

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : énergétique

Par :

**Chelabi Kousseila**

**Gougam Sofiane**

**Thème**

---

**Simulation numérique de la cavitation dans un palier  
cylindrique**

---

Soutenu le 02/07/2023 devant le jury composé de :

Mr. F. Nait bouda

Président

Mr. M. Allouche

Rapporteur

Mr. S. Mouloud

Examineur

**Année Universitaire 2022-2023**

## **Remerciement**

*Nous remercions le Dieu de nous avoir donné du courage et de la détermination*

*Pour mener à terme ce travail.*

*Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur*

***Mr ALLOUCHE Moussa,***

*Nous le remercions sincèrement pour son bon encadrement, son soutien, sa disponibilité,*

*Ses orientations, ses conseils et sa sympathie qui ont été le moteur de notre motivation*

*Pour la réalisation de notre recherche.*

*Notre gratitude va aussi aux membres du jury à*

***Mr NAIT BOUDA Faycel***

***Et***

***Mr MOULOUD Smail***

*Qui ont accepté d'évaluer et d'examiner notre présent travail.*

*On tient à remercier tout particulièrement nos très chers parents*

*Pour leur soutien et leurs encouragements*

*Nous tenons à remercier l'ensemble des enseignants de la formation*

***« Génie mécanique »***

*Nous adressons nos remerciements à tous les intervenants et toutes les personnes*

*qui leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions à*

*l'élaboration de ce mémoire..*

# **DEDICES**

*A nom du dieu miséricordieux par essence et pour excellence*

*Je dédie ct travail*

*A mes très chers parents que dieu me les gardes*

*Mes très adorables frères et*

*Mes très chères sœurs*

*Je dédie ce modeste travail spécialement à mon binôme*

*Sofiane et sa famille.*

*En enfin, à tous ceux qui ont contribué de près et de loin pour la réalisation de ce*

*Modeste travail*

***Koukou***

# Sommaire

<b>Chapitre 1 : Généralité et revue bibliographique</b>	<b>13</b>
1.1 Introduction :	13
1.2 Généralité sur les paliers à lubrification :	13
1.2.1 Les huiles lubrifiantes :	13
1.2.2 Les Huiles de base :	13
1.2.3 Les trois gammes d'huiles	14
1.2.4 La viscosité des lubrifiants	14
1.2.5 Les additifs :	15
1.3 Les paliers hydrodynamiques :	15
1.3.1 Les paramètre des paliers lisse :	16
1.3.2 Type de palier :	16
1.3.3 Palier lisse cylindrique :	16
a. Principe de fonctionnement :	16
1.3.4 Type de palier lisse cylindrique :	17
a. Palier infiniment long :	17
b. Palier court :	17
c. Palier de longueur finie :	18
1.4 Généralités sur la cavitation :	18
1.4.1 Définition :	18
1.4.2 Phénomène physique :	19
1.4.2.1 Pression de vapeur :	20
1.4.3 Types de cavitation :	20
1.4.3.1 Cavitation à bulles séparées :	20
1.4.3.2 Cavitation à poches :	20
1.4.3.3 Cavitation à lames :	21
1.4.3.4 Cavitation de vortex :	21
1.4.3.5 Cavitation de mélange :	21
1.4.4 Les effets de la cavitation :	21
1.4.4.1 Bruit :	21
1.4.4.2 Performance :	21
1.4.4.3 Vibration :	21
1.4.4.4 Erosion :	22
1.4.5 Aspects des dommages de cavitation du coussinet :	22
1.4.6 Méthode pour se protéger contre la cavitation :	22
1.5 . Synthèse bibliographique :	23
<b>Chapitre 2 : Positionnement du probleme et formulation mathematique</b>	<b>26</b>
2.1 Introduction :	26
2.2 Description du problème :	26
2.3 Equations gouvernantes :	28
2.3.1 Loi de comportement pour un fluide newtonien incompressible :	28
2.3.2 Equation de Conservation de quantité de mouvement :	29
1. L'équation de conservation de la masse pour un fluide incompressible :	29

2.3.3	Hypothèses simplificatrices :	29
2.4	<i>Equation simplifiées</i>	30
2.4.1	Condition aux limites	30
2.5	<i>Equation moyennée :</i>	30
2.6	<i>Model K-epsilon (<math>k - \varepsilon</math>) réalisable :</i>	32
2.6.1	Les équations de transport de k-epsilon réalisable :	32
2.6.2	Modélisation de la viscosité turbulente :	33
2.6.3	Equation d'énergie cinétique turbulente	34
2.6.4	Equation du taux de dissipation d'énergie cinétique turbulente	34
2.6.5	Les constantes du modèle :	34
<b>Chapitre 3 : Resultats et discussion</b>		<b>35</b>
3.1	<i>Introduction :</i>	35
3.2	<i>Représentation de champs de pression :</i>	36
3.2.1	Comparaison :	36
3.2.2	Représentation de la pression dynamique :	39
3.3	<i>Représentation de la vitesse U :</i>	41
3.4	<i>Représentation de la turbulence :</i>	43
<b>Conclusion et générale</b>		<b>46</b>

# Nomenclateur

Symbole	Définition	Unité (SI)
$u, v$	Composantes de la vitesse suivant les axes x et y	$m.s^{-1}$
$\bar{u}, \bar{v}$	Composantes des vitesses moyennes	$m.s^{-1}$
$u', v'$	Fluctuations turbulentes de u, v	$m.s^{-1}$
$\overline{u'u'}, \overline{v'v'}, \overline{u'v'}$	Contraintes de Reynolds	$m^2.s^{-2}$
$U, V$	Vitesses Adimensionnelles	-
$X, Y$	Grandeurs adimensionnelles	-
t	Temps	s
p	Pression	$N.m^{-2}$
$\bar{p}$	Pression moyenne	$N.m^{-2}$
P	Pression adimensionnelle	-
K	Energie cinétique turbulente	$J.kg^{-1}$
$K^*$	Energie cinétique adimensionnelle	-
$P_k$	Production de l'énergie cinétique turbulente	$W.m^{-3}$
$R_a$	Rayon de l'arbre	m
$C_u, C_{\epsilon 1}, C_{\epsilon 2}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$	Constantes empiriques	-
$u_\tau$	Vitesse de frottement	$W.m^{-3}$
I	Intensité de turbulence	-
T	Température	$^0K$
C	Le jeu radial	mm
$p_v$	Pression de vaporisation du liquide.	$m.s^{-2}$
$\overline{\overline{D}}$	Taux de déformation.	$s^{-1}$
S	Module de la moyenne du tenseur de vitesse de déformation	$s^{-1}$
$P_k$	Production de l'énergie cinétique turbulente	$W.m^{-3}$
$Y_k$	Dissipation de l'énergie cinétique turbulente	$W.m^{-3}$
$P_\omega$	Taux de production de la dissipation spécifique	$Kg.m^{-3}.s^{-2}$
$Y_\omega$	Dissipation de la dissipation spécifique	$Kg.m^{-3}.s^{-2}$
$A_p, A_E, A_W, A_N, A_S$	Coefficients de l'équation algébrique de transport discrétisé	-
$A([P])$	Fonction d'un schéma numérique	-
$P_0$	La pression a entrée	$- N.m^{-2}$

R	Le rayon de l'arbre	mm
$\vec{f}_v$	Force volumique	-

### Symboles grecs

$\rho$	Masse volumique	kg.m <sup>-3</sup>
$\mu$	Viscosité dynamique	kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>
$\nu$	Viscosité cinématique	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
$\varepsilon$	Taux de dissipation de l'énergie cinétique	W.kg <sup>-1</sup>
$\varepsilon^*$	Taux de dissipation adimensionnelle	-
$\mu_t$	Viscosité dynamique turbulente	kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>
$\nu_t$	Viscosité cinématique turbulent	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
N	Vitesse de rotation de l'arbre	rd.s <sup>-1</sup>
h	Épaisseur du film liquide	m
$\Omega$	Taux de dissipation spécifique	s <sup>-1</sup>
$\omega^*$	Taux de dissipation spécifique adimensionnelle	-
$\alpha, \beta, \beta^*$	Constante empirique	-
$\mu_t$	Viscosité dynamique turbulente	Kg.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup>
$\nu_t$	Viscosité cinématique turbulente	m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup>
$\tau_w$	Frottement à la paroi	Kg.m <sup>-2</sup> .s <sup>-2</sup>
$\overline{\sigma}$	Représente tenseur des contraintes	
$\theta$	Angle	Rad/s

## Nombres adimensionnels

Re	Nombre de Reynolds	$Re = U_0 D / \nu$
T <sub>a</sub>	Nombre de Taylor	$T_a = 4\omega^2 L_c^4 / \nu^2$

## Liste des tableaux

Tab (2.1) : condition aux limites

Tab (2.2) : les constantes du modèle ( $k - \varepsilon$ ) realizable



## Liste des figures

<b>Figure 1-1 Diagramme de phase.....</b>	<b>19</b>
<b>Figure 2.1 Palier lisse a l'états de fonctionnement.....</b>	<b>27</b>
<b>Figure 2-3 Schéma d'un palier développé réalisé avec Gambit.....</b>	<b>28</b>
<b>Figure 3-1 distribution de la pression statique sur le coussinet avec effet de cavitation a excentricité = 0.4 avec différentes vitesses .....</b>	<b>36</b>
<b>Figure 3-2 distribution de la pression statique sur le coussinet sans effet de cavitation .</b>	<b>36</b>
<b>Figure 3-3 Distribution de la pression statique sur le coussinet e = 0.4 avec différentes vitesses .....</b>	<b>37</b>
<b>Figure 3-4 Distribution de la pression statique sur le coussinet e= 0.6 avec différentes vitesses.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure 3-5 distribution de la pression statique sur le coussinet e=0.8 avec différentes vitesses .....</b>	<b>38</b>
<b>Figure 3-6 La variation de la pression dynamique selon h a e= 0.4.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure 3-7 variation de la pression dynamique selon h a = 0.6.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure 3-8 variation de la pression dynamique selon h a e =0.8.....</b>	<b>40</b>
<b>Figure 3-9 distribution de la vitesse adimensionnelle selon X a e=0.4.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure 3-10 distribution de la vitesse adimensionnelle selon X.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure 3-11 distribution de la vitesse adimensionnelle selon X a e =0.6.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure 3-12 distribution de la vitesse adimensionnelle selon X a e =0.6.....</b>	<b>41</b>
<b>Figure 3-13 Figure 3.12 distribution de la vitesse adimensionnelle selon X a e=0.8 .....</b>	<b>42</b>
<b>Figure 3-14 distribution de la vitesse dimensionnelle selon X a e=0.8.....</b>	<b>42</b>
<b>Figure 3-15 distribution de la turbulence .....</b>	<b>43</b>
<b>Figure 3-16 distribution de la turbulence .....</b>	<b>43</b>
<b>Figure 3-17 distribution de la turbulence .....</b>	<b>43</b>
<b>Figure 3-18 distribution de la turbulence .....</b>	<b>43</b>
<b>Figure 3-19 Contours de phases pour une excentricité de 0,4 à une vitesse de 500trs/min .....</b>	<b>45</b>
<b>Figure 3-20 Contours de phases pour une excentricité de 0,8 à une vitesse de 2250trs/min .....</b>	<b>45</b>

## **Résumé :**

Cette étude se penche sur l'importance des paliers lisses dans les machines, comme les moteurs, turbines et pompes. Elle souligne leur rôle clé dans la réduction de la friction et de l'usure, ainsi que dans le transfert de charge. L'utilisation d'une fine couche d'huile est habituelle, mais à des vitesses élevées, la cavitation (formation de bulles de gaz) peut causer des problèmes. L'objectif est de simuler numériquement comment l'huile s'écoule dans ces paliers en régime turbulent avec cavitation. On utilise le logiciel Fluent pour résoudre les équations qui décrivent ces phénomènes. L'étude met en avant l'importance de comprendre comment la cavitation affecte ces paliers lisses à des vitesses élevées. Les résultats des simulations offrent des pistes pour améliorer la conception et les performances de ces éléments clés dans les machines.

