

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur  
Et de la recherche scientifique

UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Installation énergétique et turbomachine

Par :

**BAZIZI Mahrez**

**IKHLEF Yacine**

**Thème**

---

**Simulation d'un film liquide sur une paroi cylindrique**

---

Soutenu le 10/10/2021 devant le jury composé de:

Mr. DJEMA AMAR

Président

Mr. NAITBOUDA Faïçal

Rapporteur

Mr. ALLOUCHE Moussa

Examineur

**Année Universitaire 2020-2021**

## **Remerciements**

Toute la gratitude et le merci à Dieu notre créateur qui nous a donné la force pour effectuer et achever ce travail. Ainsi nos parents qui nous aident.

Nous tenons à remercier en premier lieu notre encadreur Mr : *F. Nait Bouda* Pour avoir accepté de diriger notre travail, Pour ses précieux conseils, pour son esprit d'ouverture et sa disponibilité. Grâce à lui, notre travail s'est déroulé.

Nous remercions également Mr : *Mahdaoui Hamza* pour son aide et ses conseils. Comme nous tenons à remercier les membres de jury d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Enfin nos remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation à l'université.

## **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail*

*A ma très chère mère, source de tendresse*

*A mon très cher père Mohamed, qui m'encourage*

*Dans les instants délicats*

*A mes chères sœurs Razika, Gabria et Sultana pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire, Que*

*ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible, Merci d'être toujours là pour moi.*

*A tous mes amis sans exception.*

**BAZIZI Mahrez**

## **Dédicaces**

*Je dédie ce modeste travail*

*A ma très chère mère, source de tendresse*

*A mon très cher père Zahir, qui m'encourage*

*Dans les instants délicats*

*A mes chers frères*

*A toute ma famille*

*A tous mes amis sans exception.*

**IKHLEF yacine**

# Sommaire

<b>Remerciements</b> .....	<b>i</b>
<b>Dédicaces</b> .....	<b>ii</b>
<b>Dédicaces</b> .....	<b>iii</b>
<b>Sommaire</b> .....	<b>iv</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>vi</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>viii</b>
<b>NOMENCLATURE</b> .....	<b>ix</b>
<b>Introduction Générale</b> .....	<b>1</b>

## Chapitre 1

<b>Généralité et étude bibliographique</b> .....	<b>3</b>
I.1. Introduction .....	3
I.2. Définition d'écoulement film liquide : .....	3
I.3. Écoulement à surface libre : .....	3
I.4. Le nombre de Reynolds.....	3
I.5. Intérêt de l'étude des films liquides : .....	4
I.5.1 Les films liquides dans les processus industriels : .....	4
I.5.2. Synthèse des Techniques de Mesure d'Epaisseur d'un Film Liquide : .....	4
I.5.3. Stabilité des films liquides .....	7
I.6. Phénomène de rupture de film .....	7
I.6.1 Mécanisme de rupture d'un film liquide statique .....	8
I.6.2. Rupture d'un film sous écoulement .....	8
I.7. Etude bibliographique .....	9
I.8. Conclusion .....	17

## Chapitre 2

<b>Formulation mathématique et position du problème</b> .....	<b>18</b>
II.1. Introduction : .....	18
II.2. Formulation de problème : .....	18

II.2.1 Hypothèse de l'étude :	19
II.3. Formulation mathématique.....	20
II.3.1.Équation de continuité.....	20
II.3.2. Equation de conservation de la mass.....	20
II.3.3. Équations de continuité et de quantité de mouvement .....	20
II.3.4. Equation de taux de présence .....	21
II.3.5.Propriétés physiques du fluide dans un volume de contrôle.....	21
II.3.6Tension superficielle.....	21
II.4 méthode numérique.....	22
II.4.1 Présentation de la méthode de VOF :	22
II.4.2 Présentation de la méthode des volumes finie :	23
II.4.3 Procédure numérique sur Fluent:	24

### Chapitre 3

<b>Résultats numériques et discussions.....</b>	<b>25</b>
III. 1. Introduction .....	25
III.2 La méthode des volumes finis :.....	26
III.3. Présentation des Logiciels :.....	26
III.3.1. Présentation du Logiciel GAMBIT :.....	26
III.2.2. Présentation du Logiciel ANSYS-Fluent :.....	27
III.3. Procédures de résolution : .....	28
III.3.1. Création de la géométrie : .....	28
III.3.2. Création de maillage : .....	29
III.4 Choix de maillage : .....	30
III.5 Résultats et discussion :.....	31
III.5.1 Profils de la hauteur : .....	31
III.5.1.1 Etude effet de temps sur le film : .....	31
III.5.2 Profils de vitesses :.....	39
III.5.2.1 Etude Effet de position :.....	39
<b>Conclusion Générale .....</b>	<b>44</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>45</b>

## Liste des figures

<b>Figure I.1:</b> (a) Schéma d'un film plan et statique, d'épaisseur $h$ et dont les interfaces s'attirent via les interactions de van der Waals, quantifiées par la pression de disjonction. (b) Si une fluctuation d'épaisseur apparaît dans le film, elle aura tendance à s'amplifier car l'attraction entre les interfaces augmente fortement quand $h$ diminue. ....	8
<b>Figure I.2:</b> Profils d'ondes obtenues par Kapitza et Kapitza en 1949 (interface eau-alcool). 10	
<b>Figure I.3:</b> Train d'onde (Binnie 1957).....	11
<b>Figure I.4:</b> Courbe neutre de Yih [12].....	13
<b>Figure I.5:</b> Variation de l'épaisseur du film le long de la conduite d'étude pour une solution d'eau- glycérine à $R = 37$ . Portalski et Clegg (1972).....	15
<b>Figure I.6:</b> Image d'évaluation du film lacrymal de manière non invasive chez un sujet sain au Keratograph 5MÒ (Oculus, Wetzlar, Allemagne). ....	16
<b>Figure I.7:</b> Image d'évaluation du film lacrymal de manière non invasive chez un patient atteint de sécheresse oculaire au Keratograph 5MÒ. ....	17
<b>Figure II.1:</b> Schéma représentant l'écoulement d'un film liquide sur une paroi cylindrique..	19
<b>Figure II.2:</b> Principe de la méthode de VOF.....	23
<b>Figure III. 1 :</b> Vue globale de GAMBIT.....	26
<b>Figure III. 2:</b> Vue globale du FLUENT.....	28
<b>Figure III. 3 :</b> La géométrie du problème représenté sur GAMBIT .....	29
<b>Figure III. 4 :</b> Maillage par GAMBIT 2D.....	30
<b>Figure III. 5 :</b> Choix de maillage .....	31
<b>Figure III.6:</b> Contour de la fraction volumique a déférent temps pour $Re=900$ ( $t=0.6s$ , $t=0.8s$ et $t=1s$ ).....	32
<b>Figure III.6.1:</b> Hauteur instantanée du film Pour $Re = 150$ , $qv=1.5 \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s.....	33
<b>Figure III.6.2:</b> Hauteur instantanée du film Pour $Re = 300$ , $qv=3 \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s.....	33
<b>Figure III.6.3 :</b> Hauteur instantanée du film Pour $Re = 600$ , $qv=6 \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s.....	34
<b>Figure III.6.4:</b> Hauteur instantanée du film Pour $Re = 900$ , $qv=9 \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s.....	34

<b>Figure III. 7:</b> Illustration schématique des positions aux quelles les profils de vitesse sont analysés. ....	37
<b>Figure III.7.1:</b> Profile de vitesse a diverse positions X1, X2, X3 pour $Re=150, qv=1.5 \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s.....	38
<b>Figure III.7.2:</b> Profile de vitesse à diverse positions X1, X2, X3 pour $Re= 300, qv=3 \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s.....	38
<b>Figure III.7.3:</b> Profile de vitesse à diverse positions X1, X2, X3 pour $Re=600, qv=6 \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s.....	40
<b>Figure III.7.4:</b> Profile de vitesse à diverse positions X1, X2, X3 pour $Re=900, qv=9 \times 10^{-4}$ m <sup>2</sup> /s.....	40
<b>Figure III.8 (a),(b),(c):</b> Profile de vitesse à différentes nombres de Reynolds $Re(150,300,600,900)$ pour diverse positions X <sub>1</sub> , X <sub>2</sub> , X <sub>3</sub> .....	42

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : Récapitulation des différentes approches de mesure de l'épaisseur du film liquide.....	6
<b>Tableau II.2</b> : Récapitulation des résultats expérimentaux et comparaison avec la théorie (Binnie 1957).....	11
<b>Tableau III.1</b> : Emplacement de la hauteur minimal du film liquide en fonction de la vitesse.....	36

# NOMENCLATURE

<b>Notations</b>	<b>Signification</b>
$p$	Pression
$P_{amb}$	Pression ambiante
$P_{sat}$	Pression saturé
$P_{vap}$	Pression vapeur saturé
$\sigma$	Tension superficielle
$\vec{g}$	Vecteur accélération de la pesanteur
$v$	Volume
$\rho$	Masse volumique
$Re$	Nombre de Reynolds
$\mu$	La viscosité dynamique
$x, r$	Cordonnée curviligne
$h_0$	Hauteur initial du film mince
$h(x,t)$	La hauteur fluide
$L$	Longueur
$R_c$	Rayon cylindre
$\vec{u}, \vec{v}$	Composantes vitesse suivant les axes x,y
$Q_m$	Débit volumique
$\rho_m$	La masse volumique de mélange de phases
$\mu_m$	Viscosité de mélange
$F$	Force volumique
$\alpha$	Fraction volumique
$K$	Courbure de l'interface
$n$	Vecteur normal a l'interface
$\nabla$	Opérateur nabla

# **Introduction Général**

# Introduction Générale

L'importance de l'étude hydrodynamique des films liquides est indéniable. Les films liquides se retrouvent dans divers domaines de l'ingénierie à savoir, sans être exhaustif, le revêtement, lubrification, refroidissement, photo-bioréacteurs, les évaporateurs, réacteurs chimiques, centrales nucléaires, installations agroalimentaires.

L'écoulement de film liquide est devenu l'objet de nombreuses études, et diverses méthodes ont été proposées à travers ces études: méthodes d'analyse, numériques et expérimentales. D'un point de vue expérimental, prédire ou mesurer l'évolution temporelle et spatiale de l'épaisseur du film liquide reste un défi, qui est lié à la sensibilité du film au bruit mécanique et thermique et théoriquement au film.

Les écoulements films liquides sur une surface solide et d'un liquide libre ont été étudiés en utilisant la théorie de la stabilité hydrodynamique. Une petite perturbation appliquée à l'interface libre génère des mouvements dans le film, et l'hypothèse est faite que les équations de Navier-Stokes peuvent être utilisées pour les décrire. La force est calculée à partir de l'énergie potentielle par unité de volume dans le liquide causée par les interactions de **van der Waals** avec les molécules environnantes du liquide et avec celles du solide. Si la perturbation croît, elle conduit à la rupture du film. La gamme de longueurs d'onde de la perturbation pour laquelle l'instabilité se produit est établie et le temps de rupture est évalué. L'effet des agents tensioactifs insolubles et solubles est analysé. Les données expérimentales disponibles concernant la condensation sur une surface solide et la coalescence des bulles sont expliquées sur la base des résultats obtenus.

Depuis le travail des **Kapitza** en 1949 [9], plusieurs investigations ont été conduites quant à la mesure d'épaisseur de film liquide en vue d'applications industrielles et de la richesse fondamentale d'un tel problème. Jusqu'à 1993 les résultats expérimentaux furent basés sur des mesures qualitatives. Les travaux de **Liu et al. (1993)** représentaient une nouveauté car ils ont utilisé l'imagerie par fluorescence, technique commandée par ordinateur, avec par conséquent acquisition quantitative des données.

Peu de travaux expérimentaux ont été comparés avec les résultats de l'analyse par la théorie linéaire de stabilité : **Krantz et Goren (1971)**, **Pierson et Whitaker (1977)**, **Alekseenko et**

**al. (1985).** Ces derniers ont particulièrement investi la dynamique des ondes à l'interface d'un film liquide.

Ce travail se compose en trois chapitres.

Le premier chapitre sera consacré à la généralité des films liquides, en définissant l'écoulement de ce dernier, ainsi leurs intérêts d'études dont les processus industriel, techniques des mesures d'épaisseur et sa stabilité ; Nous avons expliqués le phénomène de rupture et finalement on termine notre partie avec une étude bibliographique.

