

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Énergétique

Thème

Etude théorique et modélisation des butées
poreuses pour le contrôle des vibrations

Préparé par :

SAFI Abdelkader et HASSANI Islem

Soutenu publiquement le : 26 / 06 / 2023, devant le jury composé de :

M. KARAS Abdelkader	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. BOUZIDANE Ahmed	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. BENADDA Mohamed	Docteur vacataire (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. ABOSHIGHIBA Hicham	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant
M. BENARIBA Aboubakeur	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Co-Encadrant
M. HAMMOU Mahmoud	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Invité

Année universitaire : 2022 - 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Sommaire

Nomeclatures	i
Remerciements	iii
Dédicaces	iv
Table des figures	v
Liste des tableaux	vii
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE	5
I.1 Introduction	5
I.2 Les rotors	5
I.2.1 Les applications du rotor	6
I.2.2 Les composants du rotors	6
I.2.3 Modèle du rotor	7
I.2.4 Types de rotors	8
I.2.5 Le problème avec ses systèmes	9
I.2.6 Expression de la vitesse critique	9
I.3 Les paliers	10
I.3.1 Les inconvénients des paliers	11
I.3.2 Types de paliers principaux dans l'industrie	13
I.4 L'étude des paliers hydrostatiques	15
I.4.1 Palier hydrostatique et l'amortissement	16
I.4.2 La lubrification hydrostatique a patin	17
I.5 Les Milieux poreux	18
I.5.1 Propriétés d'un milieu poreux	19
I.5.2 L'application des milieux poreux dans les roulements	21
I.5.3 Les paliers à air et les milieux poreux	22
I.5.4 Écoulement de l'air à travers un milieu poreux	23
II FORMULATION MATHÉMATIQUE	25
II.1 Introduction	25
II.2 Hypothèses de travail	25

II.3	Ecoulement à travers le film mince :	26
II.4	L'écoulement à travers le milieu poreux	28
II.4.1	La Porosité :	28
II.4.2	La Permeabilité :	28
II.4.3	Loi de Forchheimer	29
II.5	Simulation de l'écoulement du fluide à travers un milieu poreux	30
II.5.1	Etude d'un problème de diffusion à une dimension :	31
II.5.2	Problème de diffusion à trois dimensions Dans le cas d'un problème 3D :	32
III RÉSULTATS ET DISCUSSIONS		35
III.1	Introduction	35
III.2	Model théorique d'étude	35
III.3	La géométrie	36
III.4	Les conditions aux limites et hypothèses	36
III.4.1	Le modèle complet et le modèle simplifié	37
III.4.2	Le maillage	38
III.5	Simulation et analyses	39
III.5.1	Justification de l'utilisation du modèle simplifié	39
III.5.2	Comparaison du modèle complet et du modèle simplifié	40
III.5.3	La Validation du modèle numérique	42
III.5.4	Influence de l'épaisseur du film sur la charge portante	43
III.5.5	Influence de l'épaisseur du film sur la raideur équivalente	43
III.5.6	Influence de l'épaisseur du film sur la l'amortissement équivalent	45
III.5.7	Influence de la perméabilité sur le comportement dynamique de la butée	46
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES		48
Références		50
RESUMES		52
Abstract		53
ملخص		54

NOMENCLATURES

SYMBOLES

m	La masse de rotor	[Kg]
s	La rigidité de l'arbre	[N/m]
e	L'excentricité du rotor	
y	Déviation supplémentaire du rotor	
Q_v	Le débit volumique	[m^3 / s]
D	Le diamètre de cylindre	[mm]
h	l'épaisseur de film mince	[μm]
W	La force de portance	[N]
A	La surface	[m^2]
L	La longueur	[m]
P	La pression	[MPa]
P_s	La pression	[MPa]
r	Rayon de cylindre	[mm]
K	La raideur	[$N / \mu m$]
C	L'amortissement	[$N.s / m$]
\dot{h}	La vitesse d'écrasement	[ms^{-1}]
U, V, W	La Vitesse axiale, radiale et circonférentielle	[ms^{-1}]

NOMENCLATURES

ω	La vitesse angulaire de l'arbre	[rad / s]
ω_c	La vitesse critique ou tourbillonnaire	[rad / s]
δ	La Déformation statique de l'arbre	
μ	La viscosité dynamique	[Kg / m.s]
ν	La viscosité cinématique	[m ⁻² s ⁻²]
∇	Le gradient	
c	Coefficient d'inertie	
μ	La viscosité aérodynamique	
∇^2	La laplacien	
Δ	L'opérateur de différence	[N.s / m ²]
ρ	La densité du fluide	
ϕ	La porosité	
Φ	La perméabilité	[m ²]
Re	Le nombre de Reynolds	
Re _{ϕ}	Le nombre de Reynolds basé sur la perméabilité	
f_ϕ	Le facteur de frottement	

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos remerciements à notre encadrant Dr ABOSHIGHIBA Hicham. Nous remercions également Dr BENARIBA Aboubakeur pour son aide et ses encouragements.

Nous tenons à exprimer toute notre gratitude à Monsieur KARAS Abdelkader Professeur au département de génie mécanique d'avoir accepté de présider le jury de cette soutenance. Nos remerciements vont également au Docteur BENADDA Mohamed, à Monsieur Bouzidane Ahmed Professeur au département de génie mécanique et Mr Hammou Mahmoud Maître de Conférences au département de génie mécanique pour avoir accepté d'examiner et de juger notre travail.

Nous tenons à remercier aussi l'ensemble du staff pédagogique et administratif de l'université de Tiaret.

Dédicaces

Nous avons le grand honneur de dédier ce modeste travail :

A nos très chers parents

Tous les membres de nos familles

A tous nos amis

A tous nos camarades

A tous les amis d'études

A tous les enseignants et toutes les enseignantes qui ont contribué
à notre formation tout au long de nos vies d'étude

A tous ceux que nous aimons et qui nous aiment

Table des figures

I.1	Turbocompresseur avec ses composants [1]	7
I.2	Rotor de jeffcot laval [2]	7
I.3	Système rotor flexible [3]	8
I.4	Système rotor rigide[4]	8
I.5	l'état de l'arbre [5]	10
I.6	Différents types de paliers [6]	11
I.7	Défaillance d'une turbine hydroélectrique de 640 MW [7]	12
I.8	Roulement a billes [8]	13
I.9	Palier hydrodynamique[9]	14
I.10	Palier à quatre patins hydrostatiques alimenté par un fluide électro-rhéologique négatif[10]	15
I.11	Palier hydrostatique (Système de lubrification) [11]	16
I.12	Schéma d'un film fluide amortisseur SFD.[9]	17
I.13	Schéma de principe d'un patin hydrostatique [11]	17
I.14	Schématisation d'un patin hydrostatique [11]	18
I.15	Quelques exemples des milieux poreux[13]	19
I.16	Simulation d'un écoulement de fluide dans un canal poreux[14]	21
I.17	Les paliers à air avec milieu poreux [15]	23
II.1	Schématisation du volume de contrôle 1D	31
II.2	Représentation schématique du volume de contrôle 3D	32
III.1	Modèle théorique de Xin Xiao [16]	36
III.2	Modèle de Xin Xiao [16]	36

III.3	Modele de Xin Xiao [16]	37
III.4	Modèle Simplifié	38
III.5	Le maillage de la géométrie complète Xin xiao	38
III.6	Le maillage de la géométrie Simplifiée	38
III.7	Maillage raffiné du film d'air	39
III.8	Champ de la pression dans le modèle de Xin Xiao	40
III.9	Champ de la pression dans le modèle simplifié	40
III.10	Variation de la pression le long de l'épaisseur le modèle de Xin Xiao	41
III.11	Variation de la pression le long de l'épaisseur du modèle simplifié	41
III.12	Débit en fonction de la différence de pression	42
III.13	Charge portante en fonction de l'épaisseur du film	43
III.14	Influence de l'épaisseur du film d'air sur la raideur	44
III.15	Influence de l'épaisseur du film d'air sur l'amortissement	45
III.16	Amplitude de vibration en fonction de la fréquence d'excitation	47

Liste des tableaux

III.1	Tableau de paramétrés [16]	37
III.2	Tableau de Statistiques sur le maillage des deux géométries	39
III.3	Tableau de débit en fonction de la différence de pression	42



INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les paliers sont des composantes mécaniques conçues pour soutenir les arbres et les guider. Ils peuvent être de plusieurs types : à organes mobiles, fluides, électromagnétiques... Les paliers hydrostatiques, qui appartiennent aux paliers fluides sont une solution très intéressante pour le contrôle des vibrations des rotors. Cependant ceux parmi eux qui utilisent les liquides comme les huiles, nécessitent des installations compliquées et coûteuses pour le filtrage et le nettoyage du lubrifiant avant de le réinjecter dans le palier. Après un certain temps d'utilisation l'huile doit être remplacée par une nouvelle pour garantir sa qualité et la conservation des propriétés exigées par les concepteurs, ce qui est une source additionnelle de dépense. Une autre technologie, qui fait aussi partie des paliers fluides, résout ces problèmes d'une manière radicale : ce sont les paliers aérostatiques. Le circuit du fluide de ces types d'organes est ouvert, le fluide qui est l'air ne nécessite pas d'être récupéré, il est seulement filtré puis injecté dans le palier ensuite libéré à la sortie.

L'emploi de ces paliers peut être régulé par des résistances classiques comme le capillaire ou l'orifice mais aussi les résistances de types milieu poreux qui sont caractérisées par leur porosité et surtout leur perméabilité.

Dans ce projet de fin d'étude nous nous intéressons à l'étude de l'influence de la perméabilité de ce type de palier sur le comportement des rotors qu'ils supportent. L'étude est réalisée dans un contexte 3D en utilisant le logiciel commercial Ansys-CFX. Le modèle est d'abord validé par des résultats expérimentaux de la littérature ensuite exploité pour en tirer des relations susceptibles de conduire à un moyen de contrôle vibratoire innovateur.

Afin de traiter tous ces points ; le mémoire est organisé en trois chapitres, plus une introduction générale et une conclusion. Dans le premier chapitre, on présente une recherche

bibliographique sur les paliers en générale et sur les milieux poreux. Le deuxième chapitre est consacré à la formulation mathématique liées aux paliers et aux caractéristiques des milieux poreux. Dans le dernier chapitre la validation du modèle numérique est faite en comparant les résultats obtenus numériquement avec ceux de la littérature (expérimentaux). A la fin du chapitre les calculs des patins avec les différentes valeurs de perméabilité sont analysés. L'étude est finalisée par une section dédiée aux conclusions où nous tirons les plus importantes et nous proposons les perspectives à suivre pour un travail futur.



CHAPITRE I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre I

RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

Parmi les différents mécanismes de contrôle des vibrations, les paliers et les rotors jouent un rôle clé. Les paliers, qui sont des éléments de support des arbres ou des rotors, permettent de réduire les forces et les vibrations générées par les mouvements rotatifs. Ils assurent également le positionnement précis de l'arbre ou du rotor, minimisant ainsi les défauts d'alignement et les interactions indésirables avec les composants environnants.

Dans ce chapitre, nous présenterons les principales théories et concepts liés aux paliers et aux rotors, ainsi qu'une revue de la littérature sur les différentes techniques de contrôle des vibrations. Nous examinerons également en détail les études existantes sur les butées poreuses, en soulignant leurs avantages, leurs limitations et les défis associés à leur utilisation

I.2 Les rotors

Les rotors sont des composants rotatifs que l'on trouve dans les machines et les véhicules, tels que les moteurs, les turbines et les freins. Ils convertissent l'énergie à un mouvement ou à une force.

I.2.1 Les applications du rotor

Dans le secteur des transports, les rotors sont indispensables au fonctionnement de nombreux types de véhicules, soit qu'il s'agisse de voitures, de camions, de trains ou de bateaux. Par exemple, Les rotors jouent un rôle fondamental dans les turbocompresseurs, où ils ont pour fonction de comprimer et de pousser l'air dans la chambre de combustion du moteur, augmentant ainsi son efficacité et sa puissance.

Les rotors sont également largement utilisés dans l'industrie de l'énergie. On les retrouve non seulement dans la production d'énergie éolienne et hydroélectrique, mais aussi dans les turbines à vapeur et les turbines à gaz, où ils convertissent l'énergie thermique en énergie mécanique.

Une autre application importante des rotors est l'aviation. Dans les avions, les rotors sont utilisés pour alimenter les systèmes auxiliaires tels que les générateurs et les pompes hydrauliques. Ils sont également couramment utilisés dans les hélicoptères, où ils jouent un rôle essentiel dans le levage, la manœuvre et le contrôle de l'aéronef.

I.2.2 Les composants du rotors

Ces composants rotatifs sont généralement constitués de plusieurs pièces conçues pour fonctionner ensemble afin de remplir une fonction spécifique. Voici quelques-uns des composants essentiels d'un rotor :

- **L'arbre** : Le principal composant structurel qui supporte le reste du rotor et qui tourne autour de son axe.
- **Les disques** : Composants rotatifs chargés de convertir l'énergie en mouvement ou en force. Elles peuvent prendre différentes formes, telles que des palettes, des spirales ou des pales, en fonction de l'application.
- **Moyeu** : Structure qui se fixe à l'arbre et supporte les pales du rotor, assurant la stabilité et la structure.
- **Corps** : Cette structure extérieure protège le rotor et supporte les éléments internes. Elle peut comprendre des passages spécialisés pour diriger le flux de fluides ou de gaz.
- **Les composants** : qui permettent au rotor de tourner en douceur et avec un mini-

mum de frottement.