**Mots clés :** CFD, Cavitation, écoulement, diphasique, Fluent, palier,

## **Abstract :**

This study focuses on the importance of plain bearings in machines such as engines, turbines, and pumps. It highlights their key role in reducing friction and wear, as well as in transferring loads. The use of a thin layer of oil is common, but at high speeds, cavitation (the formation of gas bubbles) can cause issues. The goal is to numerically simulate how oil flows in these bearings under turbulent conditions with cavitation. The Fluent software is employed to solve the equations that describe these phenomena. The study emphasizes the importance of understanding how cavitation affects these plain bearings at high speeds. The results of the simulations provide insights for improving the design and performance of these crucial components in machines.

**Keys words:** CFD, Cavitation, Flow, Multiphases, Fluent, Bearing

## **Introduction générale :**

Les paliers lisses sont des éléments essentiels dans de nombreux systèmes mécaniques tels que les moteurs, les turbines et les pompes. Ils jouent un rôle crucial dans la réduction de la friction et de l'usure, ainsi que dans le transfert de charge axiale et radiale. Dans ces paliers, un film mince d'huile est généralement utilisé pour séparer deux surfaces en mouvement. Cependant, à des vitesses élevées, la formation de bulles de gaz, appelée cavitation, peut se produire dans le film d'huile, entraînant une usure et une réduction de la performance.

Dans cette étude, nous nous intéressons à la simulation numérique de l'écoulement d'un film mince dans un palier lisse en régime turbulent avec la cavitation. L'objectif est de comprendre les mécanismes qui conduisent à la formation de cavitation et les effets sur l'écoulement et la performance du palier lisse. Cette étude se base sur l'utilisation de méthodes numériques de simulation des écoulements, notamment la dynamique des fluides numériques (CFD) et la méthode des éléments finis.

La simulation numérique, à travers le logiciel Fluent, est une méthode moderne et efficace pour résoudre les équations de Navier-Stokes et les équations de Reynolds, qui régissent le comportement des fluides en mouvement. Ces équations sont utilisées pour modéliser divers phénomènes physiques, tels que la turbulence, les écoulements à haute vitesse, les interactions fluides-structures, etc.

Le premier chapitre est dédié à la synthèse bibliographique concernant la lubrification des paliers butés en régime turbulent. Nous y exposons la formation de cavitation ainsi que les influences des paramètres de fonctionnement tels que la vitesse de rotation, la pression et la charge axiale sur ce phénomène.

Le deuxième chapitre de mémoire on a exposé l'équations mathématiques pour la résolution de problèmes liés à la mécanique des fluides. Plus précisément, les équations telles que les équations de Navier-Stokes et les équations de Reynolds.

Dans le troisième et dernier chapitre, nous avons discuté des résultats obtenus ainsi que des graphiques réalisés par Fluent.

On termine par une conclusion générale ou a résumé les différents résultats obtenus.

# Généralité et revue bibliographique

## 1.1 Introduction :

Dans ce premier chapitre, nous aborderons les aspects fondamentaux de la cavitation et des paliers hydrodynamiques lubrifiés. La cavitation se produit lorsque la pression d'un fluide diminue suffisamment pour former des bulles de vapeur. Les paliers hydrodynamiques lubrifiés sont des composants mécaniques essentiels utilisés pour guider et soutenir les arbres rotatifs. Ils fonctionnent en créant un film de lubrifiant qui réduit le frottement et l'usure. Cependant, en raison des forces et des vitesses élevées, ces paliers peuvent être sujets à des problèmes de cavitation, ce qui affecte leurs performances et leur durée de vie

## 1.2 Généralité sur les paliers à lubrification :

### 1.2.1 Les huiles lubrifiantes :

Les huiles lubrifiantes actuellement utilisées sont généralement constituées d'un fluide de base appelé « base de lubrifiant » qui peut être synthétique ou d'origine minérale, auquel sont ajoutés de nombreux additifs dont la nature varie avec la destination du produit. Les principales caractéristiques des huiles sont liées à :

- La réduction des frottements.
- La réduction de l'usure.
- L'amélioration de l'étanchéité.
- L'évacuation des impuretés.

### 1.2.2 Les Huiles de base :

Selon l'origine des lubrifiants les bases minérales peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Les bases à structure paraffiniques sous forme d'hydrocarbure saturés à chaîne droite. Ces bases présentent une grande stabilité à l'oxydation et possèdent un indice de viscosité élevé (de l'ordre 100) ; elles sont par ailleurs peu agressives vis-à-vis des élastomères habituellement utilisés pour les joints d'étanchéité. Cependant le haut poids moléculaire de certaines chaînes peut entraîner la cristallisation de l'huile dès la température ambiante.

Les iso-paraffiniques qui possèdent un indice de viscosité moins élevé ne présentent pas cet inconvénient

- Les bases structurées naphthéniques, formes de noyaux cycliques. Ces bases sont moins stables à l'oxydation, et présentent un indice de viscosité plus faible (de l'ordre de 50) ; elles sont par ailleurs relativement agressives vis-à-vis des élastomères. Elles possèdent par contre d'excellentes caractéristiques des écoulements à basse température.

### **1.2.3 Les trois gammes d'huiles**

- Les huiles minérales pures : ont très peu d'additifs et possèdent un faible éventail de viscosité
- Les huiles semi-synthétiques : sont composées de 80% d'huile minérale et de 20% de bases

Synthétiques, fortement additionnées. Viscosité de 10W40

- Les huiles synthétiques : sont obtenues en mélangeant différents composés chimiques ou Pétrochimiques entre eux : alcool et acide organique, poly-glycols, hydrocarbures de synthèse, etc. Très fortement additionnées, c'est le haut de gamme des huiles. Elles couvrent toute l'échelle de viscosité. Elles offrent à l'heure actuelle, le meilleur compromis à chaud comme à froid, pour les moteurs Essence ou diesel, avec ou sans turbo.

### **1.2.4 La viscosité des lubrifiants**

La viscosité est donc essentielle dans le choix d'un lubrifiant adapté à chaque application. En fonction des besoins spécifiques de chaque système, il est important de sélectionner une huile ayant la viscosité appropriée.

Lorsque la viscosité est trop faible, le film d'huile peut se rompre, entraînant des pannes prématurées et une usure accrue des composants. À l'inverse, une viscosité excessive peut entraîner une résistance accrue aux mouvements, une diminution de l'efficacité énergétique et des pertes de puissance.

La viscosité d'une huile est généralement mesurée à une température donnée, appelée indice de viscosité. Cela permet de déterminer le comportement de l'huile dans des conditions de température variables. Un indice de viscosité élevé indique une faible variation de viscosité avec les changements de température, ce qui est souhaitable dans de nombreux systèmes.

### 1.2.5 Les additifs :

Les lubrifiants actuels sont essentiellement constitués d'une huile de base (huile minérale, huile de synthèse,) dans laquelle on introduit un composé actif qui sera nommé additif tout au long de ce texte. Un bon additif moderne sera donc un composé qui apportera à une huile de base donne un ensemble de caractéristiques nécessaire à la lubrification des machines ou mécanismes tels que les moteurs, les ponts, les boîtes de vitesse, les engrenages. Des additifs interviennent également dans les lubrifiants utilisés pour le travail des métaux et dans les graisses. Les additifs alimentaires peuvent être regroupés en quatre catégories principales selon leurs fonctions et leurs caractéristiques.

- **Les additifs antioxydants** : qui prolonge la durée d'utilisation des lubrifiants
- **Les additifs anti-usure et extrême-pression** : qui sont nécessaires dans les mécanismes ou s'exercent de fortes pressions au niveau des contacts métalliques.
- **Les additifs détergents dispersants** : qui sont utilisés pour éviter l'encrassement des moteurs thermiques.
- **Les additifs de viscosité** : qui modulent les variations de viscosité avec la température et permettent donc d'élargir la plage d'utilisations des huiles lubrifiantes.

### 1.3 Les paliers hydrodynamiques :

Les paliers hydrodynamiques sont des éléments mécaniques essentiels des groupes turbo-alternateurs sur une ligne d'arbre, plusieurs paliers sont utilisés pour le guidage en rotation du rotor. Par définition, un palier est composé d'un arbre, d'un coussinet et d'un film lubrifiant séparant ces deux premiers composants. La lubrification de ces paliers est du type hydrodynamique car les pressions, dans les films, sont dues au mouvement relatif de l'arbre par rapport au coussinet. Le phénomène est également connu sous le nom de coin d'huile ou d'effet d'entraînement de lubrifiant dans un espace convergent. Les paliers hydrodynamiques offrent plusieurs avantages, tels qu'une faible friction, une capacité de charge élevée, une dissipation thermique efficace et un fonctionnement silencieux.

### **1.3.1 Les paramètres des paliers lisse :**

Les principaux paramètres qui interviennent dans la définition d'un palier cylindrique sont :

- Les paramètres géométriques : diamètre, longueur, jeu radial,
- Les paramètres cinématiques : vitesse de rotation, charge,
- Les paramètres dynamiques : charge variable, mode de rotation (continu ou alternatif), vibrations....
- Les paramètres caractéristiques du lubrifiant : viscosité dynamique, masse volumique, chaleur spécifique.

Pour étudier le comportement dynamique des paliers lisses ; il est impératif de connaître les caractéristiques des paliers lisses

### **1.3.2 Type de palier :**

Les paliers sont des composants utilisés dans la construction mécanique pour soutenir et guider les arbres de transmission en rotation. Ils peuvent se classifiée en différentes types :

- Les a géométrie fixe (paliers lisses).
- Les paliers à roulement à billes.
- Les paliers à roulement rouleaux.
- Les paliers magnétiques.

### **1.3.3 Palier lisse cylindrique :**

Les paliers lisse sont fréquemment utilisés les plus simple sont constitués d'un arbre en acier tournant dans un alésage en bronze 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...

#### **a. Principe de fonctionnement :**

Un palier lisse est constitué de deux élément, l'arbre généralement en acier de rayon  $R_a$  et le coussinet en bronze ou en acier régulé de rayon intérieure  $R_c$  et de longueur  $L$ . Ainsi, un palier lisse peut être schématisé par deux cercles de rayon voisins et caractérisé par trois grandeurs : le jeu radial  $C=R_c-R_a$ , le rapport  $R/C$  (ou jeu relatif) et le rapport  $L/D$  de la

longueur au diamètre du palier. La figure présente les trois phases que l'on observe lors de la mise en route sous charge d'un palier. Les **O<sub>a</sub>** et **O<sub>c</sub>** représentant respectivement les centres de l'arbre et du coussinet, tandis que **W** désigne la charge extérieure appliquée à l'arbre.

- A l'arrêt, Phase [a], l'arbre et le coussinet sont en contact, la génératrice commune est opposée à la charge et la distance **O<sub>c</sub> O<sub>a</sub>** est égale au jeu radial **C**.
- Au démarrage phase [b], l'arbre roule en glissant à l'intérieure du coussinet.
- Dès que la vitesse de rotation devient suffisante phase[c], il y a création d'un champ de pression hydrodynamique qui s'oppose à la charge figure. Pour une vitesse de rotation stable, et une **W** constante, le centre de l'arbre **O<sub>a</sub>** occupe une position fixe à l'intérieure du coussinet. Si le torseur des forces extérieure se réduit à une force unique **W** qui agit dans le plan de la section médiane du palier, les axes de l'arbre et du coussinet sont alors parallèles.

Deux paramètres sont nécessaires pour positionner **O<sub>a</sub>** par rapport à **O<sub>c</sub>** On utilise habituellement la distance **O<sub>c</sub> O<sub>a</sub>** appelé excentricité **e** et l'angle que fait la direction de la charge **W** avec la ligne des centres  $\overrightarrow{O_a O_c}$  appelé l'angle de calage  $\phi$ .

