الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université YAHIA FARES de Médéa

Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique
Filière : Génie Mécanique

Option: Conception Mécanique

Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master

Utilisation d'une méthode semi analytique pour le calcul d'un champ de déformation dans un palier circulaire

Présenté par :

- **Mr. ZERAIGUI Billal.**
- **Mr. Khemissat Rafiq.**

Proposé et dirigé par :

Dr. Djilali BOUKHELEF.

2016/2017

Remerciements

Tout d'abord je remercier Allah qui nous a donné la force, le courage et la patience pour réaliser le présent travail.

Je remercie mon promoteur **Dr Djilali Boukhelef** pour sa patience et pour le choix de ce sujet ainsi pour toute l'aide qu'il m'a apportée tout au long de ce travail.

Comme je dois remercier mon ami FODIL Abdelmadjid qui m'a aidé dans mon travail.

A tous les enseignants qui nous a aidé dans ce projet (Dr. Bentchikou, Dr. Rebhi, Dr. Alliche, Dr. Tablnhas ,Dr.Youssfi. Md.abbestorki

Je remercie mon ami **soualmi noreddine , SLIMANI Radhwane ,youcef rafa** contribué à la réalisation de ce modeste travail

.

À tous les enseignants de l'université Yahia Fares Médéa pour leur magnifique qualité humaine et leur hospitalité.

J'ai remercié également tous le personnel du département de génie mécanique

Et tous ceux qui m'ont aidé de prés ou de loin.

Dédicace

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma très chère ***Mère*** *et à mon cher* ***Père****, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affections sans limite.*

A mes frères: ***mouhamede,nadhera,hayat,fadia,zineb,ishaq,***

A toute la famille : ***ZERAIGUI ,MASkri.***

Mes amis (es) : lamia,safia,azzedene,younce ,Youcef,omar ,hakim, khalil, zakaria, mohammed, Lyess , Abdeldjalil,

Je ne peux citer ici les noms de tous mes amis (es), car ils sont nombreuses qu'ils soient remerciés et que ce mémoire leur soit dédié.

A toute la promotion de G.M2017.

ZERAIGUI Billal.



Dédicace

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

A mes chers frères.

A mes chères soeurs.

A toute ma famille.

A tous mes profs qui nous ont appris.

A mon cher Binôme ZERAIGUI Billal

A mes chers amis ,

A toutes la promo Master génie mécanique 2016/2017.

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

Rafiq khemissat

ملخص

يشمل هذا العمل تحديد التشوهات داخل محمل اسطواني املس بناء على الطريقة الشبه تحليلية التي تعتمد على تحليل فوريه.

سندرس التشوه المرن تحت تأثير ا لضغط الهيدروديناميكي على المحمل ، وذلك باستخدام برنامج ANSYS APDL وMATLAB.

الكلمات المفتاحية:

سلاسل فوريه. محمل هيدروديناميكي . تشوه مرن.

Résumé :

Ce travail consiste à la détermination du champ de déplacement radial dans un palier lisse en se basant sur une méthode semi analytique basé sur l'analyse de Fourier

nous avons étudié les déformations élastiques sous l'effet d'une pression hydrodynamique sur un palier , en utilisant les logiciels ANSYS APDL et MATLAB.

Mots clés :

Séries de Fourier, palier 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

We will study the elastic deformations under the effect of a hydrodynamic pressure on a bearing, using the software ANSYS APDL and MATLAB.

Key words :

Fourier series, hydrodynamic bearing, elastic deformation.

Table des matières

Table des matières

Remerciements

Dédicace

Résumé

Table des matières…….....I

Table des figures……..V

Liste des tableaux……..…….……V III

Notation……..IX

Introduction générale .

Introduction générale : 1

Chapitre I : Etude Bibliographique.

l.2. Historique:.....4

l.2.1.LA PERIODE PREHISTORIQUE.....4

l.2.2. LA PÉRIODE GRECQUE ET ROMAINE. 5

l.2.3.MOYEN AGE ET RENAISSANCE.....6

l.2.4.VERS LA RÉVOLUTION INDUSTRIELLE 1500-1750. 7

I.2.5. LA RÉVOLUTION INDUSTRIELLE. 7

l.2.6. LA TRIBOLOGIE AU XX^{e}SIÈCLE. 8

I.3.Les paliers lisses. 10

I.3.1.Introduction. 10

I.3.2.Classement des paliers lisses.....11

I.3.2.a.selon la forme géométrique : 11

I.3.2.b.classement selon le type de lubrification:.....14

I.3.2.c.Selon la longueur. 15

I.3.3.Les avantages et Les inconvénients des paliers lisses :.....15

l.4.Lubrification.....16

l.4.1.Définition.....16

l.4.2.Rôles de la lubrification.....16

l.4.3.Courbe de Stribeck 17

l.4.4.Les types de lubrification. 17
l.5.Lubrifiants. 19
l.5.1.Fonctions des lubrifiants....19
l.5.2.Classification des lubrifiants : 19
l.5.2.1.Lubrifiants d'origine animale : 19
l.5.2.2.Lubrifiants d'origine végétale 20
l.5.2.3.Lubrifiants d'origine minérale : 20
l.5.2.4.Lubrifiants d'origine synthétique : 20
l.5.3.Proprietes des huiles. 21
l.5.3.1.Propriétés physiques 21
l.5.3.2.Propriétés chimiques. 22
l.6.Conclusion. 23

Chapitre II : Présentation des problèmes.

II.1. Introduction. 24
II.2. Principe de fonctionnement du palier. 24
II.3. les caractéristiques géométriques d'un palier lisse. 25
II.4.L'équation générale : 26
II.4.1. Équation de Reynolds: 27
II.4.2. Équation de déplacement. 27
II.5.Conditions aux limites: 28
II.5.1.Conditions de Sommerfeld. 28
II.5.2.Conditions de Gümbel ou semi Sommerfeld. 29
II.5.3.Conditions dites de Reynolds 29
II.6.Méthode des élément finis : 30
II .7.Séries de Fourier. 31
II .7.1.Définition. 31
II .7.1.Détermination des coefficients de la série au moyen des formules de Fourier. 31
II .7.2.Séries de Fourier des fonctions paires ou impaires. 33
II .7.2.1.Fonction paire : série de Fourier cosinus. 34
II .7.2.1.Fonction impaire : série de Fourier sinus. 34

Chapitre III : Etude Numérique.

II.6. Conclusion : 35
III.1. Introduction: 36

III.2. Définition d'ANSYS……..36

III.3.Principaux produits……..…37

III.4. Environnements logiciels……..…37

III.5.Méthode de Calcul : 38

III.5. 1.Exécutez l'analyse 39

III.5. 2. Définition de l'élément et du matériau. 40

III.5. 2.1.type d'element.....40

III.5. 2.2. Les propriétés du matériau de l'élément.....41

III.5. 3.Construction de la géométrie. 42

III.5. 4.Construction du maillage. 42

III.5. 5.Conditions aux limites. 44

III.5. 6.La Solution. 44

III.6. présentation de logiciel MATLAB. 45

III.6.1.L'environnement MATLAB. 46

III.6.2.Exemple. 47

III.7.Conclusion.....48

Chapitre IV :Modélisation.

IV.1. Introduction :.....49

IV.2. Propriétés de matériaux : 49

IV.3. Déformation radiale : 52

1).Palier court L/D=0,5 :.....52

1.1.Maillage : 53

1.2.Application :.....54

2).Palier longueur finie L/D=1: 56

2.1.Maillage :.....57

2.2. Application :.....58

3).Palier infiniment long L/D=1.5 :.....61

3.1.Maillage : 62

3.2 :Application : 62

IV.4. Conclusion : 65

Chapitre V : Résultats et Discussion.

V.1.Introduction :.....66

V.2.Palier court L/D=0,5: 66
V.2.1.Discussion des résultats : 68
V.3.Palier de longueur finie L/D=1 : 70
V.3.1.Discussion des résultats : 74
V.3.2.Discussion des résultats : 75
V.4.Palier infiniment long L/D=1.5 : 76
V.2.1.Discussion des résultats : 78
V.4.Conclusion. 79
Conclusion générale 80
Bibliographie. 81

Table des figures

Figure .I.1: Interaction des éléments en tribologie. 3
Figure .I.2 : Crapaudine de porte, Mésopotamie 2500 ans avant J. C.. 4
Figure .I.3: Transport de statue, tombe de TchutiHetep, El-Bersheh, Egypte, 1880 avant J. C.. 5
Figure .I.4: Un trapetum pour écraser les olives. 6
Figure .I.5: Palier lisse utilisé sur une machine Watt construite en 1788 (doc MUSÉE FORD). 8
Figure .I.6: Les paliers Lisse..... 11
Figure .I.7:Les Roulements. 11
Figure .I.8: Coupe schématique d'un palier poreux. 12
Figure .I.9 : Schéma d'un palier à arc partiel. 13
Figure .l.10: Paliers magnétiques. 13
Figure .I.11: Photographie d'un palier à quatre patins oscillants. 14
Figure .I.12 : les defférents régime de lubrification. 17
Figure .II.1: Phase du régime hydrodynamique. 25
Figure .II.2 : schéma d'un palier lisse hydrodynamique.. 25
Figure .II.3: Géométrie d'un palier lisse circulaire. 26
Figure .II.4: Palier développé. 28
Figure .II.5 : Illustration des conditions aux limites dans un palier. 30
Figure .II.6: Schéma représenté différent forme des éléments de maillage d'ANSYS. 31
Figure .III.1: ANSYS 36
Figure .III.2:ANSYS Mechanical APDL(R12.0). 39
Figure .III.3 : Définie le type de solution. 39
Figure .III.4: Change Directory. 40
Figure .III.5: Change Jobname. 40
Figure .III.6: bibliothèque de l'élément types. 41
Figure .III.7: boite de dialogue des propriétés des matériaux. 41
Figure .III.8: Entre le module de Young et coefficient de poissant.. 42
Figure .III.9: Géométrie d'un palier lisse..... 42
Figure .III.10: Les étapes de maillage. 43
Figure .III.10 : Maillage..... 44

Figure .III.11:solve. 45
Figure .III.12:L'environnement MATLAB (Version 2011b ou 7.13).....46
Figure .IV.1 : La structure et le maillage de problème axisymétrique 3D.....50
Figure .IV.2:les conditions aux limite.....50
Figure .IV.3 : Déplacement axisymétrique du palier.....51
Figure .IV.4 : Les déformations axisymétriques du palier.....52
Figure .IV.5 : La position de Déformation étudié.....52
Figure .IV.6 : La géométrie d'un palier court L/D=0,5. 53
Figure .IV.7: Maillage de palier court L/D=0,5.....54
Figure .IV.8: Champ de pression d'un palier court (L/D=0.5 et0.2). 56
Figure .IV.9 : Le champ de pression appliquée sur un palier court……..56

Figure .IV.10 : La géométrie d'un longueur finie L/D=1. 57
Figure .IV.11 : Maillage du Palier longueur finie L/D=1. 58
Figure .IV.12 : Champ de pression d'un palier à longueur finie e=0.2 60
Figure .IV.13 :Champ de pression d'un palier à longueur finie e=0.8.....60
Figure .IV.14: Le champ de pression appliquée sur le palier. 61
Figure .IV.15 : La géométrie d'un palier à longueur finie. 62
Figure .IV.16 : Maillage du palier infiniment long.....62
Figure .IV.17 : Champ de pression d'un palier à longueur finie faiblement chargé.....64
Figure .IV.18: Le champ de pression appliquée sur le palier. 65
Figure .V.1 : Schéma de solution sur ANSYS APDL (pour e=0.2).....66
Figure .V.2 : Déformation élastique du palier court faiblement charger(ANSYS). 67
Figure .V. 3:Déformation élastique du palier court faiblement charge (Series Fourier). 68
Figure .V.4:Déformation élastique du palier court faiblement chargé (Séries Fouriers) et ANSYS.....68
Figure .V.5 : Schéma de déformation palier court faiblement charger (e=0.2). 69
Figure .V.6 : Schéma de solution sur ANSYS APDL.....70
Figure .V.7 : Déformation élastique du palier à longueur finie faiblement chargé avec ANSYS. 71
Figure .V.8: Déformation élastique du palier à longueur finie faiblement chargé avec Fouriers. 72
Figure .V.9:Déformation élastique du palier à longueur finie faiblement chargé avec Fourieret ANSYS.....72

Figure .V.10 : représenté la déformation élastique du palier longueur finie L/D=1fortement charger (e=0.8) avec ANSYS.....73
Figure .V.11 : représenté la déformation élastique du palier longueur finie L/D=1fortement charger (e=0.8) avec ANSYS.....73
Figure .V.12:représenté la déformation élastique du palier longueur finie L/D=1 fortement charger (e=0.8) avec ANSYS.....74
Figure .V.13: schéma de déformation élastique du palier à longueur finie faiblement charger(e=0.2). 75
Figure .V.14: schéma de déformation élastique du palier à longueur finie fortement charger(e=0.8). 76
Figure .V.15. Schéma de solution sur ANSYS APDL (pour e=0.2).....76
Figure .V.16:déformation élastique du palier L/D=1.5 et (e=0.2) (ANSYS). 77
Figure .V.17:déformation élastique du palier L/D=1.5 et (e=0.2) (ANSYS). 78
Figure .V.18: Schéma de déformation élastique du palier infiniment long faiblement chargé(L/D=1.5 et e=0.2)…….. 79

Liste des tableaux.

Tableau.IV.1 : Tableau de propriété du palier. 49

Tableau. IV.2 : Tableau de déplacement axisymétrique dans chaque nœud. 51

Tableau.IV.3 : Tableau de géomètre d'un Palier court. 52

Tableau.IV.4.la maillage d'un palier court L/D=0,5. 53

Tableau.IV.5 : Tableau de champ du pression et champs de force applique sur le palier court. ..55

Tableau.IV.6 : Tableau de géomètre d'un palier**.** 57

Tableau.IV.7 : Tableau de champ de pression et champs de force applique sur un palier à longueur finie. 59

Tableau.IV.8 : Tableau de géomètre d'un palier**.** 61

Tableau.IV.9: Tableau de champ de pression et champs de force applique sur un palier infiniment long. 63

Tableau.V.1: Tableau de déformation radiale du palier court faiblement 66

Tableau.V.2: Tableau de déformation radiale du palier à longueur finit faiblement/fortement chargé. 70

Tableau.V.3: Tableau de déformation radiale dupalier infiniment long Faiblement charge. 76

NOMENCLATURE DES SYMBOLES

Symbole	Définition	Unité
L	Longueur du palier	[m]
D	Diametre du palier	[m]
d	Diametre du coussinet	[m]
H	Epaisseur du film	[m]
F	Force hydrodynamique	[N]
P	Pression	[N/m2]
R_a	Rayon de l'arbre	[m]
R_C	Rayon du coussinet	[m]
C	Jeu radial	[m]
E	Excentricité absolue	[m]
R	Rayon	[m]
O_{ac}	Centre du coussinet	/
O_{ao}	Centre de l'arbre	/
O_{a0}	Position d'équilibre statique,	/
Ω	Vitesse de rotation de l'arbre	[tr/min]
u, v	Composantes de la vitesse	[m/s]
Θ	Coordonnée circonférentielle	[rad]
M	Viscosité dynamique	[Pa.s]
φ	Angle de calage	[rad]
ε	Excentricité relative	/

Introduction générale

Introduction générale :

La tribologie est la branche de la mécanique qui étudie le frottement, l'usure et la lubrification des surfaces de contact entre deux solides. Elle s'intéresse principalement aux corps solides ou à l'interaction entre un solide et un lubrifiant liquide (huile), onctueux(graisse) ou granulaire (poudre).

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.

Les paliers lisses sont fréquemment utilisés; les plus simples sont constitués d'un arbre cylindrique tournant à l'intérieur 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 un problème axisymétrique 2D.

Le logiciel ANSYS APDL est utilisé pour le calcul d'un champ de déformation sous l'effet d'une pression unitaire sur le plan médian du palier. tandis que le logiciel MATLAB est employé pour la détermination des coefficients de Fouriers 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, 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 Fouriers

Dans le troisième chapitre nous allons présenter 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 d'un palier court et de longueur finie puis d'un palier infiniment long.

Chapitre I :

Etude Bibliographique

l.1.Introduction

Le nom tribologie créé récemment en Angleterre vient du grec tribein : frotter, et logos parole, étude ou science ; ainsi la tribologie est l'étude ou la science du frottement. Plus généralement la tribologie regroupe l'étude de la 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 mille cent année, 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 les quelles plus du quart de la puissance indiquée du moteur est perdue en frottement dans le moteur et dans la transmission.[1]

La Figure suivante décrit schématiquement les relations qui existent entre les trois aspects de la tribologie. [3]

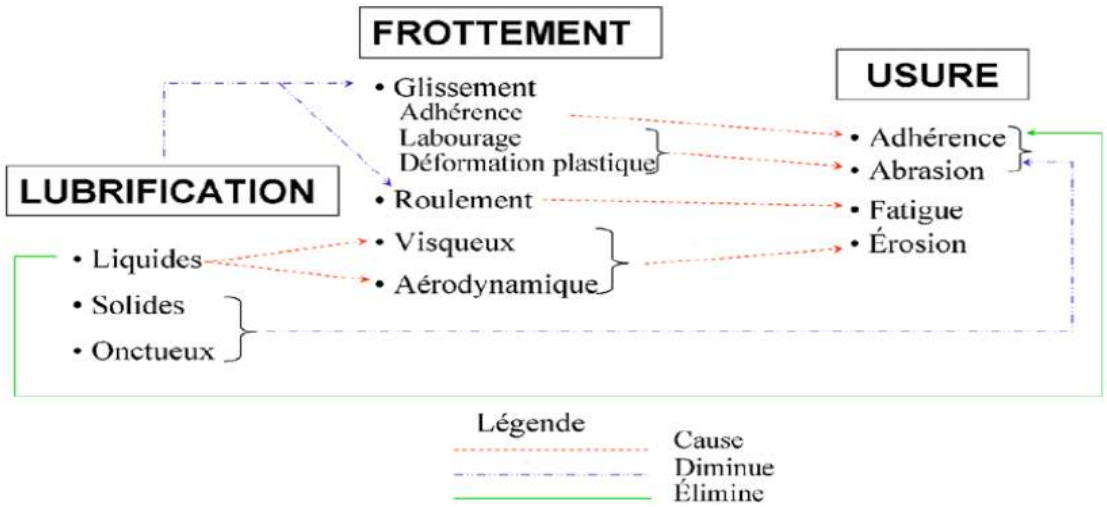


Figure.I.1 : Interaction des éléments en tribologie.

l.2. Historique:

Les références [1] et [2] regroupent un historique sur les importantes étapes du développement du domaine de la tribologie et la lubrification.

l.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 (Figure. I. 2).

De même, la fabrication des poteries a conduit très tôt, vers 4000 ans avant J. C. à la réalisation des tours de potier qui comportaient un pivot ; ce pivot pouvait être en bois, en pierre ou même en terre cuite. Ainsi, un pivot de tour en pierre, daté de 2000 ans avant J. C., a été retrouvé à Jéricho. Ces pivots étaient sans doute lubrifiés à l'aide soit de bitume soit de graisse animale.

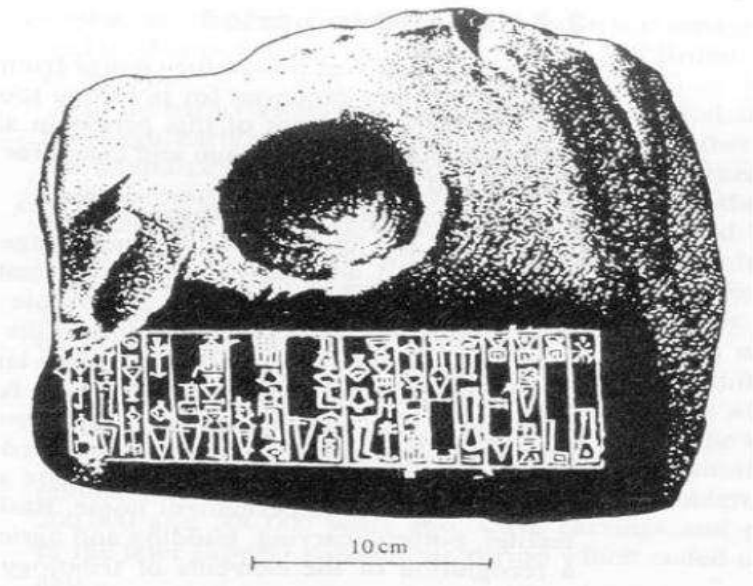


Figure. I. 2 : Crapaudine de porte, Mésopotamie 2500 ans avant J. C.

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. Les chariots montés sur roues ne permettaient

pas le transport de lourdes charges ; pour cela, l'homme a utilisé des rouleaux de bois intercalés entre une piste en bois formée de gros troncs d'arbres équarris et l'objet à transporter.

Pour transporter les lourdes charges, les Égyptiens 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 Saqqarah 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 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. (Figure .I.3).

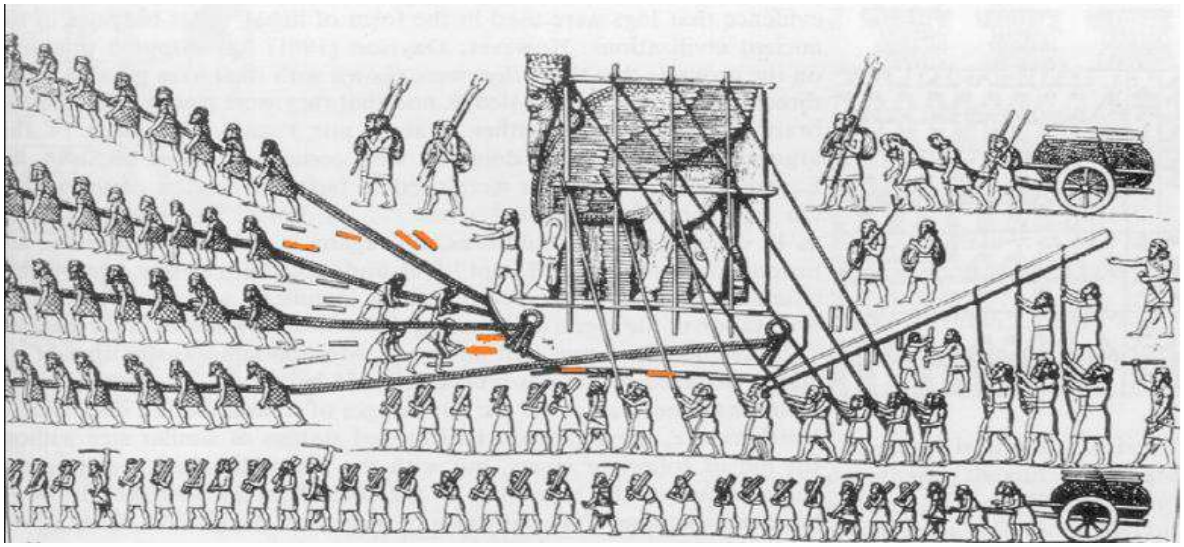


Figure.I.3: Transport de statue, tombe de TchutiHetep, El-Bersheh, Egypte, 1880 avant J. C.

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.

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 Trappeur dont plusieurs exemplaires ont été retrouvés dans les fouilles d'Olynthe (V^{e} siècle avant J. C.) et qui permettait

d'écraser et de dénoyauter les olives .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 (Mortarium) 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 méta qui évitait une usure trop rapide de l'arbre en bois; c'est un des premiers exemples de palier. (Figure.I.4).

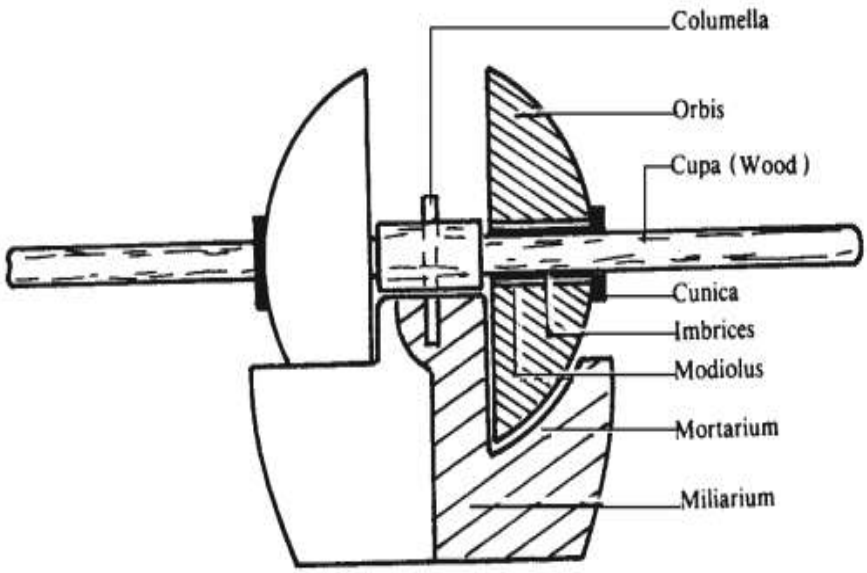


Figure.I.4: Un trapetum pour écraser les olives.

l.2.3.MOYEN AGE ET RENAISSANCE.

Après la chute de l'Empire romain et jusqu'au début du Moyen Age, c'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 VII^{e} siècle ; en tout cas, il est certain que les moulins à vent existaient en Perse au X^{e} siècle.

Vers la fin du Moyen Age, de nombreuses horloges mécaniques ont été réalisées. Les axes en fer des premières horloges étaient supportés par des coussinets en fer qui étaient vraisemblablement lubrifiés avec des huiles animales ou minérales ; ultérieurement des coussinets en bronze ont permis de réduire le frottement et l'usure.

Après le Moyen Age, la période de la Renaissance est marquée par un développement dans tous les domaines et naturellement aussi en tribologie. L'ouvrage "De rebus militaribus"

connu sous le nom de "De machinis libri decem" écrit en 1449, par Mariano Daniello di Jacopo dit Tacola, présente deux systèmes bielle manivelle.

l.2.4.VERS LA RÉVOLUTION INDUSTRIELLE 1500-1750.

C'est au XVII^{e} siècle que les premières études sur le frottement, à l'exception de celle de Léonard de Vinci, ont été effectuées : en Angleterre Robert Hooke (1635-1703) dont les travaux en Résistance des Matériaux sont bien connus montre que la déformation des solides est en partie responsable du frottement de roulement.

Ces lois qui, dans le cas du frottement sec, sont encore globalement valables aujourd'hui, ont été confirmées quelques années plus tard par Philippe de la Hire (1640-1718) et Antoine Parent (1666-1716)qui introduisit la notion d'angle de frottement.

En 1748, le mathématicien suisse Léonhard Euler (1707-1783) soumet à l'Académie des Sciences deux articles sur le frottement, dont la publication aura lieu en 1750. Dans ces articles à caractère théorique, Euler développe une approche analytique du frottement, il précise la notion de coefficient et d'angle de frottement encore utilisée aujourd'hui. Ildistingue le frottement statique du frottement dynamique dont les valeurs, c'est bien connu, sont différentes; enfin il propose de représenter la rugosité des surfaces par des pyramides.

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».

