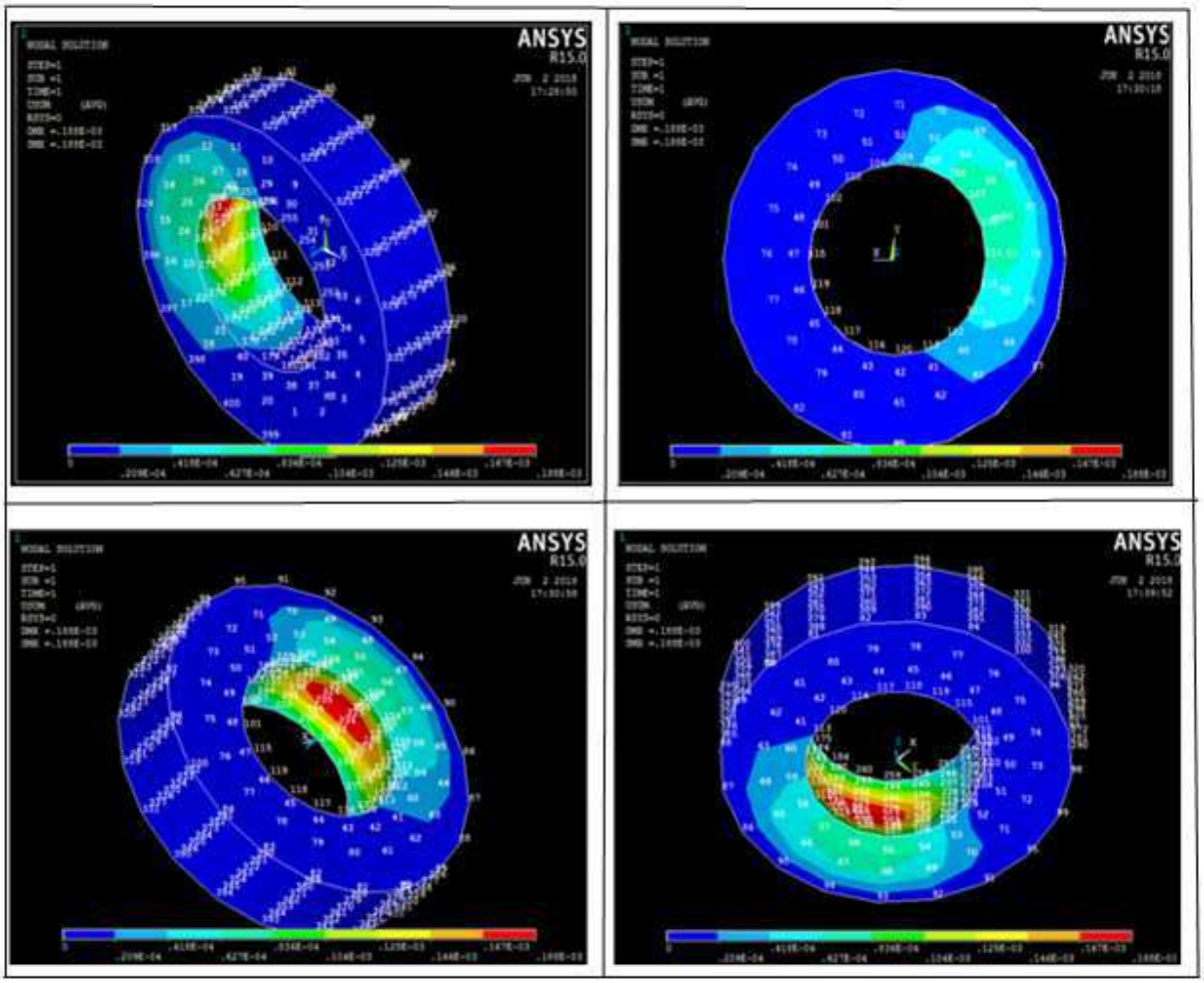


Figure V- 7 : Schéma de déformation palier court faiblement charger (e=0.2).