#### **1.3.4 Type de palier lisse cylindrique :**

##### **a. Palier infiniment long :**

Lorsque le rapport **L/D** de longueur au diamètre du palier est grand, on peut négliger le débit axial. L'écoulement est donc purement circonférentiel. En pratique, ce calcul s'applique aux paliers tels que **L /D>4**. Seul l'arbre est animé d'un mouvement de rotation uniforme.

##### **b. Palier court :**

Lorsque le rapport **L/D** de la longueur au diamètre du palier est faible, on peut négliger le gradient de pression circonférentiel devant le gradient de pression axial. Cette hypothèse émise pour la première fois par michell a été reprise et développée par ocvirk et dubois. Elle est justifiée pour les paliers dont le rapport **L/D** est inférieur ou égal 1/8. En pratique cette hypothèse est encore utilisée pour le rapport **L/D** de 0,5 car l'erreur commise reste faible sur le couple et le débit, elle est d'un ordre de grandeur acceptable sur la charge mais très importante sur la valeur du maximum de pression dans le film. Ces erreurs diminuent lorsque l'excentricité décroît.



**c. Palier de longueur finie :**

Les deux types Dans le cas où le rapport  $L/D$  est compris entre 0.125 et 4, le palier est considéré de longueur finie. Est 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 [1].

**1.4 Généralités sur la cavitation :**

**1.4.1 Définition :**

La cavitation est le phénomène de vaporisation des liquides soumis à de fortes dépressions qui sont généralement dues à l'augmentation de leurs vitesses d'écoulement. Elle se produit le plus souvent dans les machines hydrauliques telles que les hélices de bateau, les inducteurs ou encore les venturis. Les conséquences de la cavitation sont en général néfastes. Elle est à l'origine de l'érosion des hélices et des aubes de turbines. Elle génère du bruit et provoque des chutes de performances.

La définition de la cavitation est toujours accompagnée du diagramme figure1.1 de changement de phase qui montre que dans certains cas le passage de la phase liquide à la phase vapeur se fait à température constante. Il faut bien comprendre que cette transformation de phase (vaporisation) a besoin d'un apport de chaleur correspondant à la chaleur latente de vaporisation. Il en résulte donc une diminution de la température du liquide environnant la cavité de vapeur. D'après Brennen, le passage du liquide à la vapeur et vice versa se fait par le fractionnement de la substance homogène originale en un mélange de deux phases différentes [2].

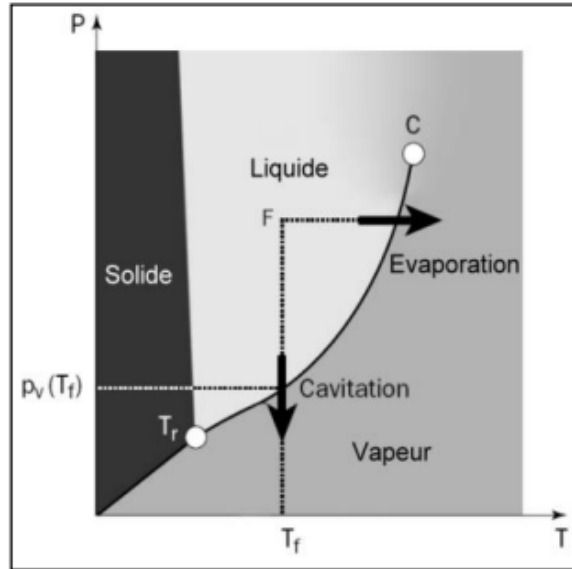


Figure 1-1 Diagramme de phase

#### 1.4.2 Phénomène physique :

La cavitation est un phénomène physique, associé aux écoulements fluides multiphasiques qui agit sur les caractéristiques de la turbulence des écoulements. Les techniques de simulation CFD à considérer incluent donc :

- La simulation des écoulements multiphasiques.
- La simulation des écoulements turbulents.

Les caractéristiques d'un écoulement cavitant se caractérisent par le nombre de cavitation, défini

Comme suit :

$$\sigma = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (1.1)$$

- $P$  = pression de référence pour l'écoulement (par exemple, la pression à l'entrée).
- $P_v$  = pression de vaporisation du liquide.
- $\frac{1}{2}\rho U^2$  = pression dynamique.

Physiquement, la tendance de l'écoulement à cavité augmente lorsque le nombre de cavitation diminue. La cavitation est traitée séparément du changement thermique des phases, parce que

le processus de la cavitation est généralement trop rapide pour que l'hypothèse de l'équilibre thermique à l'interface des phases soit correcte. Dans les modèles de cavitation les plus simples, le transfert de masse est entraîné par les effets purement mécaniques, autrement dit, les différences de pression liquide-vapeur, plutôt que les effets thermiques [3].

#### **1.4.2.1 Pression de vapeur :**

Le concept de pression de vapeur est mieux considéré du point de vue de la thermodynamique classique. Dans le diagramme de phase pour, par exemple, l'eau (figure I.1), la courbe du point triple  $T_r$  au point critique  $C$  qui sépare les domaines liquide et vapeur. Le franchissement de cette courbe est représentatif d'une transformation réversible dans des conditions statiques (ou d'équilibre) d'évaporation ou de condensation du fluide à pression dite pression de vapeur  $p_v$ . Elle est fonction de la température  $T$ . Suite à cela, la cavitation dans un liquide peut être provoquée en abaissant la pression à une température approximativement constante, comme cela se produit souvent localement dans les écoulements réels. La cavitation apparaît donc similaire à l'ébullition, sauf que le mécanisme d'entraînement n'est pas un changement de température mais un changement de pression, généralement contrôlé par la dynamique de l'écoulement [4].

#### **1.4.3 Types de cavitation :**

##### **1.4.3.1 Cavitation à bulles séparées :**

Ce type de cavitation se produit plutôt sur des profils à faible incidence ; les structures ont l'allure de bulles de vapeur isolées plus ou moins sphériques qui apparaissent de façon aléatoire au sein du liquide. Afin que ces bulles puissent se créer, il est nécessaire qu'il existe, au sein du liquide ou sur la paroi, des germes (précisément des microbulles d'air) à partir desquels les bulles grossissent.

##### **1.4.3.2 Cavitation à poches :**

Dans ce type de cavitation, la phase vapeur constitue une cavité unique, attachée au profil sur lequel elle se développe. Elle prend naissance à partir d'un décollement sur le profil ou sur un obstacle. A l'arrière de cette poche, se détachent des structures instationnaires, convectées par l'écoulement et qui collapseront en aval. Ci-après, quelques exemples de poches de cavitation.

### **1.4.3.3 Cavitation à lames :**

On peut la désigner comme un cas particulier de la cavitation par poches. Elle concerne des structures minces et stables semblables à des lames brillantes qui s'accrochent sur une arête comme par exemple le bord d'attaque d'un profil. Ce type de cavitation se produit généralement lorsque l'incidence d'un profil est trop forte et génère une dépression trop importante.

### **1.4.3.4 Cavitation de vortex :**

Un vortex (ou tourbillon) se crée par exemple aux extrémités de pales d'hélices ou de pompes. Ils peuvent aussi se créer en aval d'obstacles situés dans l'écoulement. La cavitation qui se produit alors au cœur de ce tourbillon qui est une zone à forte dépression est appelée cavitation de vortex.

### **1.4.3.5 Cavitation de mélange :**

Cette cavitation apparaît typiquement dans des couches de cisaillement entre un jet noyé et un liquide. C'est le cas des écoulements au travers d'orifices ou de vannes et aussi celui de jets propulsifs. C'est aussi le cas des écoulements en aval d'obstacles [5].

## **1.4.4 Les effets de la cavitation :**

### **1.4.4.1 Bruit :**

La cavitation se manifeste d'abord par un bruit, provenant des fluctuations de volume des bulles ou des poches de vapeur. Ce bruit est préoccupant pour la discrétion sous-marine, et il peut varier en intensité. Il constitue la principale source de bruit liée aux écoulements de liquide. L'analyse acoustique est un outil essentiel pour détecter la cavitation, car le bruit se produit avant que les bulles ou les poches ne soient visibles.

### **1.4.4.2 Performance :**

La cavitation affecte négativement les performances des équipements en perturbant les flux dans les machines et les organes hydrauliques. Les structures cavitantes créent des obstructions qui entraînent une réduction de la hauteur engendrée et de l'efficacité des pompes, une diminution de la poussée des hélices, une augmentation des pertes de charge et une limitation du débit des vannes.

### **1.4.4.3 Vibration :**

La cavitation entraîne des vibrations en raison des fluctuations des structures cavitantes en contact avec des surfaces solides. Par exemple, la cavitation des hélices d'un bateau provoque des vibrations sur la ligne d'arbre et les structures du bateau.

#### **1.4.4.4 Erosion :**

La cavitation entraîne une dernière conséquence : l'érosion mécanique. Lorsque les structures cavitantes évoluent rapidement, les volumes de vapeur s'effondrent, créant des vitesses locales élevées du liquide. Si ce processus se produit près d'une paroi, des jets de liquide se forment et peuvent causer des dommages d'érosion. Si ces dommages se répètent, ils peuvent finalement détruire physiquement la structure [6].

#### **1.4.5 Aspects des dommages de cavitation du coussinet :**

L'érosion de cavitation peut se confondre avec certaines attaques ou exsudations mais le plus souvent, c'est avec des piqures de fatigue qu'il peut y avoir confusion. Le faciès de cavitation se caractérise par l'absence de fissure au visionnage du matériau éliminé. De plus, le pourtour de la zone érodée présente une zone de transition dont l'aspect fait penser à un micro-sablage d'intensité dégressive (dans le cas de la fatigue, le pourtour est net). La zone usée se caractérise par une rugosité importante de régulière.

Un autre aspect qui définit la présence de fatigue ou de cavitation est l'usure provoquée par le départ des débris. Dans le cas de la fatigue, des écailles de volume important (quelques centièmes de micromètres à quelques dixièmes de micromètres) peuvent se produire et donner des sillons et de incrustations importantes dans le coussinet. Dans le cas de la cavitation, la taille des débris est très faible. De ce fait, seule une usure négligeable et difficilement observable pourra survenir .

#### **1.4.6 Méthode pour se protéger contre la cavitation :**

À l'heure actuelle, la prédiction et le contrôle de la cavitation ne sont pas encore assurés. Pour se protéger contre la cavitation, les industriels ont les choix suivants :

- Limiter la capacité des équipements,
- Développer des systèmes supplémentaires sur les équipements non vitaux,

Comme le système d'aération dans l'aspirateur qui aide à réduire la cavitation, mais, en revanche, diminue le rendement des turbines hydrauliques, ou bien planifier à l'avance le remplacement du matériel, etc.

Toutes ces réalités démontrent un besoin de recherche sur la cavitation afin de mieux comprendre les mécanismes d'apparition et disparition de ce phénomène et ainsi fournir les

outils et moyens capables de prédire le comportement des écoulements cavitants. Ces outils serviront ensuite à améliorer la conception des équipements et le contrôle des écoulements cavitants [7].

## **1.5 . Synthèse bibliographique :**

### **De la Cruz-Ávila, M 2022 [8] :**

Le travail vise à évaluer numériquement différentes configurations d'injection pour l'analyse du comportement et de l'évolution d'un écoulement diphasique à travers une conduite en forme de Y décalée. Pour minimiser l'agglomération entre les entrées, les zones d'injection sont espacées, évitant les zones avec des tourbillons ou des remous dus à une forte turbulence. Six scénarios d'entrée ont été examinés en fonction des données expérimentales du système d'injection. Les résultats montrent des variations significatives car le fluide principal développe un tourbillon au centre de la conduite. Cela se produit immédiatement après la zone d'alimentation des phases en raison de la phase d'huile qui présente un débordement partiel de la conduite, même dans la zone d'injection d'eau. De plus, la configuration d'alimentation joue un rôle important dans le développement de l'écoulement principal. Ainsi, de nombreux schémas d'écoulement peuvent être obtenus en fonction de la confluence des phases provenant du système d'alimentation. Les vitesses d'interface confirment le processus de transition et le développement des schémas d'écoulement, qui sont influencés par les vitesses des phases décrivant les premières étapes des trois schémas d'écoulement formés lors de la confluence des fluides. Enfin, une importance substantielle est accordée au processus de confluence, soulignant la nécessité de faire preuve de prudence lors de la sélection du système d'alimentation pour ce type de conduite en forme de Y afin d'obtenir un mélange plus homogène, que ce soit pour des émulsions étroites, moyennes ou larges.