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

Du point de vue technologique le XVIII^{e} siècle qui correspond au tout début de la révolution industrielle voit la réalisation de nombreuses machines utilisant des paliers lisses et même des roulements. Des butées à billes, sans cage, ont été retrouvées sur différents mécanismes: vanne de barrage à Philadelphie construit vers 1770, moulin à vent à Sprowston

Norkwilk construit vers 1780. Par ailleurs le développement des machines à vapeur a entraîné l'utilisation de nombreux paliers lisses. La Figure.I.5 montre un des paliers lisses d'une machine à vapeur de type Watt, construite en 1788 et qui se trouve au musée Ford à Détroit.



Figure.I.5. Palier lisse utilisé sur une machine Watt construite en 1788 (doc MUSÉE FORD).

En 1847, Gustave Adolph Hirn (1815-1890) plus particulièrement connu pour ses travaux en thermodynamique, réalise les premières expériences de lubrification hydrodynamique.

En 1883 Nikolai Pavlovich Petrov (1836-1920) présente le résultat de ses études et essais sur le frottement des paliers lubrifiés.

En Angleterre en 1882, «the Institution of Mechanical Engineers» engage Beauchamp Tower (1845-1904) pour réaliser des essais sur la lubrification des paliers.

C'est Osborne Reynolds (1842-1912), très connu pour ses études des écoulements turbulents qui, dans un article publié en 1886, établit les bases de la lubrification hydrodynamique actuelle dans le but d'expliquer les résultats expérimentaux de Tower.

l.2.6. LA TRIBOLOGIE AU XX^{e} SIÈCLE.

Pour donner un aperçu des progrès réalisés, nous utiliserons 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 XX^{e} 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 1931, Albert Kingsbury (1863-1943) obtient une solution approchée à l'équation de Reynolds, en utilisant une méthode analogique basée sur la similitude existante entre l'équation de Reynolds et l'équation qui décrit la loi de variation de la tension électrique dans un milieu résistif.

En 1953, Fred William Ocvirk (1913-1967) présente une méthode approchée pour le calcul des paliers courts. Il propose de négliger, dans l'équation de Reynolds, le gradient de pression circonférentiel devant le gradient de pression axial. La solution est analytique et utilise les conditions aux limites de Gümbel.

Les premières solutions numériques ont été proposées par Cameron et Wood en 19 siècles. L'existence de la lubrification hydrostatique connue avant le début de ce siècle. Ainsi, L. D. Girard en 1865, démontra le principe de la séparation des surfaces et de la réduction de frottement par injection d'huile sous pression.49, puis par Pinkus, Raimondi et Boyd en 1958.

En 1917, Lord Rayleigh fut le premier à présenter l'analyse d'un système hydrostatique et à calculer la charge et le couple de frottement d'une butée hydrostatique axiale.

La possibilité d'utiliser de l'air et plus généralement des gaz comme lubrifiant a été mise en évidence par Gustave Hirn avant 1854. Cependant, malgré les études réalisées en 1898 et le dispositif de démonstration mis au point en 1926 par AlbertKingsbury, ainsi que les brevets pris par Ferranti en 1904, ce n'est que depuis la seconde moitié du XX siècle que l'emploi des paliers à gaz s'est généralisé. Ces dispositifs, qui peuvent être des systèmes aérostatiques ou aérodynamiques, sont réservés aux mécanismes de hautes précisions (métrologie) ou à très grande vitesse (fraises de dentiste, gyroscopes, turbines ...). Leur emploi reste cependant limité aux systèmes supportant de faibles charges.

En 1916, Martin présente l'étude du contact entre un cylindre et un plan dans le cas d'un écoulement bi-dimensionnel, en supposant les surfaces indéformables et la viscosité du fluide constante.

La première approche du problème élastohydrodynamique a été proposée par Grubin et Vinogradova en 1949. Cette analyse prend en compte la déformation élastique des surfaces calculée à l'aide de la théorie de Hertz et l'augmentation de la viscosité du lubrifiant avec la pression.

La première solution complète du problème élastohydrodynamique a été proposée en 1959 par Dowson et Higginson ; ces auteurs ont utilisé une méthode de résolution numérique itérative qui permet de coupler le calcul des déformations élastiques à celui de la résolution de l'équation de Reynolds.

I.3.Les paliers lisses.

I.3.1.Introduction.

Les paliers sont des organes mécaniques utilisés en construction mécanique pour supporter et guider en rotation, des arbres de transmission suivant l'usage désiré.

On peut classer les paliers selon deux catégories :

1- lisse ou les arbres qui reposent sur des coussinets sont soumis au frottement de glissement entre les surfaces en contact (figure.I.6)

2- 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 (figure.I.7). **[4]**



Figure.I.6. Les paliers Lisse.



Figure.I.7. Les Roulements.

I.3.2.Classement des paliers lisses.

En peut classer les paliers selon défirent type, mais nous trouvons trios types sont :

I.3.2.a.selon la forme géométrique :

I.3.2.a.1.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 contacte 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). **[4]**

I.3.2.a.2.Paliers poreux.

Les paliers à coussinets poreux sont dits auto-lubrifiants 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.8) **[4]**

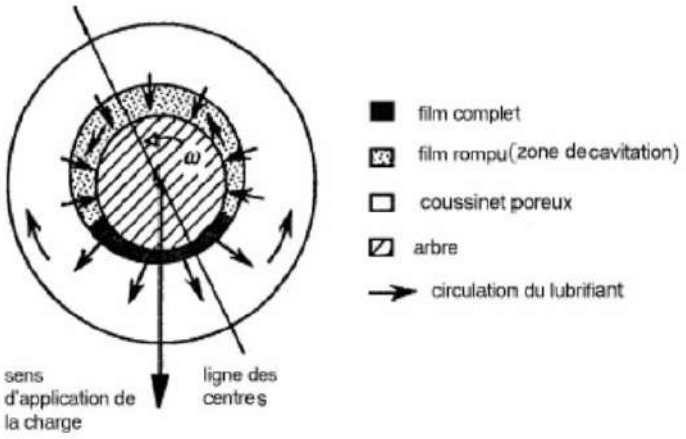


Figure. I.8: Coupe schématique d'un palier poreux.

I.3.2.a.3.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 correspondant à la meilleure solution technologie existant actuellement.

On les rencontre dans les moteurs thermiques, les compresseurs, les turbomachines, les alternateurs, les réducteurs…etc. **[3]**

I.3.2.a.4.Palier à arc partiel :

Les paliers lisses cylindriques ou à arc partiel (Figure I.9) faiblement chargés à vitesse élevée présentent de grands risques d'instabilités. L'idée d'améliorer la stabilité du palier en modifiant son profil de manière à augmenter l'excentricité de fonctionnement, c'est à-dire de la

précharge, date des années 1934.En effet, Newkrik et Grobel ont vérifié expérimentalement que l'existence d'une discontinuité dans la géométrie à la surface du coussinet pouvait améliorer la stabilité du palier. **[3]**

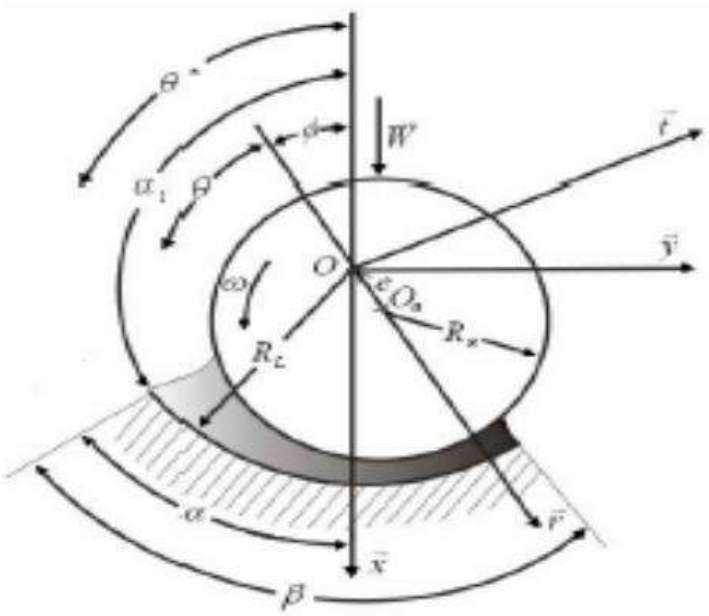


Figure.I.9 : Schéma d'un palier à arc partiel.

I.3.2.a.5.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 levide et sont utilisables dans une large gamme de températures (-200°C à 450°C) avec une dissipation d'énergie mécanique pratiquement nulle (Figure l.10). [4]



Figure. l.10. *Paliers magnétiques.*

I.3.2.a.6.Paliers à patins oscillants.

Les paliers à patins oscillantssont sont des paliers réglables par leur mode de fonctionnement (figure.I.11). Ils sont composés de n patins, identiques ou non, individuellement articulés autour de pivots situés généralement sur un cercle appelé cercle des pivots. [4]



Figure.I.11. Photographie d'un palier à quatre patins oscillants.

I.3.2.b. classement selon le type de lubrification:[5]

I.3.2.b.1.Le régime du frottement sec :

- Aucun film lubrifiant entre les surfaces en contact.Le glissement y est le plus difficile et l'usure la plus rapide

I.3.2.b.2.Le régime de lubrification limite, ou onctueuse :

- Un filme de lubrifiant recouvre les surfaces en contact sous la forme d'un épilamen (très fine couche).

I.3.2.b.3.Le régime de lubrification hydrodynamique :

- Il n y a plus aucun contact entre les surfaces. Celles-ci est toujours séparées par une couche de lubrifiant d'épaisseur minimale (e = 0.02 à 0.008 mm). Le mouvement, àcondition que la vitesse soit suffisante, crée une portance hydrodynamique comparable au ski nautique. .

I.3.2.b.4.Le régime de lubrification mixte :

- C'est un mélange de frottement onctueux et de frottement hydrodynamique, caractérisé par une portance hydrodynamique intermittente avec quelques contacts locaux.

I.3.2.b.5.Le régime élasto-hydrodynamique :

- Cet état est obtenu avec contact des surfaces élastiques, fortement chargées et généralement en contact selon un point ou une ligne.

I.3.2.c. Selon la longueur. [6]

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.3.2.b.1. Palier court :

Un palier est dit court lorsque le rapport (L/D) de la longueur au diamètre du palier est faible, de $L/D \leq 0.5$. Dans ce type de palier, on pose l'hypothèse d'un gradient de pression circonférentiel négligeable, ce qui simplifie considérablement les calculs.

I.3.2.b 2. 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 $L/D \geq 1.5$. Dans ce type de palier, on pose l'hypothèse d'un gradient de pression axial négligeable devant le gradient de pression circonférentiel.

I.3.2.b.3. Palier de longueur finie :

Dans le cas où le rapport L/D est compris entre 0.5 et 1.5, 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.

I.3.3.Les avantages et Les inconvénients des paliers lisses :

- **Les avantages.**
  - Moins encombrant

- Coût initial élevé
- Moins sensible aux poussières et aux corps étrangers
- Une durée de vie non limitée par le phénomène de fatigue
- Supportent mieux les chocs de fonctionnement.
- Grandes vitesses de rotation.

❖ **Les inconvénients.**

- Ils ne supportent pas les grandes vitesses et les grandes charges,
- Supporte un couple de démarrage faible,
- Ils nécessitent un grand couple au démarrage à des basses températures.

l.4.Lubrification.[7]

l.4.1.Définition.

La lubrification ou le graissage est un ensemble de techniques permettant de réduire le frottement, l'usure entre deux éléments en contact et en mouvement l'un par rapport à l'autre. Elle permet souvent d'évacuer une partie de l'énergie thermique engendrée par ce frottement, ainsi que d'éviter la corrosion… Dans ces situations, les écoulements fluides sont parallèles aux surfaces.

l.4.2.Rôles de la lubrification.

- diminuer les frottements et les résistances passives dans les machines, améliorer leur rendement et économiser l'énergie ;
- protéger les organes lubrifiés contre les diverses formes de corrosion et d'usure, donc contribuer à leur longévité ;
- évacuer la chaleur produite dans les moteurs ou lors de l'usinage, favoriser l'équilibre thermique des machines ;
- améliorer l'étanchéité vis-à-vis des gaz, des liquides ou des poussières ;
- éliminer les impuretés et les débris d'usure ;
- transmettre de l'énergie ou de la chaleur ;
- améliorer l'état de surface des pièces usinées ;

I.4.3.Courbe de Stribeck.[13]

Cette courbe a permis de déférence trois principaux modes fonctionnement ou régimes de lubrification d'un palier. Ceux-ci sont identifiés en fonction du type d'interactions de contact qui survient entre la surface du matériau antifriction et la surface antagoniste.

La figure (I.11) illustre ces trois modes de fonctionnement :

- la région 1 est définie comme étant de lubrification limite.
- la région 2 correspond à un régime de lubrification dit mixte.
- la région 3estdite lubrification hydrodynamique.

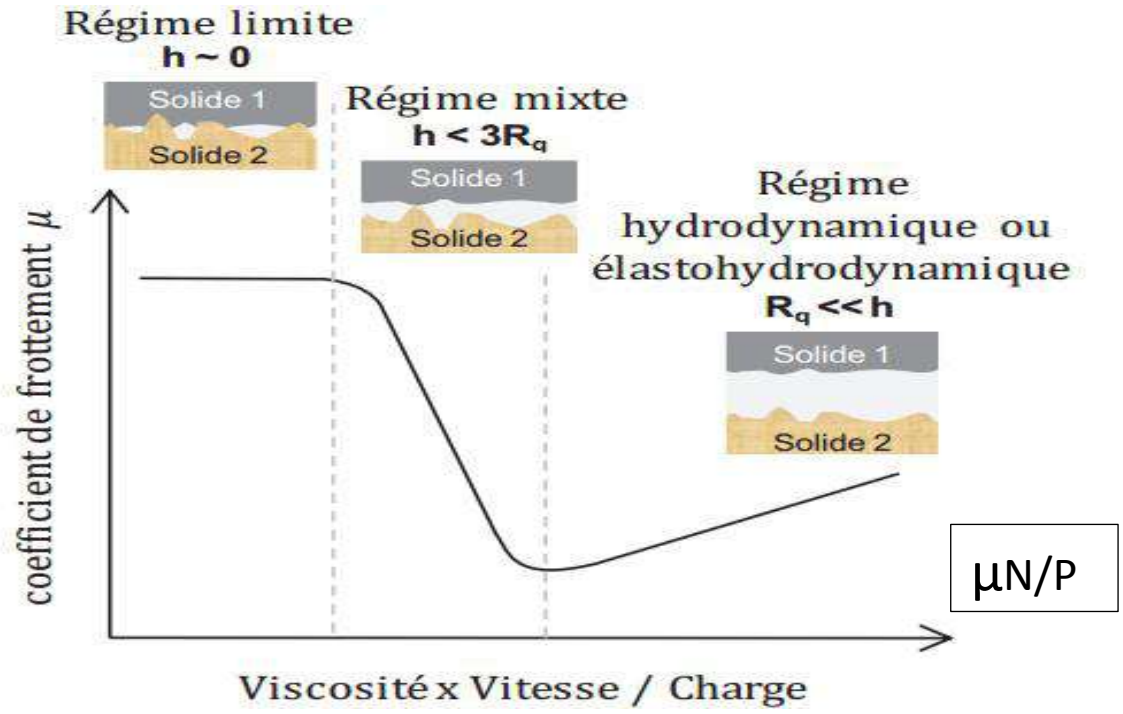


Figure.I.12 : les defférents régime de lubrification.[13]

I.4.4.Les types de lubrification.[7]

On passe progressivement du frottement sec à la lubrification « idéale » où un film suffisamment épais sépare complètement les pièces. La transmission des efforts est ssurée dans le premier cas par les seules aspérités des surfaces, dans le second cas par la pression qui règne dans la couche de lubrifiant.

Le frottement immédiat, ou sans lubrifiant. Le frottement lubrifié ou médiat est subdivisé en plusieurs régimes différents :

- **lubrification limite :** l'épaisseur du film lubrifiant est insuffisante pour isoler complètement les solides en contact ; si la charge devient trop forte, il ne subsiste qu'une couche absorbée quasi monomoléculaire. C'est la solidité de cette dernière qui empêcheles contacts métal sur métal. L'aptitude du lubrifiant à former une couche adhérente, appelée onctuosité,est ici une qualité primordiale ;
- **lubrification onctueuse :** la couche de lubrifiant est plus épaisse, elle commence à porter une partie des charges mais il subsiste des contacts entre les aspérités des pièces. En général, les pressions sont plutôt importantes et les vitesses relatives plutôt faibles ;
- **lubrification « mixte » :** le fluide supporte une partie importante des charges mais des contacts subsistent entre les aspérités. Le frottement est minimal mais ce régime est très instable et il vaut mieux 'éviter ;
- **lubrification hydrodynamique :** le lubrifiant liquide est entraîné et mis sous pression par le mouvement relatif des surfaces. Il sépare totalement es dernières et supporte l'intégralité des charges, grâce à sa viscosité, qui correspond à sa résistance à l'écoulement. Dans ce cas de figure les vitesses relatives ne sont jamais très faibles mais les pressions restent modérées, de sorte que l'on peut négliger les déformations des pièces et la compressibilité du lubrifiant ;
- **lubrification « pseudo-hydrodynamique » :** l'huile arrive dans le contact par capillarité et forme un film lubrifiant par effet d'entraînement mais ce film ne peut pas véritablement être mis sous pression et supporter les charges. C'est ce qui se passe par exemple dans les coussinets autolubrifiants en bronze poreux ;
- **lubrification élastohydrodynamique :** c'est un cas particulier du précédent, lorsque la pression dans le film liquide est suffisante pour déformer localement les solides en contact, comme c'est le cas lors du fonctionnement des engrenages. Cette déformation change la géométrie du film et la répartition des pressions, mais aussi les caractéristiques des lubrifiants à 7 000 bar et 100 °C (conditions fréquentes dans les contacts), la viscosité des huiles naphténiques peut être multipliée par 100 000 ;
- **lubrification hydrostatique ou aérostatique :** elle consiste à envoyer, à l'aide d'une pompe ou d'un compresseur, un liquide ou un gaz sous pression pour séparer les surfaces qui peuvent alors être ou non en mouvement relatif. Elle est la garantie d'un

frottement extrêmement faible et d'une absence quasi totale d'usure mais il faut une source d'énergie extérieure.

l.5.Lubrifiants.[8]

l.5.1.Fonctions des lubrifiants

- Fonctions des lubrifiantsUne réduction des pertes d'énergie mécanique ;
- Une réduction de l'usure des organes en contacte ;
- Une protection des surfaces frottantes contre la corrosion (action de l'oxygène ,de
- l'air, de l'eau, le soufre contenu dans le fuel des moteurs Diesel…) ;
- L'évacuation de la chaleur :
- Dans les moteurs thermiques, l'huile peut enlever jusqu'à 40٪ de la chaleur produite par la combustion ;
- Dans la coupe des métaux, le rôle de refroidissement de l'outil est primordial ;
- L'accroissement de l'étanchéité :
- Dans un moteur thermique, l'étanchéité aux gaz de l'ensemble piston-cylindresegments dépend de la viscosité de l'huile adhérant à la paroi intérieure du cylindre:
- L'abaissement du niveau sonore.

l.5.2.CLASSIFICATION DES LUBRIFIANTS :

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

l.5.2.1.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 :

- **Liquides :** oléines, huiles de lard, de pied de bœuf ou de mouton, etc., très onctueuses, huiles de poisson, de baleine, de phoque, glycérine autrefois utilisée pour son point de congélation très bas.

- **Pâteux :** oléo stéarines, suifs (qui deviennent très acides par oxydation), suintines et brais résultant du traitement de la laine, lanoline très utilisée dans les produits antirouille car elle absorbe l'eau ;
- **Solides :** stéarine, dont l'usage est restreint à la formulation de graisses très dures.

l.5.2.2.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 :

- **Liquides :** huiles semi siccatives (s'épaississant par oxydation) de coton, de colza, huiles non siccatives d'arachide, d'olive, et surtout de ricin intéressante par sa forte viscosité et la possibilité de l'utiliser dans une large gamme de températures.
- **Pâteux :** huiles de palme, de coco et de coprah, liquides aux températures tropicales mais pâteuses dans les régions froides ;
- **Solides :** résines et colophanes tirées du pin, pouvant résister à l'eau.

l.5.2.3.Lubrifiants d'origine minérale :

- **Liquides :** huiles de houille (Charbon utilisé comme combustible), de schiste (Rochesédimentaire ou métamorphique qui se débite en feuillets), utilisables comme produits de remplacement, et surtout huiles de pétrole.
- **Pâteux :** vaseline.
- **Solides :** soufre utilisé autrefois pour sauver les paliers endommagés, talc, mica, bisulfures de molybdène et de tungstène, graphite, sulfure de plomb, oxyde de zinc.

l.5.2.4.Lubrifiants d'origine synthétique :

- **Liquides :** silicones, polyglycols, esters phosphoriques, esters aliphatiques, polyoléfines, métaux liquides.
- **Pâteux :** verres, borates et oxyde de bore B2O3 (pâteux à chaud), graisses silicones.
- **Solides :** polyéthylènes, polytétrafluoroéthyène (PTFE), savons (stéarates de zinc, de calcium, d'aluminium, etc.), oxyde de plomb (PbO), disulfure de tungstène, phtalocyanine, fluorure de graphite, fluorures de calcium, de baryum et de lithium, nitrure de bore.

l.5.3.Proprietes des huiles.

l.5.3.1.Propriétés physiques .

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.

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.

3. Chaleur massique :

- Elle s'exprime en Joules par kilogramme x 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.

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.

5. Viscosité :

- 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.

6.Compressibilité :

- Le module de compressibilité est de l'ordre de $6*10^5$en 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.

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.

l.5.3.2.Propriétés chimiques.

1.combustibilité, point d'éclair, point de feu :

- À partir d'une certaine température, les constituants volatils de l'huile peuvent brûler aucontact 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.

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.

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.

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.

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.

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.

l.6.Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents étapes du développement de la tribologie et type des paliers lisse.

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

Chapitre II : Présentation Du Problème

II.1. Introduction.

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'équation de base de lubrification hydrodynamique, les hypothèses de Reynolds associés à ce problème et d'autre part l'équation de déformation élastique. En plus on utilise la série de Fourrier.

II.2. Principe de fonctionnement du palier. [6]

Le fonctionnement du palier repose sur le débit du film. L'adhérence du fluide lubrifiant en film mince aux parois en mouvement crée un débit du lubrifiant. 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.

La (figure II.1) présente les trois phases que l'on observe lors de la mise en route d'un palier sous chargement.

Phase (a): À l'arrêt, (figure.II.1.a), l'arbre et le coussinet sont en contact, la génératrice commune est opposée à la charge et la distance est égale au jeu radial C.

Phase (b): Au démarrage, (figure. II.1.b), 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.

Phase (c):Dès que la vitesse de rotation devient suffisante, (Figure. II.1. c), il y a présence d'un champ de pression hydrodynamique qui supporte la charge P constante, le centre de l'arbre occupe une position fixe à l'intérieur du coussinet. Si le torseur de forces extérieur se réduit à une force unique P qu'agit dans les plans de la section médiane du palier, les axes de l'arbre et de coussinet sont parallèles.

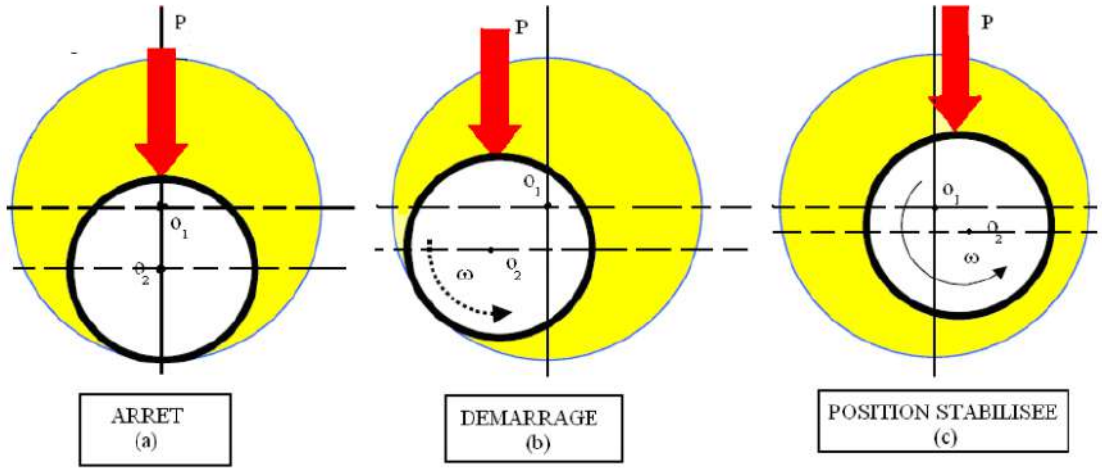


Figure.II.1. Phase du régime hydrodynamique.

II.3. les caractéristiques géométriques d'un palier lisse.

Un palier lisse hydrodynamique est constitué de trois éléments, l'arbre de rayon Ra et le coussinet de rayon Rc et de longueur L et un film d'huile intercalant les deux cylindres, (la figure II.2):

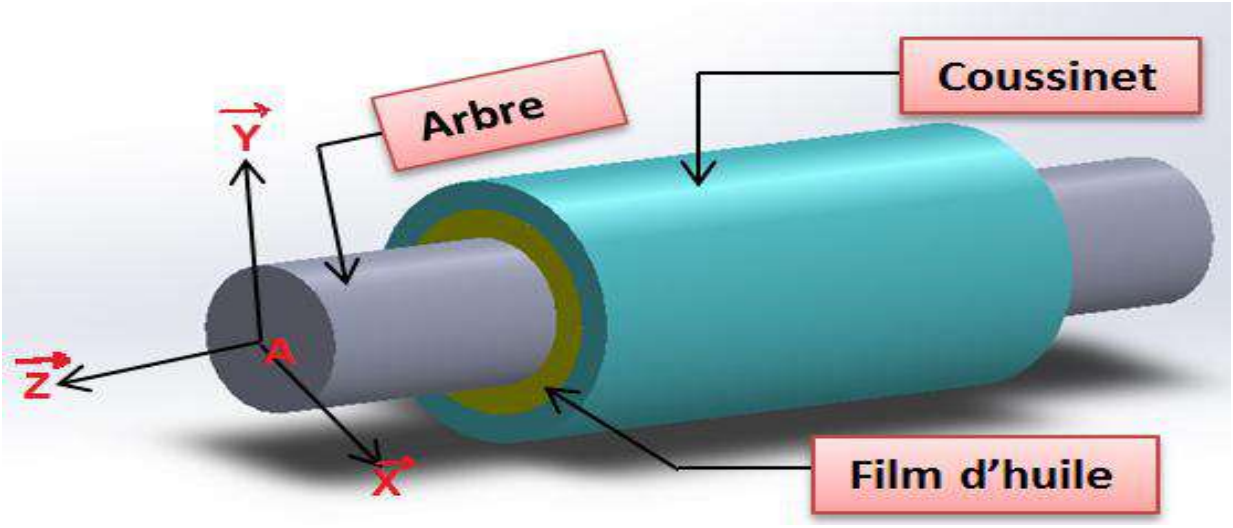


Figure. II.2 : schéma d'un palier lisse hydrodynamique.

Ainsi, un palier lisse peut être schématisé par deux cercles de rayons voisins et

Caractérisé par (Figure II.3):

Le jeu radial J= Rc - Ra.