- **Joints** : Composants qui empêchent les fuites et garantissent que les fluides ou les gaz sont contenus dans le système. D'autres composants peuvent inclure des systèmes de refroidissement, des mécanismes d'amortissement et des passages de fluides, ainsi que d'autres composants spécialisés spécifiques à l'application du rotor en particulier

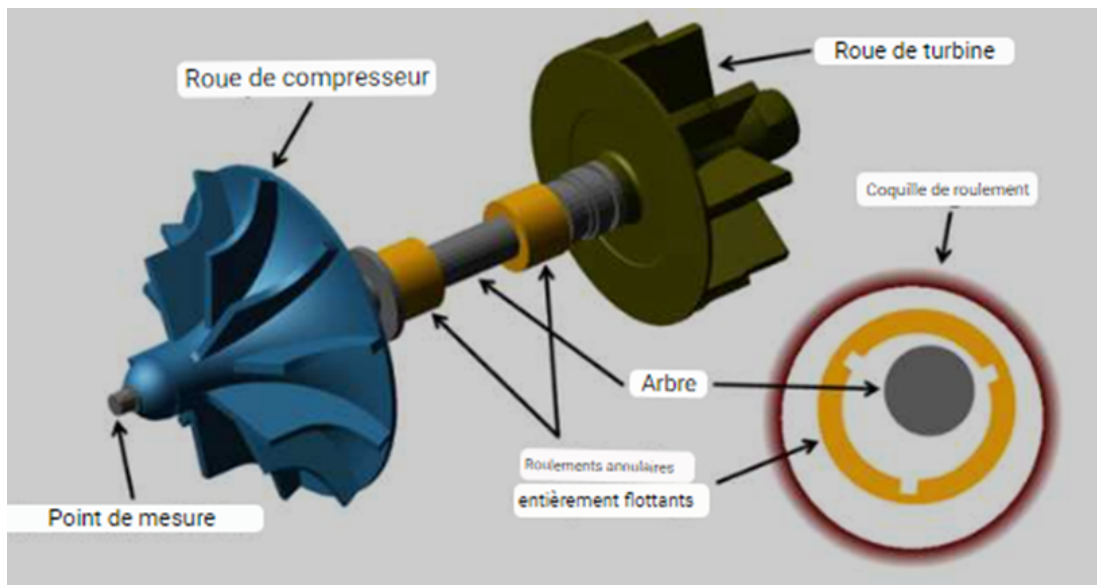


FIGURE I.1 – Turbocompresseur avec ses composants [1]

I.2.3 Modèle du rotor

Bien que les composants du rotor soient nombreux et variés, un rotor peut être étudié en le modélisant par un système qui ne contient que l'arbre, les disques, le balourd et les paliers. comme représenté a (la figure I.2) .

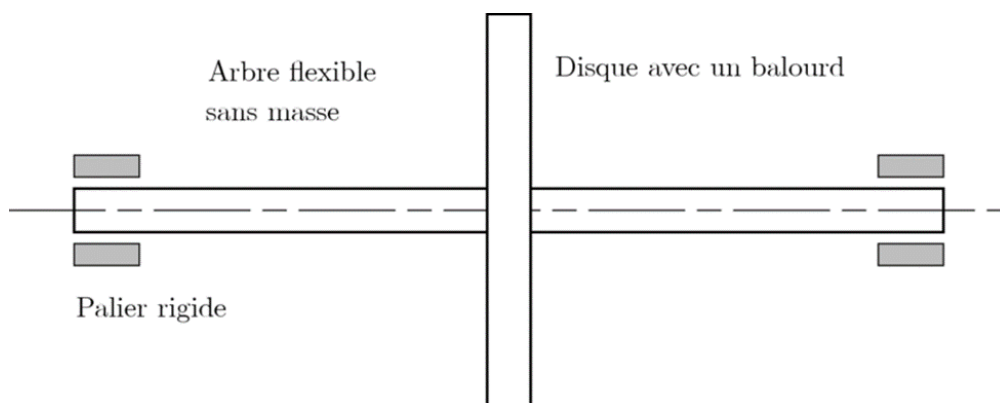


FIGURE I.2 – Rotor de jeffcot laval [2]

I.2.4 Types de rotors

Les arbres de rotor, comme les pales de rotor, peuvent être classés en deux catégories en fonction de leur conception et de leurs caractéristiques :

Les arbres de rotor flexibles (souple)

Sont conçus avec un certain degré de flexibilité, (figure I.3) ce qui leur permet de se plier ou de se déformer sous la charge, réduisant ainsi les vibrations et les contraintes. Ils sont utilisés dans des applications où la conformité, les capacités de vitesse et les faibles charges sont nécessaires, comme les générateurs d'éoliennes.

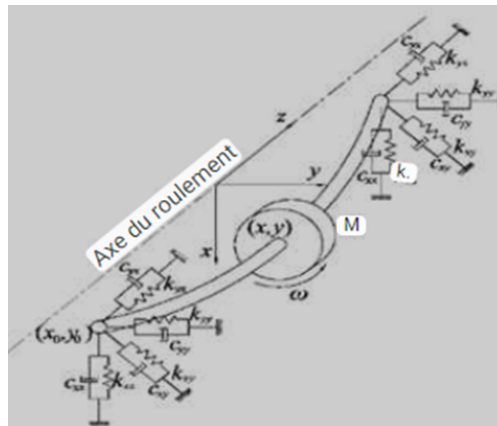


FIGURE I.3 – Système rotor flexible [3]

Les arbres de rotor rigides

Quant à eux, sont conçus pour être solides et résistants, sans aucune flexibilité ni déviation (Figure I.4) . Ils sont utilisés dans des applications à forte charge et à couple élevé, où l'accent est mis sur la résistance et la précision, comme dans les turbines à gaz et les machines lourdes.

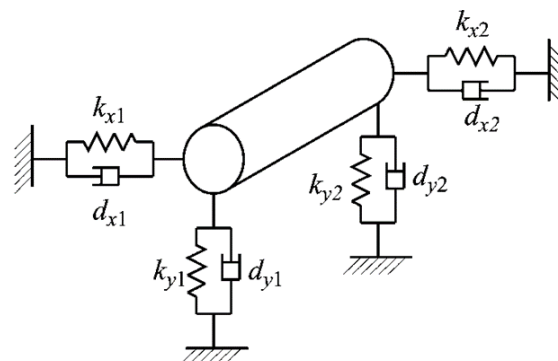


FIGURE I.4 – Système rotor rigide[4]

I.2.5 Le problème avec ses systèmes

Lorsqu'un rotor, tel qu'un engrenage ou une poulie, est monté sur un arbre fixe, son centre de gravité n'est généralement pas aligné avec la ligne médiane de l'arbre, comme illustré dans (figure I.5) . Par conséquent, lorsque l'arbre est en rotation, il subit une force centrifuge. Cette force entraîne une flexion de l'arbre dans la direction de l'excentricité du centre de gravité, ce qui accentue davantage l'excentricité et, par conséquent, la force centrifuge. Ce phénomène se cumule et peut éventuellement provoquer la rupture de l'arbre. La flexion de l'arbre dépend non seulement de l'amplitude de l'excentricité, mais également de la vitesse de rotation de l'arbre.

Ainsi, la vitesse à laquelle l'arbre tend à vibrer de manière violente dans le sens transversal est appelée vitesse critique, vitesse de résonance ou vitesse de tourbillonnement.

I.2.6 Expression de la vitesse critique

Considérons un arbre de masse négligeable portant un rotor entre deux paliers A et B, comme le montre la figure (a). La figure (b) montre l'arbre tournant à une vitesse uniforme de ω rad/s autour de l'axe de rotation. Soit le point O sur l'axe de l'arbre, O1 le centre géométrique du rotor et 'G' le centre de gravité du rotor. Soit,

m = Masse du rotor.

s = Rigidité de l'arbre.

e = Excentricité du rotor, c'est-à-dire la distance entre le centre de gravité du rotor et le centre géométrique .

y = Déviation supplémentaire du rotor due à la force centrifuge

ω = vitesse angulaire de l'arbre.

Comme le montre la figure (b), les deux forces qui agissent sur le rotor lorsqu'il tourne sont les suivantes :

La force centrifuge agissant radialement vers l'extérieur à travers CG = $m \omega^2 (y+e)$

Force résistante à la déviation (ou force de rappel) = $s \cdot y$ Pour l'équilibre,

force centrifuge = force de rappel , c'est à dire : $m\omega^2(y + e) = s \cdot y$

Or : $m \cdot \omega^2 \cdot y + m \cdot \omega^2 \cdot e = s \cdot y$

Donc : $y(s - m \cdot \omega^2) = m \cdot \omega^2 \cdot e$

et enfin : $y = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot e}{s - m \cdot \omega^2} = \frac{\omega^2 \cdot e}{\frac{s}{m} - \omega^2}$

Ainsi, lorsque $\omega = \omega_n$, la déviation y est infiniment grande (et il y a résonance) et la vitesse $\omega m \omega^2 (y + e) = s \cdot y + m \cdot \omega^2 \cdot y + m \cdot \omega^2 \cdot e = s \cdot y + y (s - m \cdot \omega^2) = m \cdot \omega^2 \cdot e$ $y = \frac{m \cdot \omega^2 \cdot e}{s - m \cdot \omega^2} = \frac{\omega^2 \cdot e}{\frac{s}{m} - \omega^2}$ est la vitesse critique.

Vitesse critique ou pulsation critique : $\omega_{cr} = \omega_n = \sqrt{\frac{s}{m}} = \sqrt{\frac{g}{\delta}}$

alors : $[\delta = \frac{m \cdot g}{s}]$

Si N_{cr} est la vitesse critique de tourbillonnement en tr/min, alors

$$\omega_{cr} = 2\pi N_{cr} = \sqrt{\frac{g}{\delta}}$$

$$N_{cr} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta}} = \frac{0.4985}{\sqrt{\delta}} \text{ r.p.s}$$

Où δ = Déformation statique de l'arbre. Par suite, la vitesse critique de l'arbre en tours/minute est égale à la fréquence propre des vibrations transversales en Hz.[4]

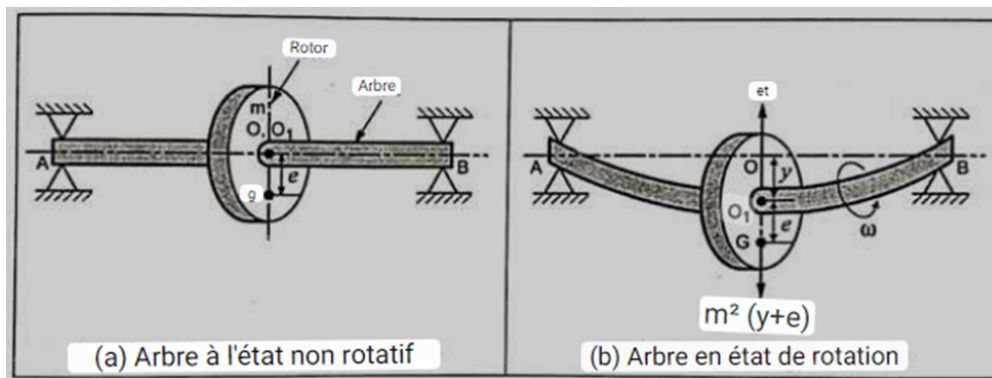


FIGURE I.5 – l'état de l'arbre [5]

I.3 Les paliers

Les paliers sont un élément essentiel de nombreuses machines, appareils et systèmes mécaniques. Ils sont utilisés pour supporter le poids des pièces en mouvement et réduire le frottement entre elles. Ces paliers contribuent à maintenir l'orientation correcte des composants en rotation, les protègent contre l'usure et les endommagements et augmentent leur efficacité et leur fiabilité dans leur ensemble.

Il existe plusieurs types de palier, chacun étant conçu pour répondre à des exigences

d'application spécifiques. Parmi les types les plus courants, on trouve les roulements à billes, les roulements à rouleaux, les paliers lisses (paliers hydrodynamiques et paliers hydrostatiques) et les butées.

Les roulements à billes sont largement utilisés dans les applications qui nécessitent un faible frottement, une vitesse élevée et une rotation précise. Les roulements à rouleaux, quant à eux, sont utilisés dans les applications lourdes qui nécessitent une capacité de charge accrue.

Les paliers lisses sont souvent cylindriques, ce qui les rend moins coûteux et plus faciles à entretenir, mais ils peuvent avoir une capacité de charge inférieure à celle des autres types de paliers. Les butées sont conçues pour supporter des charges axiales, permettant aux composants de tourner autour d'un axe.



FIGURE I.6 – Différents types de paliers [6]

I.3.1 Les inconvénients des paliers

Bien que les paliers soient fondamentaux dans le monde de la mécanique, ils présentent certaines limites et certains inconvénients. Voici certains des inconvénients les plus notables

L'usure :

Les roulements sont soumis à divers degrés de contrainte et d'usure au fil du temps, ce qui peut entraîner leur détérioration ou leur défaillance. Une lubrification insuffisante, une chaleur ou une charge excessive et la corrosion peuvent provoquer ceci

Bruit et vibrations :

Les roulements peuvent produire des bruits et des vibrations en raison de cycles de charge, d'un mauvais alignement ou d'un déséquilibre. Cela peut entraîner une gêne, une réduction de l'efficacité et l'endommagement d'autres pièces de la machine.

Coût et entretien :

Les roulements peuvent être coûteux et nécessitent un entretien régulier pour garantir leur bon fonctionnement. Le remplacement des roulements usés et l'entretien peuvent ajouter des coûts supplémentaires au fonctionnement de l'équipement.

Compatibilité et sélection :

Le choix du bon roulement pour une application peut être un processus complexe qui implique des facteurs tels que la charge, la vitesse, la température et les conditions environnementales. Le choix d'un mauvais roulement ou son installation incorrecte peut entraîner des défaillances du roulement.