### **Linlin Geng (2020) [9] :**

Une étude numérique de l'agressivité érosive de la cavitation instable au bord d'attaque, basée sur l'approche du bilan énergétique, a été réalisée pour déterminer les principaux mécanismes de dommages et l'influence de la vitesse de l'écoulement en amont. Une approche systématique a permis de déterminer l'influence de plusieurs paramètres sur la répartition spatiale et temporelle des résultats d'érosion, comprenant la sélection du modèle de cavitation et la pression d'effondrement. En particulier, les modèles de cavitation de Zwart, Sauer et Kunz ont été comparés, ainsi que l'utilisation de valeurs de pression instantanée par rapport à des valeurs moyennes. Les résultats numériques ont été comparés à une série de résultats expérimentaux obtenus à partir de tests de piquage sur des échantillons en cuivre et en acier

inoxydable. Plusieurs indicateurs d'érosion par cavitation ont été définis et leur précision pour prédire les observations expérimentales a été évaluée et confirmée lors de l'utilisation d'un niveau seuil de dommages dépendant du matériau. En résumé, l'utilisation des niveaux de pression moyenne pendant un nombre suffisant de cycles de détachement simulés, combinée au modèle de cavitation de Sauer, sont les paramètres recommandés pour obtenir des résultats fiables qui reproduisent les principaux mécanismes d'érosion observés dans la cavitation instable. De plus, les indicateurs d'érosion proposés suivent une loi de puissance en fonction de la vitesse de l'écoulement en amont, avec des exposants compris entre 3 et 5 selon leur définition.

**Léon Malan (2017) [10] :**

Cette étude est basée sur la méthode du Volume-Of-Fluid (VOF), initialement créée par Hirt et Nicols [30]. Cette méthode a gagné en popularité, surtout lorsqu'elle est utilisée avec des techniques d'advection géométrique couplées à une reconstruction plane de l'interface [14, 89]. L'objectif de la première partie de ce travail est d'étudier l'hydrodynamique de la cavitation isotherme dans de grands nuages de bulles, qui proviennent d'une étude plus large de micro-écaillage [61], menée par le CEA français. Une méthode pour traiter les cavités de vapeur à variation de volume, ou pores, a été formulée et implémentée dans un code existant, PARIS. L'écoulement est idéalisé en supposant un liquide non visqueux, des effets thermiques négligeables et une pression de vapeur nulle. Une nouvelle étude de l'interaction des nuages de bulles dans un liquide en expansion utilisant une simulation numérique directe ou détaillée est présentée. Les résultats de la simulation révèlent une compétition des pores, qui est caractérisée par le nombre de Weber dans l'écoulement. Dans la deuxième partie de l'étude, les équations gouvernantes sont étendues pour décrire un écoulement incompressible avec changement de phase [79]. La description du travail commence par la dérivation des équations gouvernantes. Ensuite, une nouvelle méthode de solution du VOF basée sur la géométrie est proposée. Dans cette méthode, une nouvelle façon d'advection de la fonction VOF est inventée, qui traite à la fois la conservation de la masse et de l'énergie sous forme conservatrice. Les nouvelles techniques incluent l'advection de l'interface dans un champ de vitesse discontinu. Les algorithmes proposés sont cohérents et élégants, nécessitant des modifications minimales du code existant. Des expériences numériques démontrent précision, robustesse et généralité. Il s'agit d'un développement fondamental significatif dans l'utilisation des méthodes VOF pour modéliser le changement de phase.

**REBUFA, J. (2016) [11] :**

Cette étude vise à améliorer les modèles numériques liés à l'impact de l'état de surface des paliers hydrodynamiques sur la dynamique de ligne d'arbre. La méthode d'homogénéisation multi-échelles a été utilisée à cet effet dans un algorithme multi-physiques

pour décrire l'interaction entre la structure flexible en rotation et les films fluides des supports de lubrification. Différents modèles ont été utilisés pour prendre en compte la présence de zone de rupture de film lubrifiant. Des méthodologies non-linéaires fréquentielles ont été mises en place afin de permettre l'étude paramétrique des solutions périodiques d'un tel système et de leur stabilité. Afin de confronter ce modèle complexe à la réalité, un banc d'essai miniature a également été conçu. Différents échantillons présentant des états de surface modifiés par ablation à l'aide de LASER femto-seconde ont été testés. L'étude expérimentale a permis de vérifier certaines tendances prévues par la simulation. Des améliorations des performances des paliers hydrodynamiques par rapport aux vibrations auto-entretenues du système ont été démontrées pour certaines textures. En revanche toutes les améliorations ne sont pas prédites par les algorithmes d'homogénéisation multi-échelles. La présence de recirculation dans les aspérités du motif a été mise en évidence à partir de la résolution locale des équations de Navier-Stokes. Ce résultat participe à la remise en question des hypothèses classiques utilisées en texturation, et peut justifier les améliorations obtenues expérimentalement avec les paliers texturés.

**Lamyaa BARZEM. (2011) [12] :**

Ces dernières décennies, de nombreux modèles de paliers à ailettes ont été développés. Cependant, de nos jours, ces modèles ne sont pas suffisamment précis pour prédire la réponse du rotor en présence de non-linéarités. Il est essentiel pour les développements futurs de contrôler les instabilités dues au comportement non linéaire afin de quantifier la dissipation d'énergie dans les paliers. À l'aide d'une approche vibrationnelle, la structure flexible est modélisée comme un milieu mince soumis à une pression de fluide compressible, isotherme et en régime laminaire puis turbulent. Le modèle est construit en utilisant la méthode des éléments finis pour la réponse des ailettes. Le frottement interne à sec est pris en compte avec la loi de Coulomb et la méthode lagrangienne mise à jour. Le modèle de la structure est couplé à l'équation de Reynolds pour calculer les mouvements du rotor, grâce au principe fondamental de la dynamique (PFD). Ce travail est réalisé, tout d'abord, pour mettre en évidence l'influence de l'approche de la structure mince sur le comportement du rotor et sur la pression du champ. Le lien entre les déflexions des bosses et le frottement à sec est établi. Le flambage de la structure est deux fois plus élevé en raison du phénomène de frottement entre les feuilles et de la dissipation d'énergie. Le deuxième objectif est d'identifier les fréquences sous-synchrones afin d'établir la pertinence du nouveau modèle d'ailettes pour les études non linéaires et d'instabilités.



# Positionnement du problème et formulation mathématique

## 2.1 Introduction :

L'étude de l'effet de la cavitation sur le comportement de l'écoulement dans un palier cylindrique lisse, composé d'un arbre en rotation et d'un coussinet fixe, est d'une importance capitale pour comprendre les phénomènes complexes qui se produisent dans ce système. La cavitation se réfère à la formation de bulles de vapeur ou de cavités dans un fluide lorsque la pression locale devient inférieure à sa pression de vapeur.

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la région où le film mince visqueux se forme entre l'arbre et le coussinet, en considérant l'effet de la rotation de l'arbre sur l'écoulement. Le mouvement de rotation de l'arbre entraîne l'accélération des particules fluides dans cet espace, créant ainsi un gradient de pression. La vitesse de rotation de l'arbre et l'entrefer entre l'arbre et le coussinet sont variés afin de déterminer les variables qui régissent l'écoulement, telles que la pression et la vitesse.

## 2.2 Description du problème :

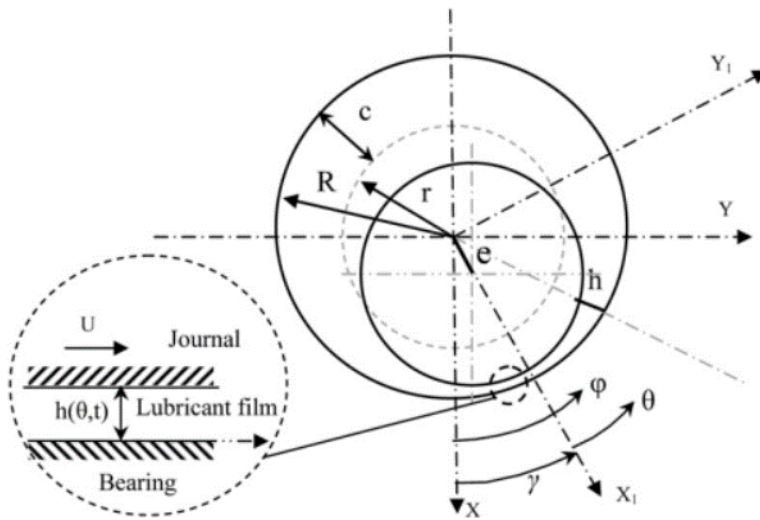
Cette étude se concentre sur l'écoulement d'un film mince visqueux entre un arbre et un coussinet de Rayon  $R$ , à une distance proche  $h_0$ . Le but de cette étude est d'analyser l'écoulement dans deux parties distinctes. La première partie concerne le problème étudié en l'absence de cavitation, tandis que la deuxième partie étudie l'effet de la pression en imposant des conditions limites périodiques.

L'arbre est en rotation avec des vitesses de rotation de [2250, 1500, 1200 et 500 tours/minute], et l'excentricité varie entre [0.6, 0.8 et 0.4]. Les dimensions et les paramètres du problème sont basés sur une étude expérimentale de référence.

Le problème physique est décrit par les équations aux dérivées partielles de continuité et de quantités de mouvement, connues sous le nom d'équations de Navier-Stokes, ainsi que par les

conditions aux limites appropriées. Ces équations sont formulées en coordonnées cartésiennes, ce qui facilite l'analyse des résultats et les calculs.

En résumé, cette étude vise à analyser l'écoulement d'un film mince visqueux entre un arbre et un coussinet dans différentes configurations. En étudiant le cas sans cavitation et en examinant l'effet de la pression avec des conditions limites périodiques, nous cherchons à mieux comprendre les caractéristiques de l'écoulement, telles que les variations de pression et les champs de vitesse.



**Figure 2.1 Palier lisse a l'états de fonctionnement**

### Maillage sous gambit V.6.3 :

La géométrie de notre travail a été réalisée avec précision sous Gambit, la décision a été prise d'adopter un maillage de 30\*3150. Cette configuration a conduit à la création de 63 000 nœuds.

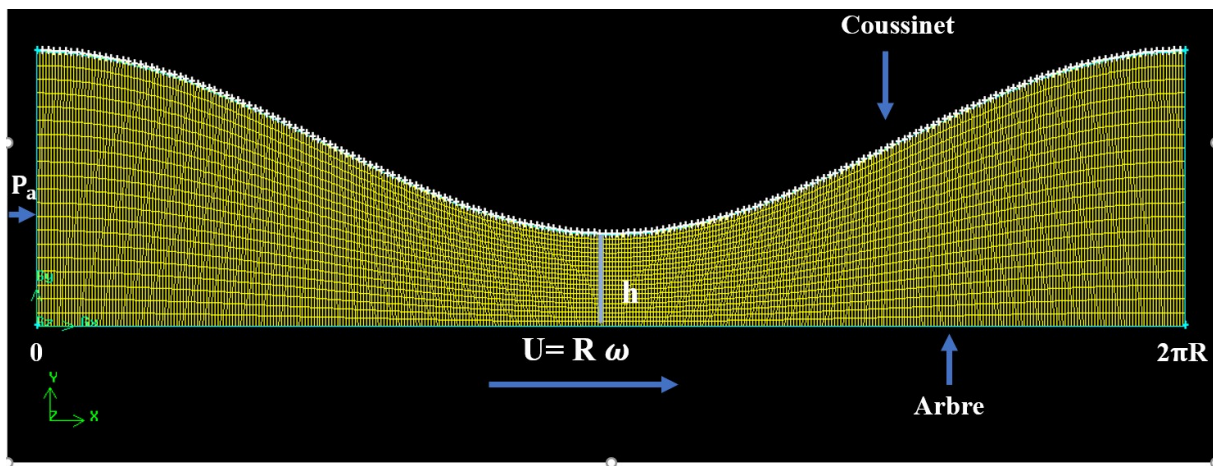


Figure 2-3 Schéma d'un palier développé réalisé avec Gambit

### 2.3 Equations gouvernantes :

Les équations régissant le problème sont les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Pour une formulation simple du problème, nous allons supposer quelques hypothèses.