On constate que la forme de déformation élastique radiale de la paroi du coussinet prend la même forme que celle du champ de pression.

V.3.Palier de longueur finie L/D=1 :

V.3.a : (e=0,5) :

Ce champ de pression a été introduit dans le logiciel ANSYS APDL pour déterminer le champ de déformation élastique on obtient ainsi le schéma de la solution suivante.

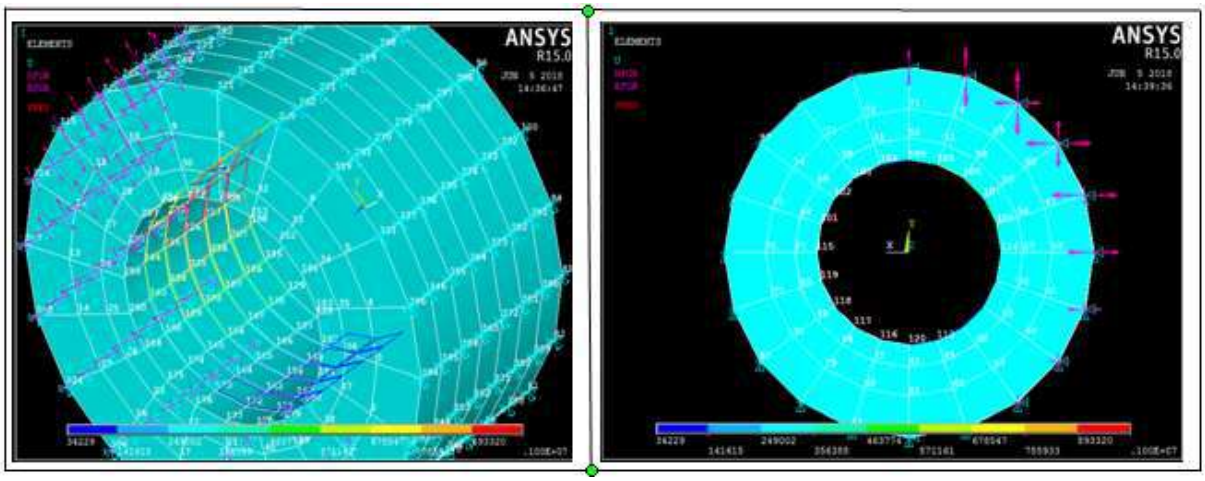


Figure V- 8 : Schéma de déformation palier court faiblement charger (e=0.2).

Lorsque nous allons appliquer un champ de pression globale sur toute la longueur du palier on a considéré la surface extérieure comme support fixe, la déformation de résultante est symétrique par rapport aux centre de palier

Les résultats de déplacement max ((centre de palier)) sur le tableau ci-dessous varient suivant l'angle θ.

Tableau V- 3: Tableau de déformation radiale de palier à longueur finit faiblement chargé.

angleϴ(rad)	**Déplacement (e=0.5) [mm]Ansys**
0	**3,01-008**
0,314	**6,83- E-008**
0,628	**1,16 E-007**
0,942	**1,91 E-007**
1,256	**2,59 E-007**
1,57	**3,63 E-007**
1,884	**4,83 E-007**
2,198	**5,85 E-007**
2,512	**6,23 E-007**
2,826	**4,40E-007**

3,14	**2,15 E-007**
3,454	**1,05 E-007**
3,768	**4,02 E-008**
4,082	**1,53 E-008**
4,396	**5,50 E-009**
4,71	**1,61 E-009**
5,024	**5,82 E-009**
5,338	**1,46 E-009**
5,652	**4,44 E-009**
5,966	**1,16 E-008**
6,28	**3,01E-008**

Figure .V. 9:.représenté la déformation élastique au milieu d'un palier de longueur finie (e=0.5) (ANSYS).