Le deuxième chapitre traite la configuration géométrique du problème étudié ainsi que la présentation des équations de Navier-Stokes qui gouvernent l'écoulement d'un fluide visqueux sur une paroi cylindrique et la méthode VOF.

Le troisième chapitre est consacré pour les résultats de simulation du problème considéré a différentes nombres de Reynolds et la discussion de ces derniers, les résultats obtenue ont été traduits en graphiques.

# **Chapitre I**

## **Généralité et étude bibliographique**

# Généralité et étude bibliographique

## I.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la généralité des films liquides, en définissant l'écoulement de ce dernier, ainsi leurs intérêts d'études dont les processus industriel, techniques des mesures d'épaisseur et sa stabilité ; nous avons expliqués le phénomène de rupture et finalement on termine notre partie avec une étude bibliographique.

## I.2. Définition d'écoulement film liquide :

L'écoulement d'un film liquide le long d'une paroi est un prototype d'écoulement ouvert avec une surface libre, qui se caractérise par la présence d'ondes solitaire, ces film liquides sont souvent de nature complexe et d'une série clairement définie d'instabilités secondaires et des déformations sur la surface libre, conduisant au chaos spatio-temporel.

## I.3. Écoulement à surface libre :

La surface libre est l'interface entre l'air et un fluide quelconque, nous supposons que la pression  $y$  est égale à la pression atmosphérique. L'écoulement dans les canaux naturels et artificiels est dans la plupart des cas, des écoulements à surface libre.

Dans un fluide, spécifiquement pour chaque particule, il y a un ensemble de forces appliquées qui diffèrent par leur nature. Il y a en effet deux types de forces, des forces volumiques (telles que les forces de gravité et les forces électromagnétiques) et des forces surfaciques (les forces d'origine visqueuse par exemple et la pression). [1]

## I.4. Le nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est un nombre qui lie entre les fluides de déférente échelle, la viscosité, la masse volumique, et une longueur de référence comme l'étude de la trainée des Corps géométrique, la traine de friction des surfaces planes, et il permet de déterminer le Régime d'écoulement, laminaire, transitoire ou turbulent, Redéfinie comme suit :

$$Re = \frac{\rho \cdot U_0 \cdot h_0}{\mu} \quad (I.1)$$

## **I.5. Intérêt de l'étude des films liquides :**

### **I.5.1 Les films liquides dans les processus industriels :**

L'écoulement en film se distingue des autres types d'écoulements diphasiques par la présence d'une surface libre continue séparant le liquide de la seconde phase qui est un gaz au repos ou en écoulement. Une ancienne utilisation d'un film liquide dans l'industrie chimique est mentionnée dans un brevet anglais datant de 1836 : du gaz chlorhydrique est absorbé par un film d'eau s'écoulant sur des anneaux de garnissage. Vers 1920, les systèmes de refroidissement par film et les évaporateurs utilisés par les allemands dans l'industrie sucrière ont inspiré les premières études théoriques et expérimentales détaillées sur les écoulements et les transferts de chaleur dans les films. Actuellement, on rencontre fréquemment des écoulements en film à l'intérieur ou à l'extérieur d'un tube cylindrique vertical sont fréquemment rencontrés dans de nombreux processus industriels. Parmi ces processus, on peut citer le revêtement d'isolation de fil. De protection des tubes; les transferts de chaleur ou de masse dans certains types de contacteurs gaz-liquide ; le refroidissement de secours des grappes de réacteurs nucléaires. [2]

### **I.5.2 Synthèse des Techniques de Mesure d'Épaisseur d'un Film Liquide :**

Les techniques de mesures sont basées sur des principes physiques, en relation avec les propriétés du film et celles du milieu qui l'entoure. Ces méthodes sont regroupées sur des bases communes, telles que discutées au préalable, à savoir Acoustique, Electrique, Optique et l'absorption des rayonnements (gamma et Rayons-X, neutrons).

-Les méthodes acoustiques sont basées sur la propagation des ondes ultrasonores qui sont réfléchies et partiellement atténuées par la discontinuité du milieu dans le quelle elles se trouvent (passage à travers une interface liquide-gaz par exemple). Donc l'épaisseur du film liquide peut être déduite à partir du temps qui s'écoule entre l'émission et la récupération de l'onde par un détecteur. Il est à noter que les méthodes acoustiques présentent l'avantage de pouvoir effectuer des mesures dans les conduites opaques.

-Les méthodes électriques sont basées sur la Variation de la Conductance Electrique ou de la capacité électrique. Dans le premier cas la technique est basée sur la détermination de la conductance électrique en mesurant l'intensité électrique ou la différence de potentielle

entre deux électrodes qui sont directement reliées à la quantité de liquide qui se trouve entre ces dernières (si l'épaisseur du film liquide augmente, la conductance électrique augmente). Dans le cas de la variation de la capacité électrique le principe se résume à la perméabilité électrique du milieu qui sépare deux plaques, parallèles, conductrices et soumises à un courant électrique d'intensité donnée. Pour mesurer l'épaisseur d'un film liquide on peut s'appuyer sur le fait que la valeur de cette perméabilité électrique dépend fortement de l'architecture du milieu diphasique qui se trouve entre les plaques. Une corrélation entre l'épaisseur du film liquide et la capacité électrique peut être introduite. Il faut, toutefois, tenir compte de l'influence de la température sur la perméabilité électrique du liquide et même sur celles des sondes. Car un passage d'un courant électrique au sein d'un milieu conducteur cause un chauffage, ce qui peut influencer les propriétés physico-électrique des matériaux qui le constituent.

-Les techniques optiques, qui constituent la partie centrale de ce travail, peuvent se baser sur la détection d'interface, la variation de l'intensité lumineuse ou la réflexion partielle ou totale de la lumière comme discutées ci-après. [3]

Techniques de Mesure	Bases Physiques	Défauts majeurs
<b>Acoustique</b>	Ultrasons	- Nécessité l'identification de la fréquence d'émission ce qui risque d'affecter la précision de mesure.
<b>Electrique</b>	Variation de la conductivité	- Techniques intrusives qui risquent de fausser la mesure de l'épaisseur et des paramètres caractérisant la dynamique interfaciale.  - La mesure de l'épaisseur nécessite la correction de la conductivité électrique dans le cas de présence de la phase gazeuse dans la phase liquide (cette correction est souvent négligée dans les travaux ultérieurs)
	Variation de la Capacité	- La présence des petites bulles dans le film, ou à sa surface, peut fausser la mesure.
<b>Optique</b>	Variation de l'Intensité Lumineuse	- Nécessitent un film liquide de composition homogène et isotrope.  - Les liquide opaques ou transportant des particules à forte concentration risque de causer une atténuation totale du signal lumineux.
	Réflexion Totale de la Lumière	- Problème de contraste à l'interface liquide-gaz.  - Valable, dans la majorité des cas, pour les liquides translucides  - Difficulté de mesure dans le cas d'un film chargé en particules solides.
	Ombres	- Diffusion lumineuse à l'interface qui peut déformer les ombres.
	Intensité de Fluorescence	- L'introduction d'un marqueur au sien de la phase liquide risque de fausser la compréhension de la physique régissant l'écoulement.
	Laser Focus Displacement (LFD)	- Limitée dans le cas d'un film liquide fortement ondulatoire
	Interférométrie	- Risque de chevauchement des franges lumineuses dans le cas d'un film ondulatoire à grandes amplitudes.

**Tableau III.1** : Récapitulation des différentes approches de mesure de l'épaisseur du film liquide.[3]

### **I.5.3. Stabilité des films liquides :**

La structure onduleuse de l'interface gaz-liquide d'un écoulement en film joue un rôle capital dans les processus de transfert entre les phases gaz et liquide. L'intérêt de la prévision du déclenchement des instabilités de la surface libre n'a pas échappé aux mécaniciens des fluides et le volume des publications sur ce sujet est important.[4]

Les analyses de la stabilité sont très courantes dans le domaine de l'instabilité hydrodynamique, Elles consistent à perturber un état de référence d'un système physique et à étudier son évolution temporelle grâce à une relation, dite relation de dispersion. Deux comportements sont possibles : soit ces perturbations sont amorties dans le temps et l'état de référence est dit stable, sinon elles s'amplifient et l'état de référence est alors instable.[5]

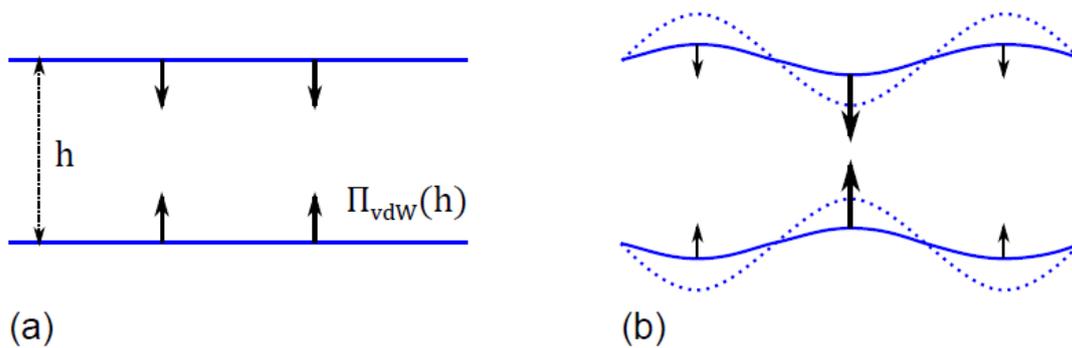
### **I.6. Phénomène de rupture de film :**

La rupture du film liquide est un phénomène physique qui se manifeste par la formation de poches de vapeur ou de gaz dans les zones d'un film liquide en dépression. Fréquemment rencontré dans les machines hydrauliques, ce phénomène peut aussi avoir lieu dans le cas des paliers hydrodynamiques. En fonction du niveau de chute de la pression, la rupture de film peut se produire selon trois modes.

- 1) Lorsque la pression au sein du film est en deçà de la pression ambiante ( $P < P_{amb}$ ), de l'air ou du gaz, en provenance de l'atmosphère, peut s'introduire dans les régions en dépression.
- 2) Quand la pression est inférieure à la pression de saturation des gaz dissous dans le film lubrifiant ( $P < P_{sat}$ ), ces gaz peuvent être expulsés.
- 3) Au moment où la pression au sein du film atteint la pression de vapeur saturante ( $P < P_{vap}$ ), le lubrifiant liquide se vaporise à température ambiante. Selon la forme et la cinématique du contact, les visualisations de l'écoulement mettent en évidence, dans la zone de rupture de film, soit une juxtaposition de filets d'air et de lubrifiant (paliers lisses), soit des bulles [6].

### I.6.1 Mécanisme de rupture d'un film liquide statique :

Les mécanismes physiques qui gouvernent localement la rupture des films liquides minces dans le cas simple où ces derniers sont Statiques, en l'absence d'écoulement global. La première étape consiste à comprendre comment, à partir d'un film d'épaisseur initialement homogène, un trou peut se former dans le film. Dans un second temps, nous nous intéresserons l'expansion de ce trou, menant finalement à la disparition complète du film. [7]



**Figure I. 1 :** (a) Schéma d'un film plan et statique, d'épaisseur  $h$  et dont les interfaces s'attirent via les interactions de van der Waals, quantifiées par la pression de disjonction. (b) Si une fluctuation d'épaisseur apparaît dans le film, elle aura tendance à s'amplifier car l'attraction entre les interfaces augmente fortement quand  $h$  diminue.