#### 2.3.1 Loi de comportement pour un fluide newtonien incompressible :

$$\overline{\overline{\sigma}} = -p\overline{\overline{I}} + \overline{\overline{\tau}} \quad (2.1)$$

$\overline{\overline{\sigma}}$  : représente tenseur des contraintes

$-p\overline{\overline{I}}$  : représente la pression hydrostatique

$\overline{\overline{\tau}} = 2\mu\overline{\overline{D}}$  : désigne le tenseur des contraintes visqueuse (déviateur des contraintes)

Avec  $\overline{\overline{D}}$  : taux de déformation.

Dans ce cas puisque :

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right), \text{ on aura } \tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$$

$$\bar{\tau} = \mu \left[ (\bar{\nabla} \vec{v}) + (\bar{\nabla} \vec{v})^t \right] \quad (2.2)$$

$$\text{div}(\bar{\tau}) = \mu \Delta \vec{v} \quad (2.3)$$

$\Delta$  : Laplacien

### 2.3.2 Equation de Conservation de quantité de mouvement :

$$\rho \left[ \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\bar{\nabla} \vec{V}) \vec{V} \right] = \bar{\nabla} \bar{\sigma} + \vec{f}_v \quad (2.4)$$

$\rho$  : la masse volumique

$\vec{f}_v$  : Force volumique

1. L'équation de conservation de la masse pour un fluide incompressible :

$$(\bar{\nabla} \vec{V}) = 0 \quad (2.5)$$

### 2.3.3 Hypothèses simplificatrices :

- L'écoulement est permanent
- L'écoulement est turbulent
- L'écoulement est bidimensionnel
- L'écoulement est incompressible
- Le travail des forces visqueuses dans l'équation de l'énergie est négligeable.

Les propriétés physiques et thermodynamiques du fluide sont considérées constantes.

Compte tenu de ces hypothèses, les équations de base régissant l'écoulement sont données respectivement par :

## 2.4 Equation simplifiées

- **Equation de continuité :**

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{2.6}$$

- **Equation de quantité de mouvement suivant x :**

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \tag{2.7}$$

- **Equation de quantité de mouvement suivant y :**

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \tag{2.8}$$

### 2.4.1 Condition aux limites :

$x = 0$	$0 \leq y \leq cte$	$P = P_0$	Entrée
$y = 0$	$0 \leq x \leq 2\pi R$	$u = U = \omega R$ $v = 0$	Arbre
$y = h(x)$	$0 \leq x \leq 2\pi R$	$u = 0$ $v = 0$	Coussinet
$x = 2\pi R$	$0 \leq y \leq Cte$	$P = P_0$	Sortie

**Tableau (2.1) : condition aux limites**

## 2.5 Equation moyennée :

Pour résoudre le système d'équations (II.1), (II.2), (II.3) et en régime turbulent une approche de décomposition de variables sera utilisée. Elle consiste à décomposer les grandeurs suivantes (u, v, p et T) intervenant dans les équations de Navier-Stokes en une grandeur moyenne et une fluctuation sous la forme

**Propriétés :**

$$\phi = \bar{\phi} + \phi'$$

$$\bar{\phi}' = 0$$

$$\overline{\bar{\phi}} = \bar{\phi}$$

$$\overline{f + \phi} = \bar{f} + \bar{\phi}$$

$$\overline{f \cdot \phi} = \bar{f} \cdot \bar{\phi} + \overline{f' \cdot \phi'}$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} = \frac{\partial \bar{\phi}}{\partial x}$$

Ou  $f$  et  $\phi$  représente P, u, v.

Le système d'équation (II.1), (II.2), (II.3) et (II.4) devient :

$$\bullet \quad \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = 0 \tag{2.9}$$

$$\bullet \quad \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \overline{u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \overline{u'v'} \right) \tag{2.10}$$

$$\bullet \quad \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \overline{u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \overline{v'v'} \right) \tag{2.11}$$

Le symbole ( $\bar{\quad}$ ) désigne une grandeur moyenne et ( $'$ ) désigne la fluctuation de la grandeur instantanée

Les équations moyennées font apparaître des termes de corrélations doubles des fluctuations. Ils proviennent de la non-linéarité des équations de bilans. Ces termes, appelés tensions de Reynolds, traduisent l'effet de la turbulence sur l'évolution du mouvement moyen et rendent les systèmes d'équations ouverts (plus d'inconnues que de relations). C'est la conséquence de la prise de moyenne des équations instantanées qui introduit une perte d'information. Se pose alors le problème de la fermeture du système, c'est-à-dire du lien entre les corrélations doubles et le champ moyen.

Il existe plusieurs modèles de fermeture, Soit à considérer le modèle k-epsilon.

## 2.6 Model K-epsilon ( $k - \varepsilon$ ) realizable :

Le modèle de turbulence K-epsilon ( $k - \varepsilon$ ) est le modèle le plus couramment utilisé dans la dynamique des fluides numérique (CFD) pour simuler les caractéristiques de l'écoulement moyen dans des conditions d'écoulement turbulent. Il s'agit d'un modèle à deux équations qui donne une description générale de la turbulence au moyen de deux équations de transport (équations aux dérivées partielles, EDP). À l'origine, le modèle  $k - \varepsilon$  visait à améliorer le modèle de la longueur de mélange et à trouver une alternative à la prescription algébrique des échelles de longueur turbulentes dans les écoulements de complexité moyenne à élever.

- La première variable transportée est l'énergie cinétique turbulente ( $k$ ).
- La deuxième variable transportée est le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ( $\varepsilon$ ).

### 2.6.1 Les équations de transport de k-epsilon realizable :

Les équations de transport modélisées pour  $k$  et  $\varepsilon$  dans le modèle ( $k - \varepsilon$ ) realizable sont :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (2.12)$$

Et :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_b + S_\varepsilon \quad (2.13)$$

Où :

$$C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\varepsilon}$$

- $G_b$  : la production de l'énergie cinétique de la turbulence due à la flottabilité
- $Y_M$  : contribution of the fluctuating dilatation in compressible turbulence to the overall dissipation rate
- $C_1, C_{2\varepsilon}$  : constantes
- $\sigma_k$  : les nombres de Prandtl turbulents  $k$
- $\sigma_\varepsilon$  : les nombres de Prandtl turbulents  $\varepsilon$
- $k$  : l'énergie cinétique turbulente
- $\varepsilon$  : le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente
- $S_k, S_\varepsilon$  : Termes sources définis par les utilisateurs

### 2.6.2 Modélisation de la viscosité turbulente :

Comme dans d'autres modèles ( $k - \varepsilon$ ), la viscosité turbulente est calculée à partir de :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.14)$$

La différence entre le modèle K- $\varepsilon$  réalisable et les modèles K- $\varepsilon$  standard et RNG est que  $C_\mu$  n'est plus constant. ( $k - \varepsilon$ )modélise est que n'est plus constant. Il est calculé à partir de :

Ou 
$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (2.15)$$

Et 
$$U^* = \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (2.16)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ij}\omega_k \quad (2.17)$$

$$\Omega_{ij} = \tilde{\Omega}_{ij} + \varepsilon_{ij}\omega_k \quad (2.18)$$

Où  $\Omega_{ij}$  est le tenseur moyen de la vitesse de rotation vu dans un repère de référence en rotation avec la vitesse angulaire  $\omega_k$ . Les constantes du modèle  $A_0$  et  $A_s$  sont donnés par :

$$A_0 = 4.04 \quad A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (2.19)$$

Où

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W) \quad (2.20)$$

$$W = \frac{S_{ij} + S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3} \quad (2.21)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (2.22)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.23)$$



**2.6.3 Equation d'énergie cinétique turbulente**

$$\bar{U} \frac{\partial k}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \bar{k}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \bar{k}}{\partial y} \right) + P_k - \varepsilon \quad (2.24)$$

**2.6.4 Equation du taux de dissipation d'énergie cinétique turbulente**

$$\bar{U} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + \bar{V} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \left( \nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + (C_{\varepsilon 1} (P_k + C_{\varepsilon 3}) C_{\varepsilon 2} \varepsilon) \frac{\varepsilon}{k} \quad (2.25)$$

$$P_k = \left[ \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (2.26)$$

Et

$$G_k = \frac{\nu_t}{\sigma_t} g \beta \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \quad (2.27)$$

**2.6.5 Les constantes du modèle :**

$C_{1\varepsilon}$	$C_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
<b>1,44</b>	<b>1,9</b>	<b>1</b>	<b>1,2</b>

**Tab (2.2) : les constantes du modèle ( $k-\varepsilon$ ) realizable**

# Résultats & Discussions

## 3.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats obtenus à partir de ces simulations numériques, qui concernent la distribution de la pression statique, la pression dynamique et la vitesse moyenne, l'évaluation du coefficient de pression et la turbulence. L'objectif principal de ces simulations est d'étudier le phénomène de cavitation.

Les résultats numériques sont présentés sous forme graphique, permettant ainsi une visualisation claire et compréhensible des données. Les distributions de la pression statique sont représentées sur des cartes de couleur ou des profils de pression le long des surfaces d'intérêt. Cela nous permet de visualiser les variations de pression dans le domaine d'étude et d'identifier les zones de basse pression qui sont associées à la cavitation.

De plus, les résultats incluent la représentation graphique de la vitesse moyenne dans le système, ce qui nous permet de mieux comprendre la dynamique de l'écoulement et ses interactions avec la cavitation.