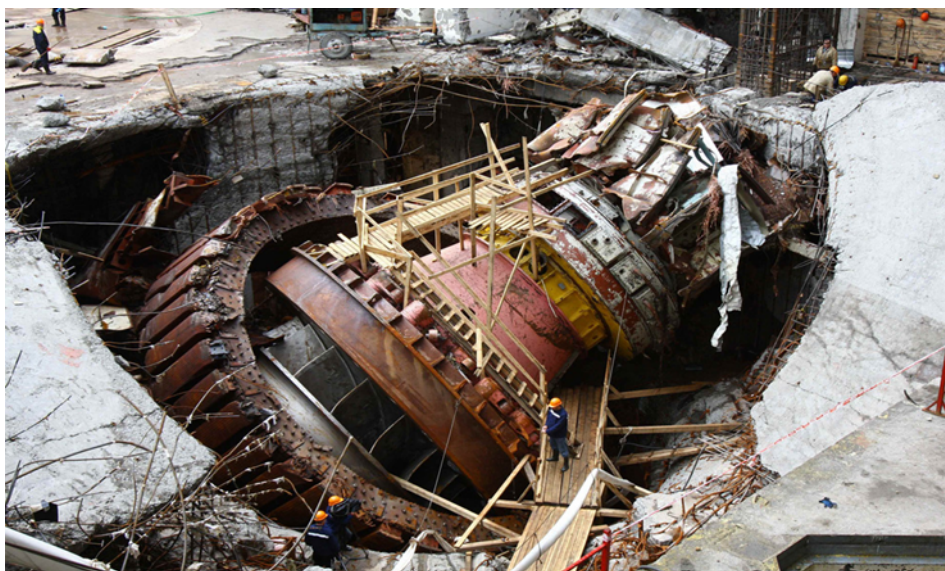


FIGURE I.7 – Défaillance d'une turbine hydroélectrique de 640 MW [7]

I.3.2 Types de paliers principaux dans l'industrie

Les roulements :

Les roulements (figure I.8) bénéficient d'une très faible excentricité mais ils souffrent d'un très faible amortissement. Ceci les rend vulnérable au phénomène de résonance, c'est-à-dire le passage par les vitesses critiques.[8]



FIGURE I.8 – Roulement a billes [8]

Paliers a fluide :

On distingue :

Dans les paliers lisses, une fine couche de lubrifiant sépare l'arbre du coussinet. Cette catégorie de paliers se divise en deux types distincts : les paliers hydrodynamiques et les paliers hydrostatiques

— **I. Les paliers hydrodynamiques** Les paliers hydrodynamiques génèrent leur propre force de sustentation par la rotation de l'arbre (figure I.9). Ils ont une simple structure, et ne nécessitent aucune installation externe pour assurer leur fonctionnement. Leur utilisation industrielle est fréquente. Cependant, ils souffrent de plusieurs problèmes :

- Le problème majeur des paliers hydrodynamiques est le contact métal-métal au démarrage et à l'arrêt.
- L'apport de chaleur au sein du fluide de lubrification qui influe les caractéristiques de ce dernier, notamment la viscosité.
- Ils deviennent inutilisables pour des installations qui tournent à faible vitesse.

- Ils peuvent provoquer l'instabilité des systèmes dans lesquels ils sont installés, à cause des vitesses super-critiques causées par les termes de couplage de leurs rigidités équivalentes.[8]

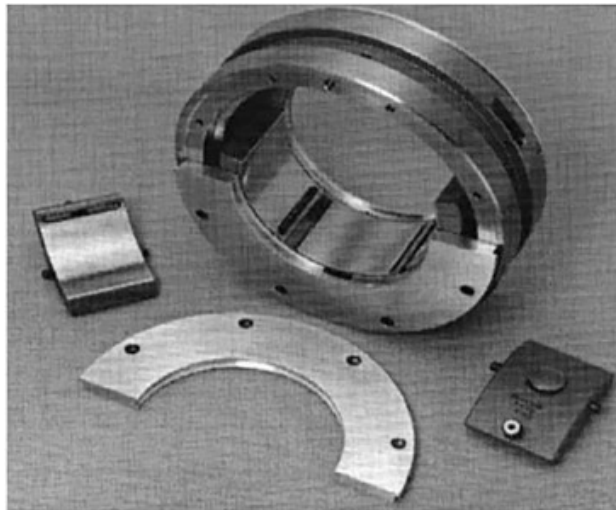


FIGURE I.9 – Palier hydrodynamique[9]

— **II. Les paliers hydrostatiques** :Les forces générées par les paliers hydrostatiques sont indépendantes des vitesses de rotation de l'arbre qu'ils supportent. Cela est dû au fait que la charge portante de ces paliers est assurée par une pression fournie par un système externe.Ils peuvent supporter des installations qui tournent à de très faibles vitesses même avec une très grande charge.

L'intérêt aux paliers hydrostatiques à beaucoup augmenté grâce aux possibilités de contrôle de vibration qu'ils offrent [8] (figure I.10) .

Les paliers hydrostatiques offrent plusieurs avantages par rapport aux autres types de paliers, tels qu'une grande rigidité, un faible frottement et la capacité de supporter de lourdes charges. Ils permettent également un excellent contrôle de la position et du mouvement de l'élément rotatif, ce qui les rend idéaux pour les applications nécessitant une grande précision.

ils sont souvent utilisés en combinaison avec d'autres types de paliers, tels que les paliers à éléments roulants ou les paliers hydrodynamiques, afin d'obtenir la meilleure combinaison de capacité de charge, de rigidité et de précision.

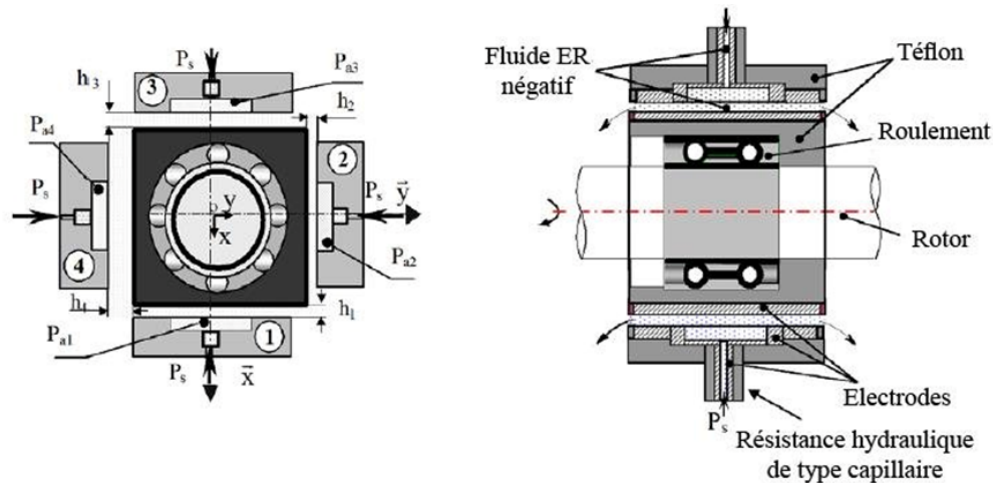


FIGURE I.10 – Palier à quatre patins hydrostatiques alimenté par un fluide électrorhéologique négatif[10]

Autres types de paliers :

- **Paliers lisses** : également connus sous le nom de paliers à glissement, utilisent un mouvement de glissement pour réduire le frottement entre deux surfaces. Ils sont couramment utilisés dans les applications où un faible frottement et un faible niveau de bruit sont importants, comme dans les moteurs électriques.
- **Paliers de butée** : sont conçues pour supporter des charges axiales et sont souvent utilisées dans des applications telles que les transmissions automobiles et les machines industrielles. Il existe plusieurs types de butées, notamment les butées à billes et les butées à rouleaux.
- **Roulements magnétiques** : utilisent des champs magnétiques pour soutenir les arbres en rotation, éliminant ainsi le besoin de paliers mécaniques traditionnels. Ils sont couramment utilisés dans les applications à grande vitesse, telles que les turbines et les compresseurs.

I.4 L'étude des paliers hydrostatiques

Celui-ci constitué de deux surfaces, une surface lisse et une surface qui comporte un ou plusieurs alvéoles La séparation des surfaces est faite par un fluide sous pression introduit par un système extérieur (une pompe), ce qui permet de supporter une charge et d'annuler tout contact métal-métal.[11] (figure I.11)

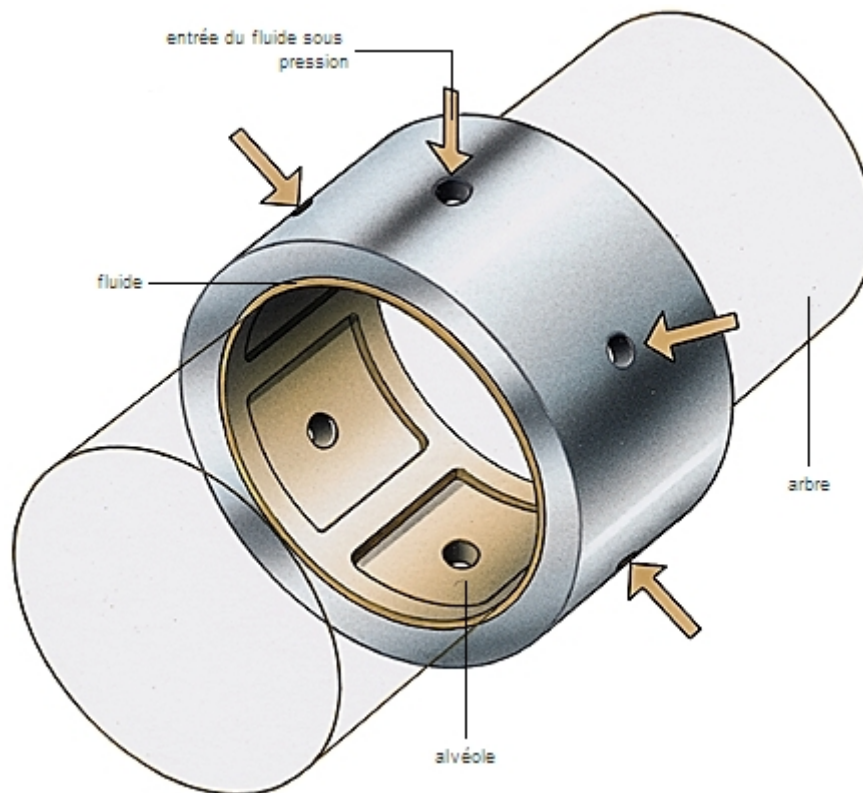


FIGURE I.11 – Palier hydrostatique (Système de lubrification) [11]

I.4.1 Palier hydrostatique et l'amortissement

Un film fluide amortisseur, connu sous le nom de "Squeeze film damper", est intégré à un ou plusieurs paliers de turbomachine dans le but de dissiper l'énergie en écrasant un film fluide, contribuant ainsi à réduire les vibrations.

Ce type de dispositif est composé d'un film fluide inséré entre la bague extérieure du roulement et son logement. Pour éviter la rotation de la bague intérieure du palier, deux approches sont utilisées : l'utilisation de broches libres entre les deux bagues ou l'utilisation d'une cage écureuil qui relie la bague extérieure du palier au stator. Dans le premier cas, le palier n'est pas centré dans son logement, tandis que dans le deuxième cas, une mécanique élastique assure le centrage. L'arbre est maintenu en rotation par le roulement, et le mouvement du palier dans son logement se limite à une orbite sans rotation, ce qui induit un effet d'écrasement du film fluide et crée un amortissement.

Ainsi, le film fluide amortisseur a pour fonction de dissiper l'énergie en comprimant le film fluide, contribuant ainsi à réduire les vibrations dans les paliers de turbomachine [9] (figure I.12).

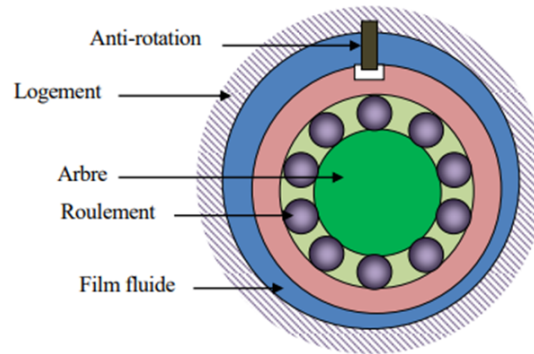


FIGURE I.12 – Schéma d'un film fluide amortisseur SFD.[9]

I.4.2 La lubrification hydrostatique a patin

Le système hydrostatique à patin repose sur un principe simple qui est la conception modulaire. Chaque patin hydrostatique forme un module qui peut être combiné avec d'autres patins pour construire un palier hydrostatique complet. Le nombre des patins peut varier : trois, quatre ou plus.

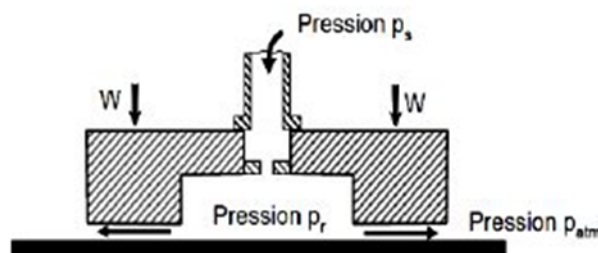


FIGURE I.13 – Schéma de principe d'un patin hydrostatique [11]

L'avantage des paliers hydrostatiques devant les paliers hydrodynamiques est qu'il est possible de créer le film fluide à l'arrêt dans les paliers hydrostatiques. Le principe est d'injecter le lubrifiant sous pression à l'aide d'une pompe dans des cavités où il crée une pression qui soulève la charge ; il s'échappe ensuite par les rainures à pression atmosphérique (figure I.13) ..

L'épaisseur du film se règle automatiquement en fonction de la pression et de la charge appliquées. Il est nécessaire de placer des résistances hydrauliques dans les tuyaux amenant le fluide aux patins afin de contrôler la pression de l'alimentation.

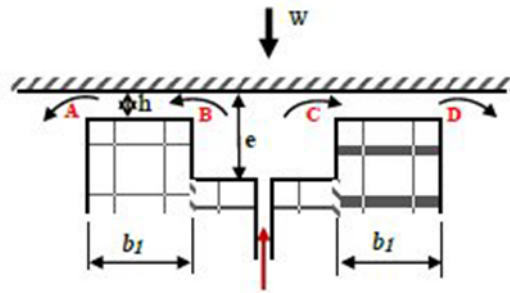


FIGURE I.14 – Schématisation d'un patin hydrostatique [11]

La (figure I.14) montre deux régions dans un patin hydrostatique. Une zone représentée par les portées (AB) et (CD) de largeur (b_1) où l'épaisseur (h) du film lubrifiant est mince. La zone (BC) constituée par la cavité où l'épaisseur du film lubrifiant (e) est grande : $e/h > 20$; dans cette région, la pression est supposée être constante : $p = p_a$; cette hypothèse est très souvent vérifiée expérimentalement. [11]

I.5 Les Milieux poreux

Un milieu poreux est un solide contenant des espaces vides (pores), reliés ou non, dispersés de manière régulière ou aléatoire. non connectés, dispersés en son sein de manière régulière ou aléatoire. Ces pores peuvent contenir une variété de fluides tels que l'air, l'eau, l'huile, etc. Si les pores représentent une certaine partie du volume global, un réseau complexe peut se former, capable de transporter des fluides. (figure I.15)

On peut citer de nombreux exemples où les milieux poreux jouent un rôle important ou lorsque la technologie les requiert en tant qu'outil.