### I.6.2. Rupture d'un film sous écoulement :

En pratique, les films liquides sont souvent le siège d'écoulements, Le temps de vie d'un film libre va alors dépendre de manière complexe de l'écoulement au sein de film, qui fixe le temps nécessaire pour que l'épaisseur atteigne une valeur donnée, des mécanismes de rupture intervenant lorsque le film est devenu suffisamment fin et d'un éventuel couplage entre les deux, en particulier en présence de tensioactifs. Deux modèles de rupture de films dynamiques sont présent dans cette section, le premier dans une situation de drainage libre, le second pendant la génération du film. [8]

### I.7. Etude bibliographique :

Les travaux pionniers de et **Kapitza** concernent les ondes se développant à la surface d'un film liquide s'écoulant sur une plaque inclinée. A ce sujet les auteurs ont réalisé une série de photographies représentant une panoplie de plusieurs types d'ondes (ondes sinusoïdales avec des crêtes arrondies et des auges, des ondes solitaires de gouttes isolées, des trains d'ondes capillaires ...etc. (figure I.2).qui peuvent être rythmiques ou tout au contraire irrégulières et imprévisibles .Ils ont noté l'existence d'ondes solitaires qui développent des pics secondaires loin de la source. Les auteurs ont défini un nombre portant leur nom, dépendant des propriétés physiques du fluide et non de l'écoulement, qui regroupe l'influence des effets inertiels, de la tension superficielle  $\sigma$  et de la viscosité  $\nu$ . Le nombre de **Kapitza** expriment le rapport entre l'effet de la tension superficielle et celui de l'inertie et est défini comme suit [9] :

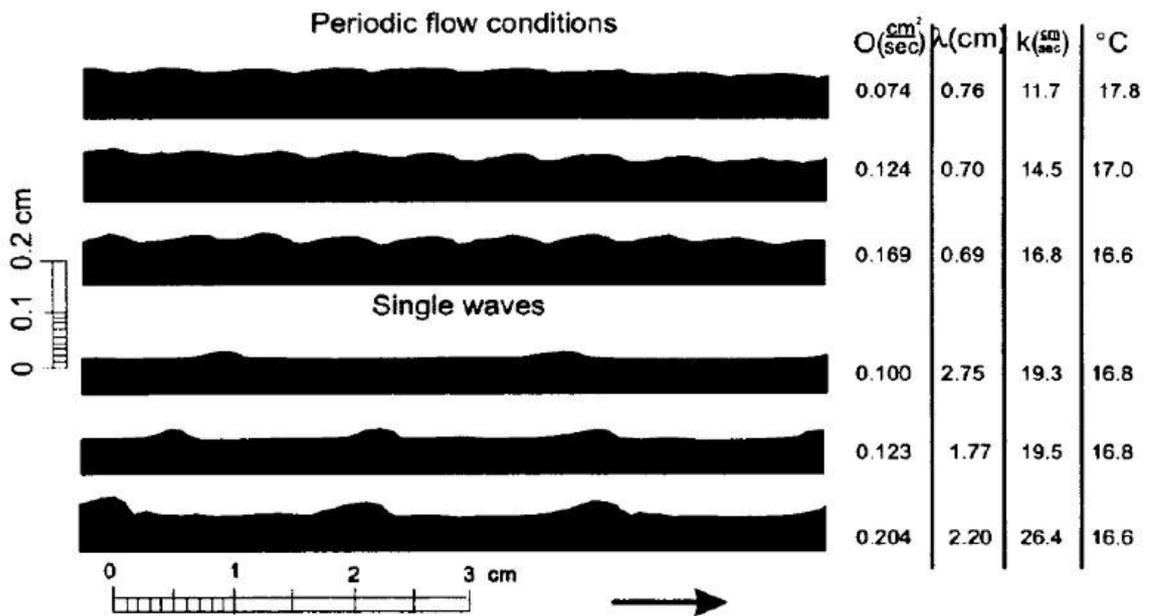
$$\gamma = \left( \frac{\sigma^3}{\nu^4 g \rho^3} \right)^{1/3} \quad (I.2)$$

Où :  $g$  est la gravitation et  $\rho$  la masse volumique du film liquide.

Dans le montage expérimental, réalisé par **Kapitza** et **Kapitza (1949)**, une excitation externe, en amont sous forme d'un écoulement périodique pulsé, a été imposée afin de compenser à la réduction de la zone de test. La technique d'embryoscopie a permis aux auteurs de capturer les profils du film liquide. Une lampe appropriée permettait d'éclairer le tube de façon tangentielle au film dont l'ombre se projetait sur une plaque de dimensions 18×14cm faisant un angle  $\theta$  avec les rayons incidents. L'ombre du film a été amplifiée  $N$  fois tel que «  $N = 1/\sin \theta$  » dans le but de faciliter la prise des photos, un stroboscope a été utilisé afin de synchroniser les ondes avec l'éclairage. Les profils d'ondes obtenus pour l'alcool sont représentés par la figure I.2.

Le nombre de Reynolds  $Re$  moyen fut compris  $7.6 < Re < 23$ , dans cette gamme les **Kapitza (1949)** ont constaté une apparition d'instabilités inter faciales pour une valeur critique  $Re^*$  définie comme suit [9],

$$Re^* = 0.63\gamma^{3/11} \quad (I.2)$$



**Figure I. 2** : Profils d'ondes obtenues par Kapitza et Kapitza en 1949 (interface eau-alcool).

$O$  : Débit par unité de largeur  $cm^2/s$

$\lambda$  : Longueur d'onde  $cm^2/s$ .

$K$  : Vitesse du vague (cm).

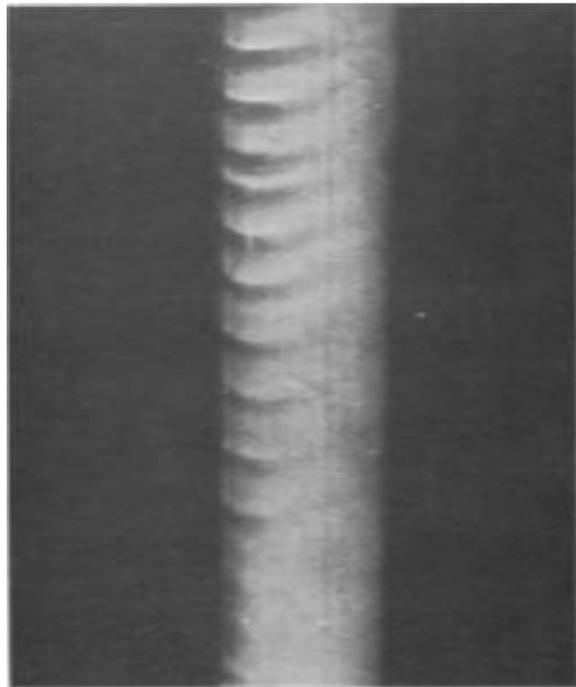
Les auteurs ont remarqué (après plusieurs séries d'expériences à différentes fréquences et amplitudes en amont tel que  $\lambda=0.85$  à 1 cm pour l'eau et 0.7 à 0.8 cm pour l'alcool) l'existence de deux principaux régimes ondulatoires stables :

- Régime à ondes périodiques : pour lequel les ondes avaient une forme presque sinusoïdale.
- Régime à ondes solitaires : dans ce cas des ondes éloignées l'une de l'autre prennent place.

**Binnie** a effectué un travail expérimental sur un montage constitué principalement d'un tube verticale en verre 150 cm de longueur et 2.65 de diamètre pour un nombre de Reynolds variant entre 4 et 5 pour le cas d'instabilité naturelle (sans excitation externe) principalement dans le but de déterminer sa plus petite valeur  $Re^*$  à partir de laquelle l'instabilité apparaît. Ce travail a conduit vers un «  $R^*= 4.4$  ». La figure I.3 est une photographie d'un train d'ondes obtenues par **Binnie**[10].

Inclinaison	Vitesse de vague C (cm/s)	Vitesse moyenne $U_0$ (in/s)	$C/U_0$	$U_0$ Longueur d'onde observée (in)	Longueur d'onde théorique
2.75	15.84	8.38	1.89	2.92	3.6
2	18.71	10.84	1.73	2.92	2.84
1	24.96	14.42	1.73	2.81	2.64

**Tableau IV.2 :** Récapitulation des résultats expérimentaux et comparaison avec la théorie (Binnie 1957).[10].



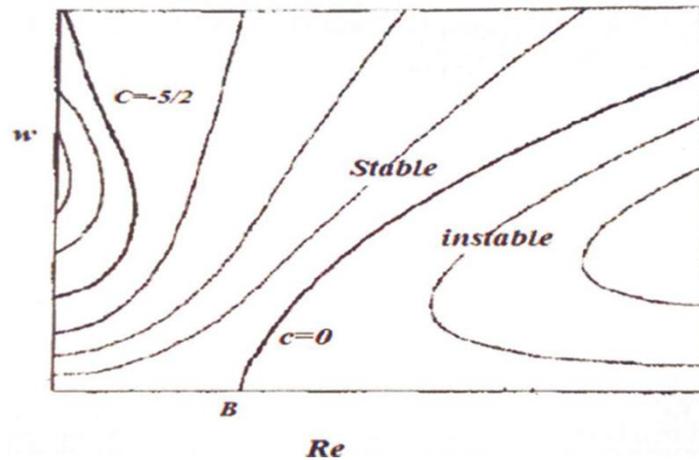
**Figure I. 3 :** Train d'onde (Binnie 1957).[10].

Dans la même perspective, **Binnie** a poursuivi ses travaux sur la dynamique des films liquides en réalisant une autre étude en 1959 en améliorant son montage expérimental de 1957. Il a utilisé un tube en verre ayant une longueur de 490 cm et un diamètre de 0.84 avec la possibilité d'imposer une légère inclinaison, d'un angle, entre 1 et 2.75°. La valeur critique  $Re^*$  du nombre de Reynolds a été déterminée confirmant la valeur prédictive donnée par la théorie linéaire de la stabilité à savoir  $Re^* = (5/6) \cot \theta$ . Les vitesses en amont ont été aussi mesurées donnant des valeurs entre 2.6 à 2.8 de la vitesse moyenne en diminuant au fur et à mesure de la décroissance de. Les longueurs d'ondes observées à l'entrée de la conduite étaient 2.8 à 2.9 cm. Le tableau I.2 récapitule les résultats obtenus comparés avec ceux prédits par théorie linéaire de stabilité [10].

**Thompson, Tseluiko et Papageorgiou** ont utilisé des modèles à ondes longues pour étudier l'effet des aspirations / injection régulière et spatialement périodique sur un écoulement en couche mince dans un plan incliné. Ils ont trouvé que l'aspiration imposée conduit toujours à des états non uniformes, permet une structure de bifurcation non triviale et un comportement complexe dépendant du temps, et modifie considérablement les trajectoires des particules dans le l'écoulement, mais a un effet relativement faible sur la stabilité de l'écoulement.

L'injection de fluide à travers les fentes a également été considérée théoriquement pour son effet sur l'étalement des films; aspiration conduit à des arêtes sur la surface libre, et injection aux indentations, mais il n'y a pas d'état d'équilibre car la masse totale n'est pas conservée. Injection présente certaines similitudes avec l'écoulement sur une paroi poreuse, qui a tendance à évacuer le fluide dans des pores étroits; ce l'écoulement est particulièrement pertinent pour l'impression d'encre sur du papier, pour lequel la porosité du substrat affecte le durée de vie et propagation des gouttes [11].

En 1961 **Yih** a mené les premières études de stabilité concernant l'écoulement de films de fluides newtoniens à une couche s'écoulant sur un plan incliné. Leurs recherches ont permis de déterminer les conditions critiques de l'instabilité. Par conséquent, ils ont montré que la vitesse de propagation de ces ondes est le double de la vitesse de base du liquide au niveau de la surface libre [12].



**Figure I. 4:** Courbe neutre de Yih[12]

Ces courbes du nombre d'onde  $\omega n$  en fonction du nombre de Reynolds  $Re$  imitent les zones de stabilité, pour une inclination de  $(\beta < \pi/2)$ ,  $C$  représente le taux d'amplification des ondes. Pour comprendre l'effet de la tension superficielle sur l'apparition des instabilités.