L'excentricité relative définie par :

$$\varepsilon = \frac{e}{c}. \qquad \text{II.1}$$

C'est l'excentricité maximale donnée :

$$c = \frac{(D-d)}{2}. \qquad \text{II.2}$$

- La hauteur minimale du film lubrifiant.

$$h_{min} = c - e = (1 - \varepsilon). \qquad \text{II.3}$$

- Le rapport (L/D) de la longueur au diamètre du palier.

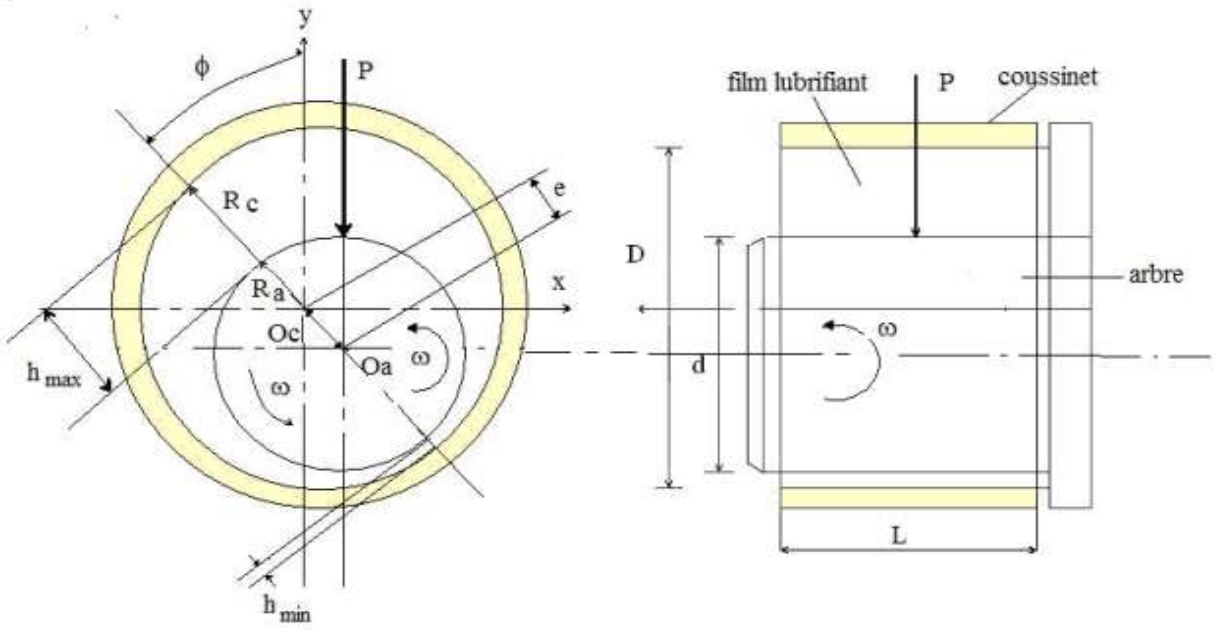


Figure. II.3: Géométrie d'un palier lisse circulaire. [10]

II.4.L'équation générale : [10]

En lubrification, l'équation de base utilisée est l'équation des films mince visqueux qui est déduite de la théorie des milieux continus en tenant compte de quelques hypothèses propre aux problèmes de lubrification. Les hypothèses de base de lubrification hydrodynamique sont :

- L'épaisseur de film est faible devant les autres dimensions.
- La vitesse de fluide selon l'épaisseur de film est très faible devant les autres vitesses.

- L'écoulement est laminaire.
- Lubrifiant newtonien, sa viscosité est constante et il est incompressible.
- Les forces de masse et d'inertie négligeable devant les forces induites par la viscosité.
- La courbe généralement de film est négligeable.
- Le milieu est continu.

II.4.1. Équation de Reynolds: [9]

L'étude de la lubrification d'un palier nécessite l'application des diverses hypothèses relatives à le mécanique des films minces visqueux. En supposant le coussinet fixe et l'arbre animé d'une vitesse angulaire de rotation ω, l'´écriture de cette équation dans un repère cartésien nous conduit à la formule suivante.

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{h^3}{12\mu}\frac{\partial P}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{h^3}{12\mu}\frac{\partial P}{\partial x}\right)=\frac{U}{2}\frac{\partial h}{\partial x}+\frac{\partial h}{\partial t}. \qquad \text{II.4}$$

Les conditions aux limites sur la pression sont assez simples : on suppose que la pression de référence est la pression atmosphérique. La pression dans les sections d'entrée et de sortie du film est considérée égale `à la pression d'alimentation et celle des bords du palier égale à la pression atmosphérique.

Avec :

x: La position autour de la circonférence d'un point donné.

z : La position dans la direction axiale de ce point

μ : La viscosité dynamique du lubrifiant qui est considérée constante dans tout le film.

h : L'épaisseur de film.

P : La pression dans le film lubrifiant.

U1, U2, V1: Sont les vitesses intérieure et extérieure.

II.4.2. Équation de déplacement. [9]

Les équations qui régissent le champ de déplacement sont données comme :

$$[M_s]\{\ddot{U}\}+[K_s]\{U\}=[F_s]+[R]\{P\} \qquad \text{II.5}$$

$$\begin{bmatrix} M_s & 0 \\ \rho RT & M_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{U} \\ \ddot{P} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_s & -R_s \\ 0 & K_f \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} U \\ P \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_s \\ F_f \end{Bmatrix} \quad \text{II.6}$$

Avec, $[M_s]$ est la matrice de masse structurale ; $[M_f]$ est la matrice de masse fluide ; $[F_s]$ et $[F_f]$ est la structure et la force de fluide matrice ; [R] est une matrice de couplage qui représente la surface efficace associée à chaque nœud dans la structure d'interface de fluide

II.5.Conditions aux limites: [10]

Pour calculer le champ de pression, il faut résoudre l'équation de Reynolds sur le domaine représenté, compte tenu des conditions aux limites sur la zone de pression. La zone est donnée selon les modèles de Reynold

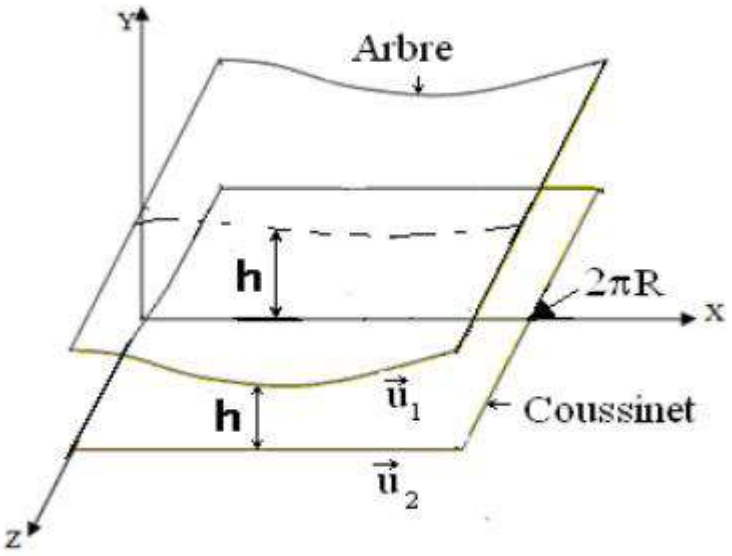


Figure. II.4. Palier développé. [10]

II.5.1.Conditions de Sommerfeld.

Sommerfeld, en 1904, suppose que le film lubrifiant est continu et qu'il n'y a pas de rupture du film.

Dans ces conditions la distribution de pression est antisymétrique par rapport au point $\pi = \theta$ et le lieu du centre de l'arbre dans le coussinet est une droite normale à la direction de charge.

Ces conditions aux limites ne sont valables que pour les paliers fonctionnant à de très faibles charges ou avec des pressions d'alimentation très élevées. Dans le cas contraire des pressions négatives apparaissent dans le film, ce qui est physiquement inacceptable. [4]

II.5.2.Conditions de Gümbel ou semi Sommerfeld.

Gümbel en 1914, à la suite des travaux de Sommerfeld, propose comme conditions aux limites

$P(\theta= 0,Z)=0$

$P(\theta= \pi, Z)=0$ II.7

Si $P(\theta, Z)=Z$ si $\pi< \theta<2\pi$

Ce la revient à négliger, dans la solution de Sommerfeld les pressions négatives.

Ces conditions impliquent une discontinuité dans l'écoulement au point $\pi = \theta$.

Elles ne sont pas acceptables physiquement mais sont utilisées dans le cas de l'approximation du palier court. [4]

II.5.3.Conditions dites de Reynolds.

Ces conditions, proposées indépendamment par Swift en 1932 et par Steiber en 1933, respectent la continuité du débit et supposent que pour une abscisse θ_S inconnue, la pression et le gradient de pression s'annulent.

$P(\theta= 0, Z)=0$

$P(\theta= \theta s, Z)=0$ II.8.

$$\frac{\partial P}{\partial \theta}(\theta = \theta_s, z) = \frac{\partial p}{\partial Z}(\theta = \theta_s, z)$$

P (θ, Z)=Z si θs< θ<2π

On distingue ainsi deux régions dans le palier :

- une région active où la pression est positive et le film complet, pour des valeurs de θ comprises entre 0 et θs

- et une région inactive à pression nulle et dans laquelle en régime dynamique, peut apparaître de la cavitation, pour θs< θ < 2π.

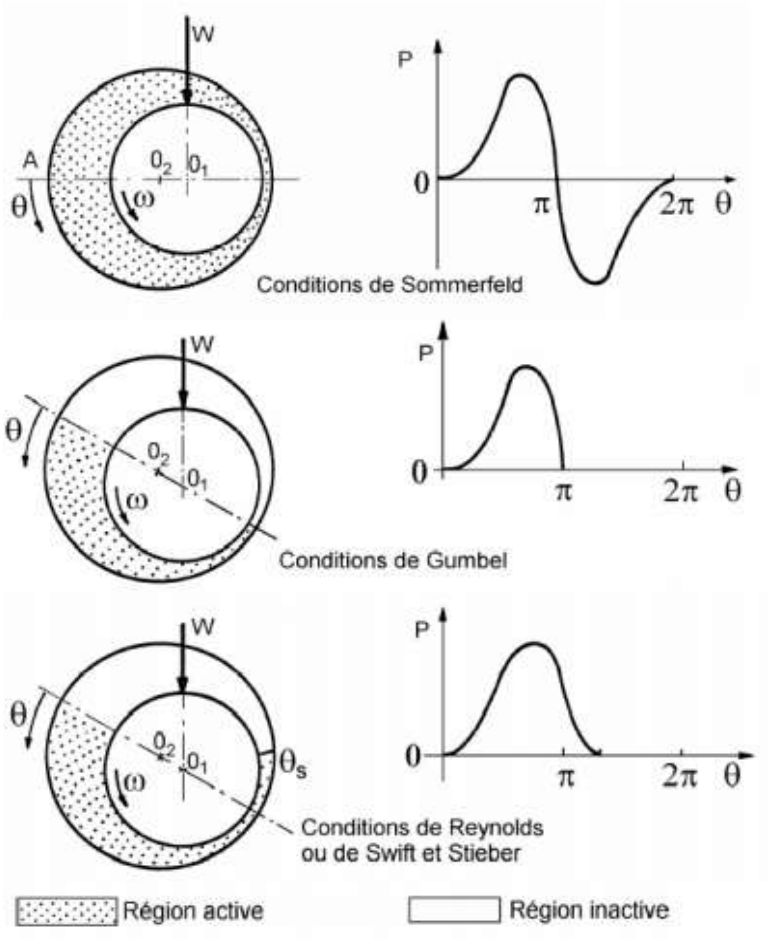


Figure. II.5. Illustration des conditions aux limites dans un palier. [4]

II.6.Méthode des élément finis : [10]

Discrétisation (maillage), calcul élémentaire, assemblage, introduction des conditions aux limites, la résolution du système d'équation et affichage de résultats.

- **Formulation par éléments finis**

Les éléments de maillage des éléments de 3D sont plusieurs hexa 8 ou 20 nœuds, Tet 4 noeud (Figure II.8)…etc. nous utilisons les éléments de maillage de type hexaédrique de 20 noeuds de ce type d'élément.

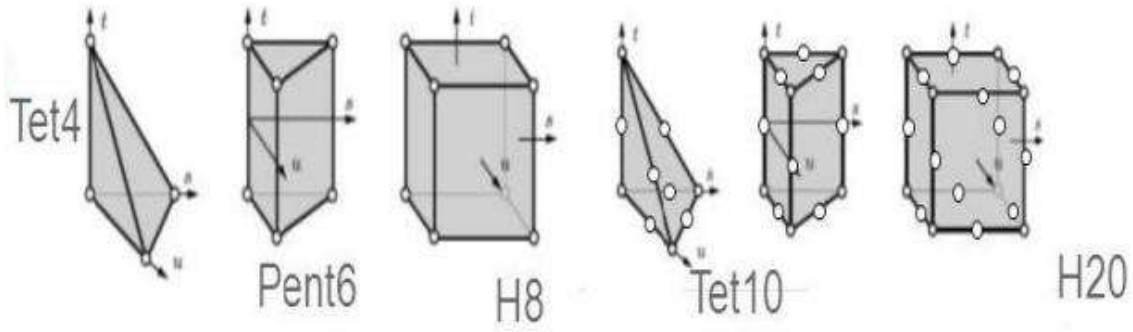


Figure II.6: Schéma représenté différent forme des éléments de maillage d'ANSYS.

II .7.Séries de Fourier.

II .7.1.Définition.

On appelle série trigonométrique une série de la forme

$$\frac{1}{a_0} + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos nx + b_n \sin nx) \qquad \textbf{(2.1)}$$

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

$$f(x) = f(x + 2\pi). \qquad \textbf{(2.2)}$$

Comme indiqué dans l'introduction, on se pose 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).

II .7.1.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 (−π, π), c'est-`a-dire que l'on peut écrire

$$f(x) = \frac{1}{a_0} + \sum_{n=1}^{\infty}(a_n \cos nx + b_n \sin nx) \qquad \textbf{(2.3)}$$

La série (2.1) (qui figure au second membre de l'équation (2.3)) est appelée série de Fourier de f (x). Les coefficients a_n et b_n sont les coefficients de Fourier de f (x).

- **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 .

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

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

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\,dx = \pi a_0, \qquad \textbf{(2.4)}$$

qui fournit une expression de a_0.

$$a_0 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\,dx \qquad \textbf{(2.5)}$$

❖ Calcul des autres coefficients 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 :

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

$$\int_{-\pi}^{\pi} \cos nx \sin kx\,dx = 0 \qquad \textbf{(2.6)}$$

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

Pour déterminer a_k pour k > 0 donné, on multiplie les deux membres de l'égalité (2.3) par cos kx

$$f(x)\cos kx = \frac{a_0}{2}\cos kx + \sum_{n=1}^{\infty}(a_0 \cos nx \cos kx + b_n \sin nx \cos kx) \quad \textbf{(2.7)}$$

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

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\cos kx dx = \pi a_k \quad \textbf{(2.8)}$$

qui fournit une expression de a_k .

$$a_k = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\cos kx dx . \quad \textbf{(2.9)}$$

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

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\sin kx dx = \pi b_k \quad \textbf{(2.10)}$$

qui fournit une expression de b_k.

$$b_k = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\sin kx dx . \quad \textbf{(2.11)}$$

II .7.2.Séries de Fourier des fonctions paires ou impaires.

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

$$f(x) = f(-x). \quad \textbf{(2.12)}$$

Elle est impaire si :

$$f(x) = -f(-x). \quad \textbf{(2.13)}$$

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.

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x)dx = 2\int_{-\pi}^{\pi} f(x)dx . \quad \textbf{(2.14)}$$

Et, si f est impaire :

$$\int_{-\pi}^{\pi} f(x)dx = 0. \quad \textbf{(2.15)}$$

II .7.2.1.Fonction paire : 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

$$a_0 = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} f(x)dx \quad \textbf{(2.16)}$$

$$a_k = \frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} f(x)\cos kx dx \quad \textbf{(2.17)}$$

$$b_k = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f(x)\sin kx dx = 0. \quad \textbf{(2.18)}$$

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.

II .7.2.1 .Fonction impaire : 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 :

$$a_0 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f\ (x)dx\ = 0. \qquad \textbf{(2.19)}$$

$$b_0 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f\ (x)\cos kx dx\ = 0. \qquad \textbf{(2.20)}$$

$$b_k\ = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} f\ (x)\sin kx dx\ = \frac{1}{\pi}\int_{0}^{\pi} f\ (x)\sin kx dx\ . \qquad \textbf{(2.21)}$$

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.

II.6. Conclusion :

La résolution de ce problème basée essentiellement sur les équations qui définissent les conditions aux limites, les équations de déplacement l'équation de Reynolds et série de Fourier.

Chapitre III : Etude Numérique

III.1. Introduction:

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats d'étude de la simulation numériques pour la détermination du champ de déplacement radial dans un palier lisse.

Le logiciel ANSYS est utilisé pour ce cas, analyse de Fourier a été établi le logiciel MATLAB.

III.2. Définition de ANSYS:

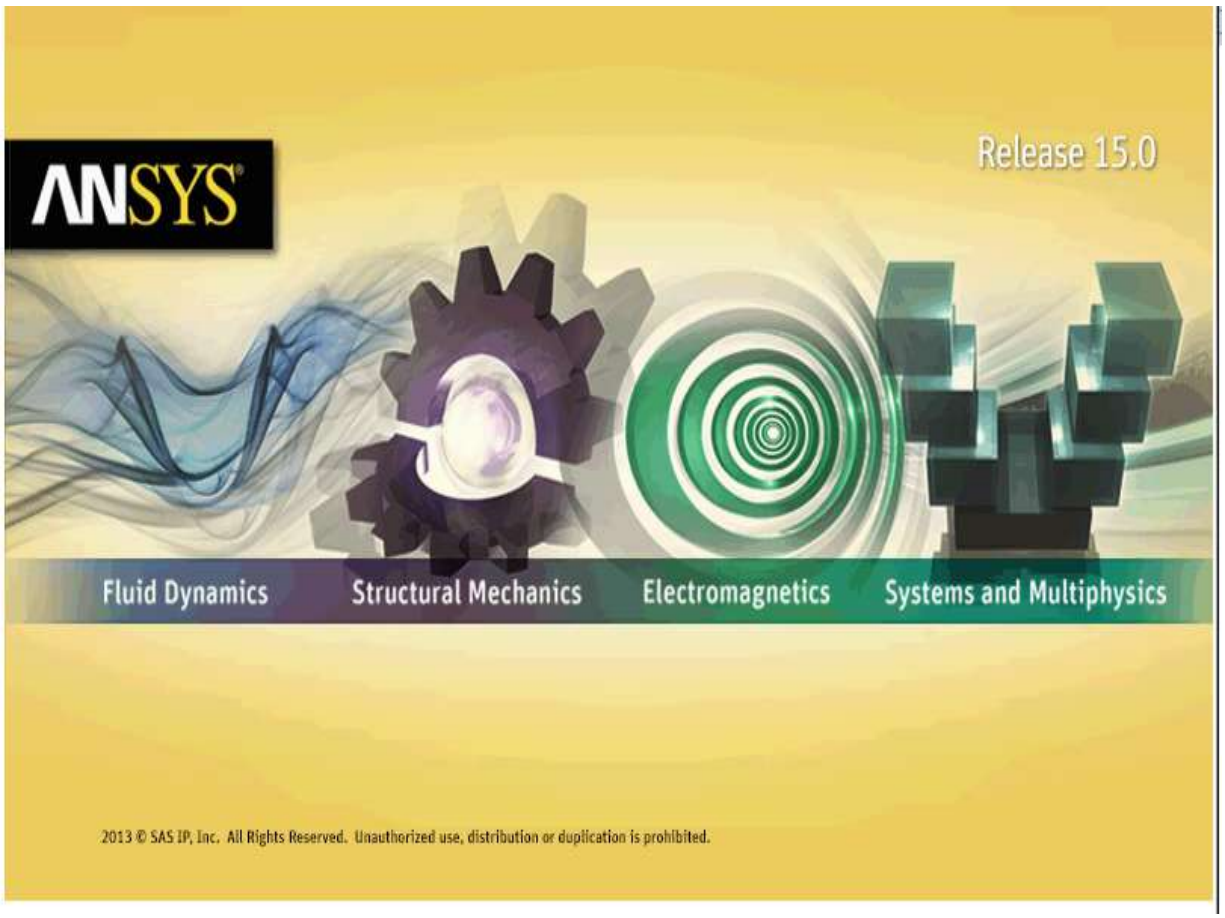


Figure. III.1. ANSYS.

ANSYS APDL est un logiciel de simulation numérique basé sur la MEF leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation.

ANSYS offre une plateforme de calcul multi-physique intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits. Les utilisateurs ANSYS sont de domaines industriels très divers comme la construction

de machines, les secteurs de l'énergie, l'automobile, le ferroviaire, l'aérospatial, le médical, la microtechnique, la micro-électronique ou encore les biens de consommation.

CADFEM est centre de compétences ANSYS en Europe et travaille en étroite collaboration avec ANSYS depuis 1985. **[14]**

III.3.Principaux produits:

- ANSYS Structural.

- ANSYS Mechanical.

- ANSYS AUTODYN et ANSYS LS-DYNA.

- ANSYS Electromagnetics et Ansoft .

- ANSYS Multiphysics .

- ANSYS CFX et Fluent.

III.4. Environnements logiciels: [11]

Deux environnements logiciels permettent de mettre en œuvre le code ANSYS :

- **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.
- **ANSYS classique**: 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.

III.5.Méthode de Calcul :

Dans ce projet, nous utilisons ANSYS Mechanical 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 (Figure. III.2.) contient plusieurs barre :

- Icon bar menu.

- Command WindowIcon.

- Icontoolbar Menu.

- AbbreviationToolbar Menu.

- Main Menu.

-Model Control Toolbar.

-Output Window.

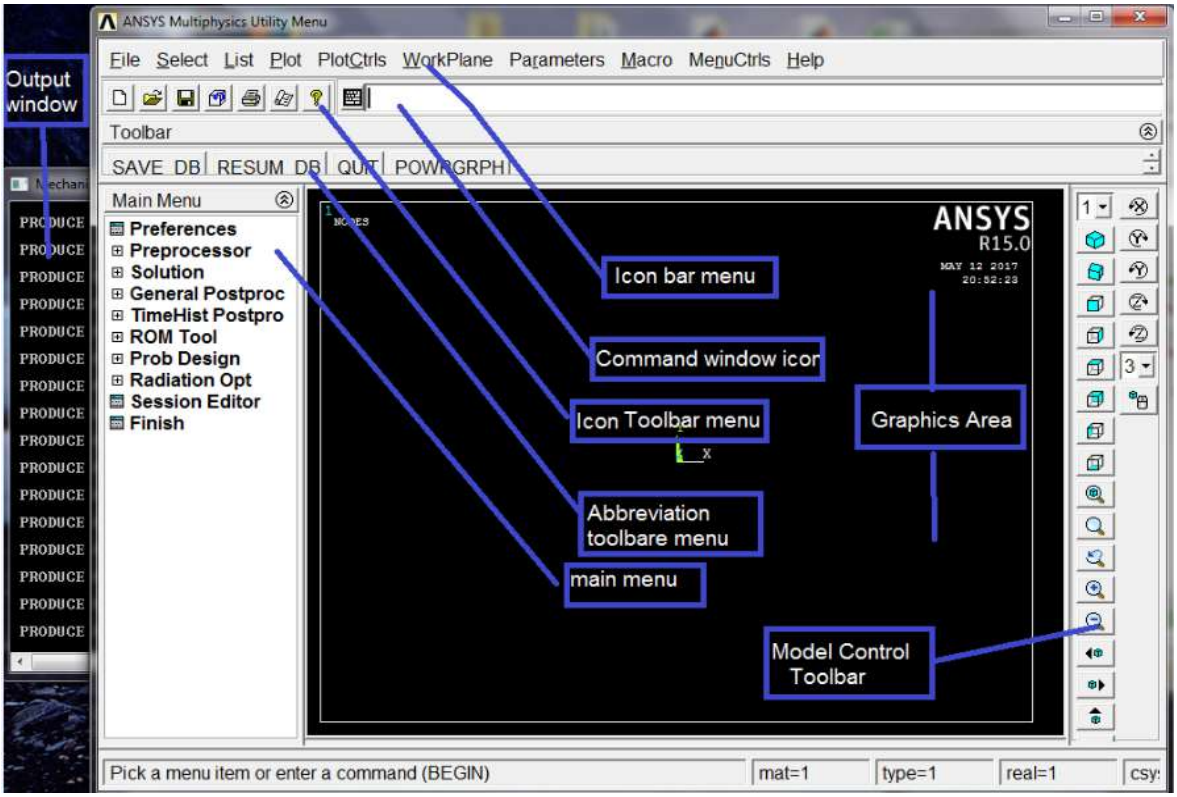


Figure. III.2. ANSYS Mechanical APDL.

III.5. 1.Exécutez l'analyse

Main Menu > Solution >Analysis Type > New Analysis

Sélectionnez « Static » dans la boite de dialogue puis cliquez sur « OK » pour valider et fermer.

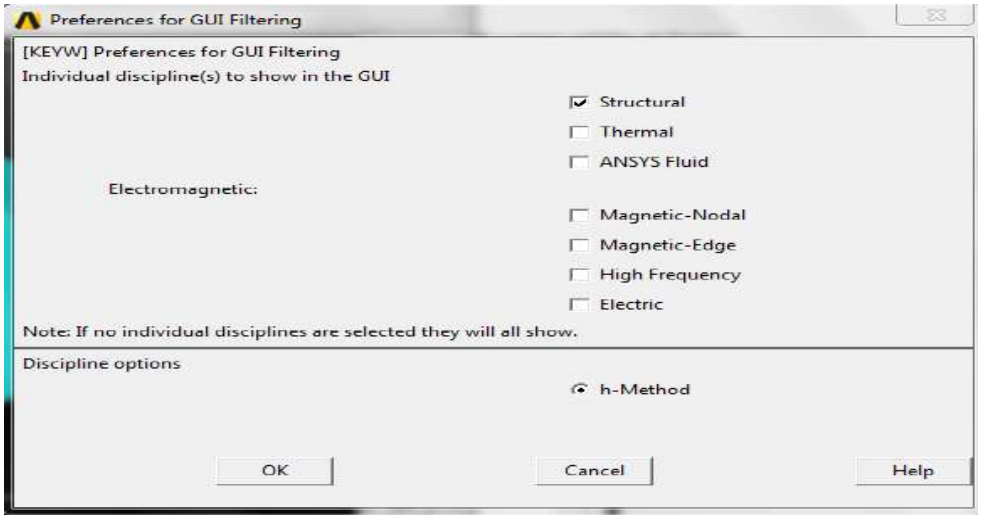


Figure.III.3 : Définie le type de solution.