- **Dans la science du sol** : Le milieu poreux (le sol) contient et transporte l'eau et les nutriments vers les plantes.

- **En hydrologie** : Le milieu poreux est une couche porteuse d'eau et une couche d'étanchéité.

- **En génie chimique** : Le milieu poreux est utilisé comme filtre ou lit catalytique.

- **En génie pétrolier** : Le milieu poreux (roche réservoir) contient du pétrole brut et du gaz naturel. [12]

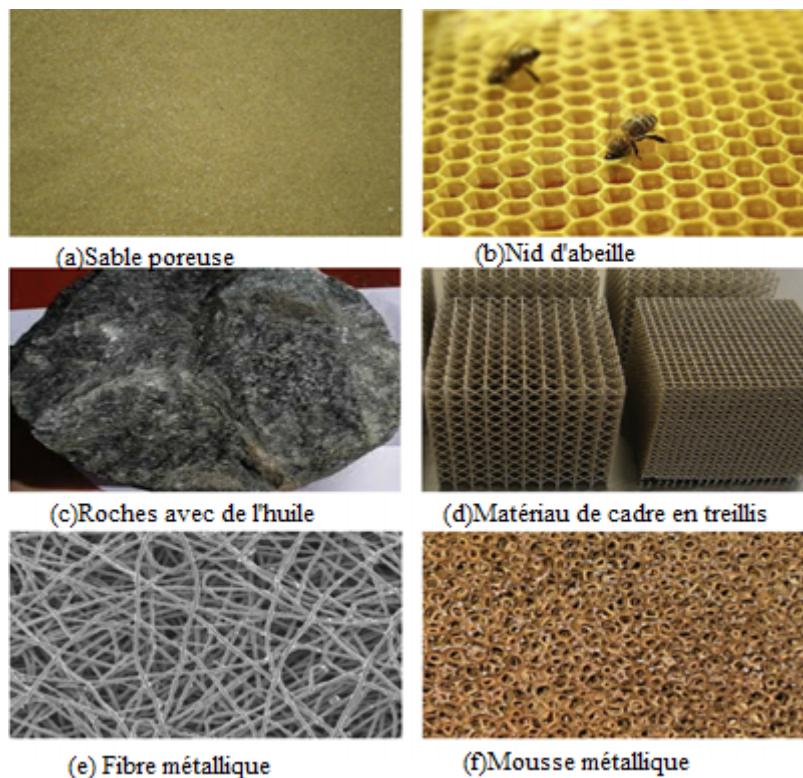


FIGURE I.15 – Quelques exemples des milieux poreux[13]

I.5.1 Propriétés d'un milieu poreux

Les propriétés d'un milieu poreux dépendent de ses caractéristiques physiques et chimiques, ainsi que de la taille, de la forme et de la répartition de ses pores. Voici quelques-unes des principales propriétés des milieux poreux :

La porosité

La porosité est une mesure du volume d'espace vide (ou pores) dans un milieu poreux, exprimée en pourcentage du volume total du matériau. La porosité peut varier de très faible (moins de 1%) à très élevée (plus de 5%) , en fonction du matériau et de la manière dont il est structuré.

Perméabilité

La perméabilité est une mesure de la facilité avec laquelle les fluides ou les gaz peuvent s'écouler à travers un milieu poreux. Elle dépend de la taille, de la forme et de la distribution des pores, ainsi que de la viscosité du fluide ou du gaz. La perméabilité est généralement mesurée en darcies ou en millidarcies.

Tortuosité

La tortuosité est une mesure du temps nécessaire à un fluide ou à un gaz pour traverser un milieu poreux par rapport à ce qu'il serait si le milieu n'était pas présent. Elle dépend de la forme et de la distribution des pores, ainsi que de la tortuosité des voies de passage individuelles.

Surface spécifique

La surface spécifique est une mesure de la surface totale des pores dans une unité de volume d'un milieu poreux. Elle est importante dans les processus chimiques et biologiques, car elle affecte la vitesse des réactions et la quantité de surface disponible pour l'adsorption.

Conductivité électrique :

Certains milieux poreux, tels que les roches et les sols, peuvent conduire l'électricité en raison de la présence de minéraux ou de fluides chargés dans les pores. La conductivité électrique peut être utilisée pour étudier les propriétés de ces matériaux et pour localiser les fluides souterrains et les dépôts minéraux.

Résistance mécanique

La résistance mécanique d'un milieu poreux dépend de la résistance des particules ou des grains individuels, ainsi que de la manière dont ils sont emballés ensemble. Cette propriété est importante dans des applications telles que les matériaux de construction et la géomécanique. Ces propriétés peuvent être influencées par divers facteurs, notamment la composition du matériau, la manière dont il a été formé et les conditions environnementales auxquelles il a été soumis.

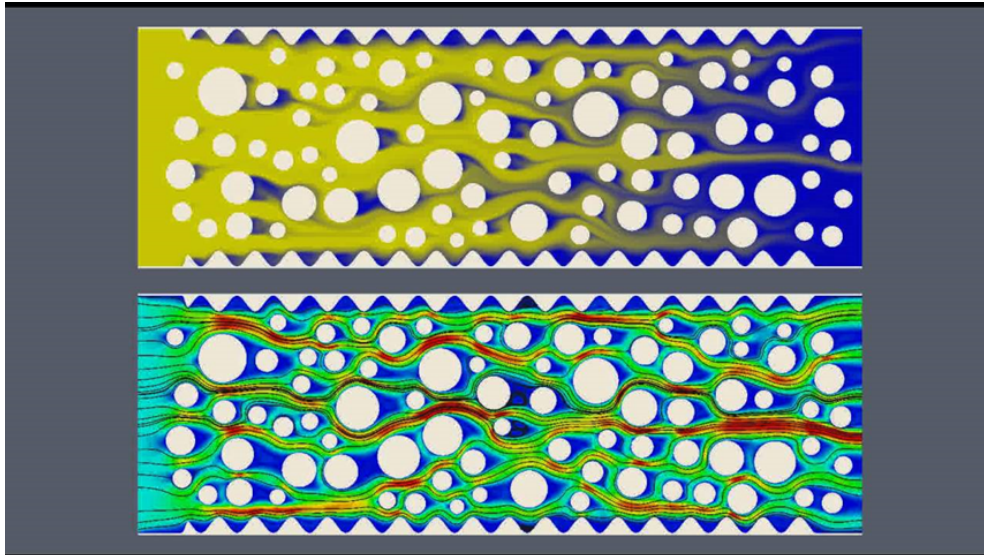


FIGURE I.16 – Simulation d'un écoulement de fluide dans un canal poreux[14]

I.5.2 L'application des milieux poreux dans les roulements

Les milieux poreux peuvent être utilisés dans les roulements pour contrôler la lubrification et réduire le frottement. Les paliers poreux sont généralement constitués d'une matrice de matériau solide avec des pores ou des vides interconnectés, qui sont remplis d'un lubrifiant tel que de l'huile ou de la graisse.

Lorsque le roulement est utilisé, le lubrifiant est aspiré dans les pores par capillarité et forme un film mince entre les surfaces du roulement. Ce film réduit le frottement et l'usure et contribue à dissiper la chaleur générée par les forces de frottement.

Les roulements poreux peuvent présenter plusieurs avantages par rapport aux roulements traditionnels, notamment :

Autolubrification :

Les paliers poreux peuvent fournir une alimentation continue en lubrifiant les surfaces des paliers, sans qu'il soit nécessaire d'utiliser des systèmes de lubrification externes.

Réduction du frottement et de l'usure :

La fine pellicule de lubrifiant fournie par le milieu poreux peut réduire le frottement et l'usure entre les surfaces des roulements, ce qui prolonge la durée de vie des roulements et améliore leurs performances.

Amélioration de la dissipation de la chaleur :

Le milieu poreux peut aider à dissiper la chaleur générée par les forces de frottement, réduisant ainsi le risque de surchauffe et de défaillance.

Capacité de charge accrue :

Les pores interconnectés du milieu poreux peuvent aider à répartir la charge plus uniformément sur la surface du roulement, augmentant ainsi la capacité de charge du roulement

Les paliers poreux peuvent être utilisés dans une large gamme d'applications, notamment les moteurs automobiles, les machines industrielles et les systèmes aérospatiaux. Cependant, leur conception et leurs performances dépendent de plusieurs facteurs, tels que les propriétés du matériau du milieu poreux, le type de lubrifiant utilisé et les conditions de fonctionnement du roulement.

I.5.3 Les paliers à air et les milieux poreux

Les paliers à air à milieu poreux sont un type de palier qui utilise l'air comprimé comme lubrifiant pour supporter une charge. Dans ce cas, le milieu poreux est un matériau comportant de petits pores ou canaux qui permettent à l'air de circuler à travers lui.

Le principe de base des paliers à air à milieu poreux est qu'une fine couche d'air comprimé est générée entre la surface du palier et la charge aussi appelé film (la figure I.17) , ce qui réduit le frottement et permet à la charge de se déplacer plus facilement. Le milieu poreux assure une distribution uniforme de l'air comprimé, ce qui contribue à maintenir l'écart entre la surface du roulement et la charge.

Les coussinets d'air à milieu poreux présentent plusieurs avantages par rapport aux coussinets traditionnels. Ils ont un faible frottement et sont très réactifs aux changements de charge et de vitesse. Ils sont également moins sensibles à l'usure, car il n'y a pas de contact physique entre la surface du palier et la charge. Les applications des coussinets d'air à milieu poreux comprennent l'usinage de précision, la fabrication de semi-conducteurs et la métrologie. Ils sont particulièrement utiles dans les applications où une grande précision et un faible frottement sont essentiels, comme dans la production de

lentilles optiques ou dans la mesure de structures à l'échelle du nanomètre.

Globalement, les paliers à air à milieu poreux offrent une solution unique au problème de la lubrification des paliers et peuvent présenter des avantages significatifs par rapport aux paliers traditionnels dans certaines applications.

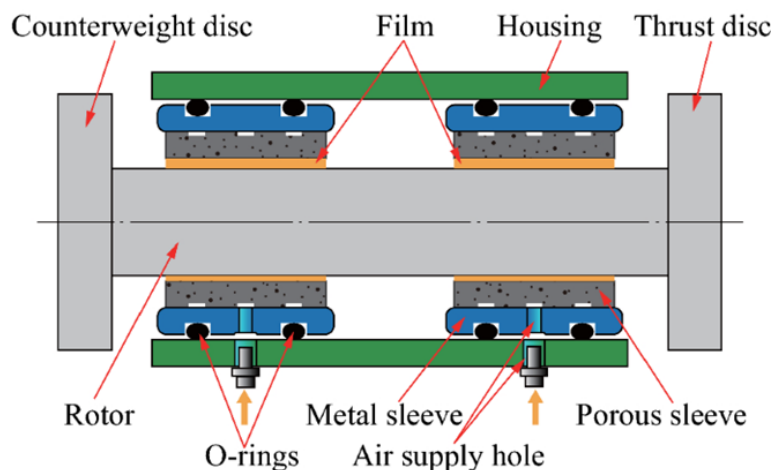


FIGURE I.17 – Les paliers à air avec milieu poreux [15]

I.5.4 Écoulement de l'air à travers un milieu poreux

L'écoulement de l'air dans un milieu poreux est un phénomène complexe qui dépend de plusieurs facteurs, tels que les propriétés du milieu (par exemple, la porosité, la perméabilité et la tortuosité), les caractéristiques de l'air (par exemple, la vitesse, la pression et la température) et les conditions aux limites (par exemple, les configurations d'entrée et de sortie).

Lorsque l'air s'écoule dans un milieu poreux, il rencontre une résistance due aux forces de frottement entre l'air et les parois des pores. Cette résistance se traduit par une chute de pression dans le sens de l'écoulement, qui est influencée par les propriétés du milieu et la vitesse de l'air. Le débit d'air dans un milieu poreux peut être décrit par la loi de Darcy, qui relie le débit volumétrique au gradient de pression et aux propriétés du milieu.

Plus de détails seront exposés dans le chapitre suivant qui sera consacré à la formulation mathématique du problème d'écoulement dans les milieux poreux.



CHAPITRE II

FORMULATION MATHÉMATIQUE

Chapitre II

FORMULATION MATHÉMATIQUE

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons explorer les formules mathématiques essentielles pour calculer la pression dans le palier aérostatiques et déterminer la force de portance générée. Les paliers aérostatiques utilisent un film d'air comprimé pour soutenir la charge et minimiser les frottements entre les surfaces en mouvement. La compréhension de ces formules mathématiques clés est cruciale pour évaluer les performances et la stabilité de ces paliers.

II.2 Hypothèses de travail

Pour simplifier l'analyse des paliers aérostatiques, certaines hypothèses simplificatrices sont souvent faites, telles que :

1. Écoulement laminaire : L'écoulement de l'air est considéré comme laminaire, ce qui simplifie les calculs en évitant de prendre en compte les effets turbulents.
2. Écoulement stationnaire : L'écoulement de l'air est considéré comme stationnaire, ce qui signifie que les propriétés du fluide et les conditions ne varient pas avec le temps.
3. Écoulement isotherme : pas d'échange de chaleur ou d'énergie
4. Le fluide est Newtonien
5. La viscosité est constante, ceci est justifié par le fait que le fluide injecté est renouvelé par un nouveau fluide en continu.

6. Seul l'écoulement de Poiseuille existe

7. Dans le volume du film mince les paliers aérostatiques reposent sur la création d'un film d'air comprimé pour générer une pression suffisante pour soutenir la charge.