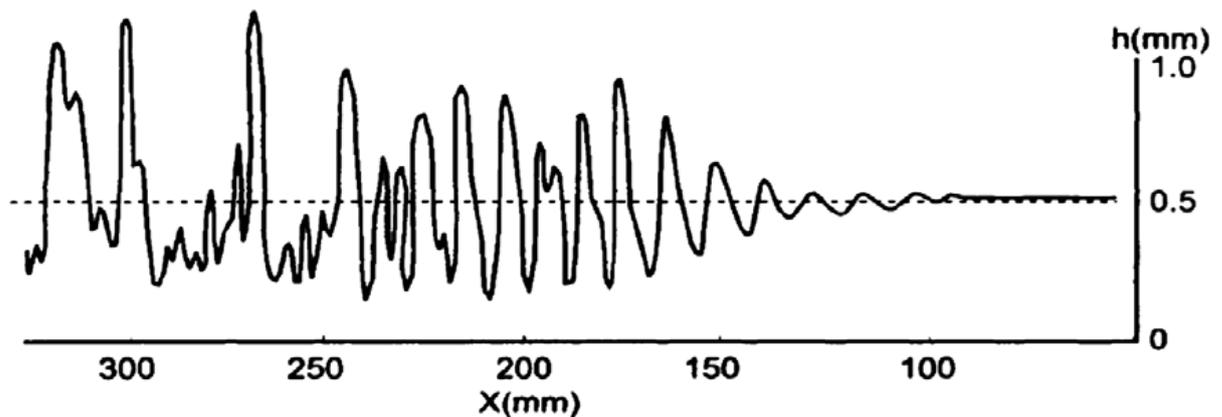
**Ruckenstein et Jain** ont étudié la rupture spontanée d'un film liquide sur une paroi solide plane. Le film liquide a été modélisé par eux comme un continuum de Navier-Stokes avec un potentiel dû aux interactions de **van der Waals**. Ils ont utilisé l'approximation de la lubrification pour obtenir les résultats de l'instabilité dynamique linéaire. À partir de cette analyse, on peut obtenir des estimations approximatives du temps de rupture, c'est-à-dire le temps nécessaire pour que le film mince atteigne une épaisseur nulle en un point donné. [13]

**Wilkes et Nedderman** ont effectué une étude expérimentale en utilisant un tube 3m de longueur et 2.5 de diamètre interne. Comparée aux expériences qui l'ont précédé, le tube utilisé dans ce travail était le plus long ce qui donnait une image plus complète de l'hydrodynamique de l'écoulement. D'autre part ce travail était une première dans le domaine car il présentait des mesures de profil de vitesse au sein d'un film ondulé. Les auteurs ont prélevé les profils de vitesse en utilisant une photographie stéréoscopique de petites bulles qui se déplaçaient avec le liquide. Ils ont pu en déduire que dans le cas d'un film ondulé le profil restait approximativement parabolique comme dans le cas d'un film plat avec une déviation maximale d'environ 20 % les valeurs du nombre de Reynolds tournaient autour de  $Re^*$  dans le cas naturellement instable.[14]

**Jones et Whitaker** ont étudié la dynamique des ondes naturelles lors de l'écoulement d'un film d'eau ayant un nombre de Reynolds compris entre 7.7 et 124 qui représentait la plus grande valeur jamais atteinte à cette époque. Ils ont trouvé que des ondes de 0.9 cm de longueur moyenne apparaissent pour  $27 < Re < 33$ . Parmi les résultats importants que l'on notera: les variations des longueurs et des vitesses d'onde en fonction du nombre de Reynolds à une distance de 2.5 à 5 cm du distributeur d'eau et les transitions entre l'état d'ondes stationnaires et celui des ondes solitaires pour une distance entre 30 à 60 cm du distributeur. [15]

**Portalski et Clegg** ont fait un travail (concernant la transition des ondes vers l'état solitaire) qui peut être qualifié de remarquable. Ils ont utilisé trois différents fluides : l'eau et deux solutions d'eau-glycérine de 25% et 45% et ont fait varier le nombre de Reynolds entre 17.7 et 375 pour un cas naturellement instable. Ils ont prélevé des photographies de l'écoulement à l'aide d'une caméra qui leur a permis de capturer une grande partie du canal d'étude (30 cm), par la suite les images ont été traitées à l'aide d'un ordinateur. Un exemple de profil est représenté par la figure I.5.

Ils ont montré que les instabilités interfaciales ont toujours existé mais avec de très faibles amplitudes et que leurs détections dépendent de la précision des appareils de mesure utilisés. La nouveauté est la détection d'une cassure soudaine de la forme des ondes en une position donnée le long de la conduite accompagnée par des formes très irrégulières puis les ondes se régularisaient graduellement jusqu'à atteindre un état d'ondes solitaires dans lequel l'amplitude s'amplifie et l'épaisseur moyenne du film devient plus petite que celle obtenue si le film était complètement plat. [16]



**Figure I. 5:** Variation de l'épaisseur du film le long de la conduite d'étude pour une solution d'eau- glycérine à  $R = 37$ . Portalski et Clegg (1972).

**Gstoehletal** ont mesuré une épaisseur comprise entre  $80 \mu\text{m}$  et  $1.4 \text{ mm}$  de la phase liquide contenue dans un tube horizontal de  $19.05 \text{ mm}$  de diamètre externe lors d'un écoulement diphasique en injectant aussi de la Rhodamine en considérant trois liquides expérimentaux (l'eau, une solution d'éthylène-glycol et une solution d'eau-glycol). Une source de laser monochromatique excitait la solution fluorescente et une caméra rapide a permis une prise des images qui ont été traitées par la suite sur ordinateur à l'aide d'un programme approprié. Les auteurs ont pu atteindre une précision intéressante caractérisée par une erreur de l'ordre de  $20 \mu\text{m}$  sur l'épaisseur de la phase liquide causée par un défaut de contraste à l'interface liquide-gaz. [17]

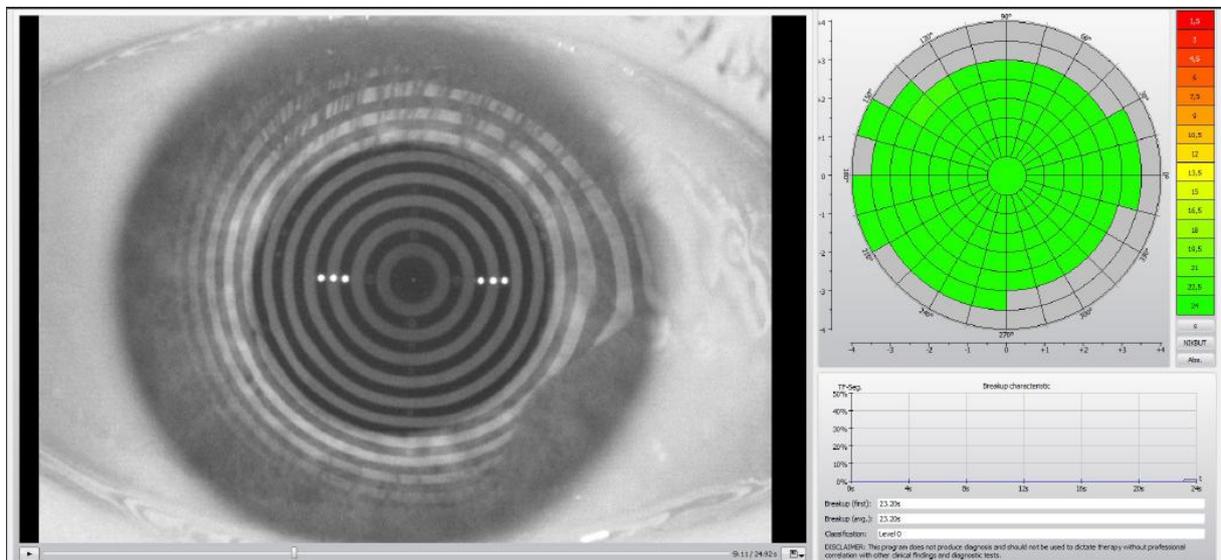
#### Quelques travaux sur le Film lacrymal :

**Le film lacrymal** est la première interface entre l'air et le dioptre oculaire, sa structure et son homogénéité vont avoir un impact majeur sur la qualité optique de l'œil à cause de la grande différence d'indice optique entre l'air et le film lacrymal. Dans la sécheresse oculaire, il existe une déficience des larmes en quantité et/ou qualité provoquant des irrégularités du film lacrymal et/ou des ruptures précoces. Celles-ci sont à l'origine de diffusions et d'aberrations optiques réduisant la qualité de l'image rétinienne.

Cependant, en **2005**, **Ridder** et al. Évaluaient de manière dynamique la sensibilité aux contrastes en utilisant des stimuli présentés de manière temporaire en relation avec le clignement palpébral. Ils montraient des fluctuations temporelles de la performance visuelle avant même la rupture du film lacrymal, prouvant que la dégradation progressive du film lacrymal modifie la sensibilité aux contrastes.

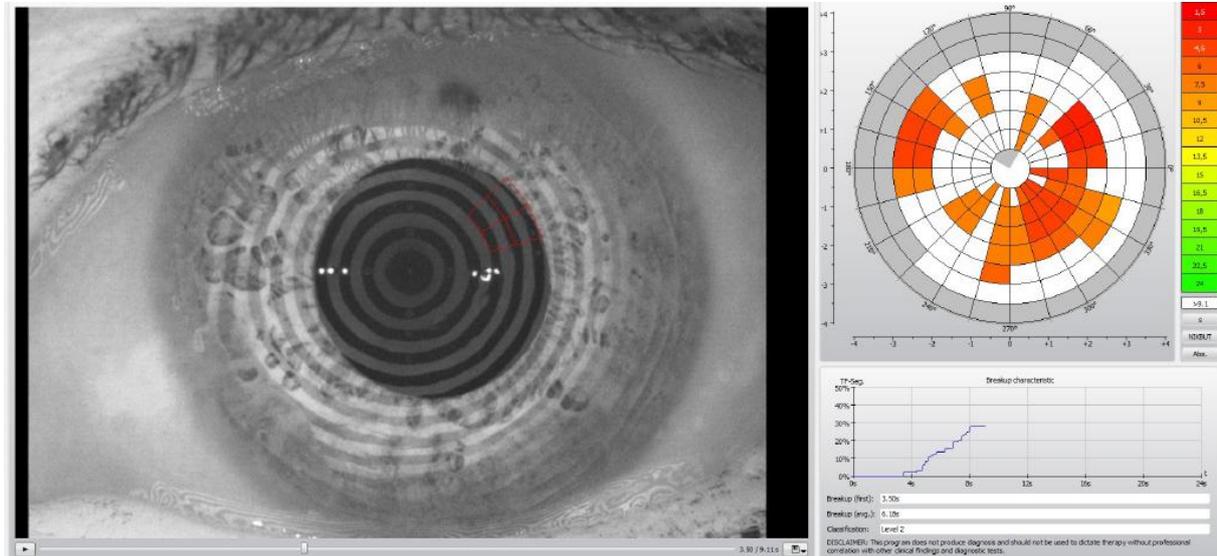
**Deschamps et al.** Montraient l'impact des aberrations optiques liées au film lacrymal sur la cornée. Grâce à un simulateur de conduite, ils observaient une augmentation du temps de réponse moyen et du pourcentage de cibles ratées dans le groupe de patients souffrant de sécheresse oculaire par rapport au groupe témoin, en corrélation avec l'augmentation des aberrations optiques. Ainsi, il est primordial de considérer l'altération de la qualité optique liée au film lacrymal, dans les symptômes oculaires de sécheresse ayant un impact Sur la qualité de vie.

L'évaluation du NIBUT est l'enregistrement vidéo de la dynamique du film lacrymal. Le Keratograph 5MÒ évalue l'évolution des ruptures du film lacrymal sur la surface cornéenne. Il repère et marque l'ensemble des zones de rupture sur l'image des placidos et sur la carte codée par couleur selon l'intensité des ruptures du film lacrymal, puis établit une courbe d'évolution des ruptures du film lacrymal. L'intérêt majeur est d'avoir le profil et les zones de rupture du film lacrymal et pas uniquement l'évaluation quantitative du temps de première rupture et du temps moyen de l'ensemble des ruptures. En effet, on peut admettre qu'une rupture plus ou moins précoce mais stable a un impact différent d'une rupture qui s'étend. De plus, on peut imaginer qu'une rupture par spots précoce dès le clignement est un mauvais étalement de l'eau sur une couche mucinique déficitaire, alors que des ruptures qui s'étendent et augmentent seraient plutôt une hyper évaporation.[18].



**Figure I. 6:** Image d'évaluation du film lacrymal de manière non invasive chez un sujet sain au Keratograph 5MÒ (Oculus, Wetzlar, Allemagne).

On observe un film homogène sur l'image des placidos sans rupture à 9 secondes, une carte codée par couleur avec absence de rupture, la courbe d'évolution sans rupture du film lacrymal jusqu'à 25 secondes.[18]



**Figure I. 7:** Image d'évaluation du film lacrymal de manière non invasive chez un patient atteint de sécheresse oculaire au Keratograph 5M0.