- **Les propriétés du lubrifiant :**

La masse volumique	$853 \text{ kg.m}^{-3}$
Pression d'alimentation	$450000 \text{ Pa}$
Pression de saturation du lubrifiant	$130 \text{ Pa}$
La viscosité du lubrifiant	$0.027 \text{ Pa.s}$

### 3.2 Représentation de champs de pression :

#### 3.2.1 Comparaison :

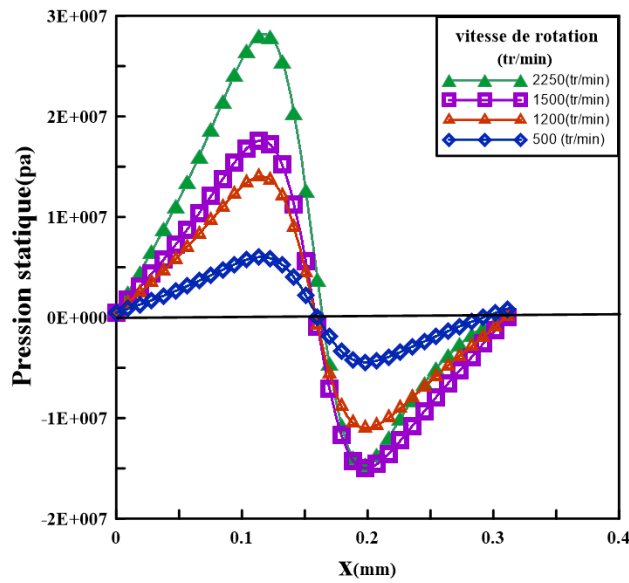


Figure 3-2 distribution de la pression statique sur le coussinet sans effet de cavitation

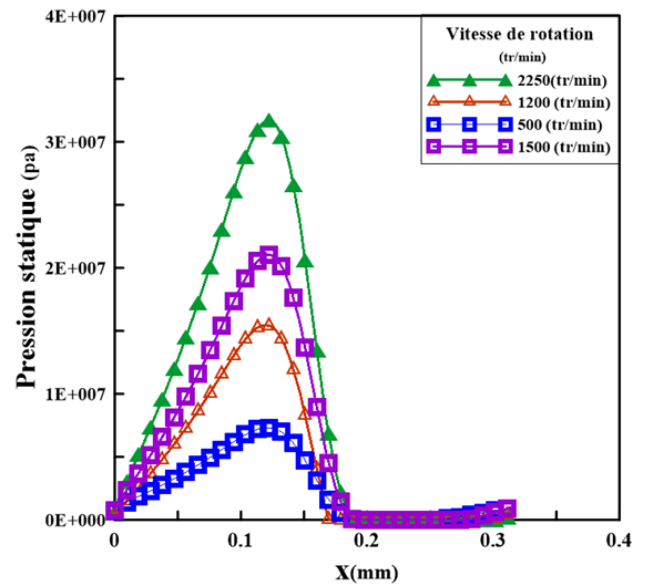


Figure 3-1 distribution de la pression statique sur le coussinet avec effet de cavitation a excentricité = 0.4 avec différentes vitesses

Dans le premier cas (Figure 3.1) là où il y'a pas effet de cavitation, on remarque une distribution uniforme de la pression statique tous au long du coussinet.

En revanche dans la deuxième cas (Figure 3.2), on a remarqué une distribution inégale de la pression statique sur le coussinet.

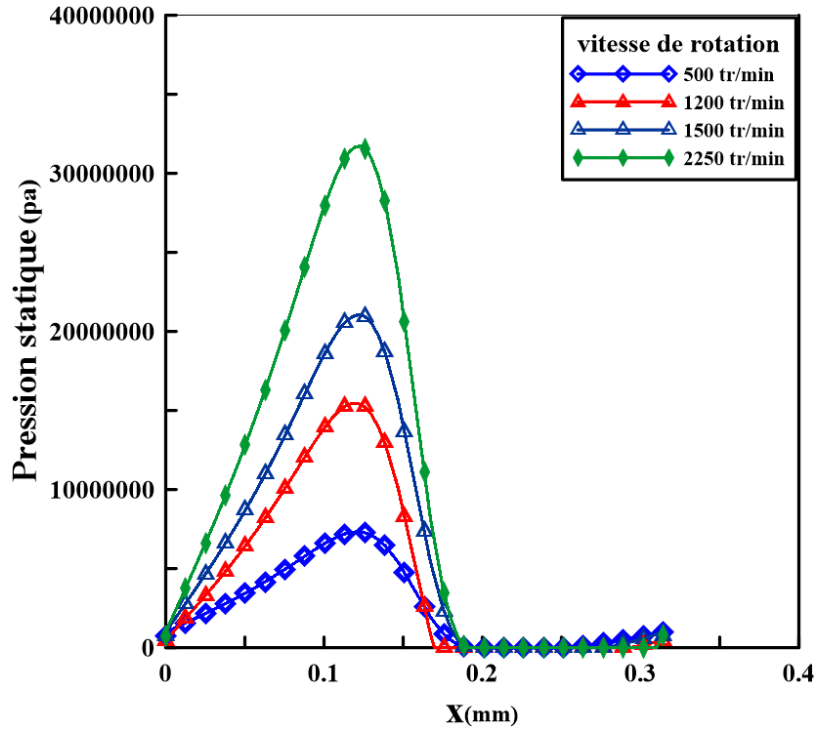


Figure 3-3 Distribution de la pression statique sur le coussinet  $e = 0.4$  avec différentes vitesses

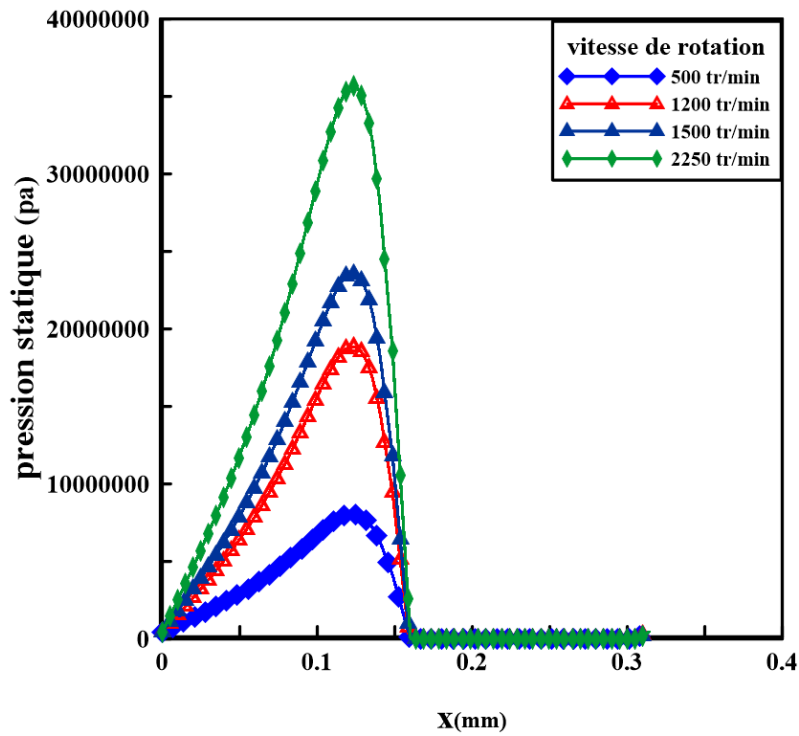


Figure 3-4 Distribution de la pression statique sur le coussinet  $e = 0.6$  avec différentes vitesses.

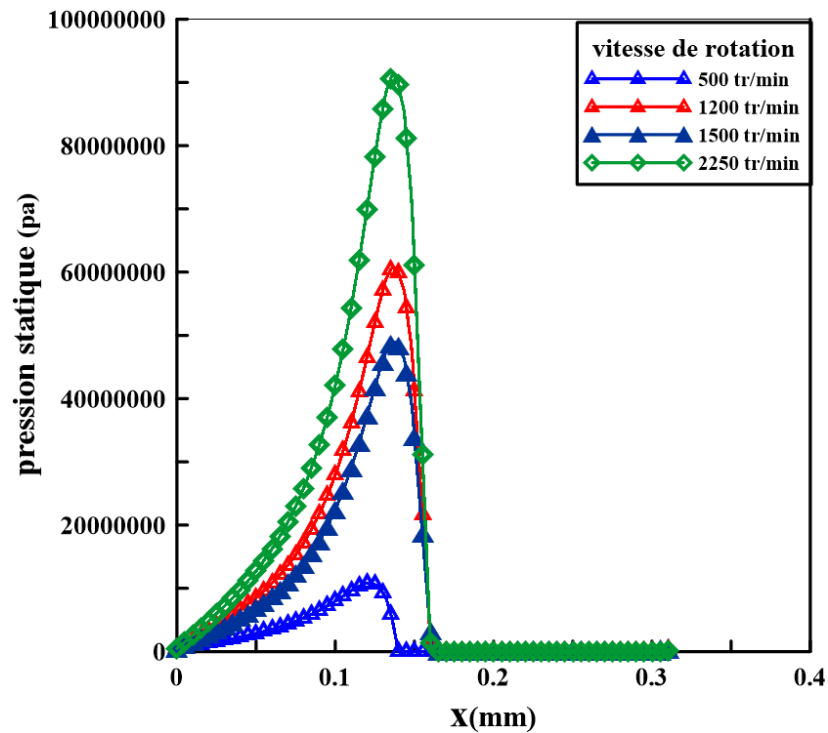


Figure 3-5 distribution de la pression statique sur le coussinet  $e=0.8$  avec différentes vitesses

Les trois figures (figure3.3, figure3.4, figure3.5), nous montrent la distribution de la pression statique au niveau du coussinet.

On constate que dans les trois cas, qu'il y a une dépression significative de la pression statique au niveau de l'entrefer (l'épaisseur minimal du film lubrifiant) à  $X=0.157 \text{ mm}$  c'est là où le phénomène de la cavitation fait apparition ( $P_{\text{statique}} = P_v$ ). La cavitation a tendance à augmenter avec une excentricité plus élevée, La cavitation est plus marquée à une excentricité de 0.8 par rapport à 0.6 et 0.4.

3.2.2 Représentation de la pression dynamique :

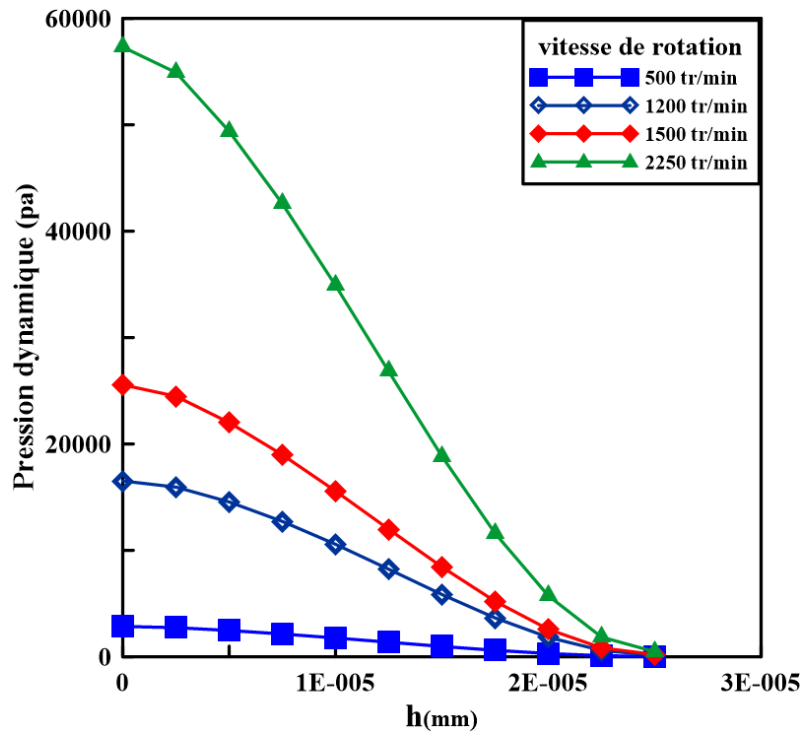


Figure 3-6 La variation de la pression dynamique selon h a e= 0.4.

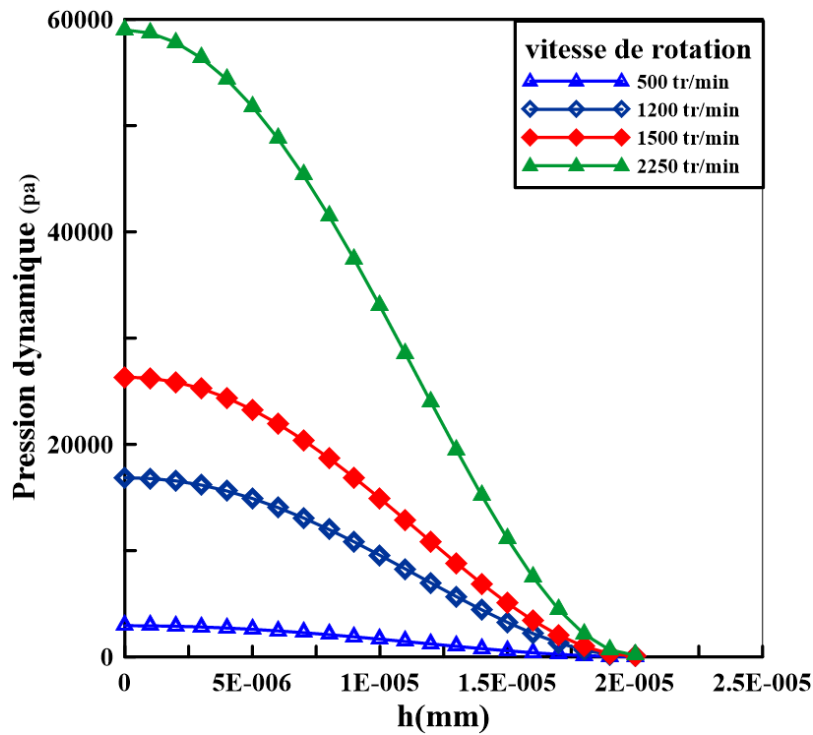


Figure 3-7 variation de la pression dynamique selon h a = 0.6.