Utility Menu>File>Change Directory

Créez un dossier dans votre répertoire de travail, puis entrez le chemin complet, puis cliquez sur « OK »

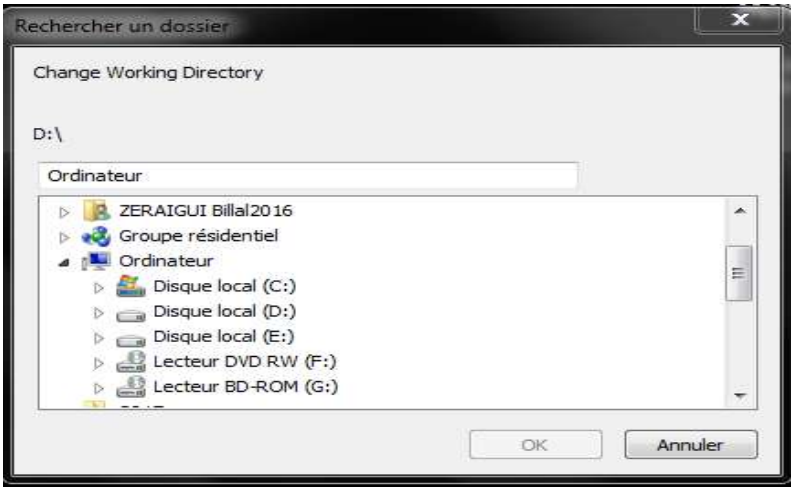


Figure.III.4: Change Directory.

Utility Menu>File>Change Jobname

Entrez le nom du fichier « palier lisse », cochez le bouton « New log and error files? » afin de créer un fichier log et erreur, puis cliquer sur « OK ».

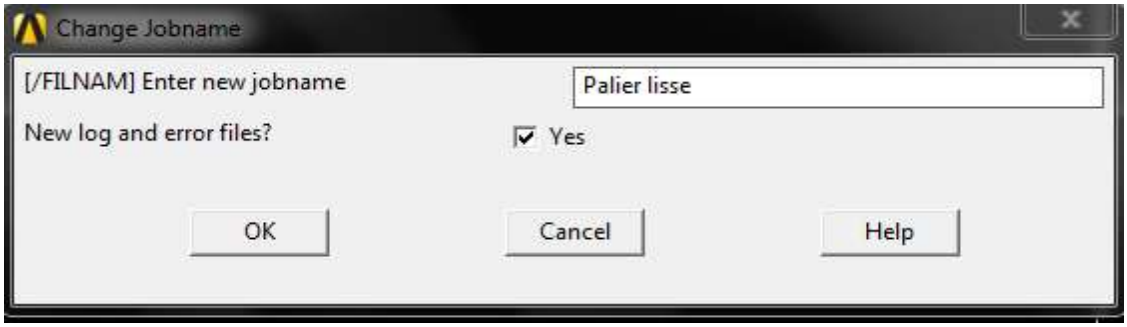


Figure.III.5: Change Jobname.

III.5. 2. Définition de l'élément et du matériau.

III.5. 2.1.type d'element

Main Menu >Preprocessor>Element Type >Add/Edit/Delete

Cliquez sur « Add » Sélectionnez « Solid » dans la bibliothèque de l'élément de dialogue choisi

«Brick 8 node 185 ». et validez en Cliquer sur OK. cliquer ensuite sur « Close ».

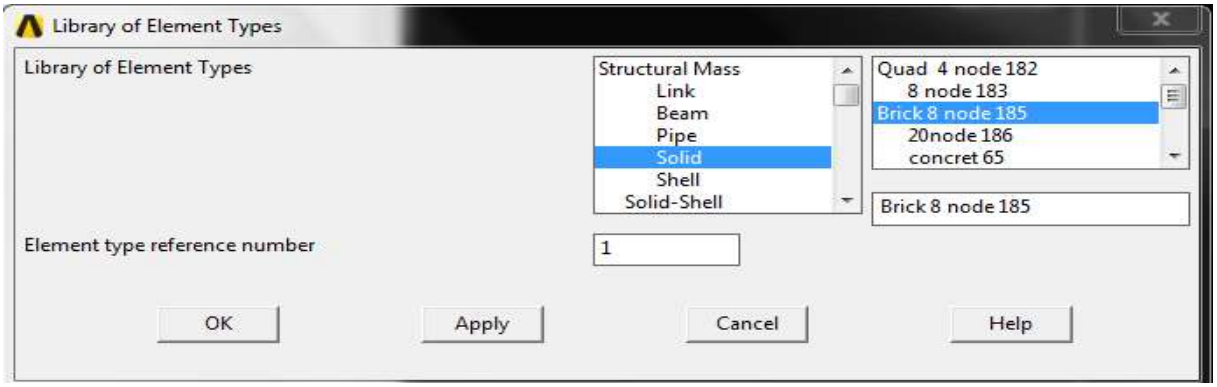


Figure.III.6: bibliothèque de l'élément types.

III.5. 2.2. Les propriétés du matériau de l'élément.

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models

Dans la boite de dialogue qui apparaît, sélectionnez « Material Model Number 1 », cliquez sur**Structural>Linear>Elastic>Isotropic.**

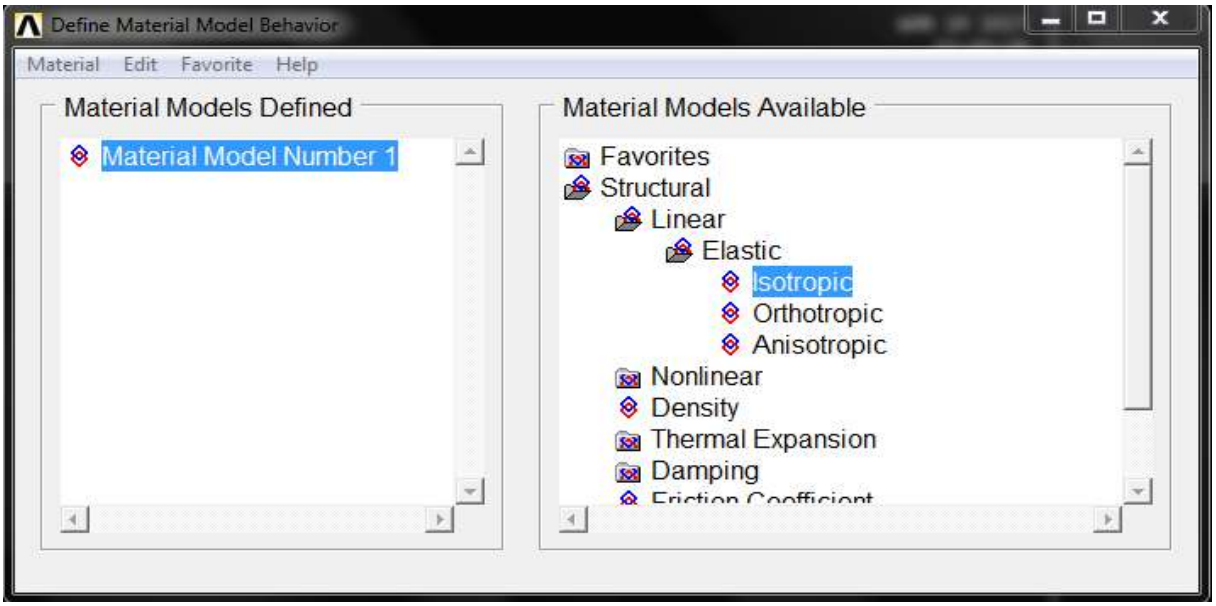


Figure.III.7: boite de dialogue des propriétés des matériaux.

Définir la valeur du module de Young en tapant à la case EX la valeur 1.0 E07 MPa, et le coefficient de Poisson en tapant à la case PRXY la valeur de 0.33; Cliquer sur « OK » pour valider et quitter.

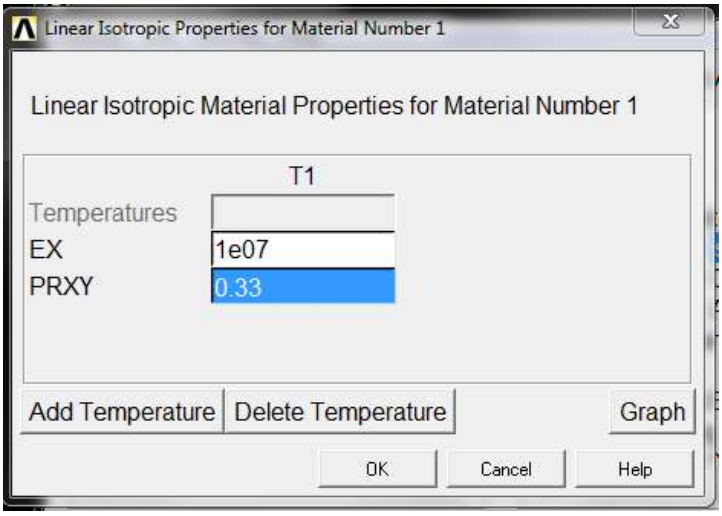


Figure.III.8: Entre le module de Young et coefficient de poissant.

III.5. 3.Construction de la géométrie.

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

Entrez dans la boite de dialogue les coordonnées des

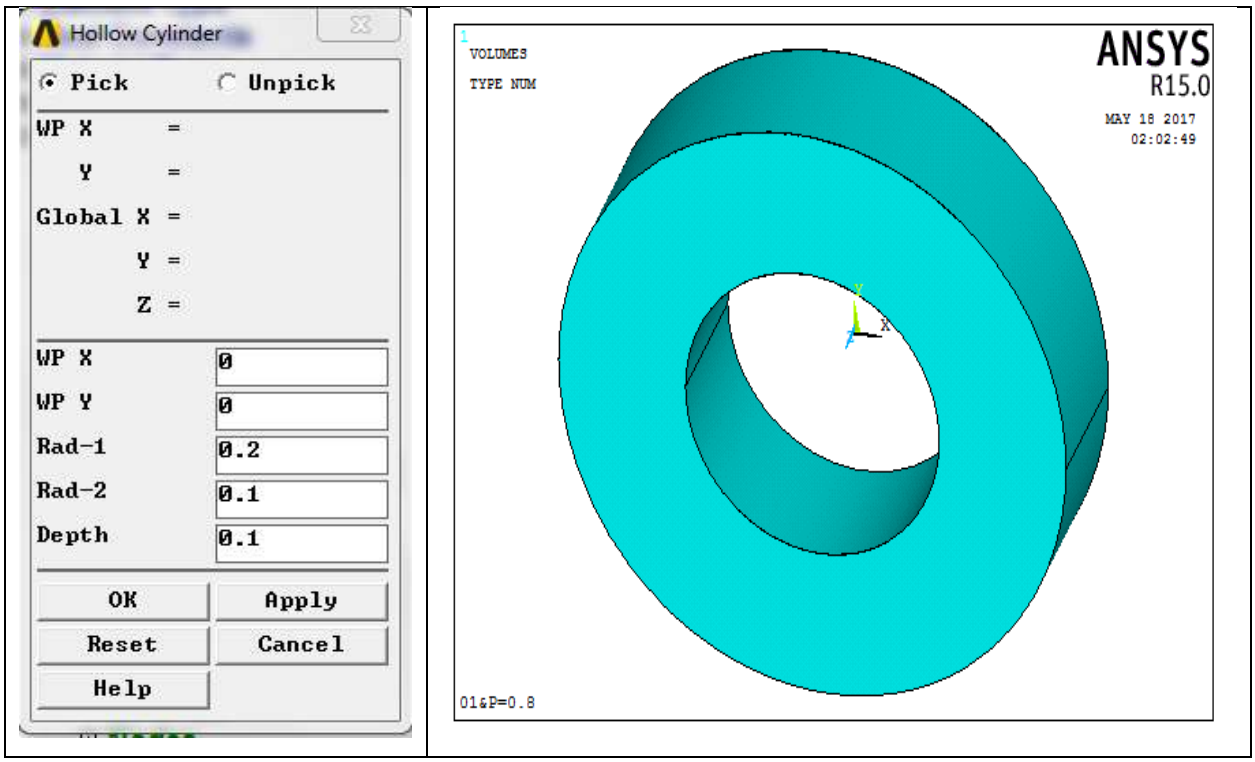


Figure. III.9: Géométrie d'un palier lisse.

III.5. 4.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 05 éléments réguliers.

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

Sélectionner les areas 1,2 et imposer 0.033

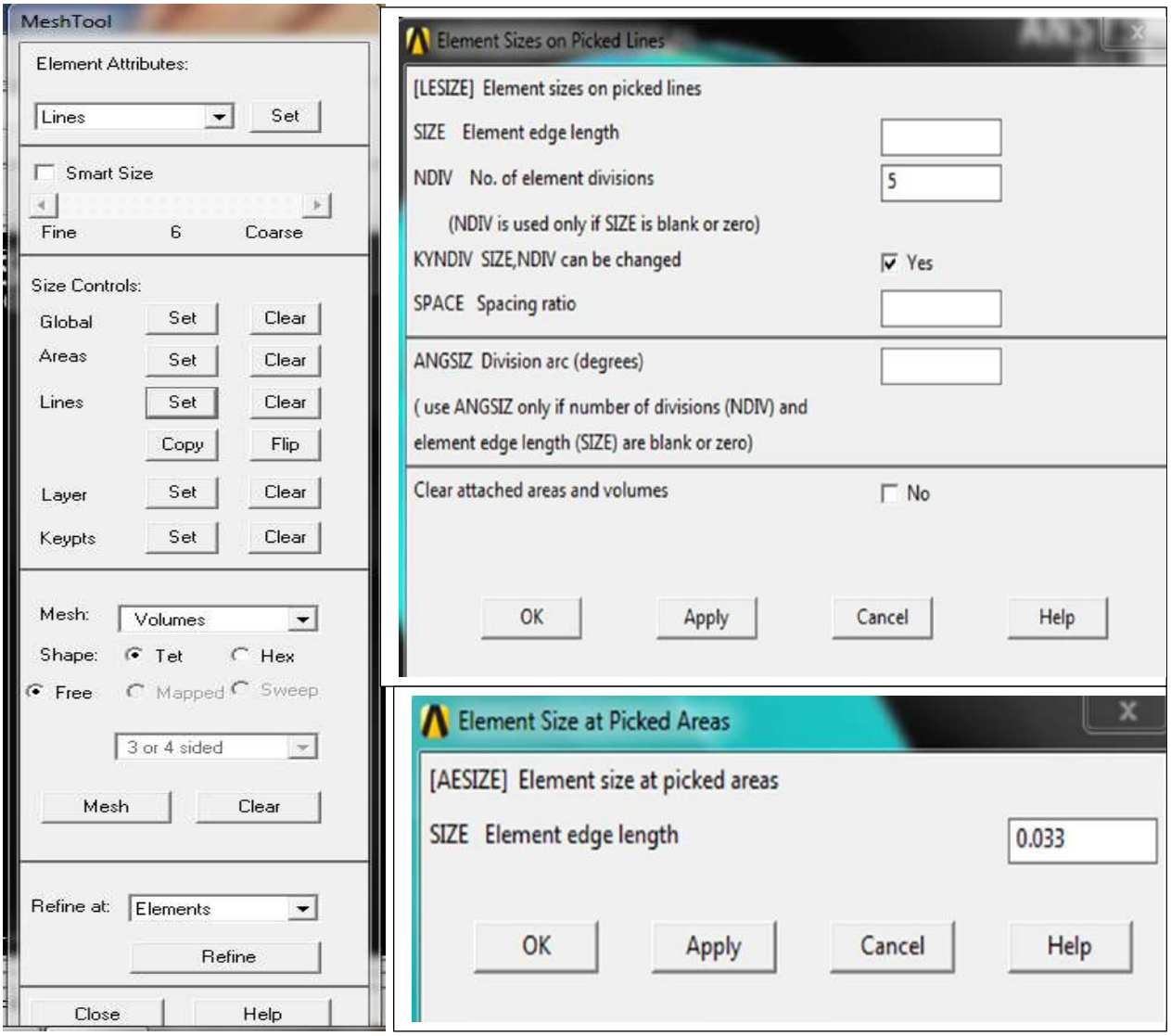


Figure.III.10: Les étapes de maillage.

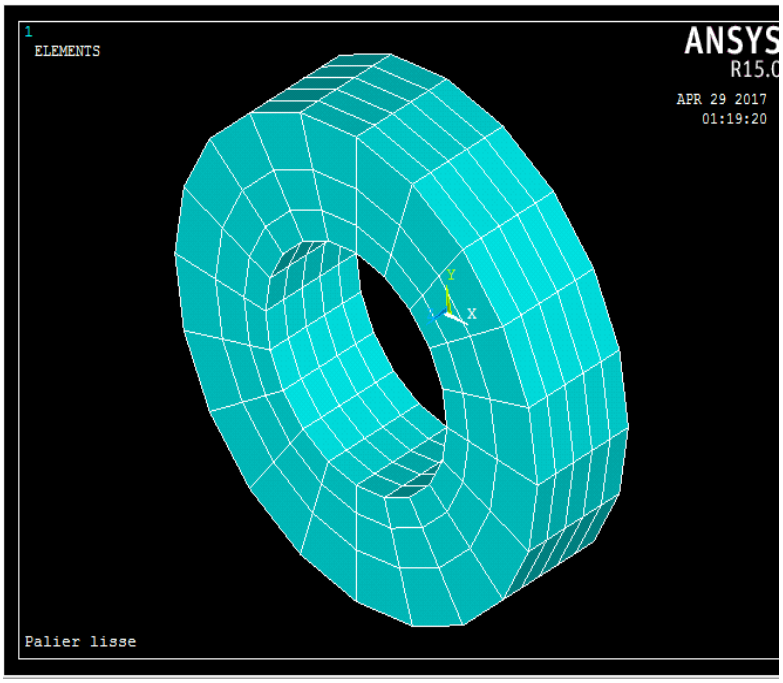


Figure .III.11 : Maillage.

III.5. 5.Conditions aux limites.

Spécifiez les conditions aux limites de déplacement en utilisant le suivant chemin de menu:

Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Displacement

Preprocessor>Loads>Define Loads>Apply>Structural>Pressure

Appliques les charges comme suite.

III.5. 6.La Solution.

Exécutez la solution en utilisant le chemin de menu suivant

Main Menu > Solution > Solve > Current LS

Après quelques minutes voire quelques heures (donc il faut vous armer de patience), ANSYS vous annonce que l'analyse est terminée. Fermez alors la boîte de message qui s'affiche passer à la phase de post-traitement.

Cliquer sur OK. cliquer ensuite sur « Close ».

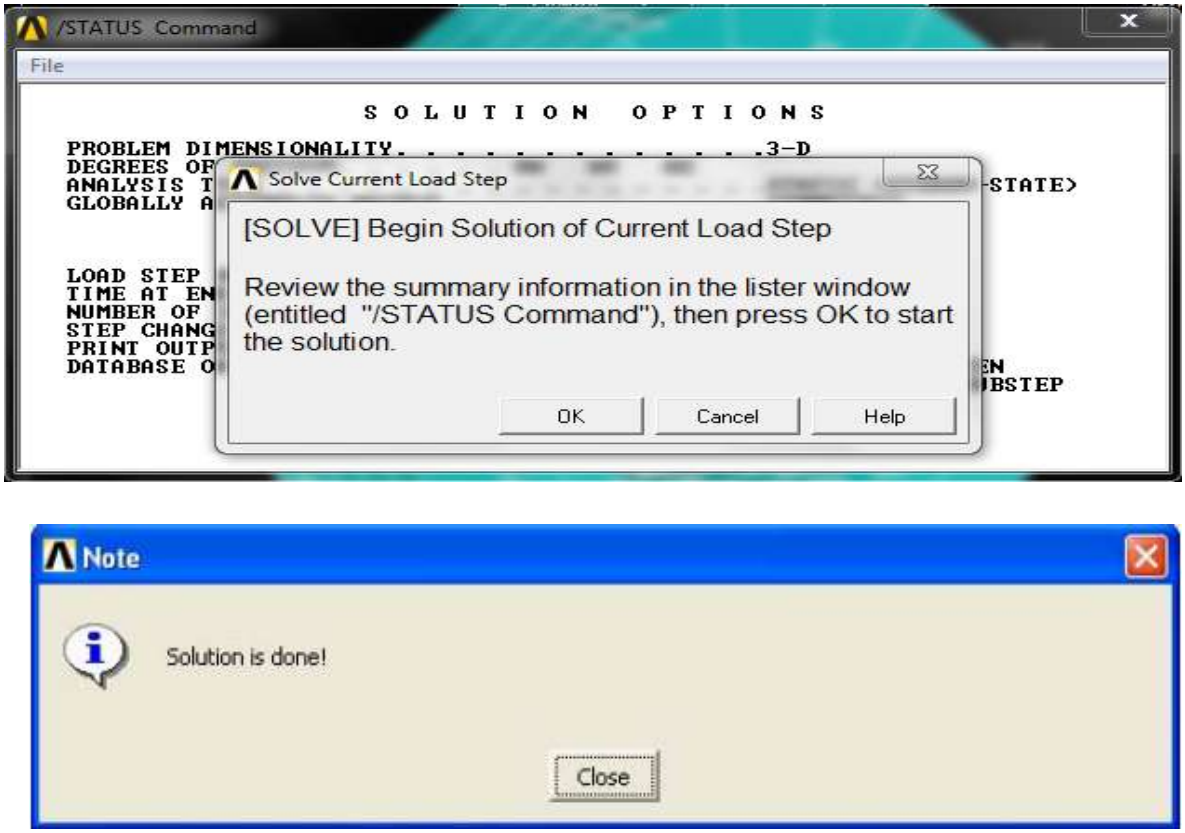


Figure.III. 12. solve.

III.6. présentation de logiciel MATLAB. [12]

MATLAB (MATrix LABoratory) est un environnement de programmation interactif pour le calcul scientifique, la programmation et la visualisation des données.

Il est très utilisé dans les domaines d'ingénierie et de recherche scientifique, ainsi qu'aux établissements d'enseignement supérieur.

À l'origine MATLAB était conçu pour faire principalement des calculs sur les vecteurs et les matrices d'où son nom 'Matrix Laboratory, mais par la suite il a était amélioré et augmenté pour pouvoir traiter beaucoup plus de domaines.

MATLAB n'est pas le seul environnement de calcul scientifique existant car il existe

d'autres concurrents dont les plus importants sont MAPLE et MATHEMATICA. Il existemême des logiciels libres qui sont des clones de MATLAB comme SCILAB et OCTAVE.

III.6.1.L'environnement MATLAB.

Actuellement MATLAB est à la version 7.x et au démarrage il affiche plusieurs fenêtres. Selon la version on peut trouver les fenêtres suivantes :

• Current Folder : indique le répertoire courant ainsi que les fichiers existants.

• Workspace : indique toutes les variables existantes avec leurs types et valeurs.

• Command History : garde la trace de toutes les commandes entrées par l'utilisateur.

• Command Window: nous utilisons pour formuler nos expressions et interagir

avec MATLAB,et c'est la fenêtre que nous utilisons tout au long de ce chapitre.

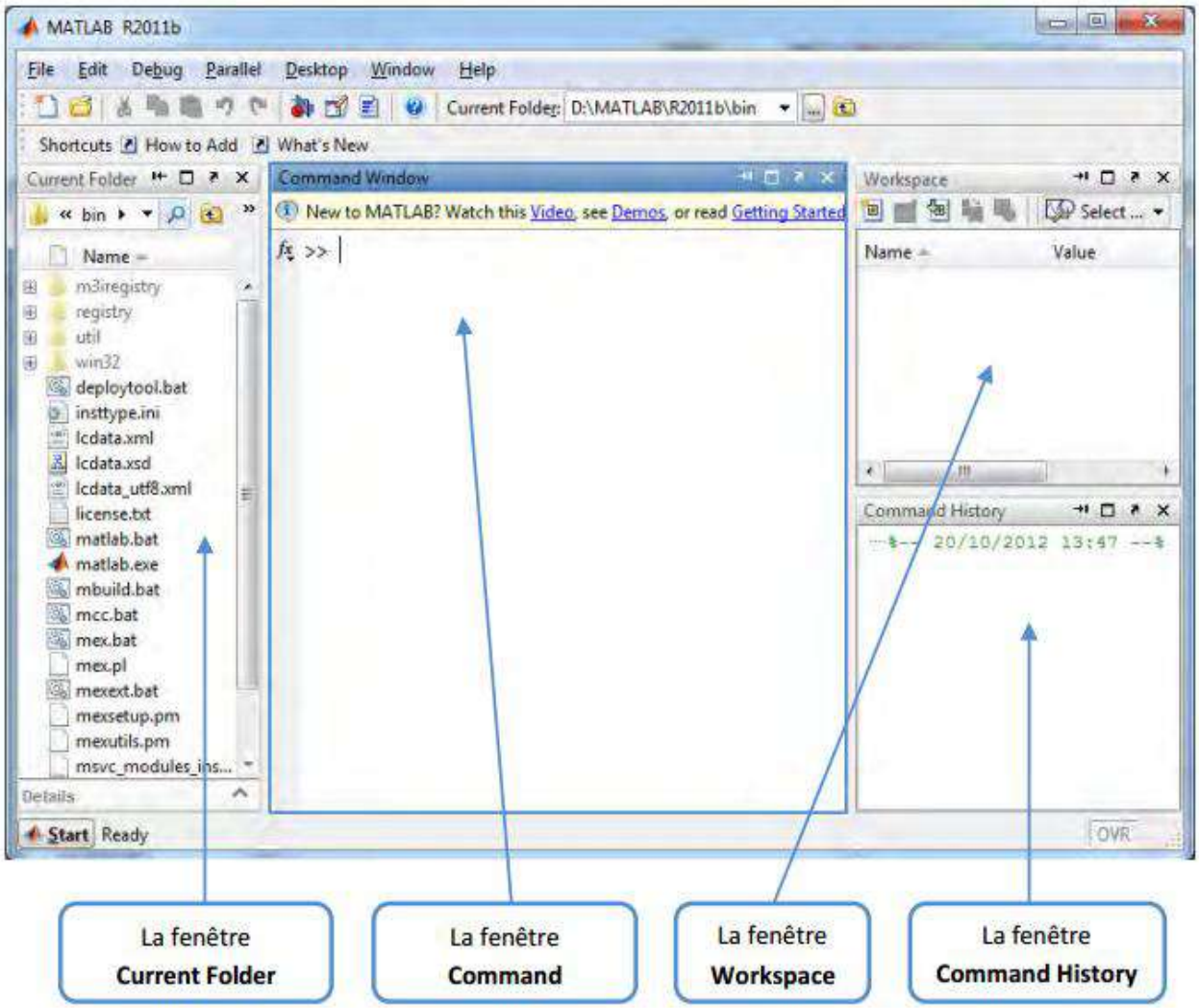


Figure.III.13 :L'environnement MATLAB (Version 2011b ou 7.13).

III.6.2.Exemple.

```
formatlong;
v=linspace(0,2*pi,21); % 21 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:l
f(j,i)=a0(j)+a1(j)*cos(v(i))+b1(j)*sin(v(i))+a2(j)*cos(
2*v(i))+b2(j)*cos(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,:)';
%% le tracage
figure
subplot(1,3,3);
plot(v,s3,'-*k');
laxlabel('angle');
ylabel('deplacement');
```

```
title('déformation')
hold on.
```

III.7.Conclusion

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

Chapitre IV: Modélisation

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 type 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 mécanique d'palier en Acier. :

Tableau.VI.1 : Tableau de propriété du palier.