On observe la première rupture du film lacrymal et sa localisation marquées par les 2 rectangles rouges à 3,5 secondes sur l'image des placidos, une carte codée par couleur avec l'ensemble des ruptures au cours de l'examen, la courbe d'évolution de la rupture du film lacrymal avec un premier NIBUT à 3,5 secondes et une moyenne du NIBUT à 6,1 secondes.[18]

## I.8. Conclusion :

Ce chapitre constitue une présentation générale de la physique des films liquides, et leur intérêt d'études (processus industriel, techniques de mesures, stabilité), on expliquant le phénomène de rupture. Finalement on conclue par une synthèse bibliographique qui présente quelques travaux de référence sur la dynamique d'un film liquide.

# **Chapitre II**

## **Formulation mathématique et position du problème**

# Formulation mathématique et position du problème

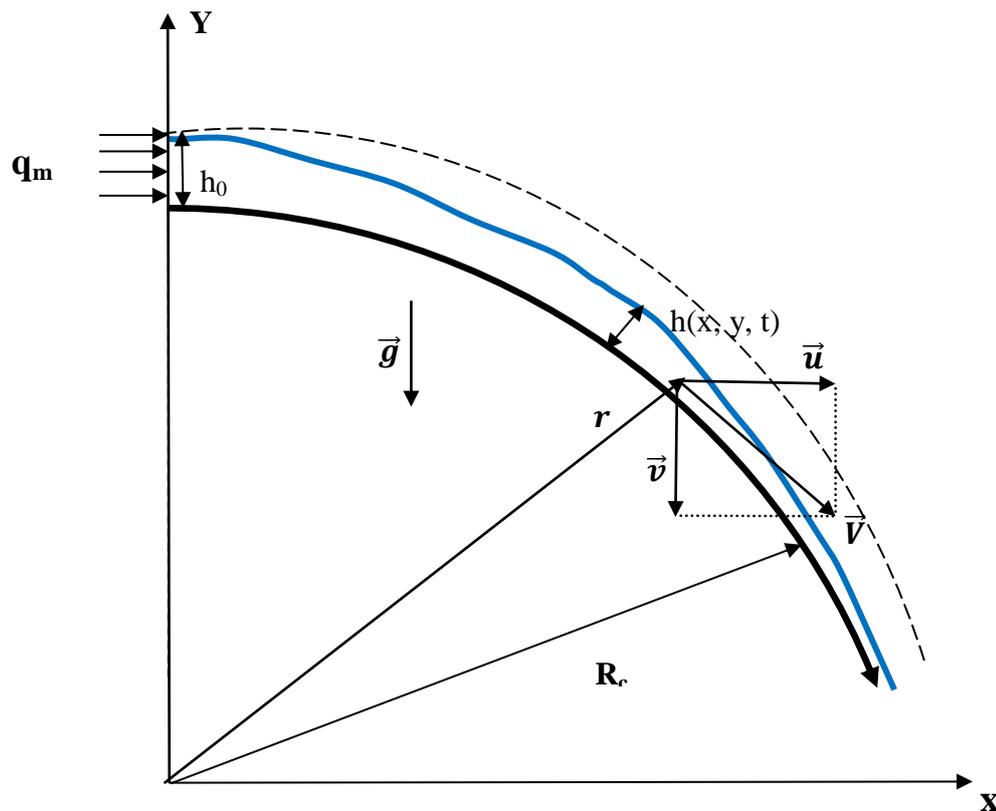
## II.1. Introduction :

Ce chapitre conduira à l'élaboration de notre modèle physique ainsi que la présentation des équations de Navier-Stokes qui gouvernent l'écoulement d'un fluide visqueux sur une paroi cylindrique et la méthode VOF.

## II.2. Formulation de problème :

On s'intéresse à l'étude de la stabilité d'un film fluide visqueux, incompressible de viscosité dynamique  $\mu$  et masse volumique  $\rho$ , s'écoulant sous l'effet de la pesanteur  $\vec{g}$  sur une paroi cylindrique comme la figure la montre. (Fig. I.1). Les variables ne dépendent que des coordonnées curvilignes  $(x, r)$ . Nous nous plaçons dans un repère cylindrique  $(x, r)$  la coordonnée tangentielle  $x$  est selon la direction de l'écoulement.

Notre géométrie d'intérêt représente une paroi cylindrique de longueur  $L = 0.05$  m et de rayon  $0.04$  m et une hauteur d'entrée du film  $h_0 = 0.003$  m avec  $\lambda = \frac{h_0}{R_c} = 0.075$  et un angle d'écoulement  $\theta = -\frac{\pi}{2}$ .



**Figure II. 1 :** Schéma représentant l'écoulement d'un film liquide sur une paroi cylindrique

### II.2.1 Hypothèse de l'étude :

Les hypothèses prises en compte pour cette étude sont :

- Fluide visqueux, newtonien et incompressible.
- Film liquide mince.
- Ecoulement laminaire bidimensionnel et isotherme.
- L'air au-dessus du fluide de pression  $P_a$  est immobile.
- La tension superficielle  $\sigma$  entre le fluide et l'air sera prise en considération

### II.3. Formulation mathématique :

Au départ le système d'équations est basé sur les principes de conservations de la masse, et de la quantité de mouvement qui constituent les équations de Navier-stokes.

#### II.3.1 Equation de continuité :

L'équation de continuité sous forme indicielle s'écrit sous la forme :

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{V} = 0 \quad (\text{II.1})$$

#### II.3.2 Equation de conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_m u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho_m v)}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.2})$$

#### II.3.3 Équations de conservation de la quantité de mouvement :

Une seule équation de bilan de quantité de mouvement est écrite pour tout le domaine et le champ de vitesse qui est calculé est ensuite partagé entre les deux phases. L'équation de Navier-stokes incompressible s'écrit :

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} \right) = -\vec{\nabla} P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho g + \vec{F}_{SF} \quad (\text{II.3})$$

La surface libre du film liquide est résolue par la méthode du volume de fluide (VOF). La dynamique de l'interface est décrite par l'équation de conservation :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \frac{\partial (\alpha u)}{\partial x} + \frac{\partial (\alpha v)}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.4})$$

La méthode VOF est basée sur le champ de la fraction volumique  $\alpha$  ayant les valeurs suivantes :

$\alpha = 0$  : la cellule est vide.

$\alpha = 1$  : la cellule est pleine.

$0 < \alpha < 1$  : la cellule contient l'interface entre les deux fluides.

### II.3.4 Equation de taux de présence :

Afin de suivre l'interface dans son mouvement, la fonction taux de présence  $\alpha_k$  est advectée par le champ de vitesse local, selon l'équation d'advection classique :

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \vec{V} \cdot \vec{\nabla} \alpha_k \quad (\text{II.5})$$

Si le problème étudié ne comporte que deux phases, il suffira de calculer une seule fois le champ de cette fonction  $\alpha_k$  afin de repérer chacune des deux phases dans tout l'espace, calculera par exemple le champ  $\alpha_2$  puis on déterminera  $\alpha_1$  sous la contrainte  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ .

### II.3.5 Propriétés physiques du fluide dans un volume de contrôle :

On écrit naturellement la masse volumique de mélange en pondérant les masses volumiques de chacune des phases par leurs taux de présences :

$$\rho = \sum \alpha_k \rho_k \quad (\text{II.6})$$

Pour la viscosité du mélange, en utilisant aussi les taux de présence  $\alpha_k$  comme coefficients, on écrit :

$$\mu = \frac{\sum \alpha_k \rho_k \mu_k}{\sum \alpha_k \rho_k} \quad (\text{II.7})$$

### II.3.6 Tension superficielle :

Il est important de tenir compte, dans un problème diphasique, de la tension superficielle entre les fluides et les effets d'adhérence à la paroi

La tension superficielle elle s'oppose à la déformation de l'interface, cette force est à l'origine des phénomènes capillaires.

De cette façon, à travers une interface, la différence de pression qui règne appelée pression capillaire peut s'exprimer à l'aide de la tension superficielle  $\sigma$  :

$$P_2 - P_1 = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{II.8})$$

Ainsi, le terme source  $\vec{F}_{SF}$  dans l'équation de quantité de mouvement s'écrit en fonction de la tension de surface  $\sigma$  :

$$\vec{F}_{SF} = \sigma k \vec{n} \left( \frac{\alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2}{\frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)} \right) \quad (\text{II.9})$$

Ou  $\vec{n}$  est le vecteur normal a l'interface,  $\sigma$  est la tension de surface considérée comme constante et égale a  $\sigma = 0.072 \text{ N/m}$  et  $K$  la courbure du film, cette dernière s'écrit :

$$k = \vec{\nabla} \cdot \vec{n} = \frac{1}{|\vec{n}|} \left[ \left( \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \cdot \nabla \right) |\vec{n}| - (\nabla \cdot \vec{n}) \right] \quad (\text{II.10})$$

En cas d'adhérence a la paroi, la notion d'angle de contact intervient en tant que condition à la limite en paroi il est utilisé pour ajuster la normal à la surface dans les cellules proches de la paroi : on calcule cette normal à la surface a la cellule adjacente à la paroi par :

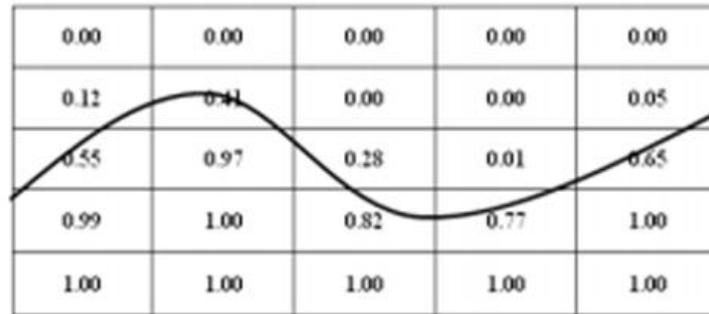
$$n = n_w \cos \theta_w + t_w \sin \theta_w \quad (\text{II.11})$$

## II.4 méthode numérique :

### III.4.1. Présentation de la méthode de VOF :

**Hirt et Nichols(1981)** [19] ont simplifié les méthodes de suivi en volume. En effet, ils ne repèrent plus le fluide par la quantité des marqueurs présents dans une cellule mais plutôt par la fraction volumique  $\alpha$  ou le taux de présence de l'un des fluides en présence. Cette approche appelée méthode Volume of Fluid (VOF) offre l'avantage par rapport à la méthode MAC de réduire considérablement la quantité d'informations à stocker dans chaque cellule. Ainsi, au lieu d'enregistrer une information par marqueur, il suffit désormais de mémoriser le taux de présence par cellule. L'évolution du taux de présence  $\alpha$  est assurée par l'équation de transport suivante :

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \alpha = 0 \quad (\text{II.12})$$



**Figure II. 2:** Principe de la méthode de VOF

Le taux de présence varie entre 0 et 1. Il vaut  $\alpha = 1$  si la cellule est remplie et  $\alpha = 0$  si elle est vide. L'interface est alors comprise dans les cellules où  $0 < \alpha < 1$ . Les méthodes VOF se scindent en deux catégories selon qu'elles intègrent ou pas une étape de reconstruction de l'interface. La reconstruction consiste à localiser l'interface en la définissant maille par maille à partir de la valeur du taux de présence  $\alpha$  et du vecteur normal à l'interface  $\nabla\alpha$  tout en assurant la conservation de la masse de chaque fluide. Dans la méthode VOF sans reconstruction de l'interface, on se contente de résoudre l'équation de transport du taux de présence. La position précise de l'interface demeure inconnue. Ces méthodes VOF avec ou sans reconstruction, permettent de traiter de façon plus souple les écoulements à topologie complexe et variable. Elles nécessitent cependant un schéma numérique conservatif pour le transport du taux de présence qui limite la diffusion numérique et empêche les oscillations liées à la variation brutale du taux de présence à la traversée des interfaces.

#### III.4.2 Présentation de la méthode des volumes finis :

Les équations qui gouvernent l'écoulement sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui n'ont pas de solution analytique d'où la nécessité de faire appel à une méthode de résolution numérique. Dans notre cas, Fluent a été utilisé, incorporant la méthode des volumes finis, basée sur :

- ✓ Une génération du maillage : division du domaine physique en volumes de contrôles.
- ✓ Une intégration des équations de transport sur chaque volume de contrôle.
- ✓ Une discrétisation des différentes équations intégrales par rapport aux volumes de contrôles obtenant ainsi un système d'équations algébriques pour chaque variable dépendante du problème à résoudre.