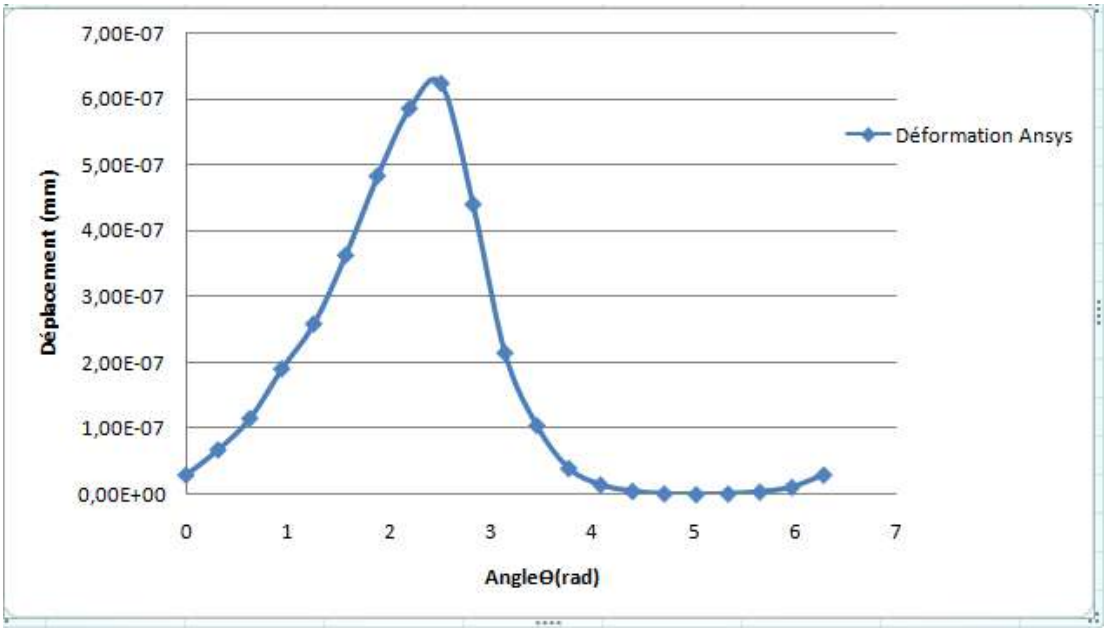


Figure V- 9:la déformation élastique au milieu d'un palier de longueur finie (e=0.5) (ANSYS).

Ce champ de pression a été introduit dans le logiciel ANSYS APDL pour déterminer le champ de déformation élastique on obtient ainsi le schéma de la solution suivante.