Acier	Valeur	Unité
Module de Young	**$1^{e}007$**	**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**	**[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 :

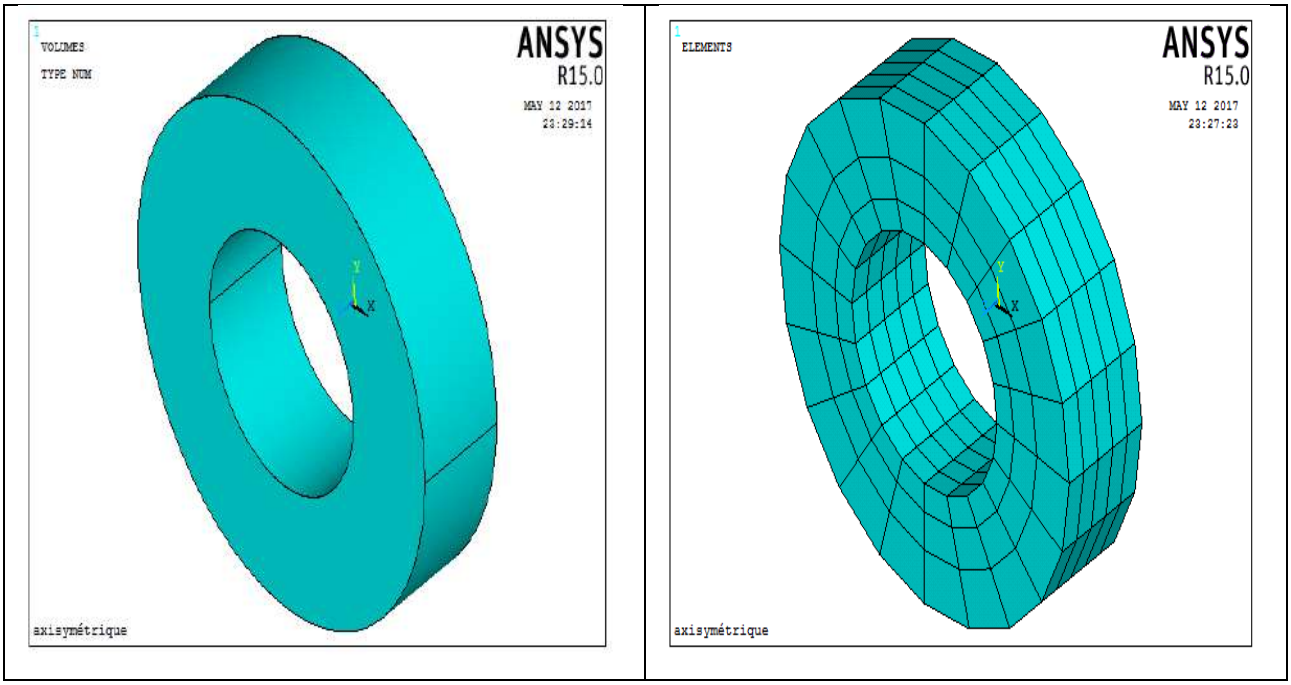


Figure . IV.1 : La structure et le maillage de problème axisymétrique 3D.

Après on choisit l'élément type de structure (**Brick 8 node 185**) et faire le maillage et on utilise dans cet exemple les conditions aux limite : **P=1 MPa** aux milieux de la structure .

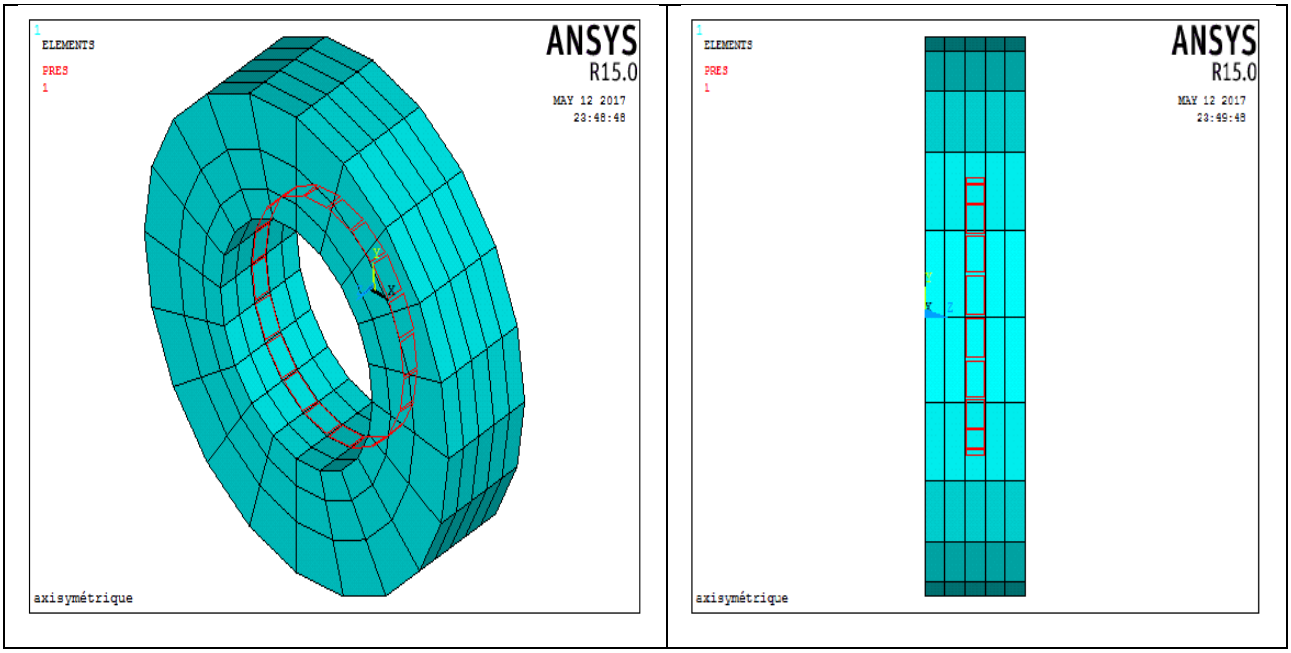


Figure. IV.2 les conditions aux limites.

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

Tableau.V.2 : Tableau de déplacement axisymétrique dans chaque nœud**.**

Position des nœuds	déplacement (µm)	déplacement (mm)
1	4,93E-04	4,93E-10
2	8,10E-04	8,10E-10
3	2,22E-03	2,22E-09
4	2,22E-03	2,22E-09
5	8,10E-04	8,10E-10
6	4,93E-04	4,93E-10

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

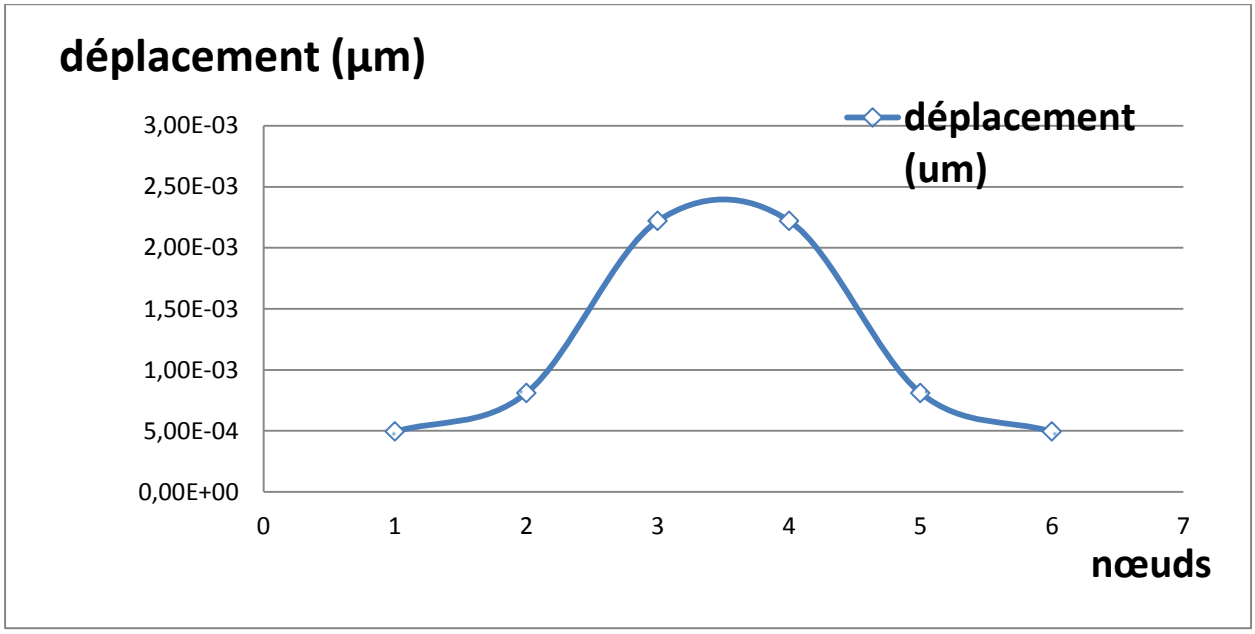


Figure.IV.3 : Déplacement axisymétrique du palier.

On observe ici que comme le palier est homogène donc le déplacement axisymétrique maximal est au milieu. **Def_{max}=2,22E-03(µm).**

On remarque un graphe qui est symétrique, qui nous donne deux points max de déplacement aux nœuds 3 et 4 **(52,22E-03 µm).**

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

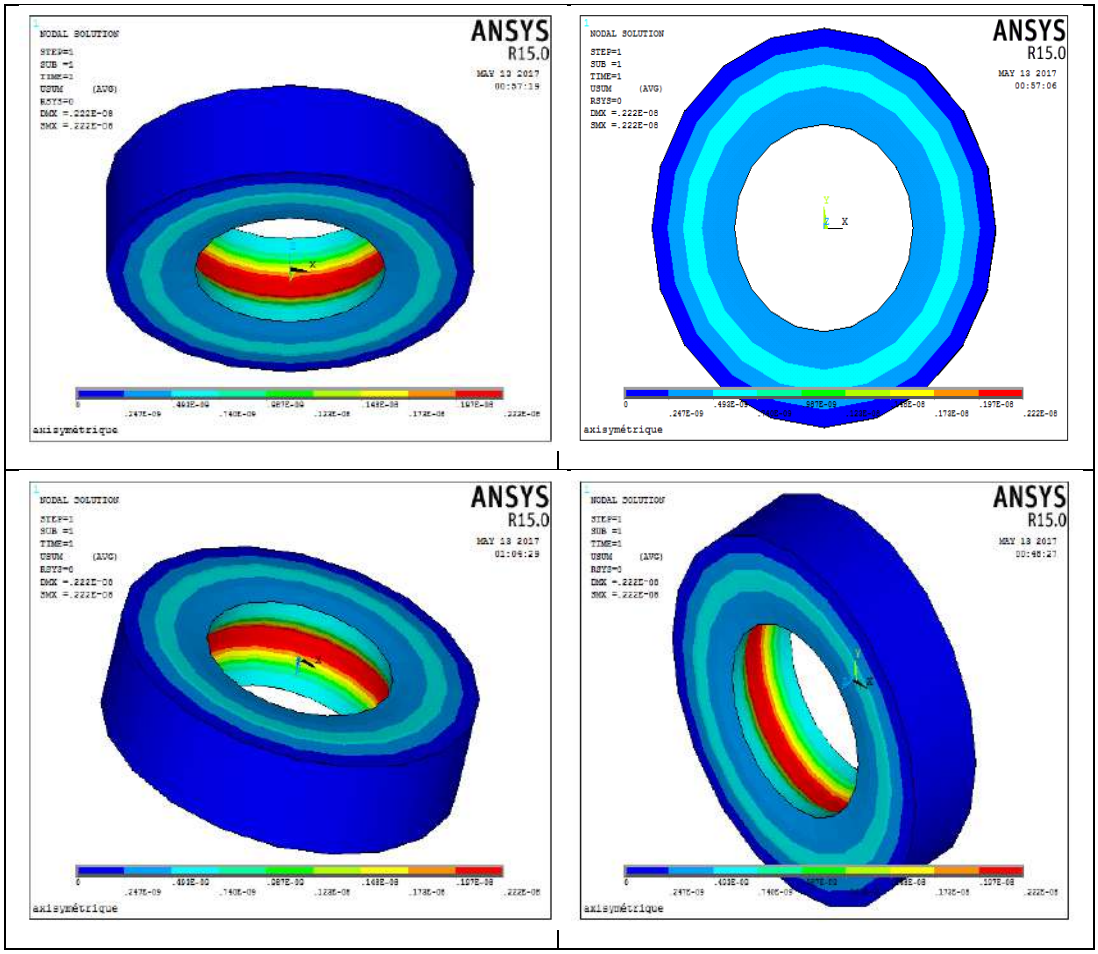


Figure. IV.4 : Les déformations axisymétriques du palier.

IV.3. Déformation radiale :

Dans cet exemple en exploiter les déformations radiales à partir d'un palier court et à longueur finie et long. Cette partie contient deux trois cas, Figure . IV.5

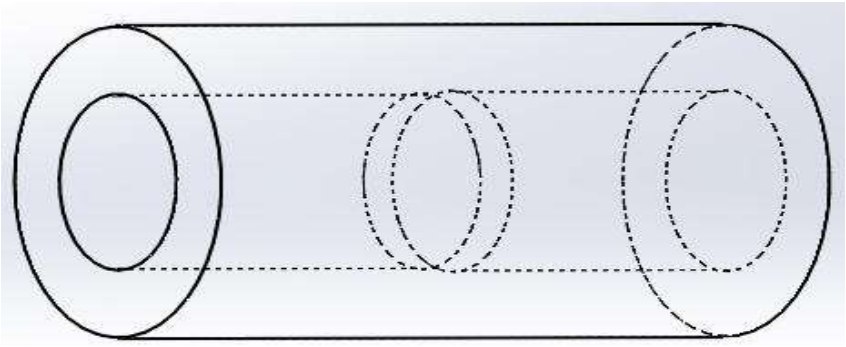


Figure.IV.5 :La position de Déformation étudié.

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

Tableau.VI.3 : Tableau de géomètre d'un Palier court.

Diamètre extérieur	**0. 200**	**[m]**
Diamètre intérieur	**0.100**	**[m]**
Longueur	**0.050**	**[m]**
Rayon extérieur	**0.100**	**[m]**
Rayon intérieur	**0.050**	**[m]**

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

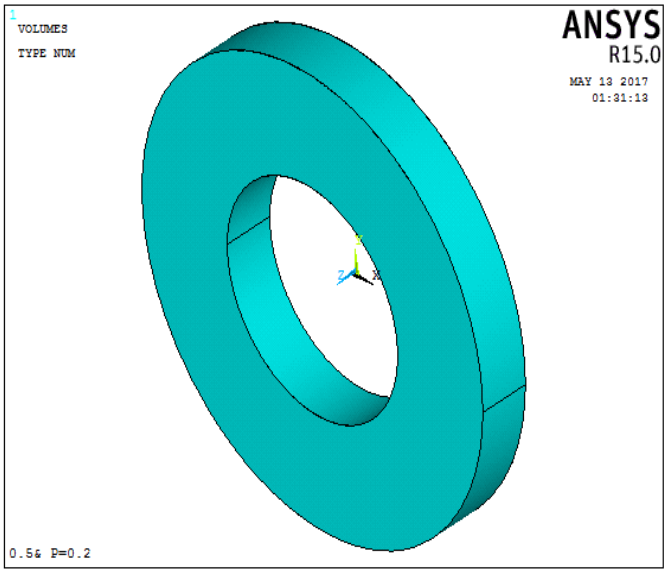


Figure .IV.6 : La géométrie d'un palier court L/D=0,5.

1.1.Maillage :

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

Tableau.VI.4.la maillage d'un palier court L/D=0,5.

Suivant le rayon	**R : 3 éléments.**
Suivant l'angle	**θ : 20éléments.**
Suivant la longueur	**L :5 éléments**

Le maillage est dans la figure IV.7 ci-dessous :

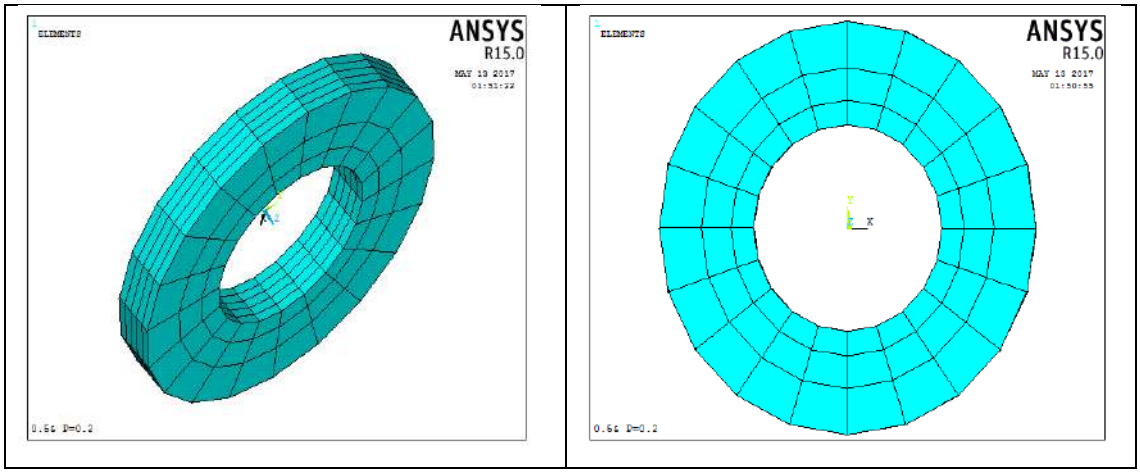


Figure.IV.7: Maillage de palier court L/D=0,5.

1.2.Application :

Pour obtenir les résultats des déformations sur le palier court de rapport longueur/diamètre=0.5, 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 et Z=0.5L et Ri=cts.

Détermination du champ de pression sur cette application :

Palier court faiblement charger ou l'excentricité est petite (e=0.2).

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

Tableau.IV.5 : Tableau de champ du pression et champs de force applique sur le palier court.

Angle θ (grad)	Pression (MPa)	Champs de force(N)
0	0.00E+00	0,00E+00
0,314	9,83E+03	9,65E-01
0,628	2,23E+04	2,19E+00
0,942	3,63E+04	3,56E+00
1.256	5,08E+04	4,99E+00
1,57	6,49E+04	6,37E+00
1,884	7,60E+04	7,47E+00
2,198	8,07E+04	7,93E+00
2,512	7,47E+04	7,33E+00

2,826	5,56E+04	5,46E+00
3,14	2,69E+04	2,64E+00
3,454	0,00E+00	0,00E+00
3,768	0,00E+00	0,00E+00
4,082	0,00E+00	0,00E+00
4,396	0,00E+00	0,00E+00
4,71	0,00E+00	0,00E+00
5,024	0,00E+00	0,00E+00
5,338	0,00E+00	0,00E+00
5,652	0,00E+00	0,00E+00
5,966	0,00E+00	0,00E+00
6,28	0,00E+00	0,00E+00

- **Le Coefficients de Fouriers.**

A0	3.8933 e+000
A1	-2.413295e+000
A2	-3.788134e-001
A3	1.931494e-002
B1	3.068561e+000
B2	-1.314648e+000
B3	9.910700e-002

La déformation corresponde à chaque harmonique amplitude.

A0	8.6455E-09
A1	-4.1448E-09
A2	-6.5061E-10
A3	3.3173E-11
B1	5.2703E-09
B2	-2.2579E-09
B3	1.7022E-10

Le graphe représenter de champ du pression applique sur le palier court (**Figure. .IV.8)**

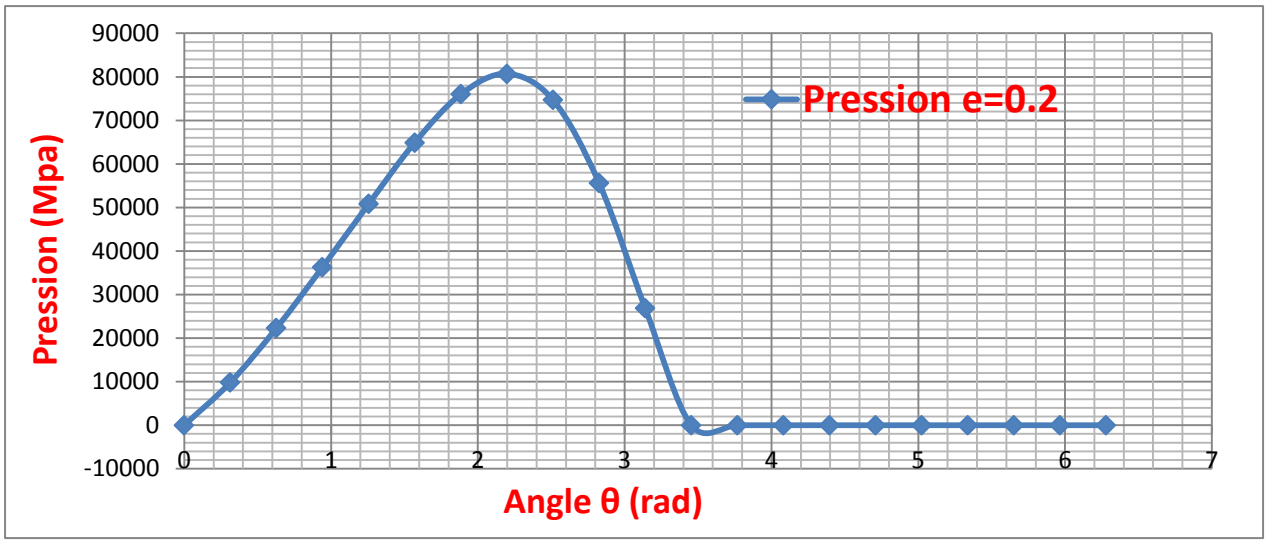


Figure. IV.8: Champ de pression d'un palier court (L/D=0.5 et0.2).

On remarque que le graphe de la pression est au point max(Θ=2.198 rad),la pression maximale dans ce cas est : P_{MAX}=8.07E 04Mpa.

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

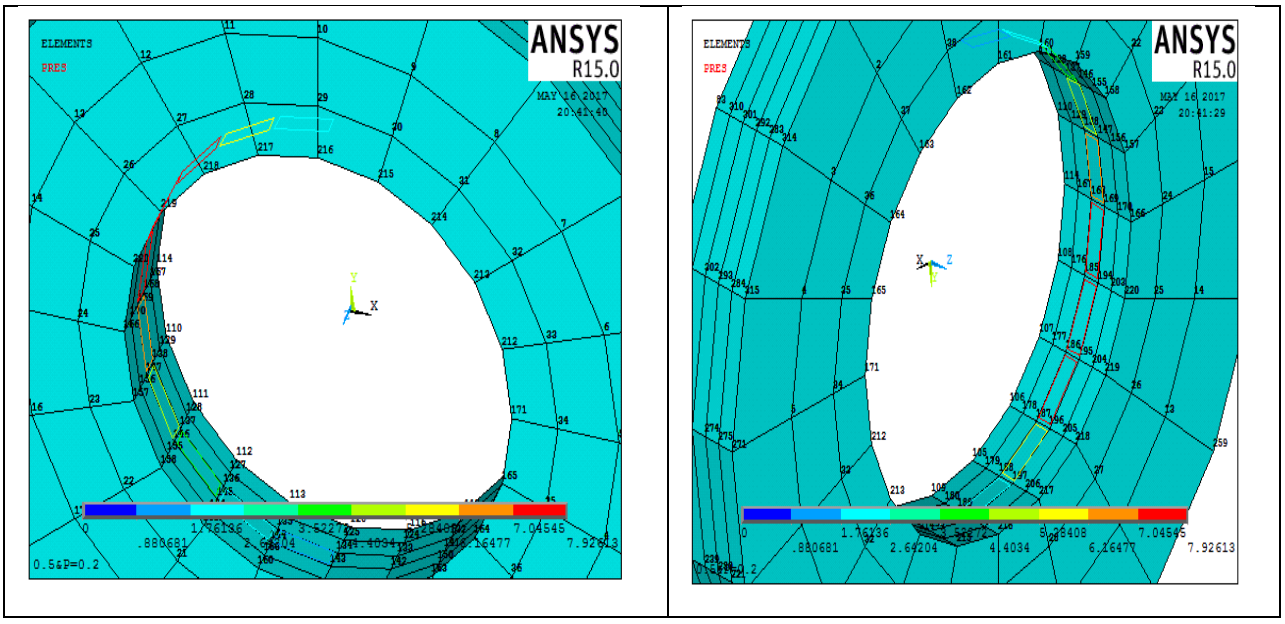


Figure .IV.9 : Le champ de pression appliquée sur un palier court.

2).Palier longueur finie L/D=1:

Les dimensions géométriques du palier**:**

Tableau.V.6 : Tableau de géomètre d'un palier**.**

Diameter intérieur	**0.100**	**[m]**
Diameter extérieur	**0.200**	**[m]**
Longueur	**0.100**	**[m]**
Rayon extérieur	**0.100**	**[m]**
Rayon intérieur	**0.050**	**[m]**

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

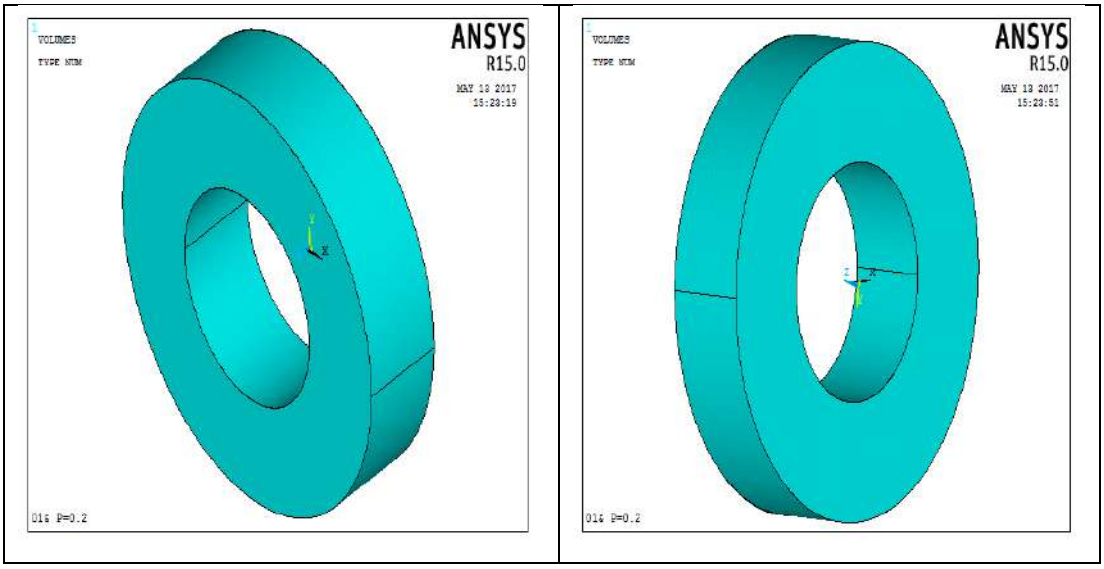


Figure.IV.10 : La géométrie d'une longueur finie L/D=1.