Pour la résolution d'un problème par cette technique il faut donc :

- ✓ Mettre à jour des propriétés du fluide.
- ✓ Mettre à jour le champ de vitesse c'est-à-dire la résolution des équations de transport de quantité de mouvement en utilisant les valeurs courantes de pression.
- ✓ Tester la convergence, si celle-ci est atteinte, on arrête le processus de calcul, sinon le processus recommence à partir de la deuxième étape.

### **III.4.3 Procédure numérique sur Fluent:**

Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide du logiciel commercial CFD (Ansys-FLUENT 6.3.24). Dans notre cas, la méthode de (VOF) et le modèle de la force de surface continue (CSF) ont été adoptés. La discrétisation du schéma implicite a été utilisée pour résoudre les équations gouvernantes. Le calcul a été poursuivi jusqu'au moment ( $t=1.2s$ ). Dans ce travail, les termes convectifs des équations de Navier-Stokes ont été discrétisés à l'aide du schéma upwind du second ordre. Le logiciel (FLUENT) utilise un schéma non itératif du premier ordre avec un pas de temps variable pour l'intégration du terme transitoire de l'équation du taux de remplissage (II.4). Le pas de temps de simulation a été maintenu à  $1 \times 10^{-4}$ . Le critère de convergence est choisi de manière à ce que le résidu de toutes les équations soit inférieur à  $10^{-5}$ .

# **Chapitre III**

## **Résultats numériques et discussions**

# Résultats numériques et discussions

## III. 1. Introduction

La simulation numérique en dynamique des fluides (appelée encore CFD –Computational Fluid Dynamics), Cette méthode consiste à caractériser les écoulements fluides par la résolution des équations fondamentales de mécanique des fluides, moyennant différents modèles en fonction de la nature de l'écoulement (Laminaire, turbulent, multiphasique ...). Les calculs par CFD ont pris de l'ampleur après la publication des équations de Navier-Stokes. Par contre, c'est qu'au début des années 1950 que le développement de la CFD a commencé, et ceci grâce au développement des méthodes de calcul numérique et surtout grâce à l'apparition de machine de calcul qui ont permis la résolution des équations pour des géométries complexes. Par contre, durant cette période la puissance des machines n'était pas encore suffisante pour exploiter au maximum cette technique. Ce n'est que pendant les années 90, avec l'apparition de puissantes machines de calculs, que des temps de calcul raisonnable ont pu être envisageables pour la résolution de ces équations.

Principalement, la méthode CFD a été utilisée en génie des mécaniques des fluides afin de caractériser les écoulements en présence d'obstacle pour mieux les profiler. De nos jours, la CFD est de plus en plus présente dans différents domaines et industries (aéronautique, automobile, chimie...). Parmi ces domaines, le domaine du génie chimique est considéré comme le plus complexe en raison du couplage entre les réactions chimiques, les phénomènes de transfert de matière, transfert de chaleur et des quantités de mouvements ainsi que la présence, dans certain cas, des écoulements multiphasiques (liquide-solide, liquide-gaz et liquide-gaz-solide).

Dans cette partie nous portons à la présentation du programme Gambit et le code ANSYS-Fluent et les méthodes employées par celui-ci, ainsi le maillage de domaine de calcul et les conditions aux limites appliqués lors de simulations sous l'outil de résolution seront abordés.

## III.2 La méthode des volumes finis :

Parmi les méthodes numériques utilisées, on cite la méthode des différences finis, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis, ce dernier reste la plus utilisée dans la plupart des codes de calcul CFD (Computational Fluid dynamic).

La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation qui est bien adaptée pour la simulation numérique de divers types (elliptique, parabolique ou hyperbolique, par exemple) de lois de conservation, elle a été intensivement employée dans plusieurs domaines de technologie, tels que la mécanique des fluides, le transfert de la chaleur et de la masse, la technologie de pétrole ou la rhéologie.

## III.3. Présentation des Logiciels :

### III.3.1. Présentation du Logiciel GAMBIT :

Ce logiciel est utilisé pour définir et créer le modèle d'étude (surface ou volume) et de le mailler suivant le bon vouloir de l'utilisateur. Les différentes étapes d'utilisation de GAMBIT sont définies dans la notice suivante.

Après avoir lancé le logiciel, l'interface d'utilisation apparaît

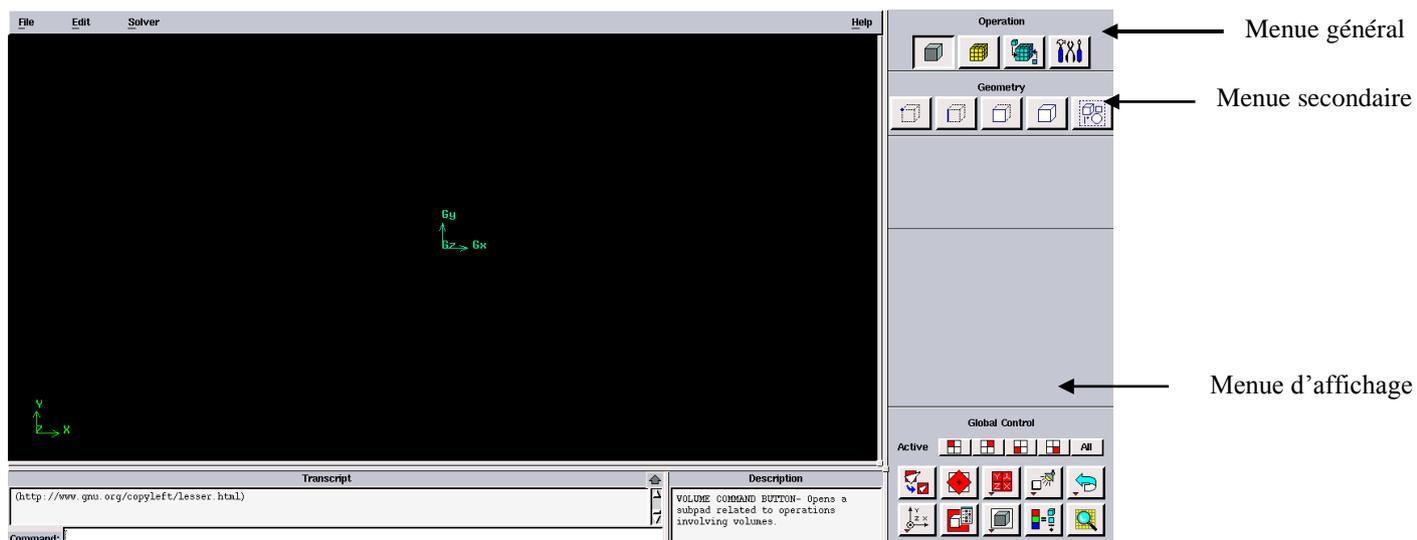


Figure III. 1 : Vue globale de GAMBIT

L'utilisation de Gambit est simple : principalement il faut prendre les menus en haut adroite et effectuer les tâches en partant du menu de gauche pour aller jusqu'à celui de droite (où normalement on doit avoir fini notre maillage).

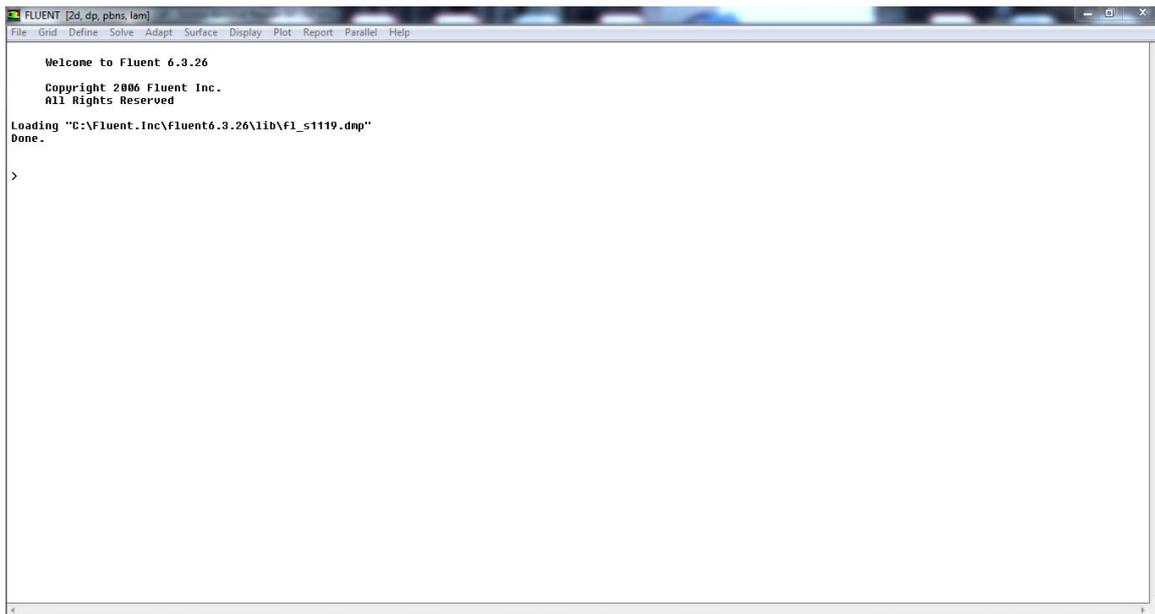
Si on désire ouvrir un projet déjà existant, on utilise le menu *file, open* ou *import* dans le cas d'un maillage. Il se peut que cette combinaison ne marche pas alors il faudra lire le journal (*Run journal*) ce qui refera pas à pas les étapes réalisées dans la géométrie sauvegardée.

### **III.2.2. Présentation du Logiciel ANSYS-Fluent :**

Il existe un certain nombre de codes industriels, aux meilleurs performants, permettant la prédiction d'écoulements de fluides (FLUENT, CFX, PHOENICS, FEMLAB, CFD-ACE, FLOTRAN, CFDS-FLOW3D ...) Dans ce code on ne définit que la nature et les valeurs de ces conditions (vitesses, températures, pression...) seront à définir sous Fluent.

Fluent est un code de calcul qui permet de simuler les écoulements des fluides avec et sans les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles structurées et non structurées produites grâce à des géométries complexes avec une facilité relative.

Les mailles supportées en 2D sont de types triangulaires ou quadrilatéraux. Elles sont tétraédriques/hexaédriques/pyramidales en 3D ou des mailles (hybrides) mélangées. Le code "Fluent" est écrit en langage C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage (allocation de la mémoire dynamique). En plus, il utilise une architecture qui lui permet de s'exécuter entant que plusieurs processus simultanés sur le même poste de travail ou sur des postes séparés pour une exécution plus efficace. Pour réaliser nos simulations, nous avons choisi le code de calcul ANSYS-Fluent, que nous présentons dans cette partie.



**Figure III. 2:**Vue globale du FLUENT

### **III.3. Procédures de résolution :**

Pour la création de notre modèle on passe par les étapes suivantes :

#### **III.3.1. Création de la géométrie :**

Notre géométrie est construite sur GAMBIT en 2D, vu sa complexité on a choisi de l'établir point par point, relier entre eux dans différentes direction les lignes sont créés, pour obtenir les faces.

Etapes à suivre pour la création de la géométrie :

**Création des points :** On positionne les points avec leurs coordonnées pour définir les Frontières et les dimensions de la géométrie.

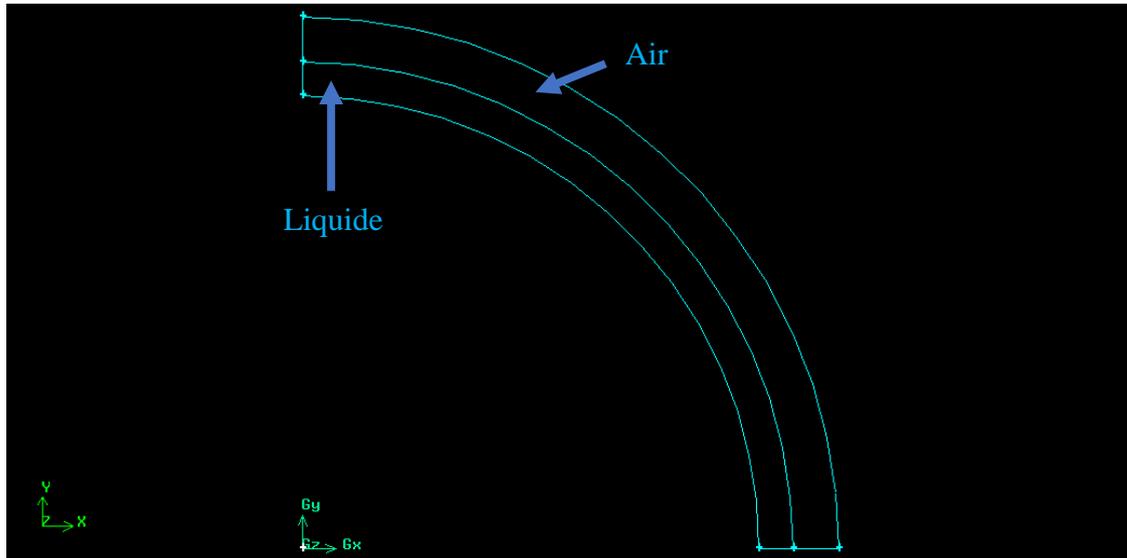
**Création des lignes :** On rejoint les points existants pour créer des lignes.