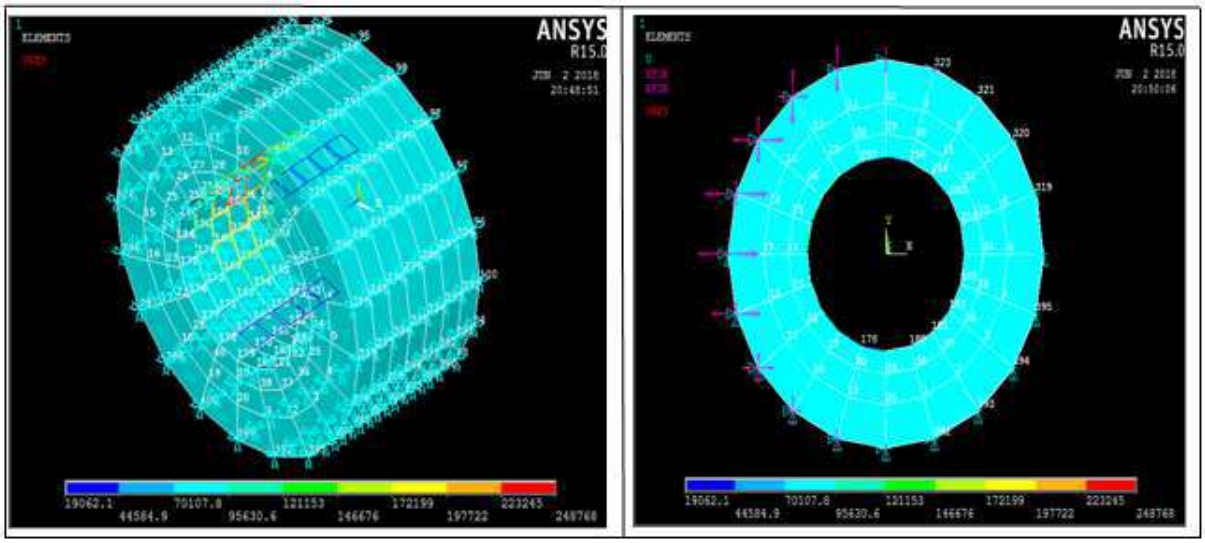


Figure V- 10 : Schéma de solution sur ANSYS APDL

les résultats de déformations sont mentionnés sur le tableau ci-dessous et sont variés suivant l'angle pour obtenir la déformation radiale au milieu d'un palier à longueur finie faiblement chargé.

Tableau V- 4: Tableau de déformation radiale de palier à longueur finit faiblement chargé.

angleϴ(rad)	**Déformation (e=0.2)[mm] (ANSYS)**	**Déformation (e=0.2)[mm] (Série Fourier)**
0	**1.70E-08**	**1,08 E-08**
0,314	**3,95E-08**	**1,90E-08**
0,628	**6,49E-08**	**3,51 E-08**
0,942	**9,13E-08**	**5,78E-08**
1,256	**1,16E-07**	**8,33 E-08**
1,57	**1,36E-07**	**1,07E-07**
1,884	**1,48 E-07**	**1,24E-07**

2,198	**1,46E-07**	**1,32E-07**
2,512	**1,20E-07**	**1,27E-07**
2,826	**9,15E-08**	**1,11 E-07**
3,14	**5,09E-08**	**8,56E-08**
3,454	**2,01E-08**	**5,67E-08**
3,768	**7,50E-09**	**3,05E-08**
4,082	**2,80 E-09**	**1,22E-08**
4,396	**9,93E-10**	**3,93E-09**
4,71	**3,11 E-10**	**3,65E-09**
5,024	**2,60E-10**	**7,01 E-09**
5,338	**8,39E-10**	**9,66E-09**
5,652	**2,33E-09**	**9,80 E-09**
5,966	**6,15 E-09**	**8,93 E-09**
6,28	**1.70E-08**	**1,08E-08**

La Figure.V.11 représenté la déformation élastique au milieu d'un palier a longueur finie faiblement chargé (e=0.2) avec ANSYS.