2.1.Maillage :

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

Suivant le rayon	**R : 3 éléments.**
Suivant l'angle	**θ : 20 éléments.**
Suivant la longueur	**L : 5 éléments**

Le maillage est dans la fig. IV.11 dessous :

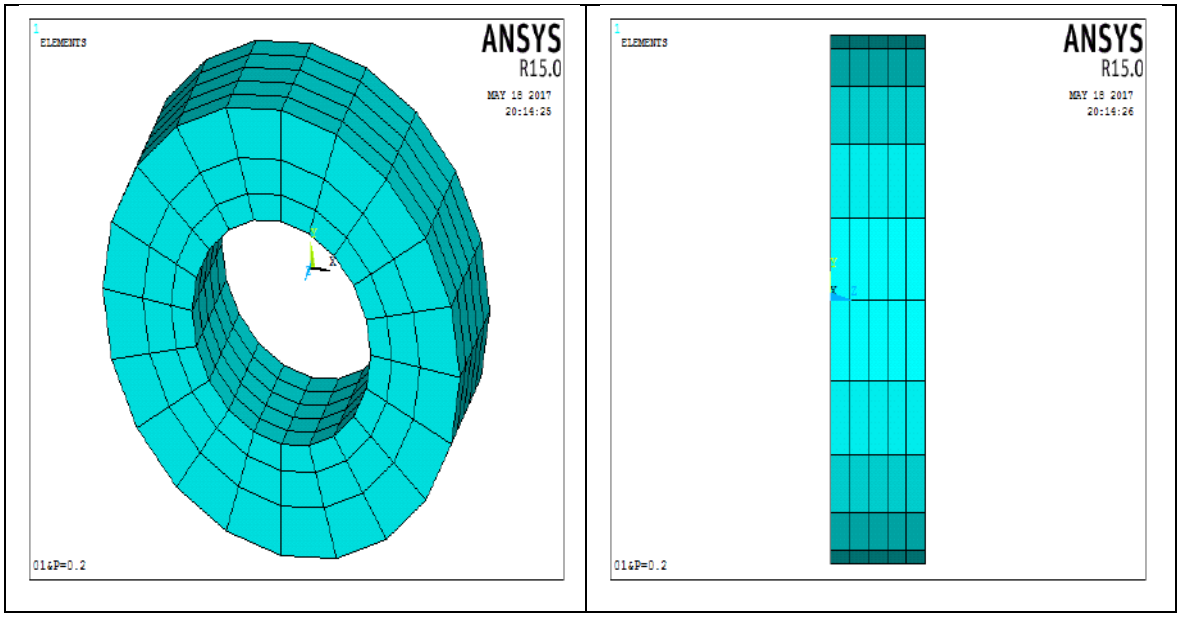


Figure. IV.11 : Maillage du Palier longueur finie L/D=1.

2.2. Application :

Pour obtenir les résultats des déformations élastiques sur un palier à longueur finie de rapport longueur/diamètre=1, Nous allons aussi 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 et Z=0.5L (pour cette exemple Z=0.01m) et Ri=cts.

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=0.8)

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

Tableau.IV.7 : Tableau de champ de pression et champs de force applique sur un palier à longueur finie.

angle(⁰)	Pression(e=0.2) (MPa)	Pressione= (0.8) (MPa)	force (e=0.2) (N)	Force (e=0.8) (N)
0	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
0,314	3,93E+04	6,94E+04	7,72E+00	1,36E+01
0,628	8,18E+04	1,52E+05	1,61E+01	2,98E+01

0,942	1,26E+05	2,61E+05	2,48E+01	5,13E+01
1,256	1,70E+05	4,23E+05	3,34E+01	8,30E+01
1,57	2,10E+05	6,81E+05	4,12E+01	1,34E+02
1,884	2,39E+05	1,13E+06	4,70E+01	2,21E+02
2,198	2,49E+05	1,93E+06	4,90E+01	3,78E+02
2,512	2,32E+05	3,35E+06	4,55E+01	6,58E+02
2,826	1,82E+05	5,30E+06	3,58E+01	1,04E+03
3,14	1,11E+05	4,81E+06	2,17E+01	9,45E+02
3,454	4,01E+04	0,00E+00	7,87E+00	0,00E+00
3,768	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4,082	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4,396	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
4,71	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
5,024	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
5,338	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
5,652	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
5,966	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
6,28	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00

- **Le Coefficients de Fouriers.**

	Coefficients (e=0.2)	Coefficients (e=0.8)
A0	24.4500e+000	282.9592e+000
A1	-1.591719e+001	-4.283554e+002
A2	-1.571671e+000	3.015289e+002
A3	-8.449270e-001	-2.143317e+002
B1	1.970306e+001	8.277444e+001
B2	-7.107853e+000	6.435211e+001
B3	1.731389e-002	2.915829e+001

- **La déformation corresponde à chaque harmonique amplitude.**

	Coefficients (e=0.2)	Coefficients (e=0.8)
A0	1.1226E-007	7.3595e-007

A1	**-3.5113E-008**	**-1.1141e-006**
A2	**-3.4901E009**	**7.8425e-007**
A3	**-1.8762E-009**	**-5.5746e-007**
B1	**4.3753E-008**	**2.1529e-007**
B2	**-1.5784E008**	**1.6737e-007**
B3	**3.8447E011**	**7.5838e-008**

Champ de pression (e=0.2) la Figure IV.12

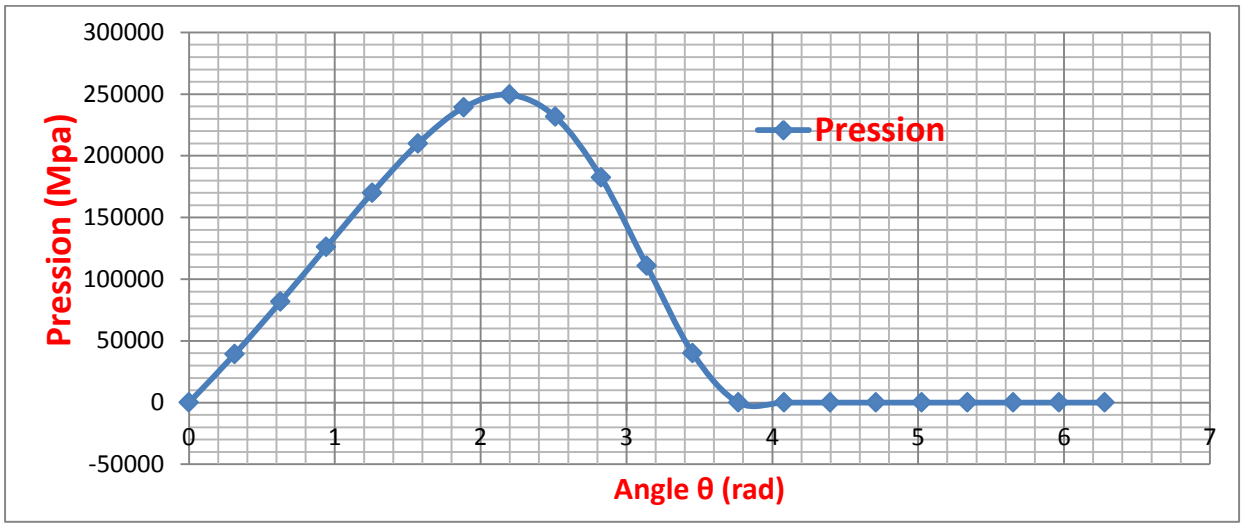


Figure. IV.12 : Champ de pression d'un palier à longueur finie e=0.2

Champ de pression e=0.8 la Figure. IV.13.

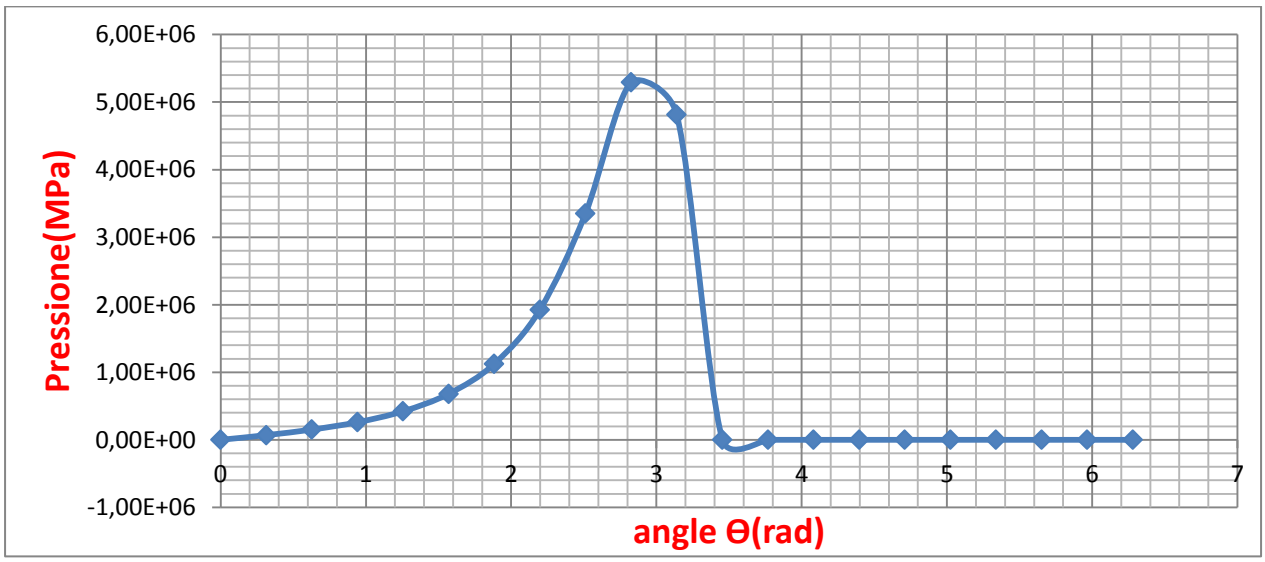


Figure. IV.13 : Champ de pression d'un palier à longueur finie e=0.8.

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 :

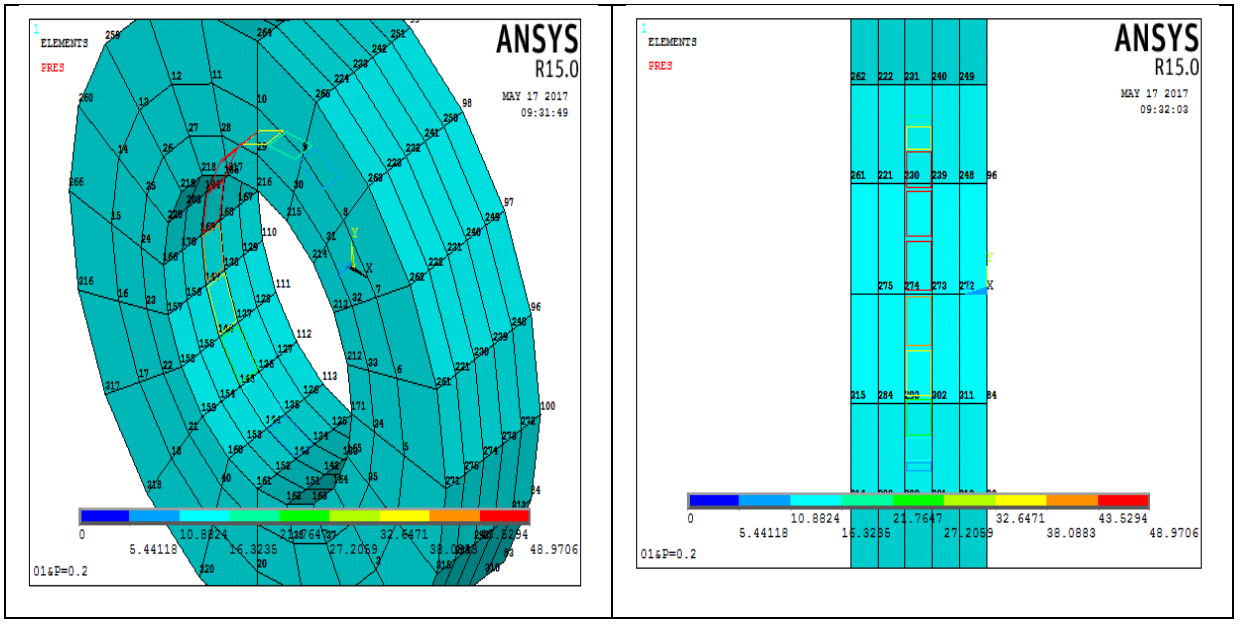


Figure. IV.14: Le champ de pression appliquée sur le palier.

3).<u>Palier infiniment long L/D=1.5</u> :

Les dimensions géométriques du palier :

Diamètre intérieur	**0.100**	**[m]**
Diamètre extérieur	**0.200**	**[m]**
Longueur	**0.150**	**[m]**
Rayon intérieur	**0.100**	**[m]**
Rayon intérieur	**0.050**	**[m]**

Tableau.IV.8 : Tableau de géomètre d'un palier.

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

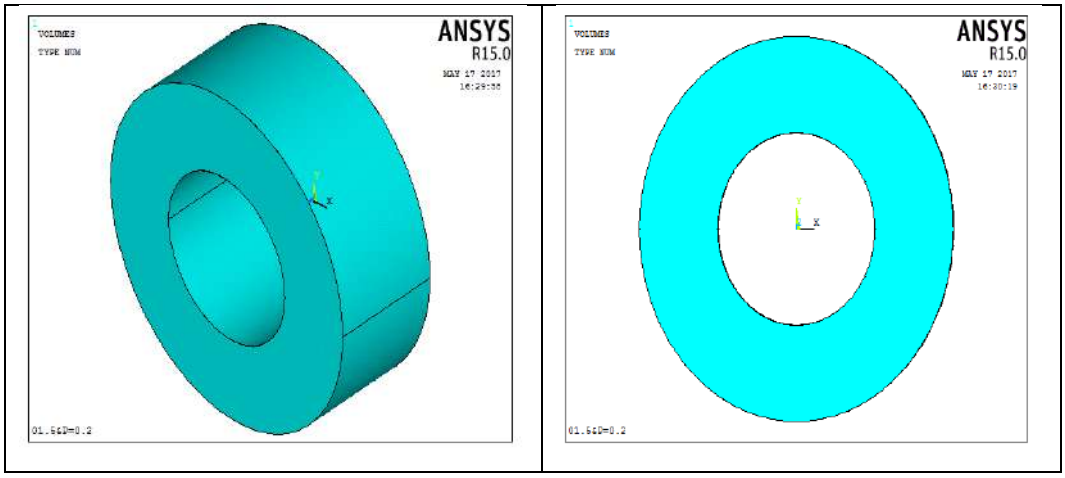


Figure.IV.15 : La géométrie d'un palier à longueur finie.

3.1.Maillage :

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

Suivant le rayon	R : 3 éléments.
Suivant l'angle	Θ : 20 éléments.
Suivant la longueur	L : 5 éléments

Le maillage est dans la figure IV.16 dessous :

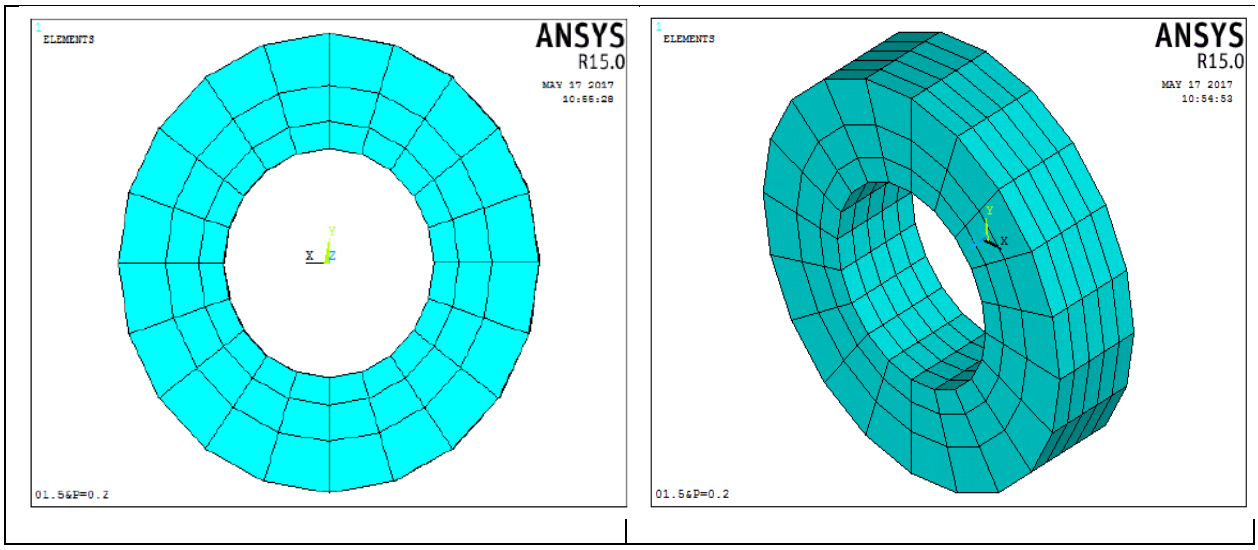


Figure .IV.16 : Maillage du palier infiniment long.

3.2 :Application :

Pour obtenir les résultats des déformations élastiques sur un palier infiniment long de Rapport longueur/diamètre=1,5 Nous allons aussi 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 et Z=0.5L (pour cette exemple Z=0.15m) et Ri=cts.

Palier faiblement charger ou l'excentricité est petite (e=0.2).

Le tableau suivant représente les champs de pression et champs de force applique sur un palier fortement.

Tableau.IV.9: Tableau de champ de pression et champs de force applique sur un palier infiniment long.

Angle θ (rad)	pression (Mpa)	Force (N)
0	0,00E+00	0,00E+00
0,314	7,30E+04	7,72E+00
0,628	1,48E+05	1,61E+01
0,942	2,24E+05	2,48E+01
1,256	2,96E+05	3,34E+01
1,57	3,59E+05	4,12E+01
1,884	4,04E+05	4,70E+01
2,198	4,18E+05	4,90E+01
2,512	3,90E+05	4,55E+01
2,826	3,14E+05	3,58E+01
3,14	2,03E+05	2,17E+01
3,454	8,64E+04	7,87E+00
3,768	0,00E+00	0,00E+00
4,082	0,00E+00	0,00E+00
4,396	0,00E+00	0,00E+00
4,71	0,00E+00	0,00E+00
5,024	0,00E+00	0,00E+00
5,338	0,00E+00	0,00E+00
5,652	0,00E+00	0,00E+00
5,966	0,00E+00	0,00E+00
6,28	0,00E+00	0,00E+00

❖ Coefficients de Fourriers.

A0	**58.5191e+000**
A1	**-1.591719e+001**
A2	**-3.251948e+000**
A3	**-3.268362e+000**
B1	**1.970306e+001**
B2	**-7.107853e+000**
B3	**1.731389e-002**

La déformation corresponde à chaque harmonique amplitude.

A0	**1.52220E-07**
A1	**-1.0643E-007**
A2	**-8.4580E-009**
A3	**-8.5007E-009**
B1	**5.1246E-008**
B2	**-1.8487E-008**
B3	**4.5032E-011**

Champ de pression e=0.2 la Figure IV.19.

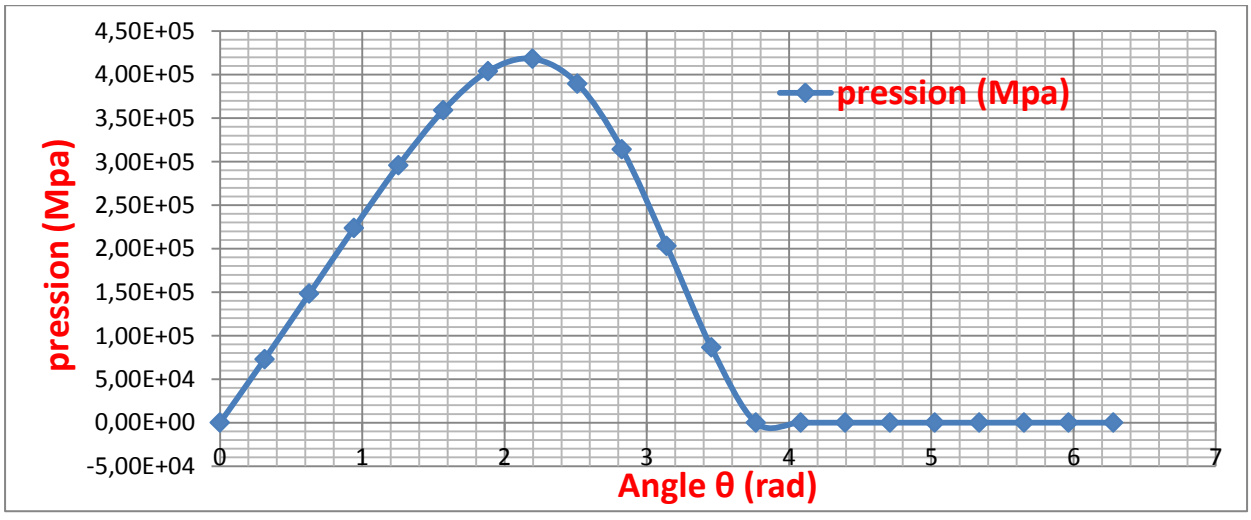


Figure.IV.17: Champ de pression d'un palier à longueur finie faiblement chargé.

On remarque que le graphe de la pression est au point max (Θ=2.198 rad), une pression maximale: **P_{MAX}=4,18E+05Mpa**.

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

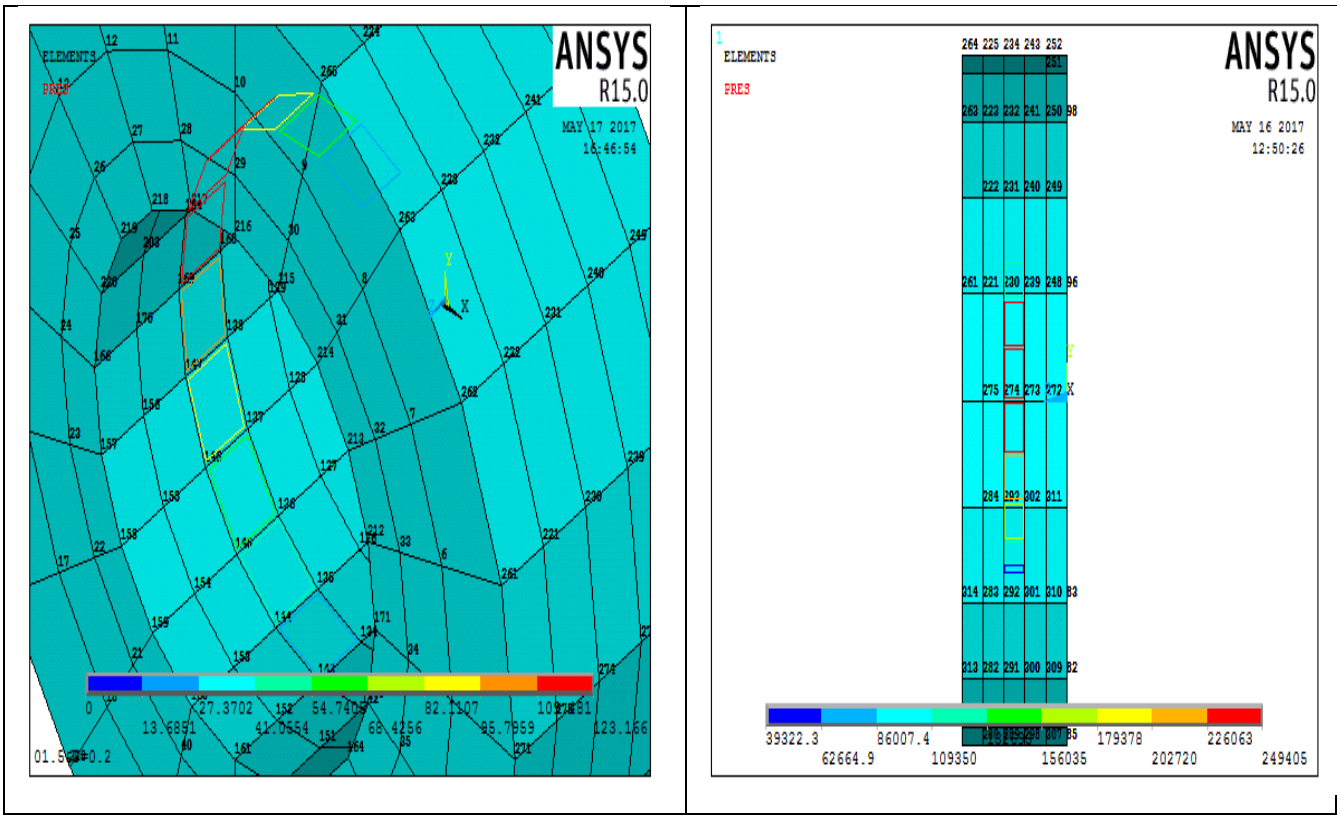


Figure.IV.18: Le champ de pression appliquée sur le palier.

IV.4. 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.

Chapitre V : Résultats Et Discussion

V.1.Introduction :

À partir de chapitre précédent nous allons dans ce chapitre analyser les résultats qui représentent les déformations élastiques sur les différents paliers étudiés sollicité à pression hydrodynamique. Et on va comparer les résultats obtenus par ANSYS avec lesquelles obtenus par MATLAB.

V.2.Palier court L/D=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.

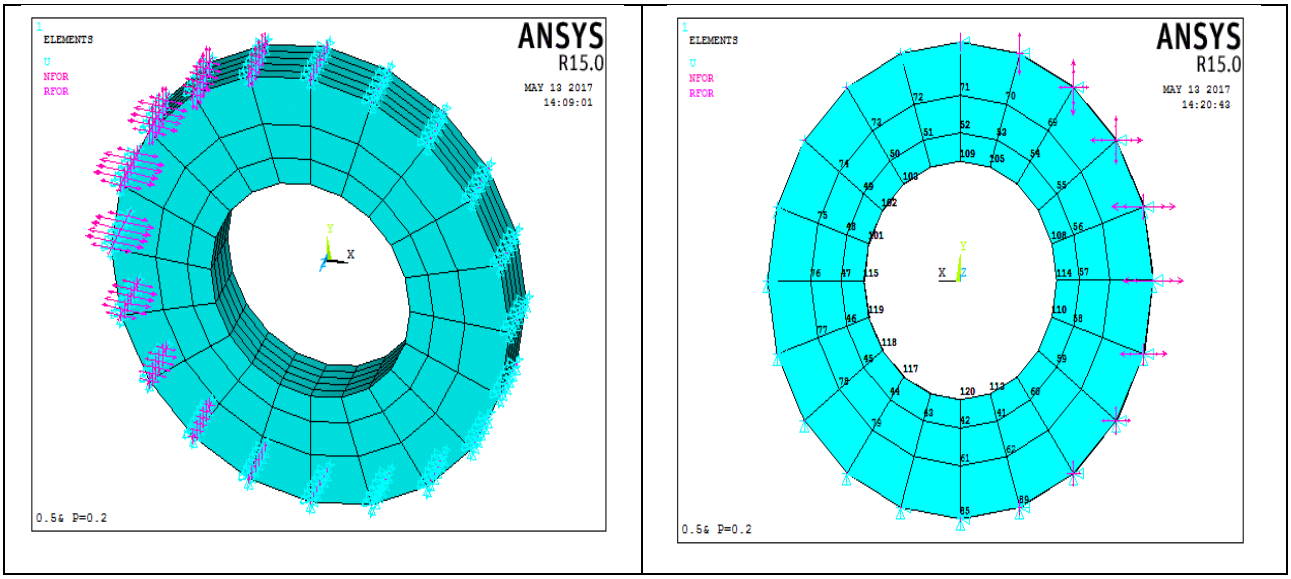


Figure.V.1. Schéma de solution sur ANSYS APDL (pour e=0.2).

Lorsque nous allons appliquer un champ de pression aux milieux de palier on a considéré la surface extérieure comme support fixe, la déformation de résultante est symétrique par rapport à le linge de chams de pression.

Les résultats de déplacement sur le tableau ci-dessous varient suivant l'angle θ.