II.3 Écoulement à travers le film mince :

Les paliers aérostatiques reposent sur la création d'un film d'air comprimé pour générer une pression suffisante pour soutenir la charge. Les formules suivantes sont utilisées pour calculer la pression dans les paliers aérostatiques :

Équation de continuité : (écoulement en régime permanent) L'équation de continuité exprime la conservation de la masse d'air à travers le film. Elle stipule que le débit massique d'air entrant dans le palier doit être égal au débit sortant, assurant ainsi la stabilité du film d'air comprimé.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) + \frac{\partial}{\partial t}\rho = 0 \quad (\text{II.1})$$

Equation de Navier-Stokes : L'équation de Navier-Stokes, qui est la version complète de l'équation de conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho(\partial v/\partial t + v \cdot \nabla v) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + f \quad (\text{II.2})$$

- ρ est la densité de l'air,
- t est le temps,
- v est le vecteur vitesse de l'air,
- ∇ : est l'opérateur nabla (gradient),
- P est la pression,
- μ : est la viscosité dynamique de l'air,
- ∇^2 : est l'opérateur laplacien (divergence du gradient),
- f : représente les forces volumiques, telles que la gravité.

Cette équation se compose de plusieurs termes :

1. $(\partial v/\partial t)$: C'est le terme d'accélération, qui représente le changement de vitesse de l'air au fil du temps.

2. $(\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v})$: C'est le terme de convection, qui décrit comment le mouvement du fluide affecte son propre transport. Il indique que le fluide se déplace et transporte son énergie cinétique.

3. $-\nabla p$: C'est le terme de pression, qui représente la variation de pression dans le fluide. Il indique que les variations de pression entraînent des forces qui agissent sur le fluide.

4. $\mu \nabla^2 \mathbf{v}$: C'est le terme de diffusion visqueuse, qui rend compte des effets de la viscosité sur le mouvement du fluide. Il décrit la tendance du fluide à s'écouler le long des gradients de vitesse.

5. f : C'est le terme des forces volumiques, qui inclut des forces externes appliquées sur le fluide, telles que la gravité ou d'autres forces spécifiques à votre système.

Il est important de noter que les équations de Navier-Stokes sont non linéaires et peuvent être difficiles à résoudre de manière analytique dans la plupart des cas. Cependant, des méthodes numériques, peuvent être utilisées pour obtenir des solutions approximatives en discrétisant l'espace et le temps.

En résolvant ces équations, ça nous aide à obtenir des informations sur les caractéristiques de l'écoulement de l'air dans les paliers aérostatiques, telles que les profils de vitesse, les distributions de pression, les zones de recirculation, etc.

Équation de Reynolds : est utilisée pour déterminer le champ de pression dans le film mince qui se situe après la zone poreuse. Cette équation est un cas particulier des équations de Navier-Stokes. Elle est obtenue en simplifiant les gradients de pression dans la direction de l'épaisseur du film mince (ici la direction « y »). Son expression est donnée par

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{h^3}{\mu} \frac{\partial P}{\partial z} \right) = 6U \frac{\partial h}{\partial x} + 12 \frac{\partial h}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

La Force de Portance : notée W est la force générée par la pression dans le palier aérostatique, qui contrebalance la charge appliquée. Pour calculer la force de portance, nous intégrons le champ de pression sur la surface de portance, ce qui est donné par la

formule suivante :

$$W = \iint_{x,y} P(x,y) ds \quad (\text{II.4})$$

Si le champ de pression est constant ou si la surface de portance est petite la charge W peut être calculée par :

$$W = P_m \times s \quad (\text{II.5})$$

La pression moyenne P_m est généralement calculée en prenant la moyenne des pressions dans le film d'air sur la surface portante du palier.

II.4 L'écoulement à travers le milieu poreux

II.4.1 La Porosité :

La porosité est la présence de vides (pores) dans un matériau solide, occupés par des fluides. Elle est déterminée par le rapport entre le volume des espaces vides et le volume total d'un milieu poreux, et sa valeur est comprise entre 0 et 1 (ou, en termes de pourcentage, entre 0 et 100 %) :

$$\varphi = \frac{V_p}{V_T} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

φ : est la porosité,

V_p : le volume des pores,

V_t : le volume total du matériau

II.4.2 La Permeabilité :

La loi de Darcy s'applique aux écoulements visqueux isothermes et donne une relation entre la vitesse de l'écoulement et la différence de pression ΔP du fluide de part et d'autre du l'élément poreux sur une distance Δx

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = \frac{\mu}{\Phi} V \quad (\text{II.7})$$

Où μ est la viscosité de l'air, Φ est La perméabilité, $V = Q_m/A$ est la vitesse de l'air, qui est variable le long de x . Q_m est le débit massique, de l'air dans les sections amont et aval de la résistance. En amont et en aval du milieu poreux, et $A = \pi D^2/4$ est la section de ce milieu. La perméabilité peut également être déterminée théoriquement lorsque la porosité et la forme de la poudre du milieu poreux est sphérique avec des rayons égaux. Selon la règle de Carman-Kozeny, la perméabilité théorique pour des particules sphériques est donnée par :

$$\Phi_{th} = \left(\frac{D_p^2}{180} \right) \left[\frac{\varphi^2}{(1 - \varphi)^2} \right] \quad (\text{II.8})$$

II.4.3 Loi de Forchheimer

En général, le rapport $\frac{\Delta P}{\Delta x}$ dépend d'un terme inertiel, ainsi que du terme visqueux décrit par la loi de Darcy ; plus important encore, il dépend de la vitesse de l'écoulement. Ce comportement est résumé par la loi de Forchheimer (II.8)

$$\frac{\Delta P}{\Delta x} = \frac{\mu V}{\Phi} + c \frac{\rho V^2}{\Phi^{1/2}} \quad (\text{II.9})$$

Où (c) est un coefficient sans dimension, appelé coefficient d'inertie, utilisé pour les milieux poreux. L'équation (II.8) peut être utilisée pour déterminer le coefficient d'inertie (c) à partir de la perméabilité obtenue précédemment et d'une différence de pression P donnée. Perméabilité obtenue précédemment et d'une différence de pression P donnée. La racine carrée de la perméabilité comme dimension caractéristique des milieux poreux, le nombre de Reynolds basé sur la perméabilité peut être défini comme suit :

$$\text{Re}_\Phi = \frac{\rho v^2 \Phi^{1/2}}{\mu} \quad (\text{II.10})$$

En définissant le facteur de frottement sans dimension f_Φ comme suit

$$f_\Phi = \frac{\Delta P}{\Delta x} \frac{\Phi^{1/2}}{\rho v^2} \quad (\text{II.11})$$

Et en substituant (II.10) et (II.9) dans l'expression (II.11), on obtient :

$$c = f_{\Phi} - \frac{1}{\text{Re}_{\Phi}} \quad (\text{II.12})$$

Dans l'équation (II.11) pour un nombre de Reynolds relativement faible nous considéreront que Coefficient d'inertie est négligeable .

II.5 Simulation de l'écoulement du fluide à travers un milieu poreux

Les méthodes numériques sont un outil puissant et largement utilisé pour résoudre des problèmes d'écoulement de fluide complexes dans les paliers hydrostatiques. Elles consistent à discrétiser l'espace en une grille de points, puis à appliquer les équations fondamentales de la dynamique des fluides sur ces points.

Dans CFX la méthode des volumes finis permet de discrétiser les termes de flux et les termes source des équations de conservation, et de les évaluer sur les faces des cellules du maillage. Les équations sont ensuite résolues de manière itérative pour obtenir les valeurs de pression, de vitesse et de température dans chaque cellule du maillage.

Cette méthode offre des avantages tels que la conservation globale des quantités physiques, la flexibilité pour gérer des géométries complexes et la capacité à traiter des conditions aux limites variées.

La technique comprend deux étapes importantes :

Le maillage : il consiste à diviser le domaine en plusieurs intervalles réguliers appelés volumes de contrôle.

La discrétisation : lors de cette étape les équations sont intégrées dans les volumes de contrôle.

II.5.1 Etude d'un problème de diffusion à une dimension :

Considérons un problème de transport de la variable α par diffusion.

$$\text{div}(\Gamma \text{grad} \alpha) + S_\alpha = 0 \quad (\text{II.13})$$

La clé de la méthode des volumes finis réside dans l'application du théorème de la divergence ou théorème d'Ostrogradski, qui permet de changer une intégrale de volume en intégrale de surface.

$$\int_{cv} \text{div}(\Gamma \text{grad} \alpha) dv + \int_{cv} S_\alpha dv = \int_A n(\Gamma \text{grad} \alpha) dA + \int_{cv} S_\alpha dv = 0 \quad (\text{II.14})$$

A : surface enveloppant le volume de contrôle

n : vecteur unitaire.

L'Equation (II.12) en 1D prend la forme suivante :

$$\frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\alpha}{dx} \right) + S = 0 \quad (\text{II.15})$$

(Γ) : Coefficient de diffusion.

(S) : Terme source.

Maillage :

Dans le cas d'une étude à une dimension de l'espace, le maillage est constitué d'une droite subdivisée en un nombre fini de segments réguliers. Ceux-ci constituent les volumes de contrôle dans le cas unidimensionnel. Ci-dessous, nous donnons l'exemple d'un maillage comprenant cinq volumes de contrôle qu'on peut adopter pour la discrétisation de l'équation

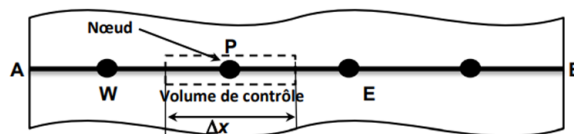


FIGURE II.1 – Schématisation du volume de contrôle 1D

Discrétisation :

L'intégration de l'équation (II.15) sur le volume de contrôle de centre P donne :

$$\int_{\Delta v} \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\alpha}{dx} \right) dv + \int_{\Delta v} s dv = \left(\Gamma \frac{d\alpha}{dx} \right)_e - \left(\Gamma \frac{d\alpha}{dx} \right)_w + \bar{s} \Delta V = 0$$

\bar{s} : est la valeur moyenne de la source et dV le volume de contrôle correspondant. Signalons que dans ce cas, une dimension, $V=X$

Dans le cas général où le coefficient de diffusivité n'est pas constant ses valeurs sur les facettes "w" et "e" du volume de contrôle CV seront exprimées en fonction des valeurs aux points nodaux P, W et E par :

$$\Gamma_E = \frac{\Gamma_E - \Gamma_P}{2} \quad \Gamma_W = \frac{\Gamma_P - \Gamma_W}{2}$$

II.5.2 Problème de diffusion à trois dimensions Dans le cas d'un problème 3D :

En 3D, chaque nœud P a six nœuds voisins notés W, E, S, N, B et T, et les six facettes du volume de contrôle sont notées w, e, s, n, b et t respectivement.

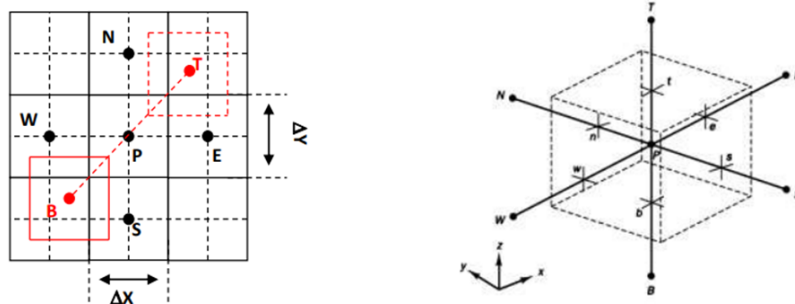


FIGURE II.2 – Représentation schématique du volume de contrôle 3D

Avec :

$$a_W = \frac{\Gamma_W}{\Delta X} \Delta Y \Delta Z \quad a_E = \frac{\Gamma_E}{\Delta X} \Delta Y \Delta Z$$

$$a_N = \frac{\Gamma_N}{\Delta Y} \Delta X \Delta Z \quad a_S = \frac{\Gamma_S}{\Delta Y} \Delta X \Delta Z$$

$$a_B = \frac{\Gamma_B}{\Delta Z} \Delta X \Delta Y \quad a_T = \frac{\Gamma_T}{\Delta Z} \Delta X \Delta Y$$

$$a_P = a_W + a_E + a_N + a_S + a_B + a_T + S_P$$



CHAPITRE III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Chapitre III

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons exposer les différents résultats obtenus en commençant par la validation avec des travaux expérimentaux de la littérature, ensuite la justification de l'adoption du modèle simplifié et en fin l'étude de l'influence de la perméabilité sur le comportement du patin poreux.

III.2 Model théorique d'étude

Notre point de départ pour étudier les paliers aérostatiques est l'article intitulé "Study on Static Characteristics of Aerostatic Bearing Based on Porous SiC Ceramic Membranes" par Xin Xiao et al [16]. Dans cet article Xin étudie le patin aérostatique montré sur (la figure III.1), à la fois expérimentalement et théoriquement avec des simulations 3D. L'étude est centrée sur l'influence de la perméabilité sur la charge portante et la raideur équivalente.