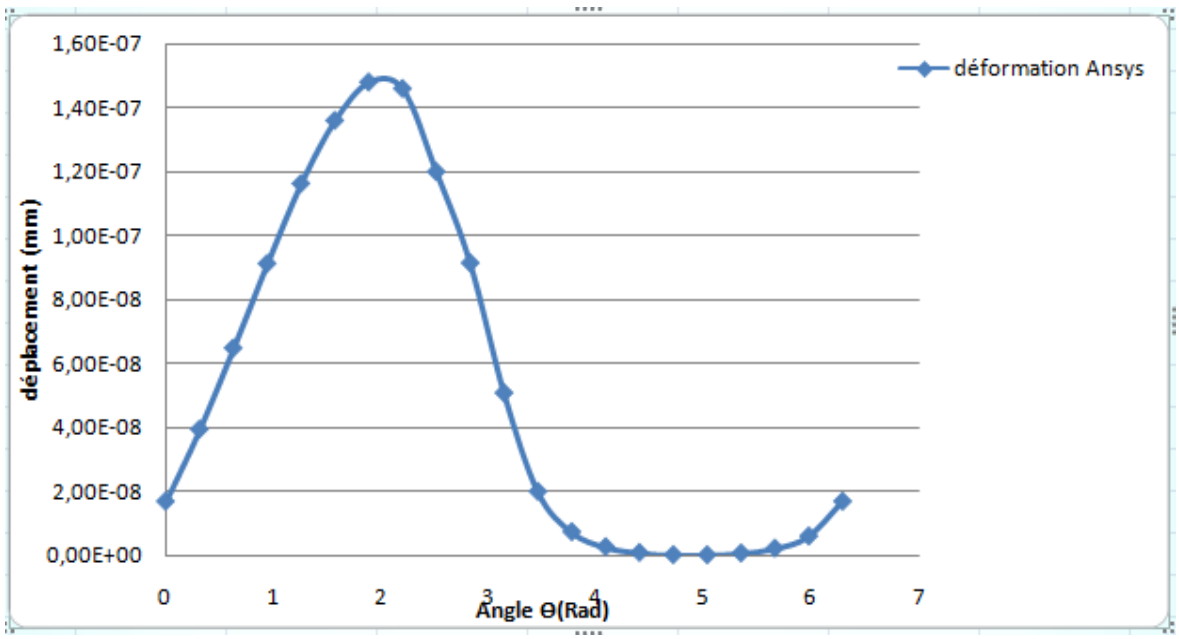


Figure V- 11: Déformation élastique de palier à longueur finie (e=0.2) [avec ANSYS.]

La Figure. V.12. représenté la déformation élastique au milieu d'un palier a longueur finie faiblement chargé (e=0.2) en utilisant les série de Fourier.

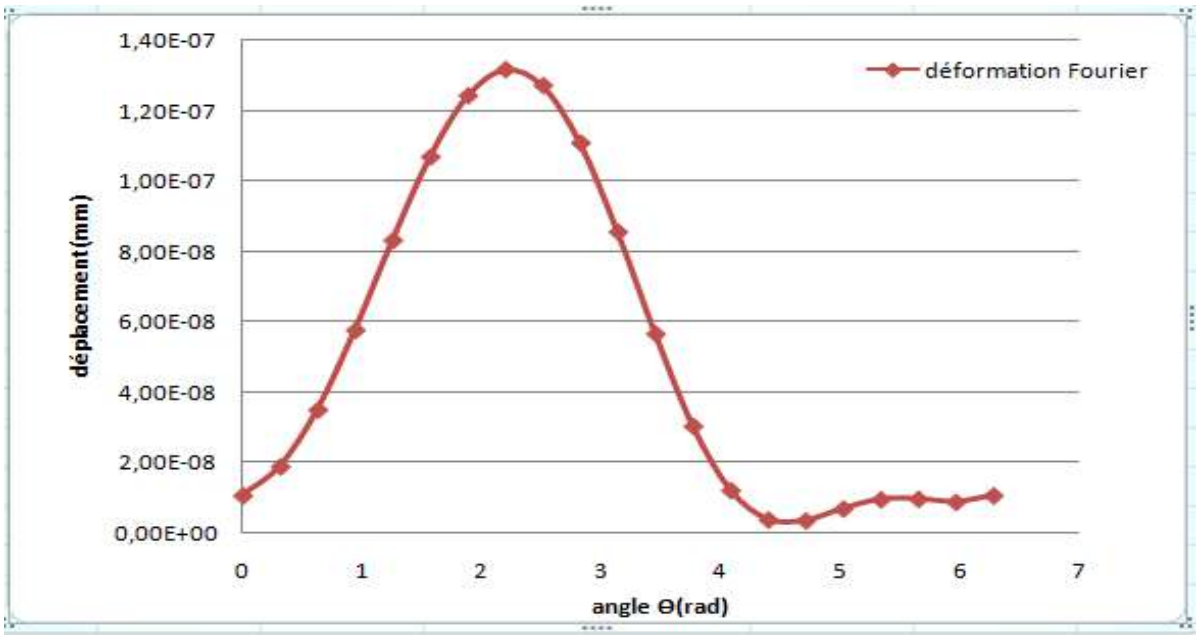


Figure V- 12 : Déformation élastique de palier à longueur finie (e=0.2)[avec les série de Fourier]

La Figure.V.13 représente la déformation élastique au milieu d'un palier a longueur finie faiblement chargé (e=0.2) avec ANSYS et Fourier.