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

angleΘ(rad)	Déformation (e=0.2) [mm] (ANSYS)	Déplacement (e=0.2) [mm] (Fourier Serie)
0	4,92E-10	1,92E-09
0,314	1,22E-09	2,68E-09

0,628	**2,96E-09**	**4,23E-09**
0,942	**5,15E-09**	**6,59E-09**
1,256	**7,56E-09**	**9,49E-09**
1,57	**1,00E-08**	**1,24E-08**
1,884	**1,21E-08**	**1,48E-08**
2,198	**1,35E-08**	**1,58E-08**
2,512	**1,34E-08**	**1,53E-08**
2,826	**1,13E-08**	**1,32E-08**
3,14	**7,40E-09**	**1,02E-08**
3,454	**3,07E-09**	**6,99E-09**
3,768	**1,12E-09**	**4,44E-09**
4,082	**4,71E-10**	**2,89E-09**
4,396	**1,98E-10**	**2,28E-09**
4,71	**6,98E-11**	**2,24E-09**
5,024	**2,88E-11**	**2,32E-09**
5,338	**2,86E-11**	**2,25E-09**
5,652	**8,57E-11**	**2,01E-09**
5,966	**2,08E-10**	**1,80E-09**
6,28	**4,92E-10**	**1,92E-09**

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

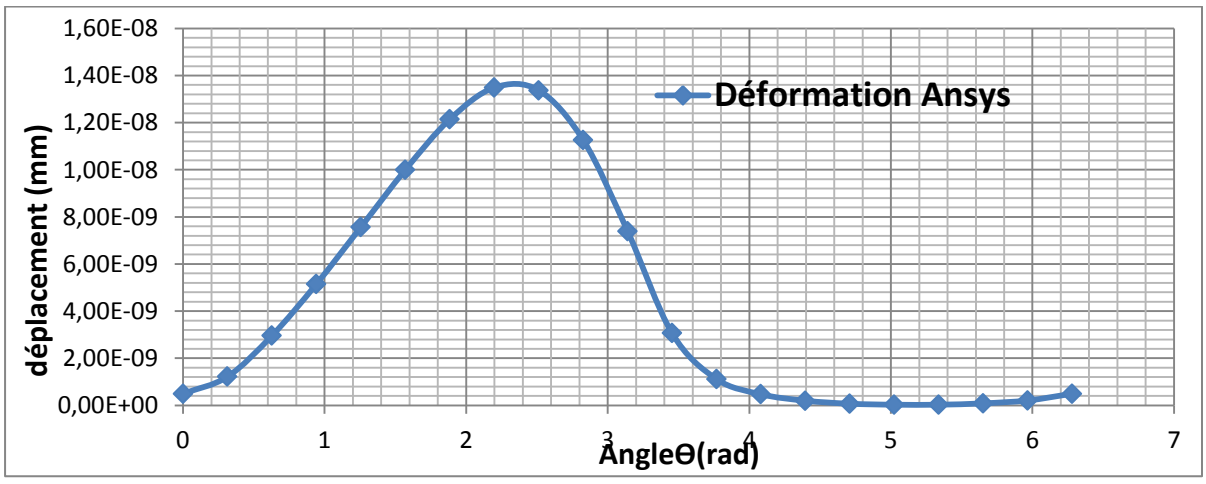


Figure.V.2 : Déformation élastique du palier court faiblement charger(ANSYS).

Figure .V. 3. Représente la déformation élastique du palier court faiblement chargé (e=0.2) Séries Fourier.

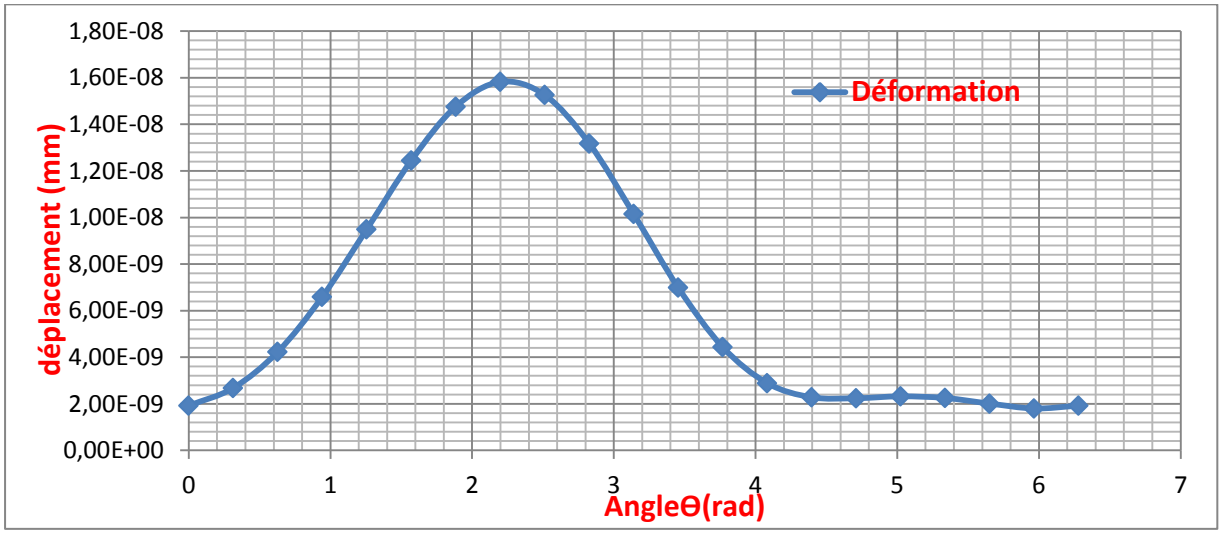


Figure. 3: Déformation élastique du palier court faiblement charge (Séries Fourier).

La figure .V.4 suivante représente la déformation élastique du palier court faiblement chargé (e=0.2) Séries Fouriers et ANSYS

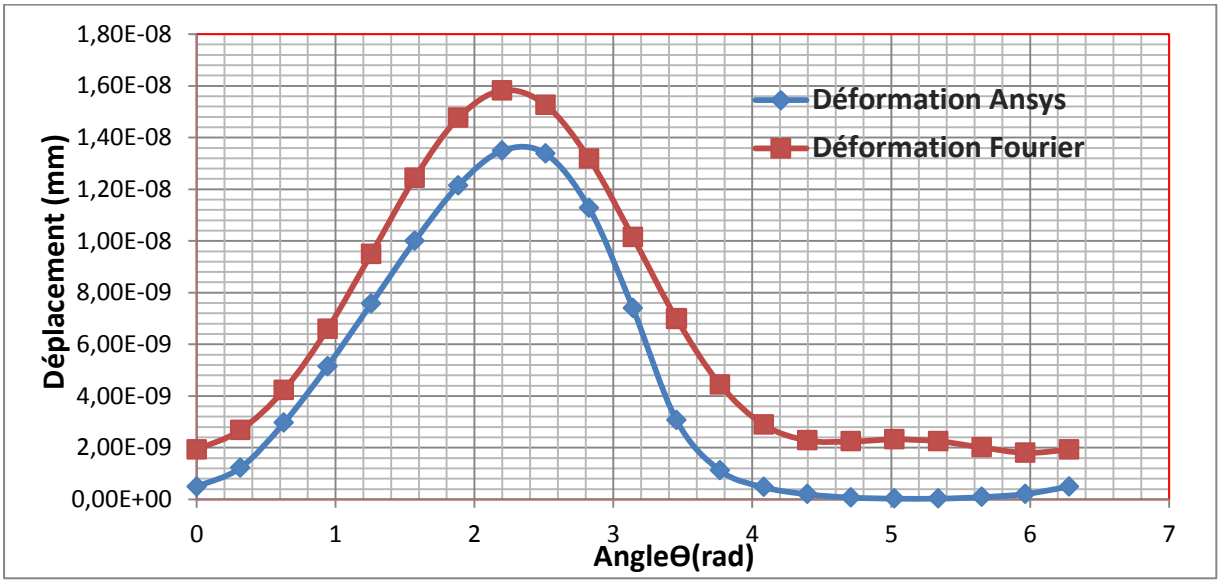


Figure.V.4.Déformation élastique du palier court faiblement chargé (Série Fourier) et ANSYS.

V.2.1.Discussion des résultats :

Les figures (V.2) et (V.3), représentent les déplacements élastiques d'un palier court faiblement chargé en utilisant le logiciel ANSYS APDL et l'analyse de Fourier..

les déplacements nodales sont répartie en suivant direction circonférentielle **(1,35E-08<max >1,34E-08),** et dans l'intervalle **2.198(Rad) <θ<2.512(Rad)** en utilisant le logiciel ANSYS. Tandis que ceux issus de l'analyse de Fouriers sont répartis de la manière suivante :

déplacement maximale **(1.58<max >1,53E-08).**Dans l'intervalle **1.198(Rad) <θ<1.512(Rad**).

On remarque que les deux résultats sont similaire (Figure.V.4) mais ceux issus du logiciel ANSYS APDL sont plus important.

Le schéma ci-dessous représente les contours de la déformation d'un palier court faiblement chargé obtenus par le logiciel ANSYS APDL :

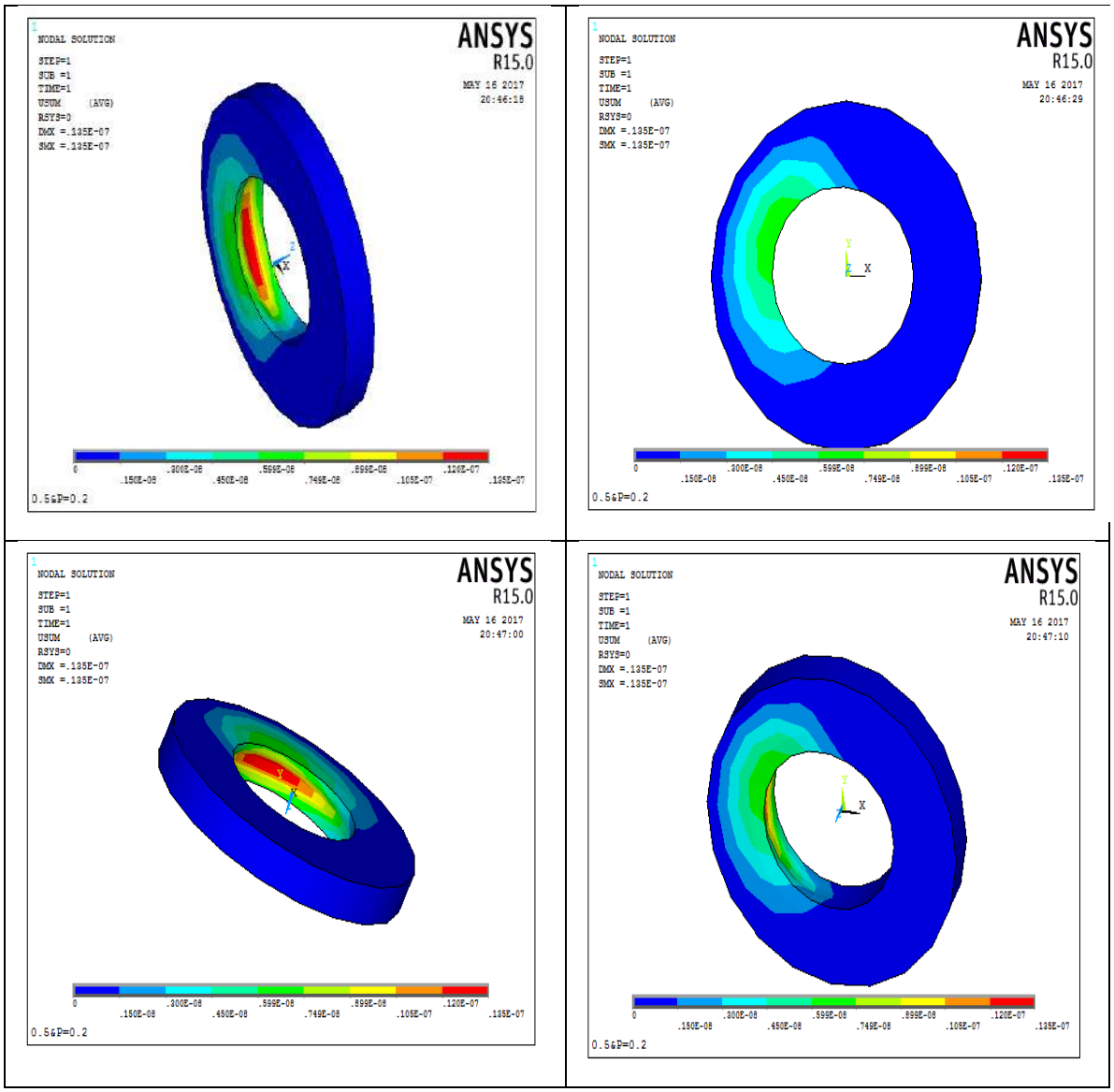


Figure.V.5. Schéma de déformation palier court faiblement charger (e=0.2).

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

Les déplacements nodales sont plus importants dans la zone ou l'épaisseur du film fluide faible. (Voir figures V.4/5).

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

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 (figuier **V.6.**.)

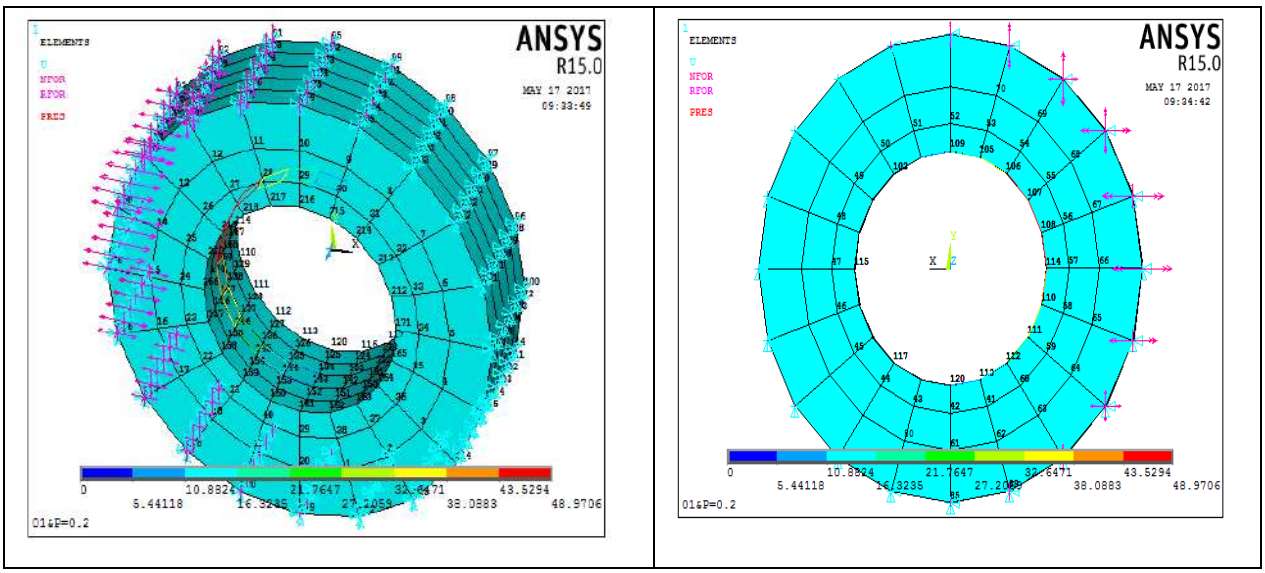


Figure .V.6. Schéma de solution sur ANSYS APDL

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

Tableau.V.2: Tableau de déformation radiale de palier à longueur finit faiblement/fortement chargé.

angleΘ(rad)	Déplacement (e=0.2) [mm]Ansys	Déplacement (e=0.2) [mm] fourier	Déplacement (e=0.8) [mm] Ansys	Déplacement (e=0.8) [mm] fourier
0	3,71E-09	1,62E-08	7,93E-09	-1,29E-07
0,314	1,11E-08	2,37E-08	2,11E-08	1,10E-08
0,628	2,79E-08	3,86E-08	5,13E-08	2,46E-07
0,942	4,65E-08	5,94E-08	9,17E-08	3,48E-07

1,256	6,58E-08	8,27E-08	1,50E-07	2,30E-07
1,57	8,40E-08	1,04E-07	2,45E-07	7,80E-08
1,884	9,91E-08	1,20E-07	4,13E-07	2,16E-07
2,198	1,08E-07	1,27E-07	7,13E-07	8,32E-07
2,512	1,06E-07	1,25E-07	1,22E-06	1,76E-06
2,826	9,17E-08	1,12E-07	1,90E-06	2,55E-06
3,14	6,58E-08	9,07E-08	2,22E-06	2,73E-06
3,454	3,58E-08	6,60E-08	1,15E-06	2,16E-06
3,768	1,29E-08	4,31E-08	2,71E-07	1,15E-06
4,082	4,59E-09	2,66E-08	1,11E-07	2,23E-07
4,396	1,76E-09	1,83E-08	4,55E-08	-2,25E-07
4,71	7,00E-10	1,67E-08	1,38E-08	-1,60E-07
5,024	2,52E-10	1,80E-08	5,36E-09	1,25E-07
5,338	2,08E-10	1,86E-08	2,12E-09	2,82E-07
5,652	5,80E-10	1,71E-08	1,36E-09	1,79E-07
5,966	1,44E-09	1,51E-08	2,71E-09	-4,00E-08
6,28	3,71E-09	1,62E-08	7,93E-09	-1,29E-07

La Figure.V.7 représenté la déformation élastique de palier de longueur finie faiblement chargé (e=0.2) avec ANSYS

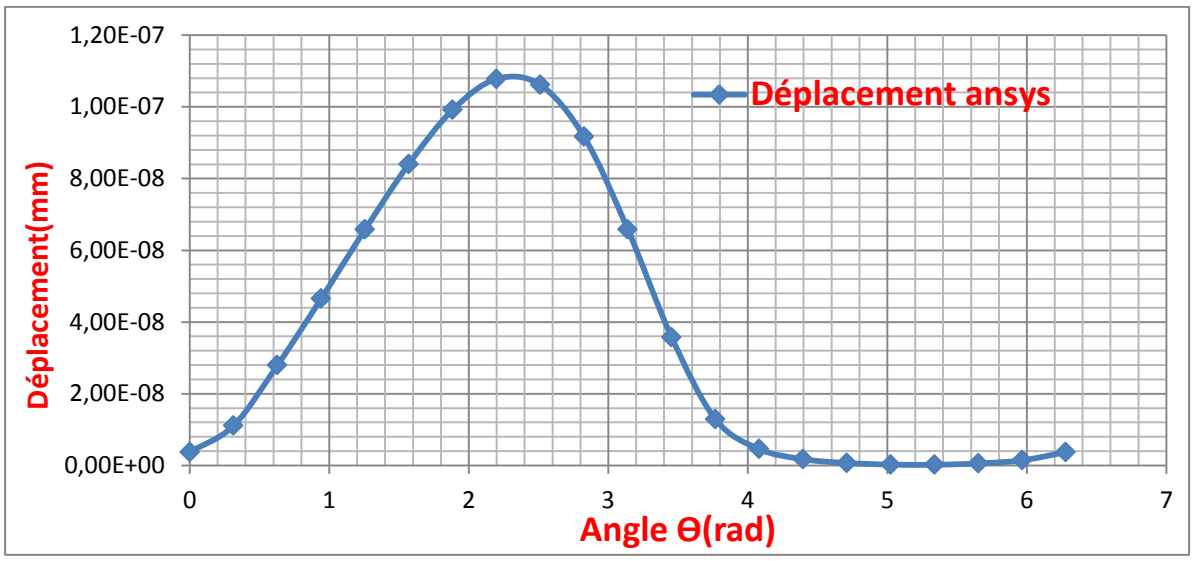


Figure.V.7. Déformation élastique de palier à longueur finie faiblement chargé avec ANSYS.

La Figure.V.8. représente la déformation élastique de palier de longueur finie faiblement chargé (e=0.2) en utilisant les série de Fourier.

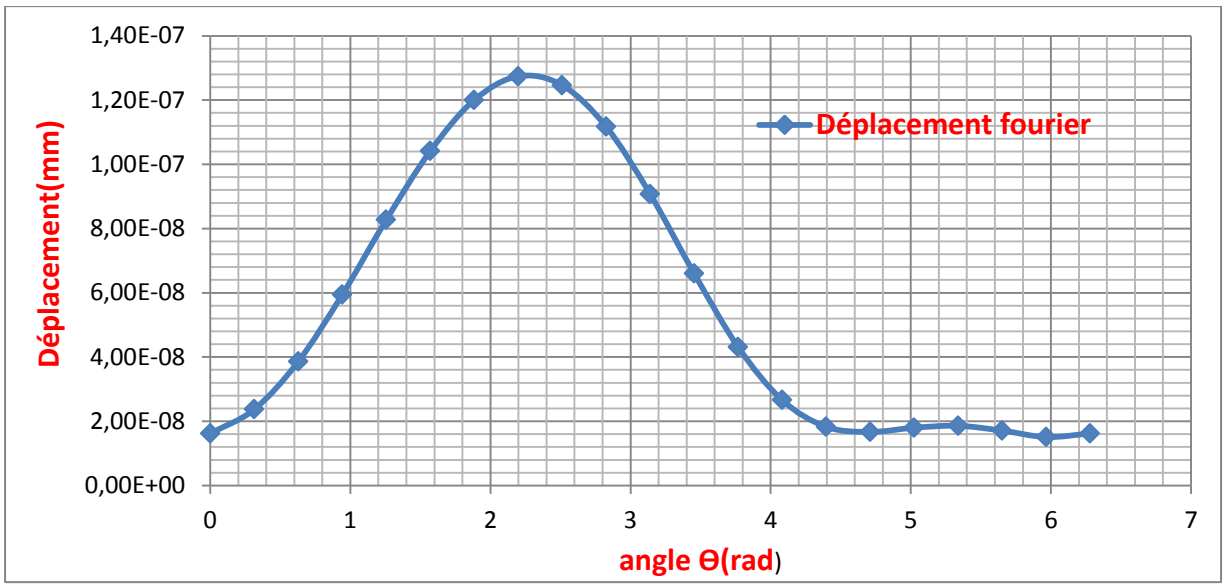


Figure.V.8: Déformation élastique du palier de longueur finie faiblement charger en utilisant les séries de Fourier.

La Figure.V.9 représente la déformation élastique de palier de longueur finie faiblement chargé (e=0.2) avec ANSYS et Fourier.

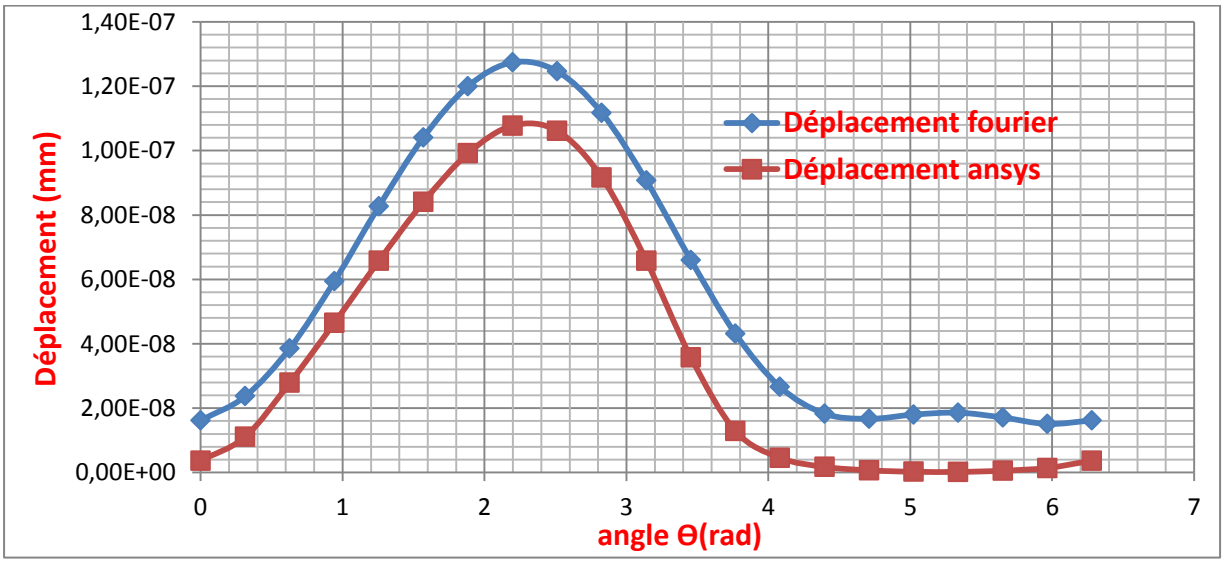


Figure.V.9:Déformation élastique du palier à longueur finie faiblement chargé avec Fourier et ANSYS

La Figure.V.10 représenté la déformation élastique du palier longueur finie fortement chargé (e=0.8) avec ANSYS.

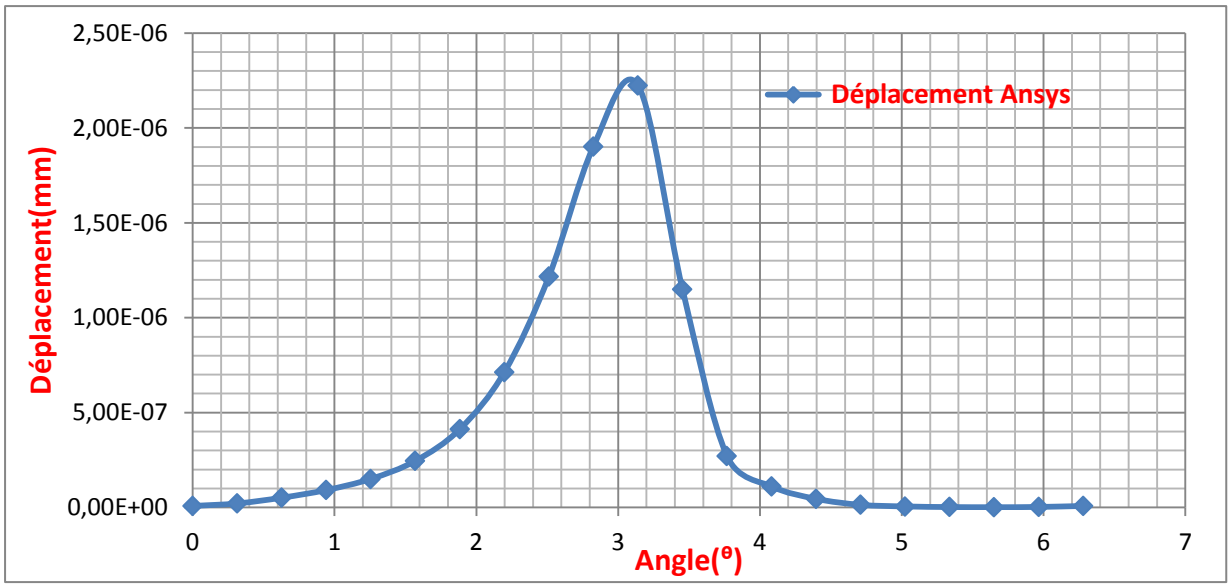


Figure.V.10: représenté la déformation élastique du palier longueur finie L/D=1fortement charger (e=0.8) en utilisant le ANSYS

La Figure.V.11 représenté la déformation élastique du palier longueur finie fortement charger (e=0.8) en utilisant les série de Fourier.