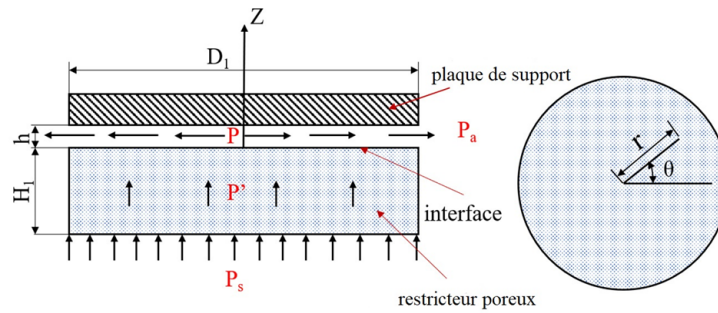


FIGURE III.1 – Modèle théorique de Xin Xiao [16]

III.3 La géométrie

La structure principale du palier aérostatique comprend le corps du palier et la résistance poreuse. Cette dernière est en céramique poreuse SiC (carbure de silicium). Le principe d'un palier aérostatique poreux est que l'air comprimé externe pénètre dans la cavité à haute pression et passe ensuite à travers la résistance poreuse, formant un espace de film gazeux entre cette dernière et la surface du grain mobile, fournissant ainsi une capacité de charge portante et une certaine rigidité et amortissement pour le rotor supporté (figure III.2). Les dimensions du patin sont représentés dans (le tableau III.1)

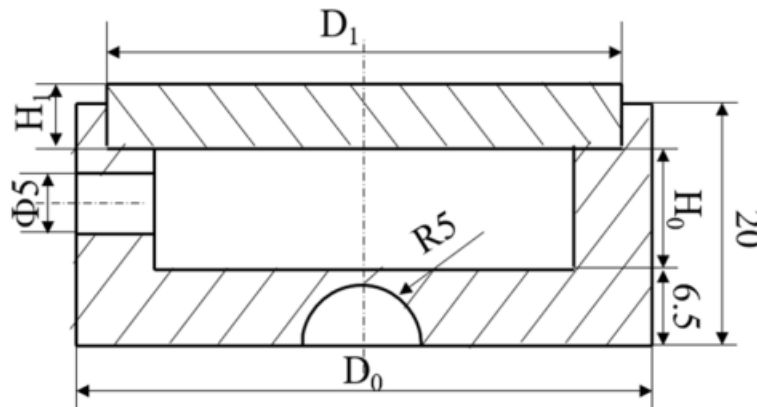


FIGURE III.2 – Modèle de Xin Xiao [16]

III.4 Les conditions aux limites et hypothèses

Le gaz est supposé idéal et l'écoulement dans la région poreuse, dans la cavité d'entrée et dans film de gaz est laminaire. Le fluide est aussi supposé Newtonien et l'écoulement sans apport de chaleur. Tandis que l'effet de la rugosité de la paroi sur l'écoulement du

gaz est ignoré. La pression d'entrée et la pression de sortie sont fixées à 0,5 MPa, et 0 MPa, respectivement. Les deux paramètres les plus importants qui définissent un milieu poreux sont la perméabilité et la résistance inertielle. Dans notre étude ainsi que celle de référence seule la perméabilité est considérée. A cause du faible gradient de la pression de par et d'autre du patin les effets inertiels n'ont pas été pris en considération.

Paramétrés	Valeurs
Diamètre du Patin (D0)(mm)	48
Épaisseur de la cavité de gaz (H0)(mm)	10
Diamètre moyen poreux (D1)(mm)	43
Épaisseur du milieu poreux (H1)(mm)	5
Épaisseur du film gazeux (h)(μm)	4 ~ 26
Pression d'alimentation du gaz (Ps)(MPa)	0.5
Température environnementale (T)(K)	298
Pression environnementale (P ₀)(MPa)	0.1
Viscosité aérodynamique (μ)(N·s/m ²)	1.7894×10^{-5}
Coefficient de perméabilité du milieu poreux (Φ)(m ²)	2.78×10^{-13}

TABLE III.1 – Tableau de paramétrés [16]

III.4.1 Le modèle complet et le modèle simplifié

Le modèle utilisé par Xin Xiao [16] contient une entrée cylindrique qui donne accès à la chambre juste au-dessous de la résistance poreuse (Figure III.3). Après l'utilisation de cette géométrie nous avons constaté qu'elle peut être simplifiée en éliminant toute la partie inférieure non poreuse comme il est représenté à la (figure III.4).

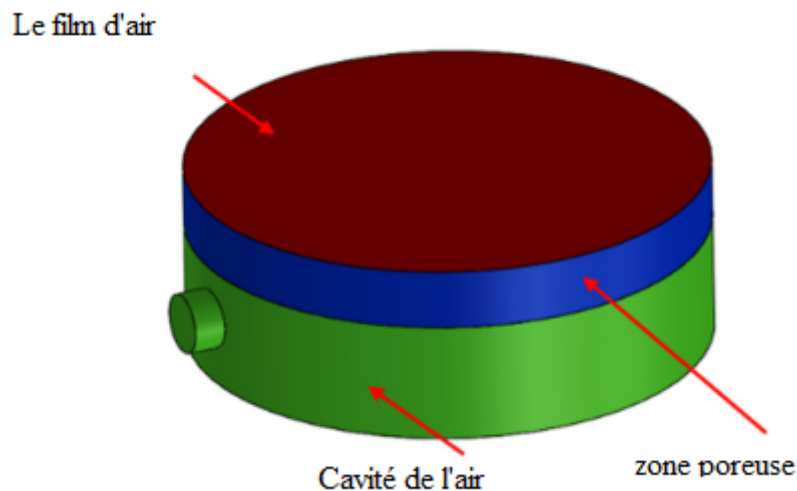


FIGURE III.3 – Modele de Xin Xiao [16]

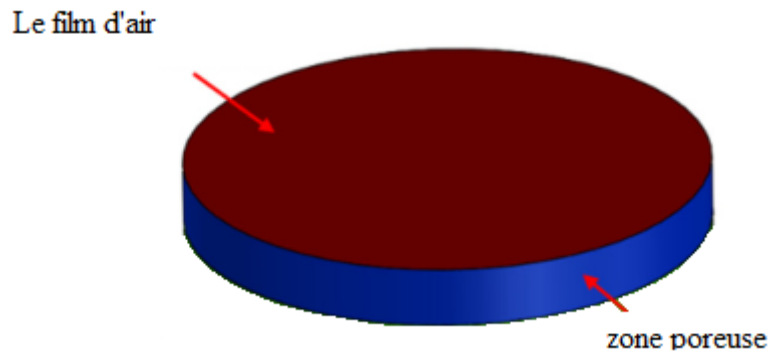


FIGURE III.4 – Modèle Simplifié

III.4.2 Le maillage

A cause de la courbure de la géométrie nous l'avons subdivisée pour éviter les éléments trop déformés dans la région proche du centre. Le maillage adopté est initialement de type structuré, mais la zone qui contient l'entrée dans le modèle complet, présente des courbures qui rendent la tâche impossible. Un raffinement avec des éléments tétraédriques non structurés à été adopté dans cette région (figure III.5)

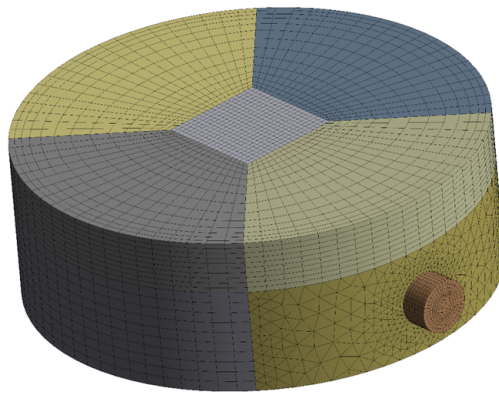


FIGURE III.5 – Le maillage de la géométrie complète Xin xiao

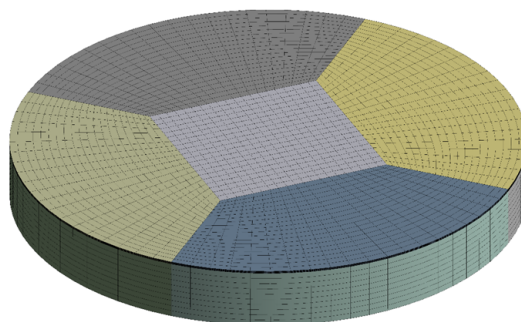


FIGURE III.6 – Le maillage de la géométrie Simplifiée

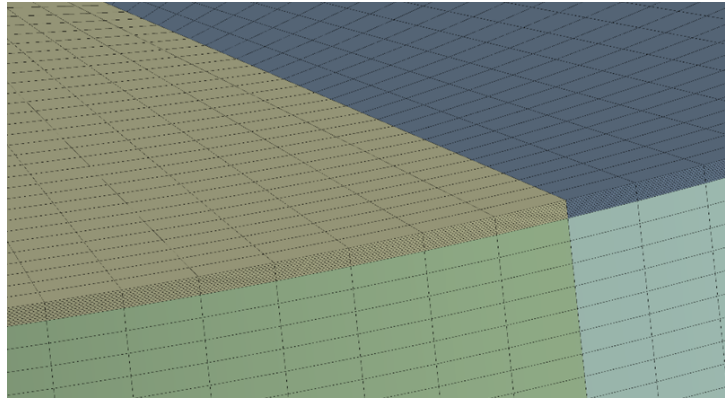


FIGURE III.7 – Maillage raffiné du film d’air

Un soin spécial a été accordé au film mince qui a été maillé avec 10 éléments rien que dans la direction de l’épaisseur pour bien capter les phénomènes visqueux.

III.5 Simulation et analyses

III.5.1 Justification de l’utilisation du modèle simplifié

Selon le tableau (III.1) il est bien clair que dans le maillage de la géométrie simplifié les nombres des nœuds et des éléments ont été réduits de manière très importante par rapport à celle de la géométrie complète, ce qui signifie une diminution considérable du temps de calcul.

D’une autre part la qualité elle-même du maillage est amélioré passant de 0.14451 vers $8.6168e^{-2}$ car selon le critère dit "Skewness" dans “ANSYS MESHING” qui signifie écrasement ou déformation plus la valeur est proche du zéro mieux plus le maillage est de bonne qualité

	Modèle Xin Xiao	Modèle simplifier
Nombre des nœuds	77618	44902
Nombre des éléments	90 475	40 000
Moyenne qualité « Skewness »	0.14451	$8.6168e^{-2}$
Max qualité « Skewness »	0.82478	0.5

TABLE III.2 – Tableau de Statistiques sur le maillage des deux géométries

III.5.2 Comparaison du modèle complet et du modèle simplifié

Les contours de la figure III.8 représentent une vue planaire de la variation du champ de pression à travers de la géométrie. Dans la cavité d'entrée d'air du modèle complet on constate qu'il n'y a aucun changement de pression, ce qui veut dire qu'elle ne joue le rôle que d'un distributeur de pour homogénéiser la pression à l'entrée de la résistance poreuse.

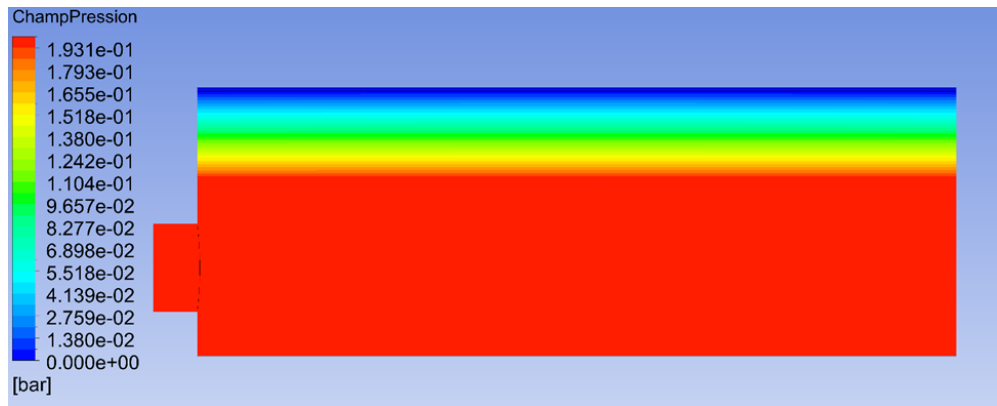


FIGURE III.8 – Champ de la pression dans le modèle de Xin Xiao

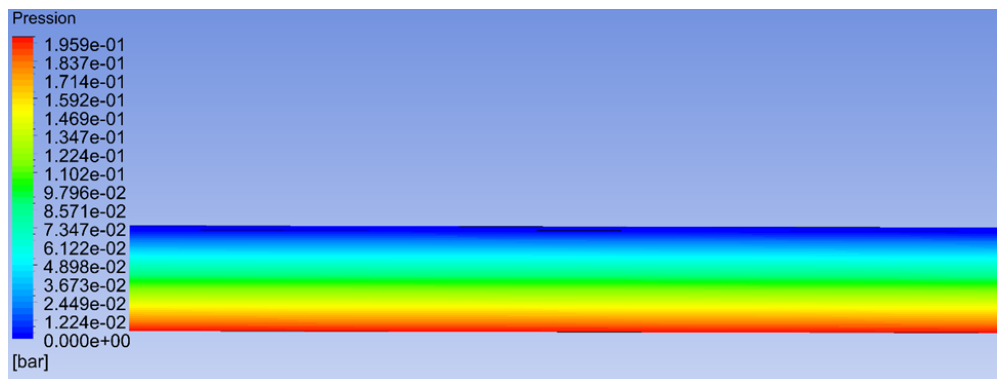


FIGURE III.9 – Champ de la pression dans le modèle simplifié

Ce constat nous a motivé pour supprimer la cavité entièrement du modèle et d'appliquer la pression d'entrée sur le bas de la résistance poreuse. La (figure III.9) montre que notre approche est bien fondée puisque le champ de pression à travers le système reste identique.

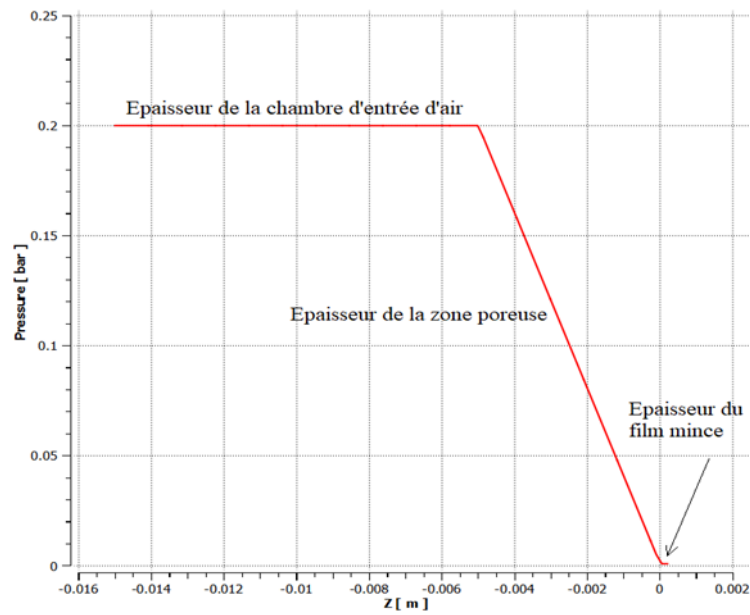


FIGURE III.10 – Variation de la pression le long de l'épaisseur le modèle de Xin Xiao

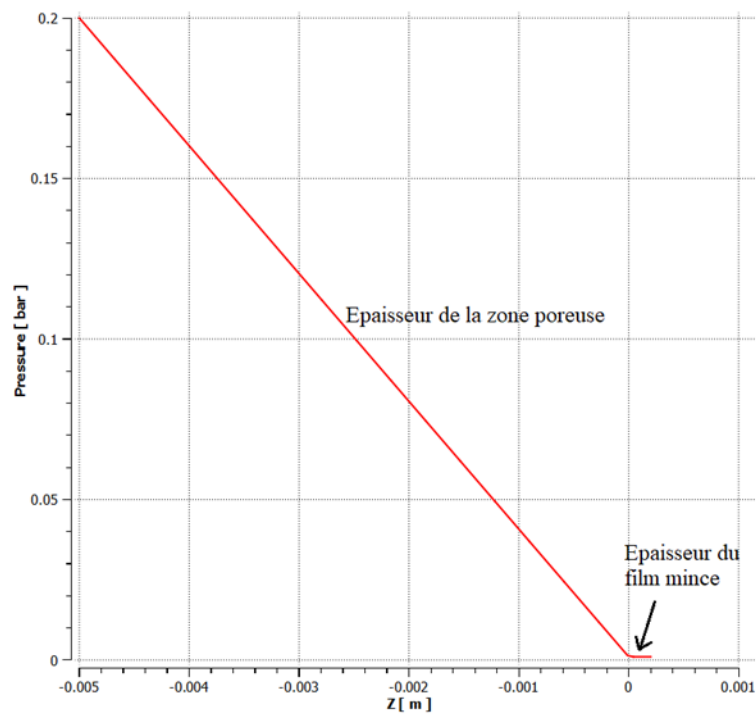


FIGURE III.11 – Variation de la pression le long de l'épaisseur du modèle simplifié

Les courbes des figures III.10 et III.11 représentent la variation de la pression le long de l'épaisseur des deux patins : du modèle complet ainsi que celle du modèle réduit ou simplifié. Elles confirment notre conclusion que la cavité n'affecte pas les résultats, et son élimination ne nous fait que gagner en ressources de calcul.