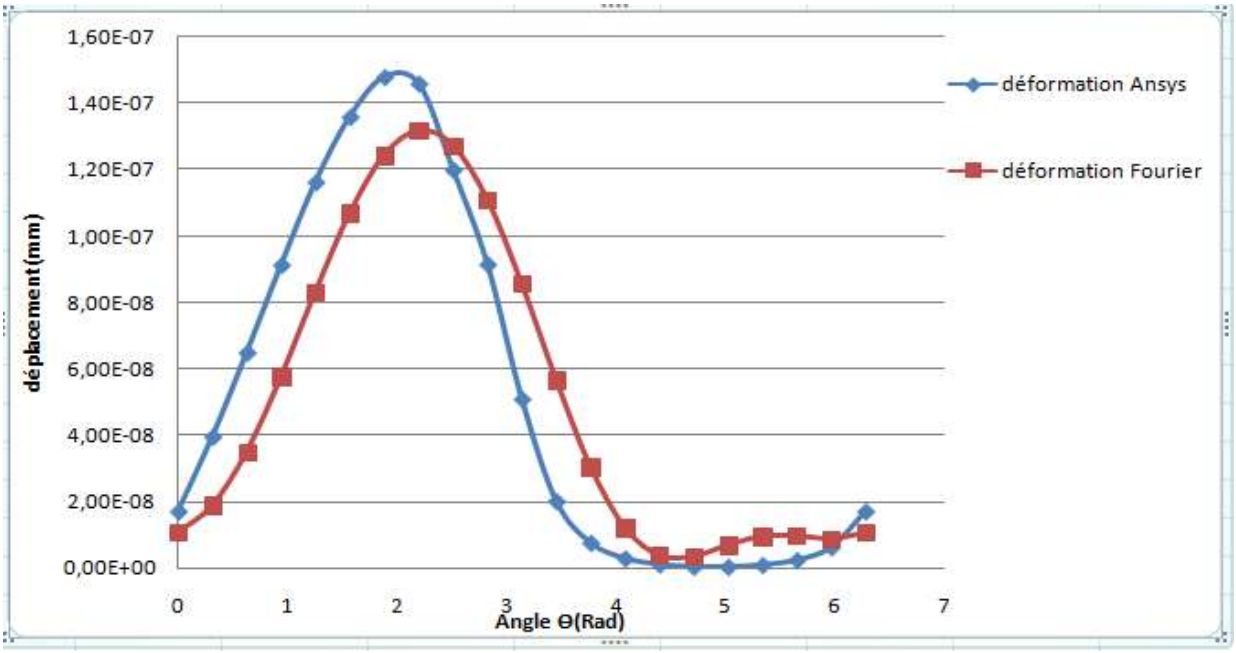


Figure V- 13 :Déformation élastique du palier (L/D=1, e=0,2)

V.3.1Discussion des résultats :

La figure (V.2) représentent les déplacements élastiques au milieu d'un palier de longueur finie(e= 0.2) en utilisant le logiciel ANSYS APDL, Les déplacements nodales sont répartie suivant la direction circonférentielle **(6,23 E-007< déplacement max >5.85 E-007),** et dans l'intervalle **2,198 (Rad) <θ<2,512 (Rad)**

Les figure (V.7) et (V.8), représentent les déplacements élastiques au milieu d'un palier de longueur finie (L/D=1,e=0,2) en utilisant ce logiciel ANSYS APDL et analyse de Fourier.

Les déplacements nodales sont répartie en 2D suivant direction circonférentielle et le direction radial **(1,48 E-07< déplacement max >1,46E-07),** et dans l'intervalle **1,884 (Rad) <θ<2,198 (Rad)**.

En utilisant le logiciel ANSYS. Tandis que ceux issus de l'analyse de Fourier sont répartis de la manière suivante :

Le déplacement nodal maximal (**1,32 E-07**< **déplacement max >1,27E-07).**et dans l'intervalle

2,198 (Rad) <θ < 2,512 (Rad).