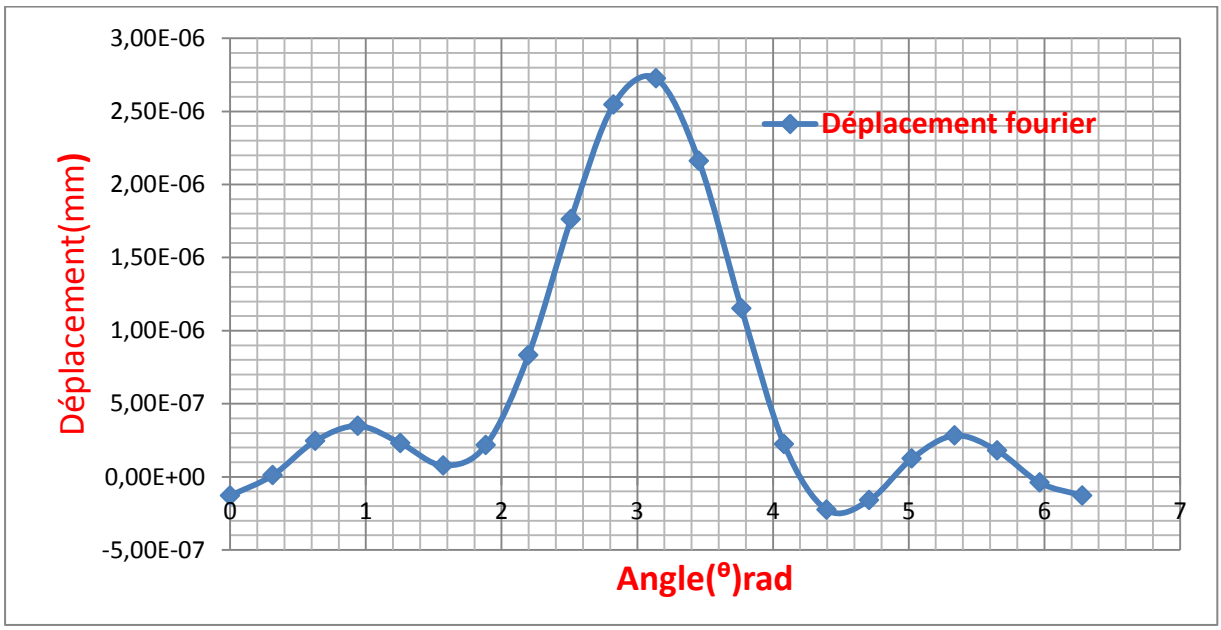


Figure.V.11: représenté la déformation élastique du palier longueur finie L/D=1fortement chargé (e=0.8) en utilisant les séries de Fourier.

La Figure (V.12).représente la déformation élastique de palier longueur finie fortement charger (e=0.8) avec Fourier et ANSYS

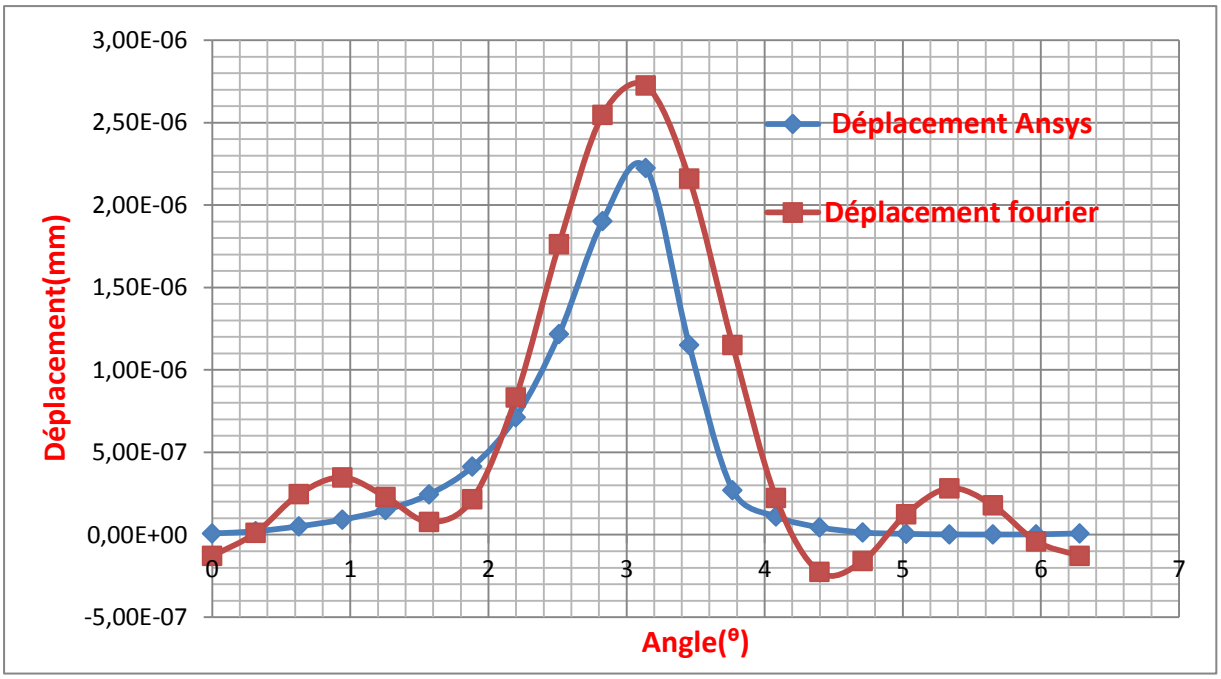


Figure.V.12.représenté la déformation élastique du palier longueur finie L/D=1 fortement charger (e=0.8) en utilisant le ANSYS.

V.3.1Discussion des résultats :

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

Les déplacements nodales sont répartie en 2D suivant direction circonférentielle et le direction radial **(1,06E-07<max 1,08E-07),** et dans l'intervalle **2.198(Rad) <θ<2.512(Rad)**.

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

Les déplacements nodale maximal **(1,27E-07<max >1,25E-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.

Dans de cas d'un palier longueur finie L/D=1 fortement charger l'approximation et un peut perturber ce qui veut dire que le nombre de termes de Fourier est insuffisant (dans notre cas on a retenue n = 3).

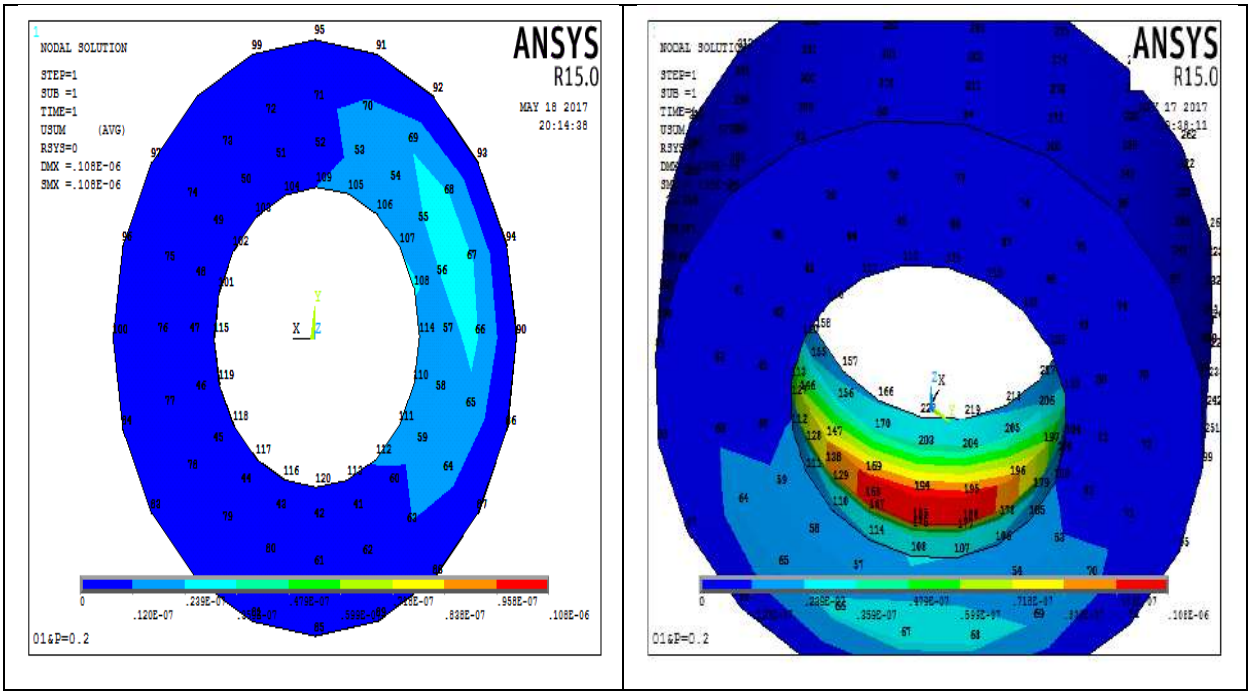


Figure.V.13: schéma de déformation élastique du palier à longueur finie faiblement charger(e=0.2).

V.3.2.Discussion des résultats :

Les figures (V.10) et (V.11), représente les déplacements élastiques de palier de longueur finie L/D=1 fortement chargé eu utilisant ce logiciel ANSYS APDL et analyse de Fourier.

Les déplacements nodales sont répartie en suivant direction circonférentielle direction **(1,90E-06<max<2,22E-06),** et dans l'intervalle **2.82(Rad) <θ<3.14(Rad)** en utilisant le logiciel ANSYS. Tandis que ceux issus de l'analyse de Fourier sont répartis de la manière suivante :

Les déplacements nodale maximale **(2,55E-06<max >2,73E-06).**et dans l'intervalle

2. 82(Rad) < θ < 3.14(Rad).

On remarque que les résultats sont similaire (Figure.V.12) mais ceux issus du logiciel ANSYS APDL sont plus important.

Dan de cas d'un palier longueur finie L/D=1 fortement charger l'approximation et un peut perturber ce qui veut dire que le nombre de termes de Fourier est insuffisant.

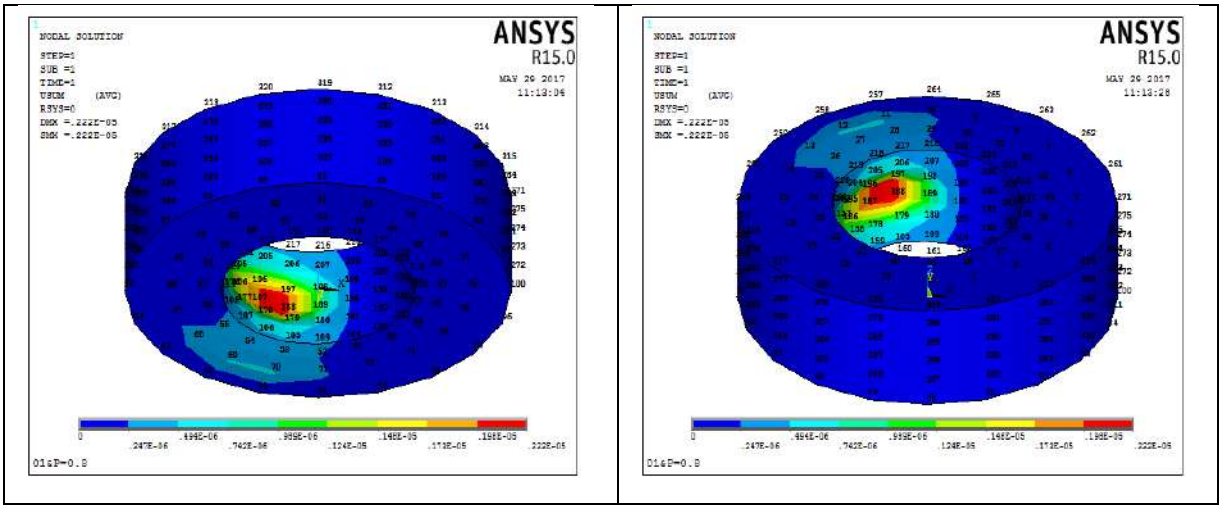


Figure.V.14: schéma de déformation élastique du palier à longueur finie fortement charger(e=0.8).

V.4.Palier infiniment long L/D=1.5 :

Le 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 (**V.14.**)

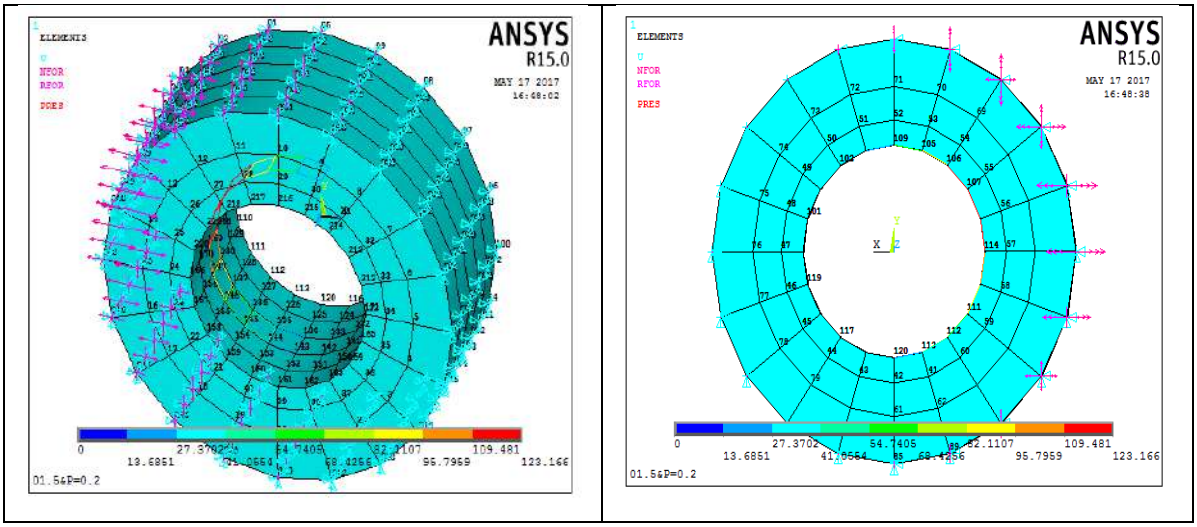


Figure.V.15. Schéma de solution sur ANSYS APDL (pour e=0.2).

Les résultats de déplacement sur le tableau ci-dessous varient suivant l'angle θ, pour obtenir juste la déformation radiale du palier infiniment long faiblement.

Tableau.IV.3: Tableau de déformation radiale de palier infiniment long Faiblement charge.

Angle Θ(Rad)	déplacement (Ansys)	déplacement (Fourier)
0	1,08E-08	2,88E-08
0,314	3,57E-08	4,42E-08

0,628	**8,92E-08**	**7,87E-08**
0,942	**1,46E-07**	**1,24E-07**
1,256	**2,02E-07**	**1,71E-07**
1,57	**2,54E-07**	**2,12E-07**
1,884	**2,95E-07**	**2,45E-07**
2,198	**3,17E-07**	**2,68E-07**
2,512	**3,12E-07**	**2,81E-07**
2,826	**2,73E-07**	**2,78E-07**
3,14	**2,03E-07**	**2,59E-07**
3,454	**1,18E-07**	**2,25E-07**
3,768	**4,46E-08**	**1,85E-07**
4,082	**1,39E-08**	**1,50E-07**
4,396	**4,83E-09**	**1,26E-07**
4,71	**1,77E-09**	**1,10E-07**
5,024	**5,67E-10**	**9,52E-08**
5,338	**4,67E-10**	**7,65E-08**
5,652	**1,39E-09**	**5,35E-08**
5,966	**3,76E-09**	**3,41E-08**
6,28	**1,08E-08**	**2,88E-08**

On a tracé les résultat de déformation f(x,x,z) sous forme de graphe.

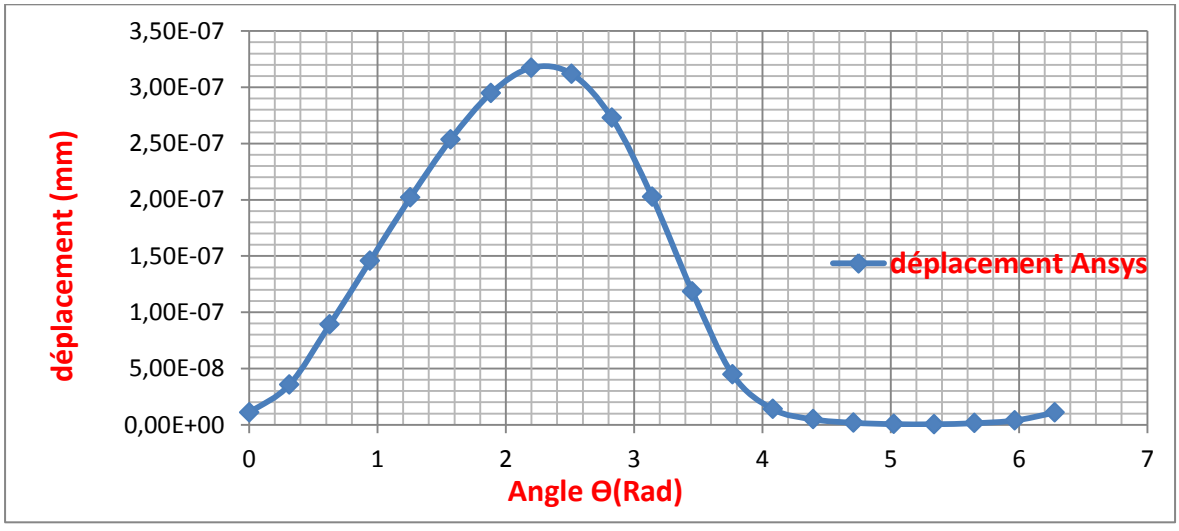


Figure.V.16.déformation élastique du palier L/D=1.5 et e=0.2 (ANSYS).

La figure V.17: représenté la déformation élastique du palier infiniment long faiblement charger (e=0.2),en utilisant les série de Fourier.

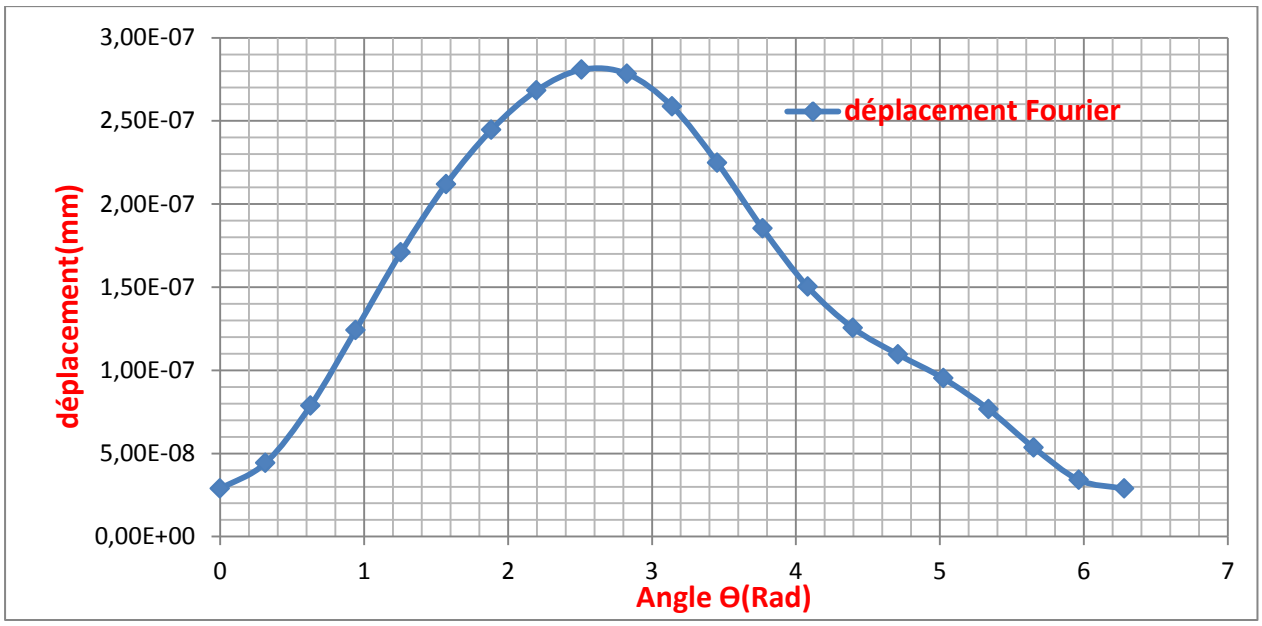


Figure.V.17.déformation élastique du palier L/D=1.5 et e=0.2en utilisant les série de Fourier.

V.2.1.Discussion des résultats :

Les figures (V.16) et (V.17), représentes les déplacements élastiques d'un palier palier infiniment long faiblement chargé en utilisant ce logiciel ANSYS APDL et analyse de Fourier.

Les déplacements nodales sont plus importante dans la zone ou l'épaisseur du film fluide faible.

Que les déplacements nodales sont répartie en 2D suivant direction circonférentielle et le direction radial **(3,17E-07<max 3,12E-07),** et dans l'intervalle **2.198(Rad) <θ<2.512(Rad)** en utilisant le logiciel ANSYS. Tandis que ceux issus de l'analyse de Fourier sont répartis de la manière suivante :

On remarque que les déplacements nodale sont répartie en 2D suivant direction circonférentielle et la direction radial **(2,81E-07<max >2,78E-07).**et dans l'intervalle

2.512(Rad) <θ<2.826(Rad).

Le schéma ci-dessous représente les contours de la déformation d'un palier court faiblement chargé obtenus par le logiciel ANSYS APDL :

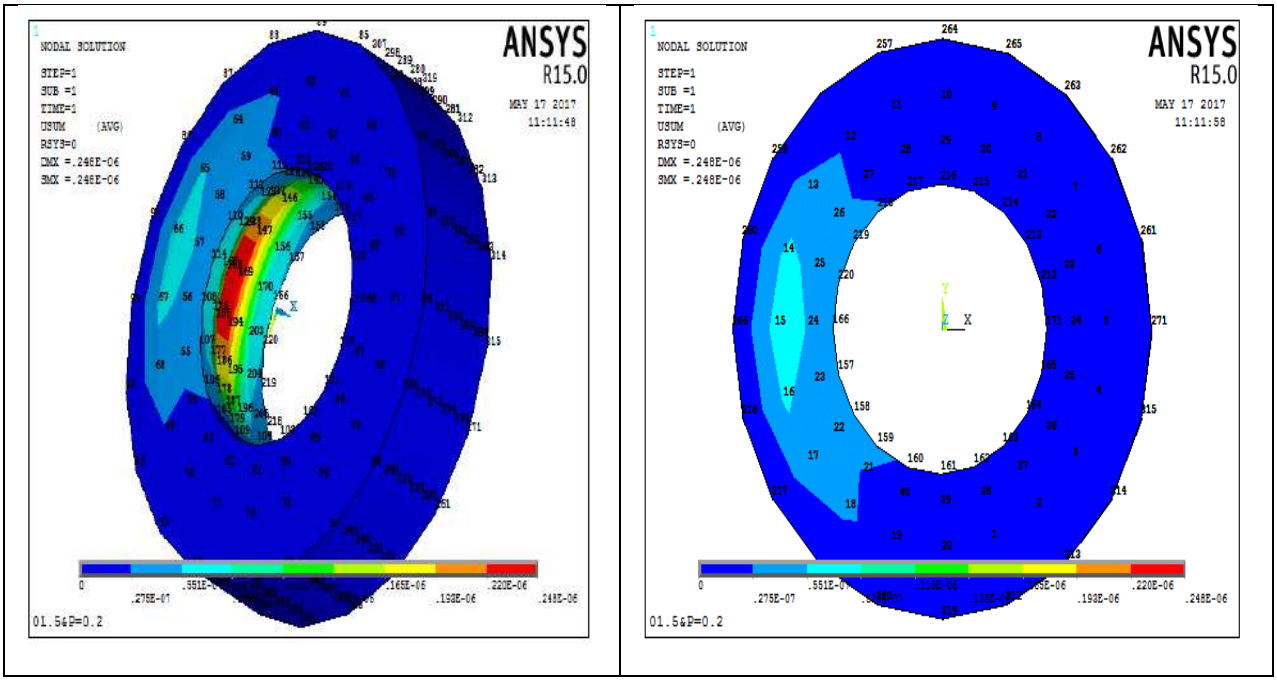


Figure.V.18: Schéma de déformation élastique du palier infiniment long faiblement chargé (L/D=1.5 et e=0.2).

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

Les déplacements nodales sont plus importante dans la zone ou l'épaisseur du film fluide faible. (Voir figures V18).

V.4.Conclusion.

Dans ce chapitre, comme conclusion on dit que dans les paliers hydrodynamique les déformations sont plus importante dans la zone la plus chargée. On remarque aussi que les déformations sont plus significatives pour des paliers courts.

Aussi pour des paliers fortement chargé on doit augmenter le nombre de termes de Fourier pour avoir de bons résultats

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

Conclusion Générale

Conclusion générale.

Le but de ce travail et de calculer les déformations élastiques d'un palier cylindrique en utilisant l'analyse de Fourier.

Le champ de pression engendré dans le palier est non axisymétrique, La méthode de sérier de Fourier sert à la transformation de ce problème 3D en une somme de plusieurs problèmes 2D.

On remarque que la méthode est basée sur les séries de Fourier permit de résoudre le problème de déformation du palier d'une manière très simple 2D sans passer par le modélisation 3D de la structure.

Dans ce contexte le logiciel MATLAB est utilisé pour le calcul des coefficients de Fourier, ainsi que calcul des déformations élastiques à l'intérieur d'un palier hydrodynamique.

On remarque que les résultats obtenus sont satisfaisantes en comparant avec ceux obtenus par le logiciel ANSYS APDL pour des paliers à faible excentricité relative mais peut préciser pour des excentricités élevées

En perspective une amélioration des résultats doit passer par l'augmentation du nombre de termes de Fourier surtout pour des paliers fortement chargés.

Bibliographie.

[1] Jean Frêne, « La tribologie de l'Antiquité à nos jours » .Bulletdine l'UniodnenPhysicien . Publication mensuelle Décembre 1986.

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

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

[4] Nassim ZERROUNI «Etu de De L'interaction Fluide Visqueux-structure D'un palier Fluide Soumis à des Sollicitions temporelles » thèse de magister ,Université de M'Hamed Bougara, Boumerdes 2009.

[5] Mr .Nader BEN SALEM ,Cour Génie Mécanique «chapitre 5 lubrification des roulements. »

[6] Sahli Abdelkader, Mémoire de magister, Étude expérimentale d'un palier lubrifie mesaligne, Université de Hassiba Ben Bouali, Chlef, 2011.

[7] Wikipedia_files/Tribologie_Lubrifiants%20%E2%80%94%20Wikilivres.html

[8] Mr .Nader BEN SALEM ,Cour Génie Mécanique «chapitre-2-generalites sur les lubrifiants.»

[9] Aziz Ouadoud, Ahmed Mouchtachiet et Noureddine Boutammachte, « Analyse Thermoélastohydrodynamique d'un palier elliptique avec deux lobes » ´21`eme Congrès Français de M´mécanique, 26 au 30 août 2013

[10] 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.

[11] HIKH TOUHAMI Abd el Ouahab « Calcul des déformations Elastohydrodynamiquedans un palier circulaire. (Utilisation du logiciel ANSYS) » Thèse de master, université Dr Yahia Feras, Médéa, 2011.

[12] Y.BAZIZ, « Cours Outils de programmation pour les mathématiques » Centre Universitaire RELIZANE, 2013/2014

[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.

[14] /ansys.html.