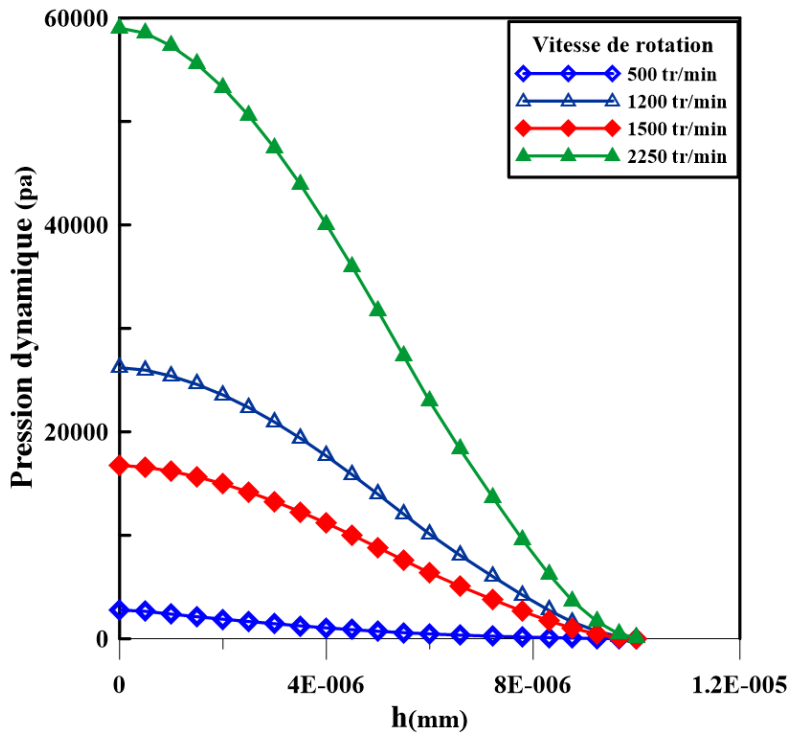


Figure 3-8 variation de la pression dynamique selon  $h$  a  $e=0.8$ .

Les trois figures présentes nous représentent, la variation de la pression dynamique selon  $h$  (l'épaisseur du film) à l'entrefer.

Typiquement dans les trois cas [ $\varepsilon=0.8, 0.6, 0.4$ ] la vitesse d'écoulement est plus faible et la pression dynamique est plus élevée à l'entrée. En avançant vers la sortie de l'entrefer, la vitesse d'écoulement augmente, ce qui entraîne une diminution de la pression dynamique.

### 3.3 Représentation de la vitesse U :

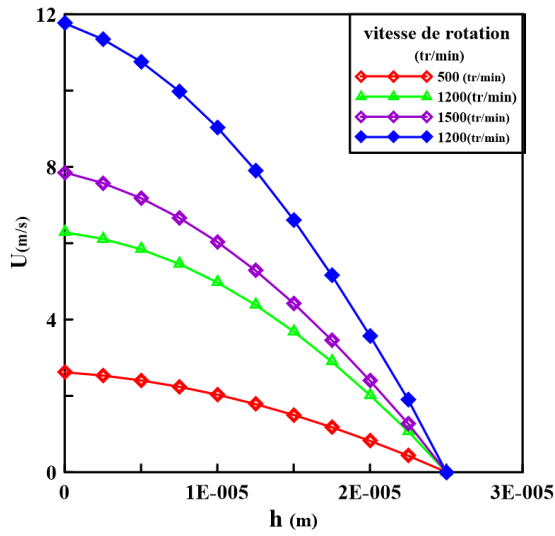


Figure 3-10 distribution de la vitesse adimensionnelle selon X

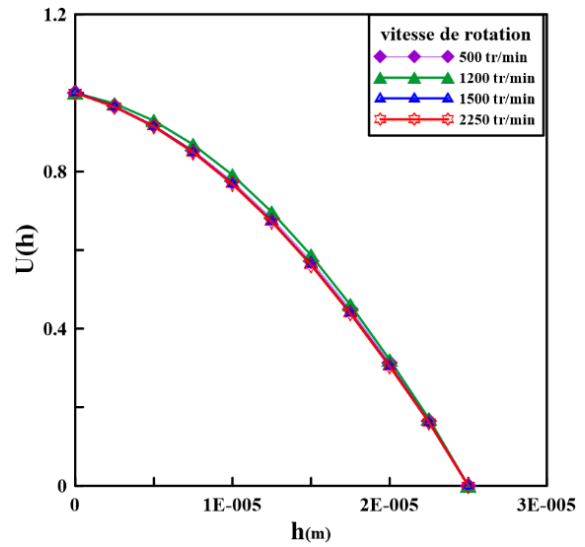


Figure 3-9 distribution de la vitesse adimensionnelle selon X a  $e=0.4$

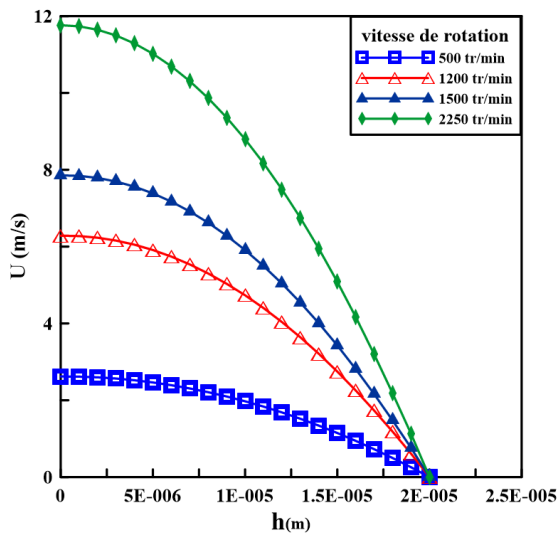


Figure 3-12 distribution de la vitesse adimensionnelle selon X a  $e=0.6$

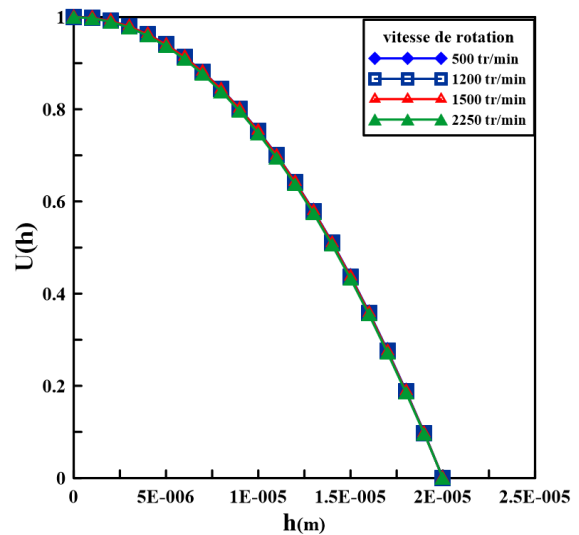


Figure 3-11 distribution de la vitesse adimensionnelle selon X a  $e=0.6$



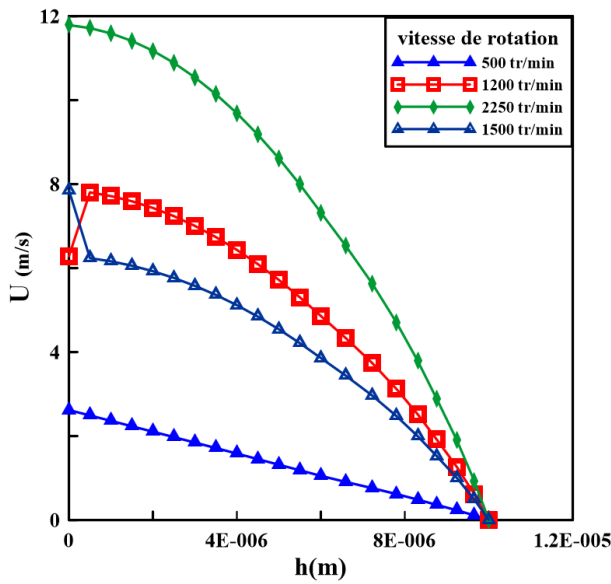


Figure 3-14 distribution de la vitesse dimensionnelle selon X a  $\epsilon=0.8$

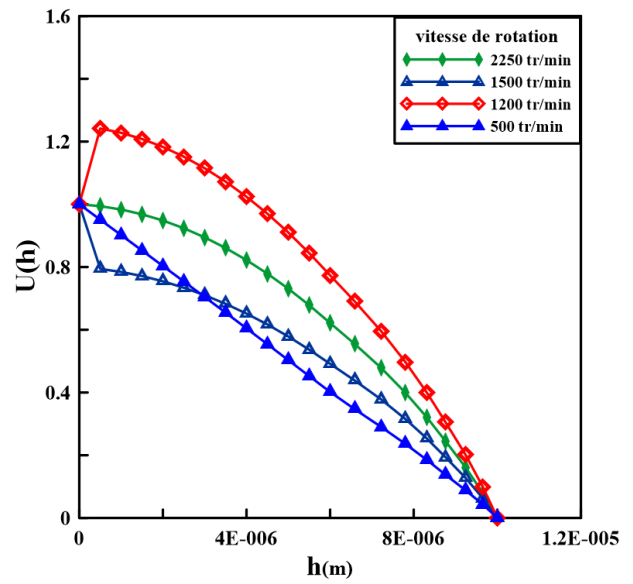


Figure 3-13 Figure 3.12 distribution de la vitesse adimensionnelle selon X a  $\epsilon=0.8$

- $\frac{dU}{dh} = U(h)$

La variation de la vitesse  $U(h)$  selon  $X$  peut être utilisé pour étudier le profil de vitesse de l'écoulement entre les deux surfaces. Elle peut même nous aider à caractériser le type de l'écoulement.

Comme on l'on remarque dans les figures ci présentes prenons par exemple la (figure 3.7) qui caractérise la vitesse  $U(h)$  au niveau de l'entrefer à  $X_1=X_0=0.1570759$ . On remarque que pour différentes vitesses de rotation on obtient des formes paraboliques qui font référence à l'écoulement de couette  $P_2 < P_1$ .

Le même profil c'est reproduit dans la figure qui suit (figure 3.9).

Sauf pour dans la (figure 3.11). On remarque des profils de vitesse différents par rapport à ceux quand vient de discuter, prenons par exemple le profil à vitesse de rotation 500

tr/min, nous donne un écoulement de couette avec un gradient de pression nul  $\frac{dp}{dx} = 0$ ,

$P_1 = P_2$ .

Dans les autres cas à 1200 tr/min et 1500 tr/min, la forme du profil n'est pas uniforme cela peut signifier à une présence de turbulence dans cette zone.