**Créations des faces :** On façonne les faces à partir des lignes existantes.

**Maillage des lignes :** On subdivise chaque ligne en sous -domines et on augmente la Densité des nœuds, pour chaque ligne. Chaque un segment il a un Raffinement spécifique dans une zone précise.

**Maillage des faces :** On maille les grandes faces avec l'élément carré et pour la face d'obstacle, on utilise l'élément triangulaire.

**Enregistrement et exportation du fichier maillé :** Une fois, la géométrie a été créée et les On exporte le fichier maillé vers Fluent 5/6 et donner un nom pour enregistrer.



**Figure III. 3:** La géométrie du problème représentée sur GAMBIT

### III.3.2. Création de maillage :

Pour construire un maillage, il est bon de suivre la démarche suivante :

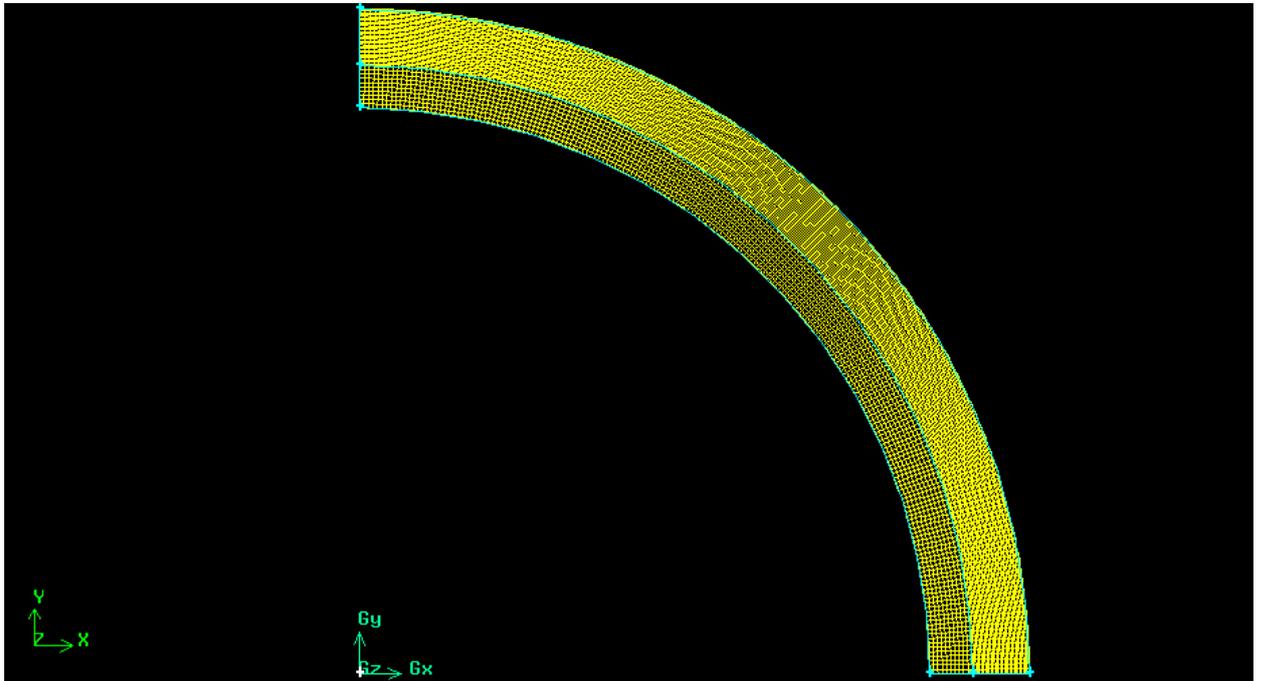
- définir la géométrie
- réaliser le maillage
- définir les paramètres des zones de calcul.

La géométrie comprend les positions physiques de points caractéristiques définissent la zone que l'on a à mailler : coordonnées spatiales des quatre sommets d'un carré ; du point de départ et du point d'arrivée d'une ligne ; du centre et de l'ouverture angulaire d'un arc de cercle. Il faut pouvoir représenter la zone à étudier par un ensemble de figures géométriques simples raccordées les unes aux autres.

Pour des maillages structurés, on peut faire la liaison entre la géométrie et le maillage, Aussi, avant de réaliser le maillage, il faut spécifier par écrit d'une part la géométrie adoptée pour

définir la zone à mailler, d'autre part les numéros des mailles correspondant aux points caractéristiques de la géométrie. Un nœud pourra alors être repéré par ces coordonnées physiques  $x$  et  $y$  ou indices  $I$  et  $J$ .

Par ailleurs, il peut être avantageux de définir des points intermédiaires qui ne sont pas indispensables à la définition de la géométrie mais qui permettent de délimiter les zones dans lesquelles les mailles seront adaptées pour raffiner le maillage près des parois par exemple ou bien pour épouser au mieux la forme des obstacles, parois ou autres...



**Figure III. 4 :** Maillage par GAMBIT 2D

### III.4 Choix de maillage :

Pour vérifier le maillage sur les résultats graphiques, on utilise plusieurs maillage (60x10, 100x20, 200x40, 240x60) pour obtenir les résultats graphiques de profile de hauteur et profile de vitesse.

On remarque un léger changement pour les maillages 60x10, 100x20, 200x40, et à partir de ce dernier y'a pas vraiment un changement pour les résultats Donc nous avons opté pour le maillage de (200x40) dans le reste du travail.