III.5.3 La Validation du modèle numérique

Le modèle adopté dans notre étude est validé sur la base des résultats expérimentaux de Xin Xiao ainsi que les calculs théoriques par la loi de Darcy pour $h=5\ \mu\text{m}$. En effet, la variation du débit volumique à la sortie est étudiée en fonction de la différence de pression de part et d'autre du patin aérostatique. Les résultats sont décrits sur le tableau et la figure suivants :

ΔP	Débit		
	Notre Étude	Référence [Xin]	Théorie
2.00E+04	9.31E-05	8.63E-05	9.02E-05
3.00E+04	1.40E-04	1.33E-04	1.35E-04
4.00E+04	1.82E-04	1.86E-04	1.80E-04
5.00E+04	2.27E-04	2.33E-04	2.25E-04

TABLE III.3 – Tableau de débit en fonction de la différence de pression

Un bon accord entre les trois résultats peut être constaté sur la figure III.12. D'autres résultats présentés dans la suite vont confirmer davantage la validité du modèle adopté par rapport aux résultats expérimentaux de Xin Xiao.

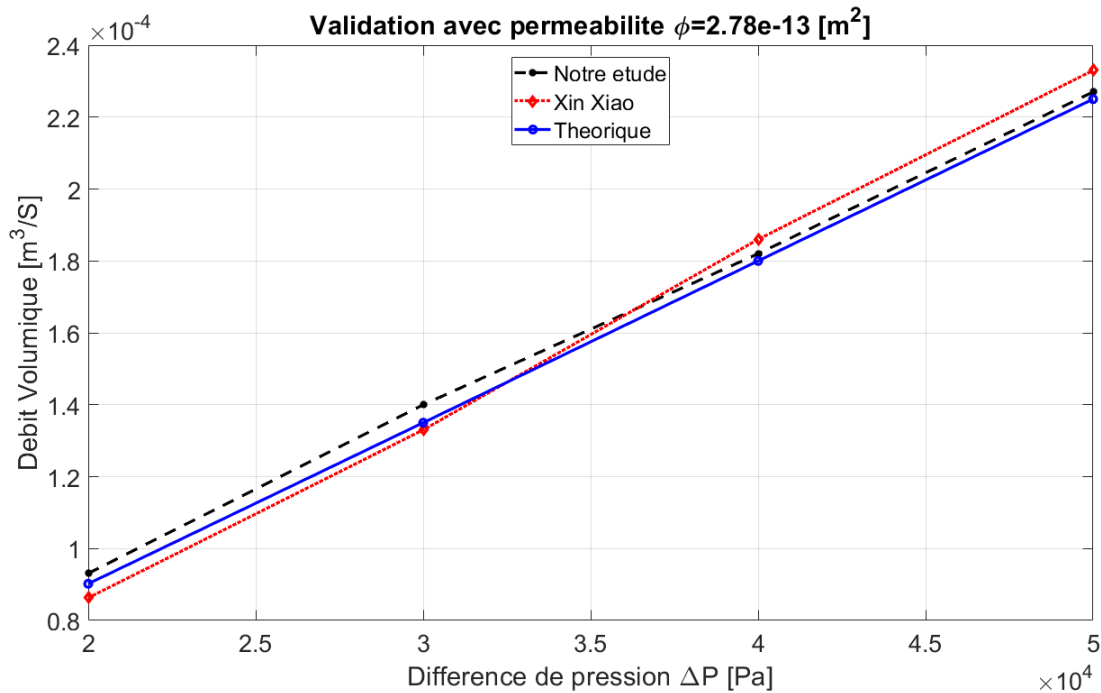


FIGURE III.12 – Débit en fonction de la différence de pression

III.5.4 Influence de l'épaisseur du film sur la charge portante

Le premier paramètre étudié dans ce mémoire est l'épaisseur du film mince du gaz. Ce dernier est varié dans l'intervalle $[5\mu m, 25\mu m]$. A chaque valeur de l'épaisseur (5 valeurs) la simulation est effectuée sous Ansys-CFX pour calculer le champ de pression à travers le patin, ensuite ce champ est intégré en utilisant Ansys-CFD-Post sur la face qui représente le grain mobile (la face supérieure) pour obtenir la force ou la charge portante. Les résultats obtenus sont représentés sur (la figure III.13). Premièrement, on remarque encore une fois le bon accord entre nos résultats et ceux de référence. Deuxièmement on remarque que malgré que le système soit aérostatique avec seulement 3Bars de pression d'alimentation; le patin relativement petit (diamètre de 48mm) arrive à supporter une charge qui dépasse les 400N. La dernière remarque est liée à relation entre l'épaisseur du film d'air et la charge portante. On note que la charge est inversement proportionnelle à l'épaisseur du film, ce qui est conforme à la théorie de la lubrification largement connue.

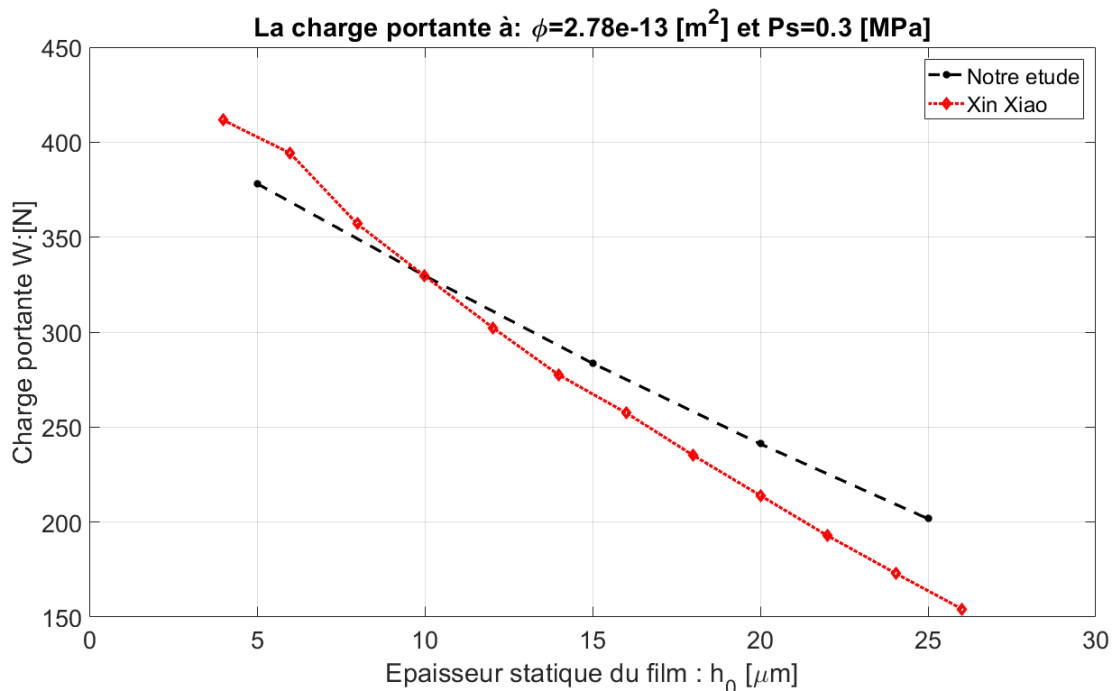


FIGURE III.13 – Charge portante en fonction de l'épaisseur du film

III.5.5 Influence de l'épaisseur du film sur la raideur équivalente

En pratique les paliers aérostatiques (Hydrostatiques aussi) sont étudiés dans leur forme la plus complexe (fluide,résistance, film...) pour en déduire un système équivalent

bien plus simple, qui est composé de masse, de ressort et d'un amortisseur. Les paramètres dynamiques de ce système équivalents qui sont la raideur et l'amortissement sont calculés en utilisant la théorie de perturbation. Le principe est simple, la position verticale du grain mobile (égale à l'épaisseur du film d'air) est perturbée autour de la position de l'équilibre statique. Ceci varie la valeur de la charge portante générée. La perturbation étant relativement petite (ne dépasse pas 20 %' de l'épaisseur du film) la variation de la charge en fonction du déplacement est donc supposée linéaire et la constante de raideur est donnée par :

$$K_{eq} = \frac{W_2 - W_0}{h_2 - h_0}$$

Le même principe est appliqué entre la charge générée et la vitesse d'écrasement (\dot{h}) toujours autour de la position d'équilibre statique. Ceci se traduit par la relation :

$$C_{eq} = \frac{W_2 - W_0}{\dot{h}_2 - \dot{h}_0}$$

Sur un logiciel comme Ansys-CFX la raideur est déterminée en lançant deux simulations avec deux valeurs de l'épaisseur du film différentes. Les charges sont ensuite calculées par intégration des deux champs de pression. Enfin, la raideur est simplement calculée par la relation précédente.

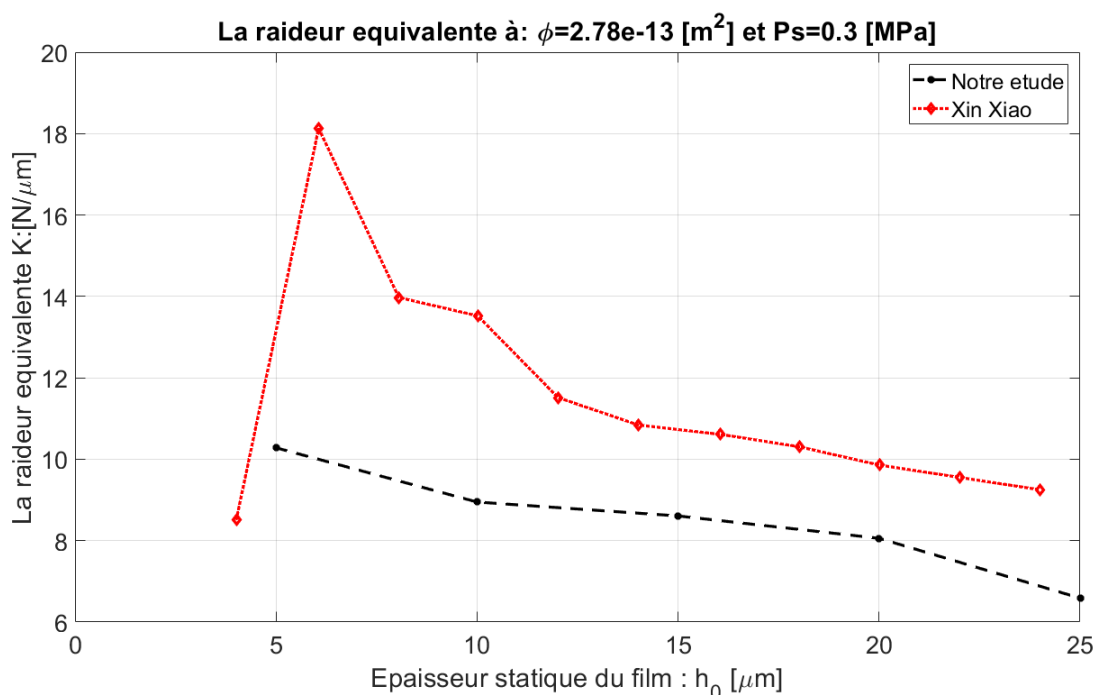


FIGURE III.14 – Influence de l'épaisseur du film d'air sur la raideur

Sur la figure III.14 on constate que bien qu'il y ait une différence entre les deux courbe l'écart reste petit. La diminution de la raideur dans le sens de l'augmentation de l'épaisseur du film d'air peut aussi être constatée. La valeur moyenne de la raideur de notre étude $K=8.5 \text{ N/um}$, la valeur moyenne de la raideur de mesurée par Xin Xiao est $K=11 \text{ N/um}$ ce qui est largement acceptable vu la difficulté de la mesure expérimentale de ce paramètre.

III.5.6 Influence de l'épaisseur du film sur la l'amortissement équivalent

Contrairement à la raideur, le calcul de l'amortissement nécessite une simulation en interaction fluide structure à cause de la condition aux limites sur le grain mobile qui est traduite par une vitesse imposée dans la direction perpendiculaire. Ceci est traduit par une déformation du maillage et la simulation classique n'arrive pas à modéliser.

Il est à noter que le coefficient d'amortissement n'a pas été étudié par Xin Xiao pour des raisons qu'il n'a pas mentionnées.