### 3.4 Représentation de la turbulence :

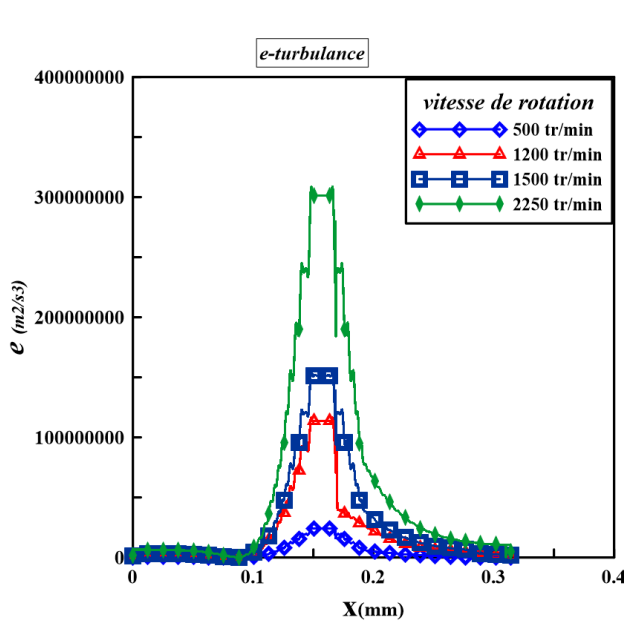


Figure 3-16 distribution de la turbulence

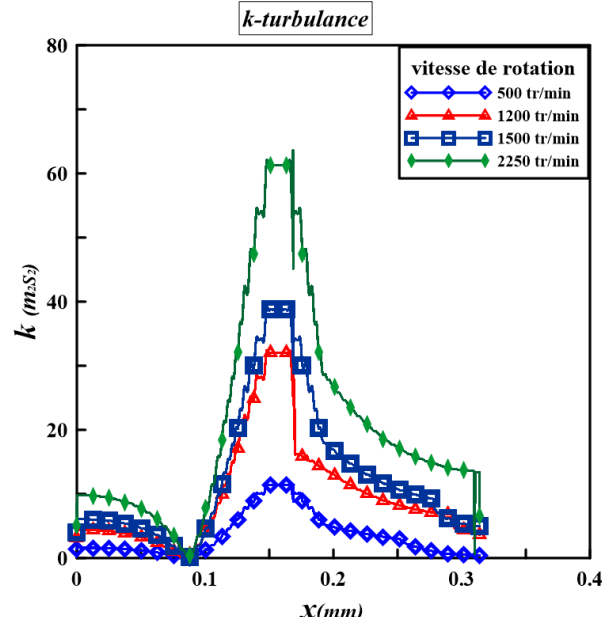


Figure 3-15 distribution de la turbulence

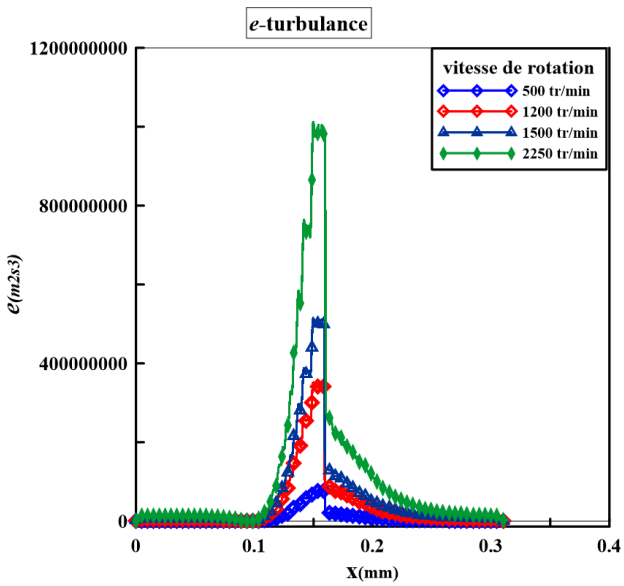


Figure 3-18 distribution de la turbulence

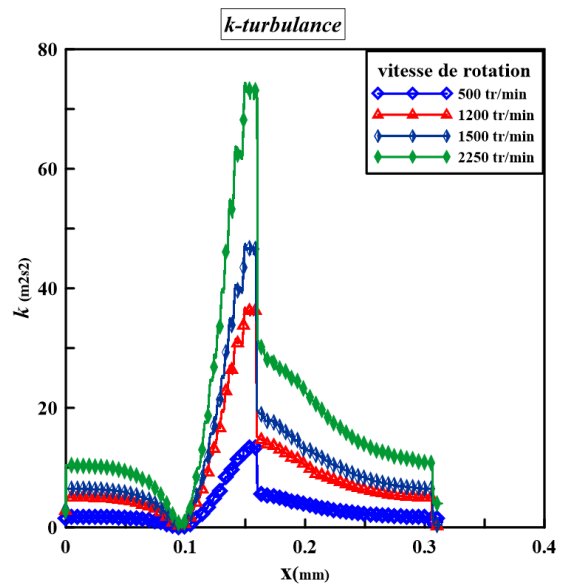


Figure 3-17 distribution de la turbulence

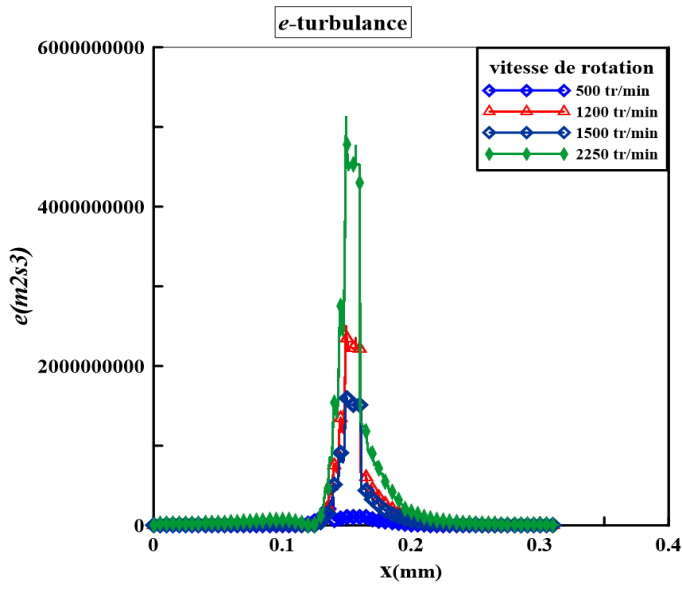


Figure 3-19 Distrubution de turbulence

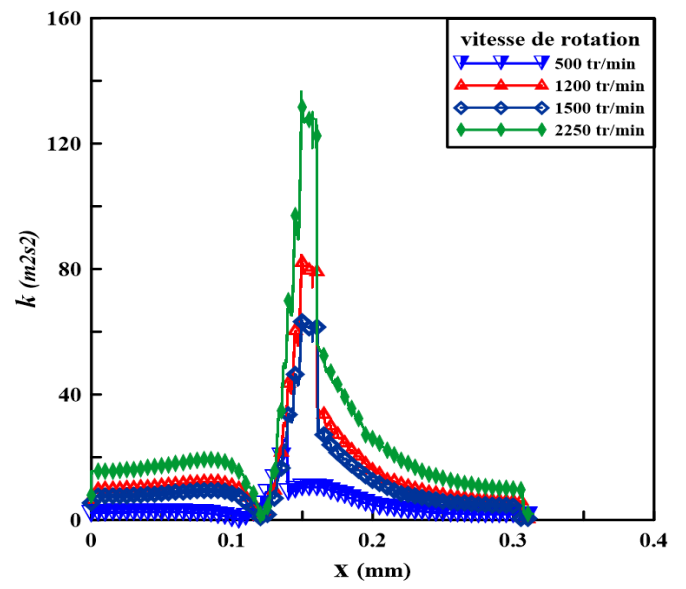


Figure 3-20 distrubution de la turbulence

#### 4. Contours :

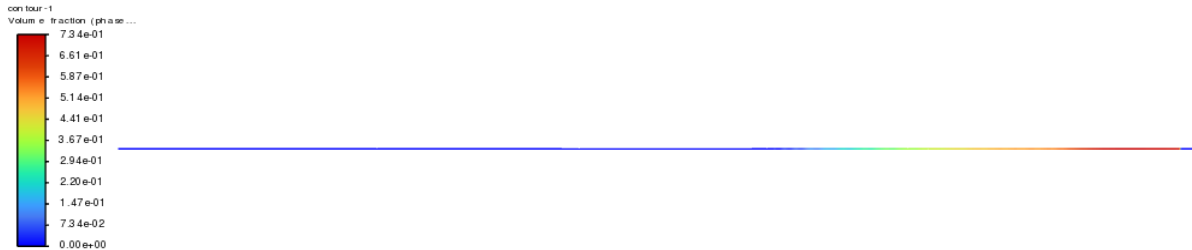


Figure 3-19 Contours de phases pour une excentricité de 0,4 à une vitesse de 500trs/min

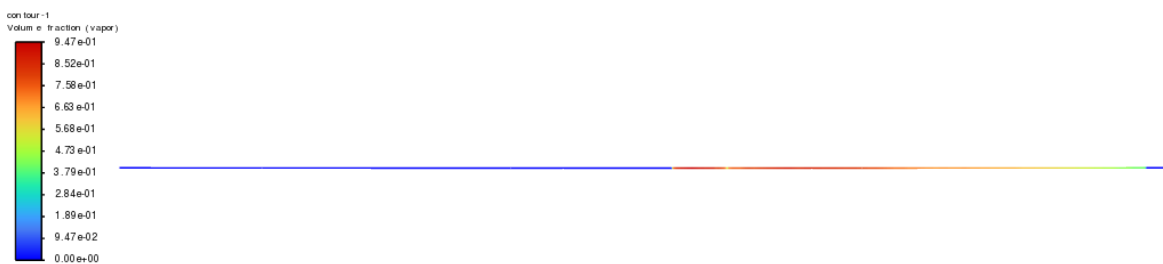


Figure 3-20 Contours de phases pour une excentricité de 0,8 à une vitesse de 2250trs/min

## **Conclusion générale**

En résumé, la cavitation d'un lubrifiant dans un palier est un phénomène complexe qui est influencé par l'excentricité et la vitesse de rotation de l'arbre, ainsi que la formation de bulles de gaz. Lorsque la pression locale devient inférieure ou égale à la pression de vapeur du lubrifiant, des bulles de gaz se forment, ce qui compromet la capacité du lubrifiant à maintenir une bonne lubrification entre les surfaces en contact. Cela peut entraîner une usure prématurée, des vibrations et des dommages au palier.

La presentitude consiste à simuler un écoulement avec cavitation dans un palier lisse en utilisant logiciel fluent. On a abouti aux résultats suivants :

L'excentricité de l'arbre crée des variations de pression dans le palier, favorisant ou aggravant la cavitation. Une excentricité élevée augmente les pressions locales et diminue la capacité du lubrifiant à assurer une lubrification adéquate.

La vitesse de rotation de l'arbre joue également un rôle important. À des vitesses élevées, les forces centrifuges augmentent, ce qui peut augmenter la pression dynamique dans le palier. Cependant, à des vitesses encore plus élevées, la formation de bulles de gaz peut s'intensifier en raison de la baisse accrue de la pression statique.

## **Tables des références :**

- [1] : Jean fren. (1990). *Lubrification hydrodynamique : palier et butee*. Paris : Eyrolles.
- [2] : Takfarines Ait-Ali. Modélisation de la cavitation par une approche à interface diffuse avec prise en compte de la tension de surface. Mécanique [physics.med-ph]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2015. Français.
- [3] : Tran, T. D. (2015). Études des modèles de cavitation pour la simulation des écoulements cavitants stationnaires et instationnaires [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
- [4] : Jean-Pierre FRANC et Jean-Marie MICHEL.2003. FUNDAMENTALS OF CAVITATION. Grenoble Sciences.
- [5] : PERRET René. (S. d.). La cavitation : une introduction. Encyclopedie de l'énergie.
- [6]: Said AIT SAID Mounir BENAMARA. (2017). Influence de la Viscoélasticité dans la Cavitation en Milieu Confiné. UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI.
- [7] : Tran, T. D. (2015). Études des modèles de cavitation pour la simulation des écoulements cavitants stationnaires et instationnaires [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.