On remarque que les résultats sont similaire (**Figure V.7)** mais ceux issus du logiciel ANSYS APDL sont plus importât.

Le schéma ci-dessous représente les contours de la déformation d'un palier Palier de longueur finie (L/D=1 ,e =0,2) obtenus par le logiciel ANSYS APDL

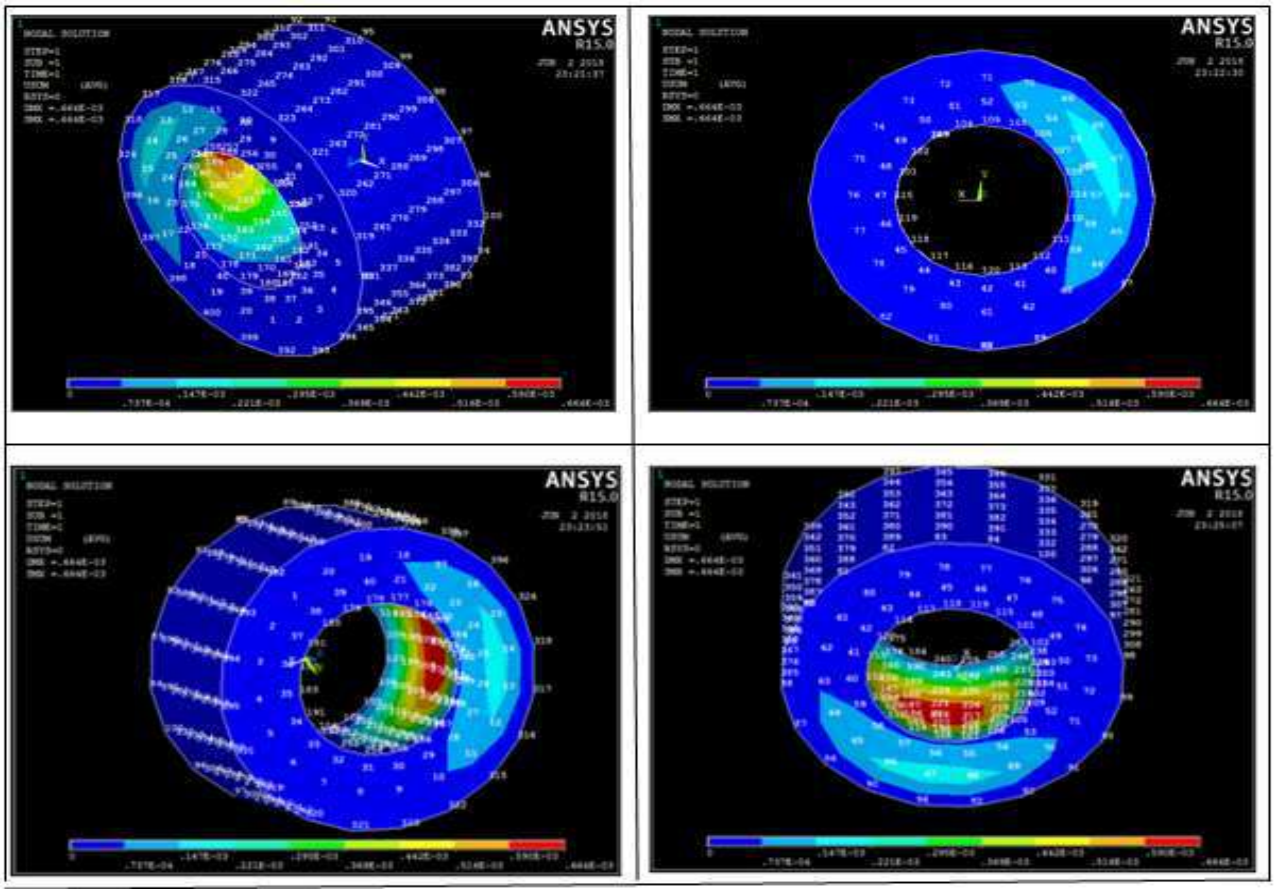


Figure V- 14 : schéma de déformation élastique du palier à longueur finie faiblement charger(e=0.2).