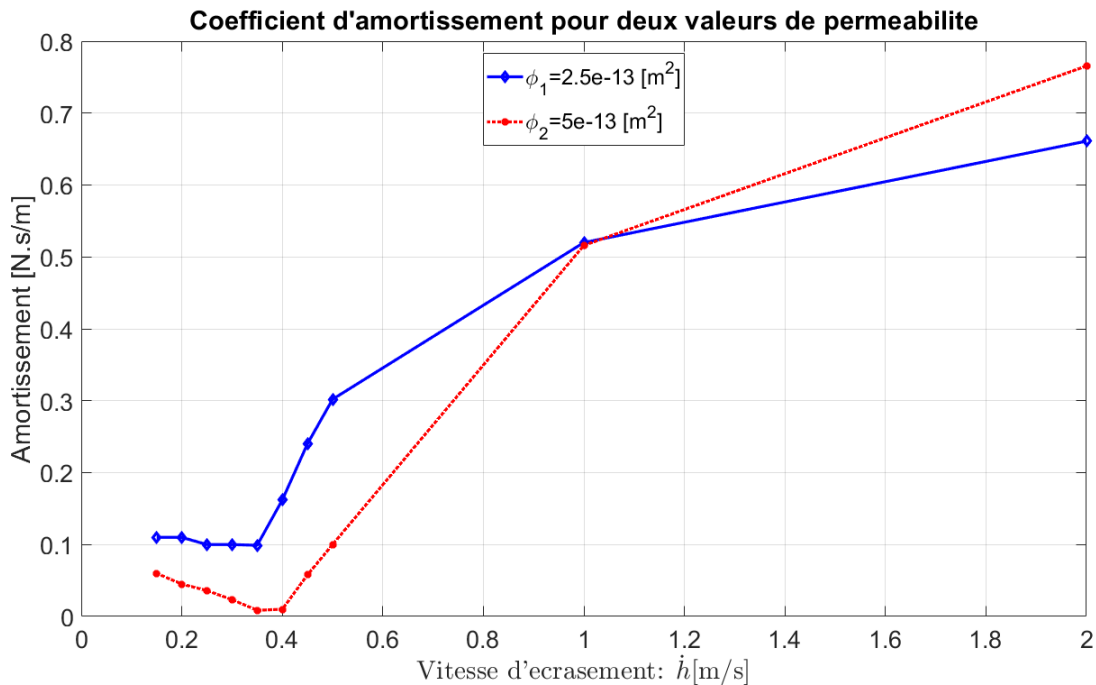


FIGURE III.15 – Influence de l'épaisseur du film d'air sur l'amortissement

Sur la figure III.15 on constate qu'il y a deux zones distinctes : une première allant de la vitesse d'écrasement 0.1 m/s à 0.4 m/s et la deuxième de 0.4 m/s à la fin c'est-à-dire 2 m/s .

C'est la première zone qui représente la phase linéaire où l'amortissement est presque constant, et c'est cette valeur qui sera considérée pour la suite. La valeur moyenne de l'amortissement dans cette première zone pour la perméabilité $\phi_1 = 2.5 \times 10^{-3} m^2$ est égale à $C = 0.104Ns/m$ quant à celle liée à la perméabilité $\phi_2 = 5 \times 10^{-3} m^2$ elle est égale à $C = 0.041Ns/m$.

Il est clair que l'augmentation de la perméabilité, par le double, entraîne une chute de l'amortissement de plus que la moitié. Ceci peut être expliqué par le fait que l'augmentation de la perméabilité facilite l'écoulement du fluide à travers les pores du patin, ainsi diminuer la résistance et le frottement ce qui est en relation directe avec l'amortissement.

III.5.7 Influence de la perméabilité sur le comportement dynamique de la butée

Pour étudier l'influence de la perméabilité sur le comportement dynamique de la butée supportant une charge de $1kg$ et excitée par un balourd d'excentricité $e = eps * h_0$, nous allons considérer deux cas :

- Perméabilité : $\phi_1 = 2.5 \times 10^{-3} m^2$, Pression d'alimentation : $P_s = 0.3MPa$, et épaisseur du film d'air : $h_0 = 5\mu m$, qui donne une raideur de : $K = 11.35N/\mu m$ et un amortissement de $C = 0.104Ns/m$
- Perméabilité : $\phi_2 = 5 \times 10^{-3} m^2$, Pression d'alimentation : $P_s = 0.3MPa$, et épaisseur du film d'air : $h_0 = 5\mu m$, qui donne une raideur de : $K = 10.086N/\mu m$ et un amortissement de $C = 0.041Ns/m$

Les deux amortissements étant très faibles à cause de la faible viscosité de l'air, fait tendre les amplitudes aux alentours des fréquences propres ($\omega_1 = 3.37 \times 10^{+03} rad/s$, $\omega_2 = 3.18 \times 10^{+03} rad/s$) à des valeurs presque infinies.

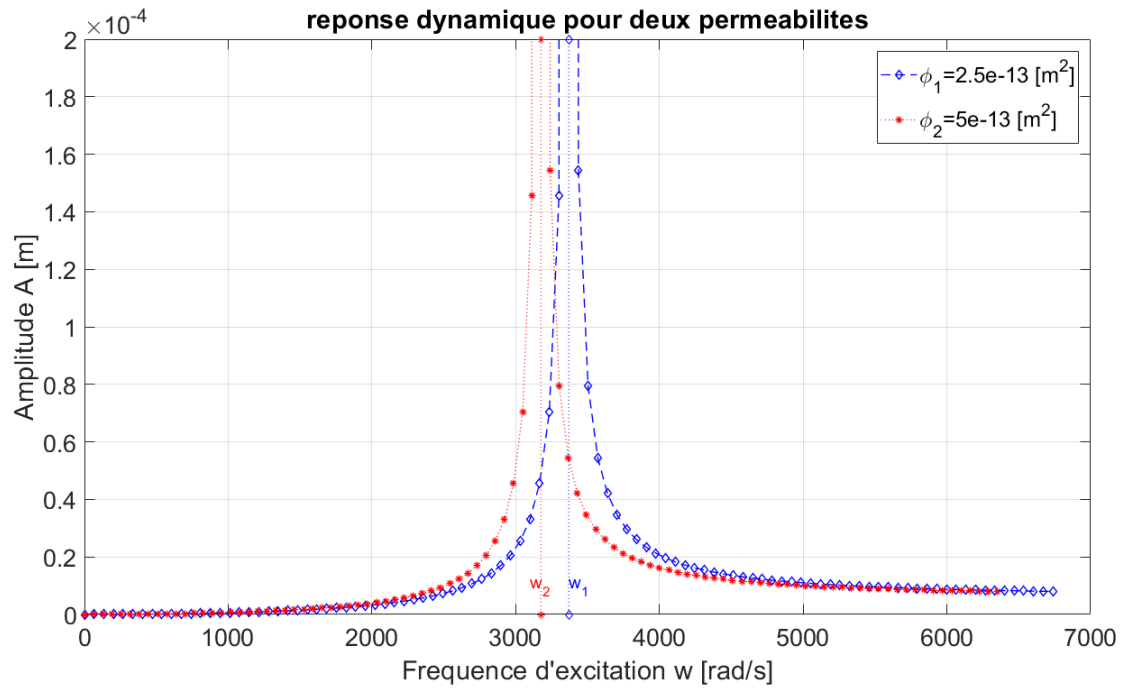


FIGURE III.16 – Amplitude de vibration en fonction de la fréquence d’excitation

Cependant le résultat le plus important de cette étude c’est l’influence de la perméabilité sur les raideurs, qui lorsqu’elle est augmentée elle fait décaler la courbe de la réponse dynamique vers la gauche. Ceci est très intéressant, dans une perspective de contrôle de vibration par action sur la perméabilité. par exemple si un système doit être opéré dans une fréquence d’excitation proche à sa fréquence propre ω_1 on peut changer la perméabilité pour faire diminuer les amplitudes et vice versa.



**CONCLUSIONS
ET
PERSPECTIVES**

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'objectif de ce projet de fin d'étude est d'étudier l'influence de la perméabilité d'une butée aérostatique poreuse sur le comportement dynamique d'un rotor rigide. L'étude est effectuée en 3D en utilisant le logiciel commercial Ansys-CFX et validée en utilisant des travaux expérimentaux de la littérature, à savoir celles de Xin Xiao.

Le premier résultat obtenu est la preuve de l'efficacité du modèle simplifié à répliquer les résultats du modèle complet proposé par Xin Xiao. Ceci a réduit la taille du maillage tout en améliorant sa qualité et le temps d'exécution d'une manière considérable.

On a trouvé aussi que l'influence de l'épaisseur du film d'air sur la charge et la raideur est similaire aux paliers classiques.

L'amortissement étant très faible à cause de la faible viscosité de l'air, fait tendre les amplitudes aux alentours des fréquences propres à des valeurs presque infinies.

Le résultat le plus important de cette étude concerne l'influence de la perméabilité sur la raideur, qui modifie la position de la courbe de la réponse dynamique. Ceci est très intéressant, si on veut contrôler la vibration du rotor par action sur la perméabilité. La modification de la perméabilité peut faire éviter à un rotor de fonctionner proche d'une de ses fréquences propres.

En perspective on propose en premier lieu de penser à concevoir un système de butée poreuse à perméabilité modifiable pour le contrôle de la vibration des rotors lors du passage par les fréquences propres dangereuses, en deuxième lieu on propose d'approfondir l'étude de l'influence de la perméabilité sur le comportement non-linéaire du rotor surtout à fort excentricité,

Références

- [1] Nowald, Gerrit & Boyaci, Aydin & Schmoll, Robert & Koutsovasilis, Panagiotis & Driot, Nicolas & Schweizer, Bernhard. (2015). Influence of axial grooves in full-floating-ring bearings on the nonlinear oscillations of turbocharger rotors.
- [2]Roques, Sébastien. (2023). Modélisation du comportement dynamique couplé rotor-stator d'une turbine en situation accidentelle.
- [3]Adhikari, Sondipon & Friswell, Michael. (2001). Eigenderivative analysis of asymmetric non-conservative systems. INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING Int. J. Numer. Meth. Engng. 51. 709-733. 10.1002/nme.186.abs.
- [4] <https://theteche.com/whirling-or-critical-speed-of-shaft-theteche-com/> article par Santhakumar Raja
- [5]https://www.linkedin.com/pulse/different-types-bearings-used-rotating-equipment-maintenance?utm_source=share&utm_medium=guest_desktop&utm_campaign=copy
- [6]<https://eandt.theiet.org/content/articles/2011/07/fatal-failures-siberias-hydro-disaster/>
- [7]Ai, X. (2013). Function and Structure of Rolling Element Bearings. In: Wang, Q.J., Chung, YW. (eds) Encyclopedia of Tribology. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-92897-5_332
- [8]Thèse Doctorat : Etude de comportement dynamique non linéaire d'une ligne d'arbre supportée par des patins hydrostatiques : influence des forces d'inertie sur la réponse dynamique par ABOSHIGHIBA Hicham
- [9] Abed, Asma. (2017). Etude du comportement statique et dynamique de paliers fluides à patins hydrostatiques intelligents.
- [10] Charef Karim, Bouchena Abdelhadi (2019) Mémoire master "Etude d'un palier hydrostatique lubrifié par valves électro-rhéologiques"

- [11]Thèse Doctorat : Conception d'un palier fluide intelligent à patins hydrostatiques contrôlés par des valves électrorhéologiques pour contrôler les vibrations de rotors par BENADDA Mohamed
- [12]TEXTBOOK SERIES VOLUME 1 FLUID FLOW IN POROUS MEDIA by Zoltán E. HEINEMANN Professor for Reservoir Engineering Leoben, October 2005 actualized by Dr. Georg Mittermeir Tehran, February 2013
- [13]Xu, Huijin & Gong, Liang & Zhao, Chong & Yang, Y.H. & Xu, Z.G.. (2015). Analytical considerations of local thermal non-equilibrium conditions for thermal transport in metal foams. *International Journal of Thermal Sciences*. 95. 10.1016/j.ijthermalsci.2015.04.007.
- [14]<https://www.youtube.com/watch?v=wa5ssJNrKbs>.
- [15]Zhang, Kang & Feng, Kai & Li, Wen-Jun & Song, Lijun. (2021). Nonlinear Dynamic Analysis of a Rotor-Porous Air Journal Bearing System With O-Rings Mounted. 10.21203/rs.3.rs-485873/v1
- [16]Xiao, X., Du, J., Zhang, Y., Yan, J., Li, Y., Zhu, K., & Wang, L. (2022). Study on Static Characteristics of Aerostatic Bearing Based on Porous SiC Ceramic Membranes. *Membranes*, 12(9), 898.

RESUMES

L'étude théorique et la modélisation des butées poreuses pour le contrôle des vibrations jouent un rôle crucial dans le domaine de l'ingénierie mécanique. Les vibrations excessives dans les machines tournantes peuvent entraîner des dommages structuraux et une diminution des performances. Afin de remédier à ce problème, cette thèse propose une approche basée sur l'utilisation de butées poreuses pour atténuer les vibrations indésirables. Les conclusions de cette recherche fournissent une base solide pour la conception et l'optimisation des paliers et des rotors utilisant des butées poreuses, ouvrant ainsi la voie à des améliorations significatives des performances des machines tournantes.

Abstract

The theoretical study and modeling of porous thrust bearings for vibration control plays a crucial role in mechanical engineering. Excessive vibration in rotating machines can lead to structural damage and reduced performance. To remedy this problem, this thesis proposes an approach based on the use of porous thrust bearings to attenuate unwanted vibrations. The findings of this research provide a sound basis for the design and optimization of bearings and rotors using porous thrust bearings, paving the way for significant improvements in rotating machine performance.

ملخص

تركز هذه الدراسة النظرية والنمذجة على الواجهات المسامية لمراقبة الاهتزازات وتلعب دورًا حاسمًا في مجال الهندسة الميكانيكية. يمكن أن تؤدي الاهتزازات الزائدة في الآلات الدوارة إلى تلف هيكلها وتقليل أدائها. ومن أجل معالجة هذه المشكلة، تقترح هذه الأطروحة نهجًا يعتمد على استخدام الواجهات المسامية لتقليل الاهتزازات غير المرغوب فيها. وتوفر استنتاجات هذا البحث أساسًا قويًا لتصميم وتحسين المحامل وباستخدام الواجهات المسامية، مما يمهد الطريق لإجراء تحسينات هامة في أداء الآلات الدوارة.