On constate que la forme de déformation élastique radiale de la paroi de coussinet prend la même forme que celle du champ de pression.

V.4.Conclusion.

Dans ce chapitre on peut conclure que dans les paliers hydrodynamiques les déformations sont plus importante dans la zone la plus chargée

On. remarque aussi que les les déformations sont plus significatives pour des paliers courts.

En fin, cette déformation peut affecter la forme circulaire du palier donc il faux mieux choisir le palier hydrodynamique selon son application.

Conclusion générale :

Le but de ce travail est de calculer les déformations élastiques d'un palier cylindrique en utilisant l'analyse de Fourier en prenant un champ de pression engendré dans le palier en forme non axisymétrique,

La méthode est basée sur les séries de Fourier nous a permit de résoudre le problème de déformation du palier d'une manière très simple (bidimensionnelle, 2D) sans passer par le modélisation (tridimensionnelle, 3D) de la structure.

Dans ce contexte le logiciel MATLAB est utilisé pour le calcul des déformations élastiques radial à l'intérieur d'un palier hydrodynamique.

On remarque que les résultats obtenus par le logiciel MATLAB sont proche de ceux obtenus par le logiciel ANSYS APDL pour des paliers à petite excentricité relative .

On remarque que les pressions sur le plan médian sont les plus significatif et par le suite les déformation liées à cet pression est les plus dominante.

En perspective une amélioration des résultats doit passer par l'augmentation du nombre de termes de Fourier et aussi par l'augmentation de maillage (Ansys) surtout pour des paliers fortement chargés.

References

[1] Jean Frêne, « La tribologie de l'Antiquité à nos jours » .Bullet dine l'Uniodnen Physicien . Publication mensuelle Décembre 1986.

[2] Jean Frêne et autre, Lubrification Hydrodynamique Palier et Butées, direction des études et recherches d'électricité, France, 1990.

[3] Boukhelef D «etude élastohydrodynamique du comportement en mode dynamique des paliers à très haute vitesse » Thèse de doctorat en science . université ORAN 2013.

[4] ZENATI Khaled , « Etude de déformation d'une structure axisymétrique soumise à un chargement non axisymétrique Application au palier hydrodynamique Thèse de master, université Dr Yahia Fares, Médéa, 2015.

[5] SAHLI ABDELKADER, ' «Etude experimentale d'un palier lubrifie mesalignE. Thèse de magister, Université de Hassiba Ben Bouali Chlef 2011.

[6] http://fr.wikipedia.org/wiki/ANSYS.

[7] Meramria Wafa« Étude de L'Effet Dynamique d'un Palier Lisse par Analyse Vibratoire » thèse de magister, université Badji Mokhtar, Annaba, 2009.

[8] Abir BENTIBA « Étude de déformation d'un palier circulaire sous l'effet du champ de pression hydrodynamique en utilisant le logiciel ANSYS APDL » Thèse de master, université Dr Yahia Feras, Médéa, 2016.

[9] Meramria Wafa, « Etude de l'effet dynamique d'un palier lisse par Analyse vibratoire » thèse de magister, université Badji Mokhtar, Annaba, 2009.

[10] Mr. ZERAIGUI Billal. «Utilisation d'une méthode semi analytique pour le calcul d'un champ de déformation dans un palier circulaire » Thèse de master, université Dr Yahia Feras, Médéa, 2017.

[11] virgil optasanu. « modélisation expérimentale et numérique de la lubrification des paliers compliants sous chargement dynamique».these de doctorat . universite de poitiers 2000

[13] Malek HAMZAOUI « Simulation des transferts thermiques par convection et par conduction dans un palier hydrodynamique en présence d'un écoulement laminaire confine » thèse de magister. Université m'Hamed Bougara Boumerdes 2006.(courbe de stribeck).

[14]https://www.google.com.