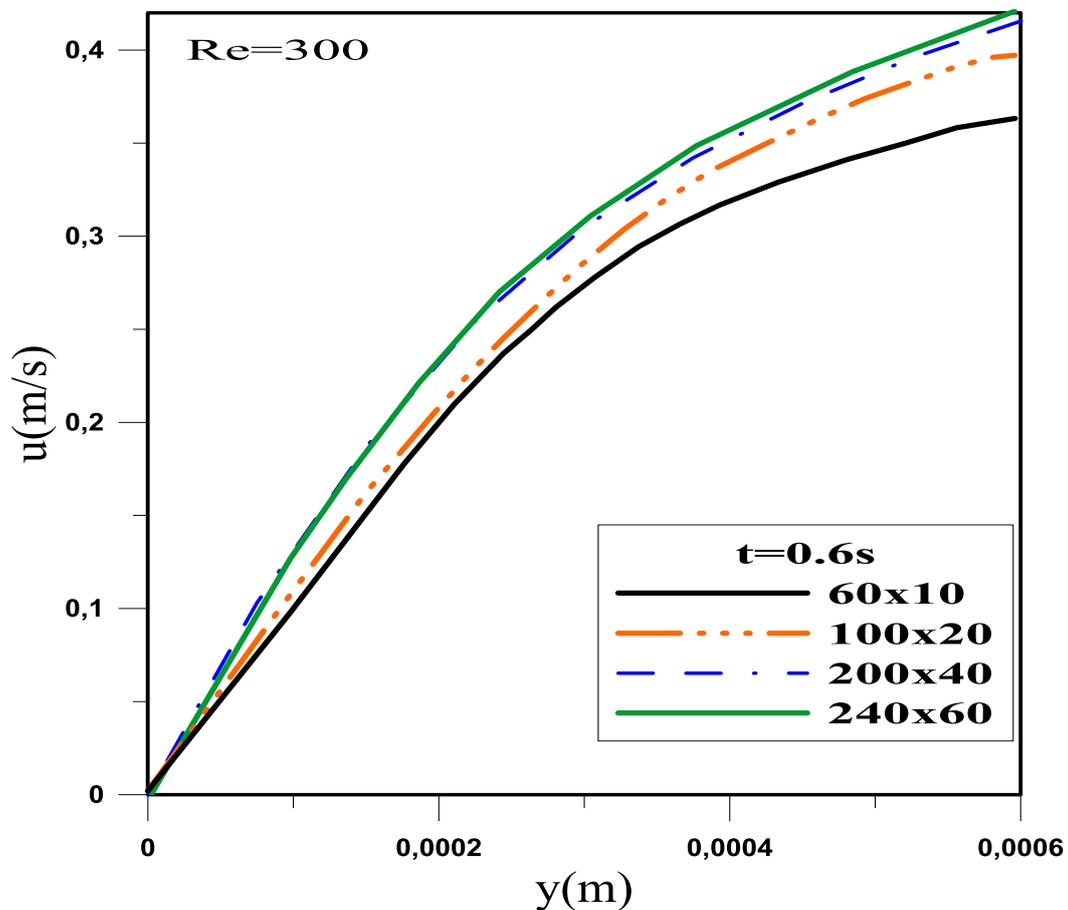


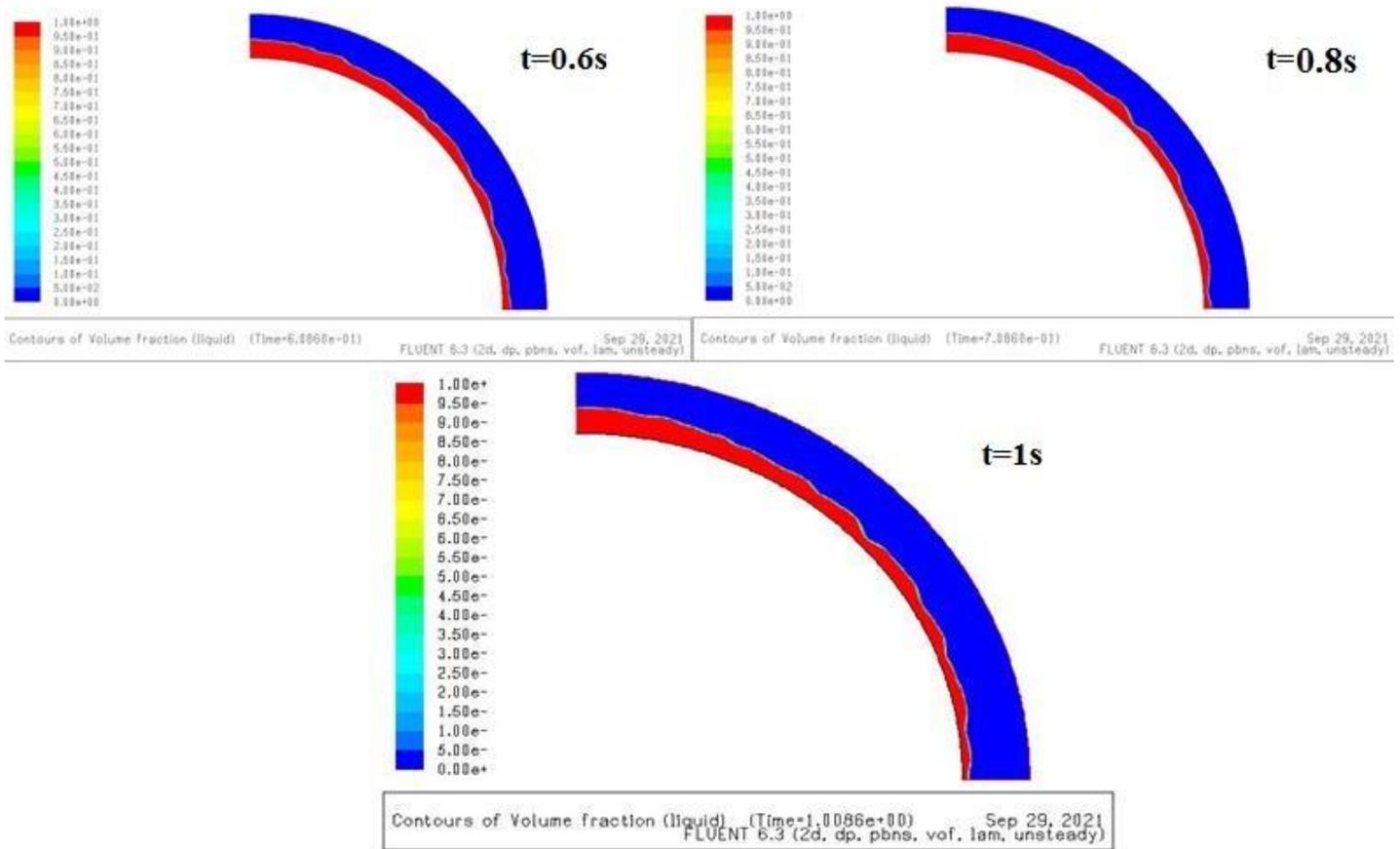
Figure III. 5 : Choix de maillage

### III.5 Résultats et discussion :

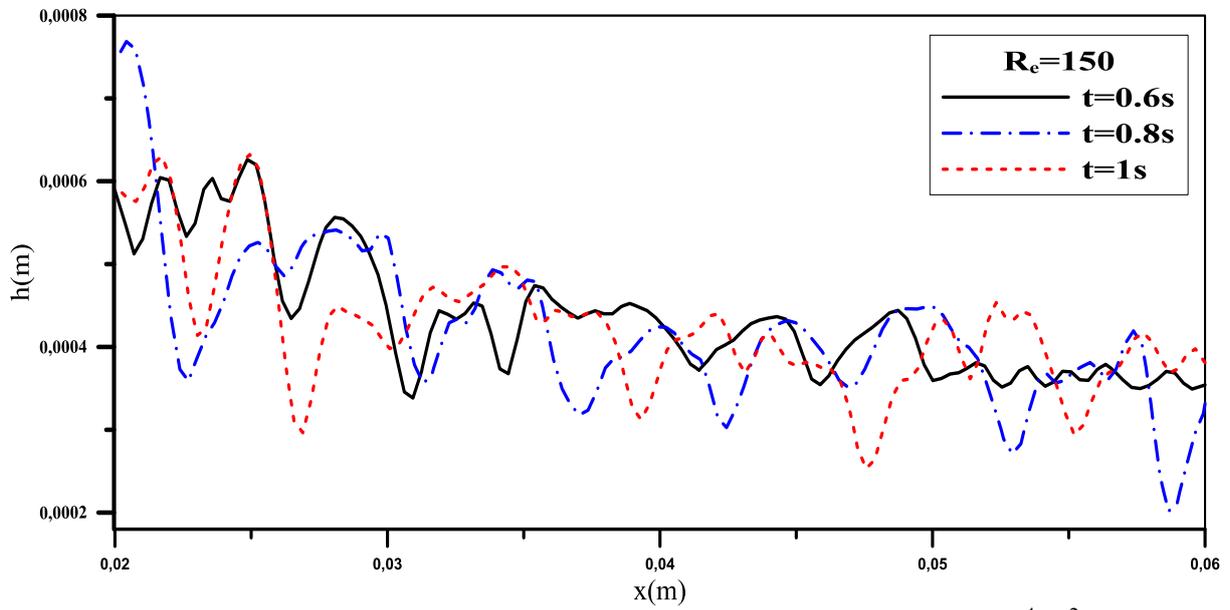
#### III.5.1 Profils de la hauteur :

##### III.5.1.1 Etude effet de temps sur le film :

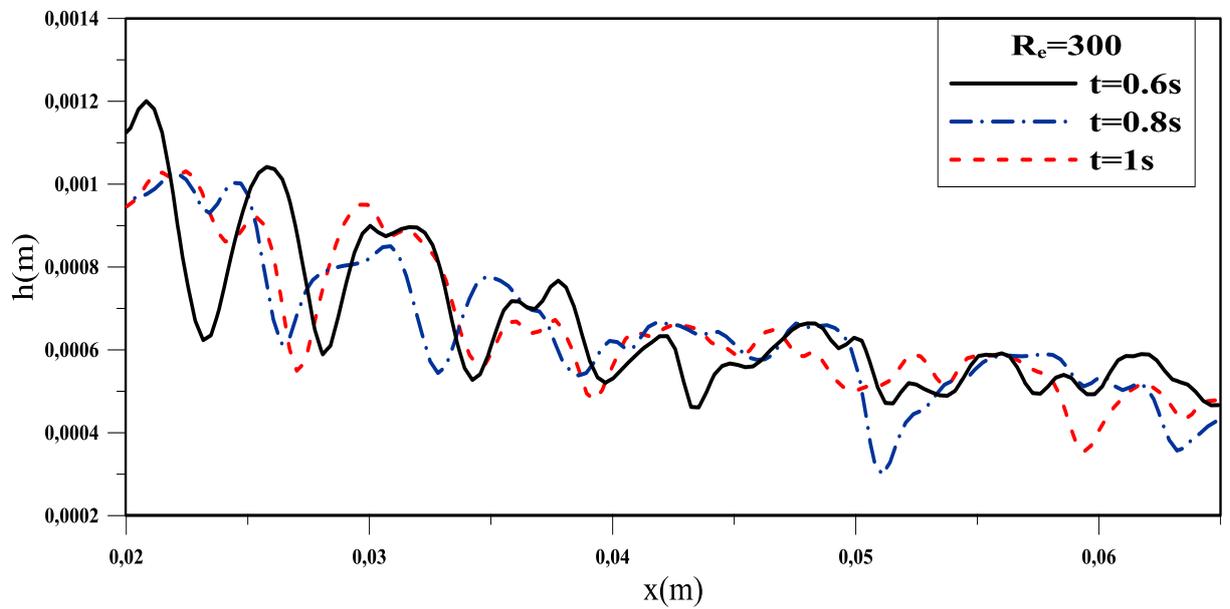
Dans cette partie, on s'intéresse à présenter les résultats de la simulation d'un écoulement D'eau sur une paroi cylindrique, avec la hauteur initial du liquide  $H=0.003m$ , Pour cela, on varie la vitesse de circulation  $Re=150$  jusqu'à  $Re=900$  et on présente les résultats comme suit:



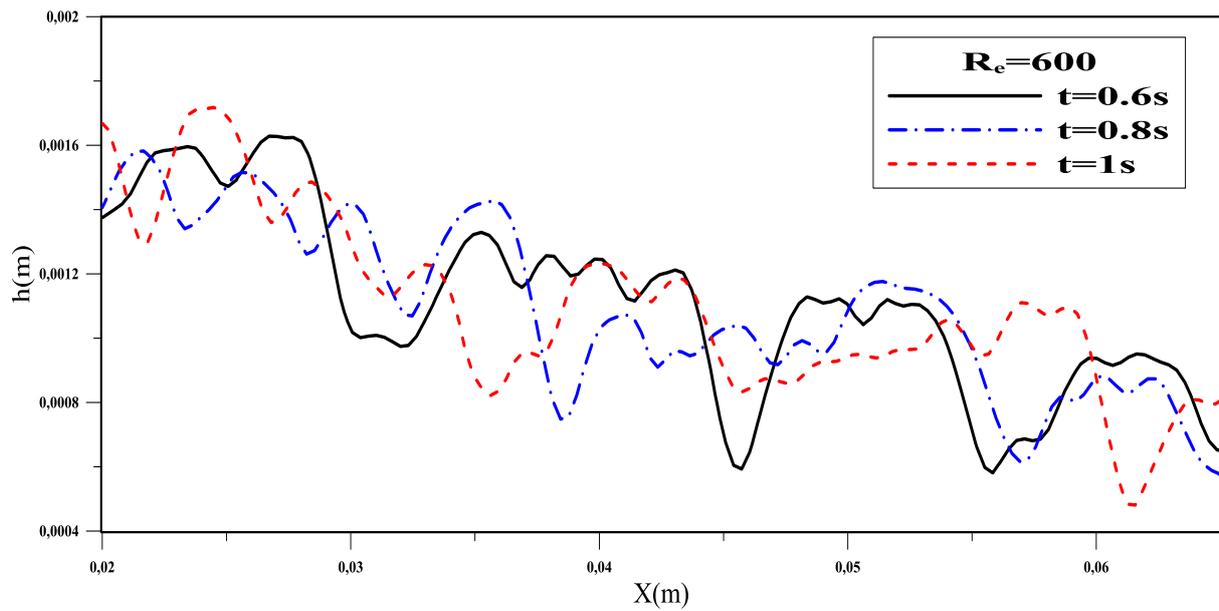
**Figure III.6:** Contour de la fraction volumique a déférent temps pour  $Re=900$  ( $t=0.6s$ ,  $t=0.8s$  et  $t=1s$ ).



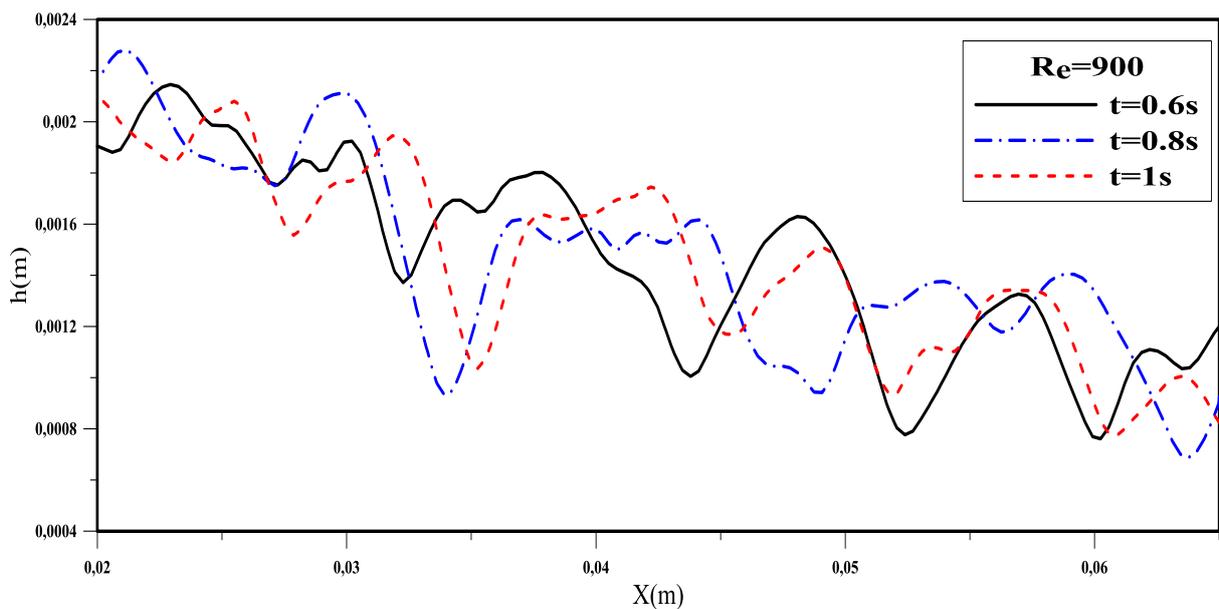
**Figure III.6.1:**Hauteur instantanée du film Pour  $Re = 150$ ,  $q_v=1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$



**Figure III.6.2:**Hauteur instantanée du film Pour  $Re = 300$ ,  $q_v=3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$



**Figure III.6.3:** Hauteur instantanée du film Pour  $Re = 600$ ,  $q_v = 6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$



**Figure III.6.4:** Hauteur instantanée du film Pour  $Re = 900$ ,  $q_v = 9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

Les figures suivantes III.5 (1, 2, 3, 4) représentent l'évolution de la hauteur instantanée du film liquide correspondent aux différents nombres de Reynolds. La hauteur maximale du film  $h_{max}$  et la hauteur minimale du film  $h_{min}$  sont obtenues à partir des résultats numériques, présentées sur les figures, tous les cas considérés sont généralement en accord satisfaisant les uns avec les autres. En particulier, les mêmes tendances peuvent être extraites en ce qui concerne la variation de la hauteur du film et la vitesse des vagues lorsque  $R_e$  augmente, une augmentation de  $R_e$  entraîne initialement une augmentation de la hauteur des vagues. On remarque que Les ondes apparaissent comme un train d'ondes de forme sinusoïdale sur toute la surface libre en raison de la tension de la surface (contacte entre l'air et l'eau). Nous voyons le processus de scission des ondes et les emplacements des zones de rupture sur le film (variation de la hauteur minimal) varient avec temps.

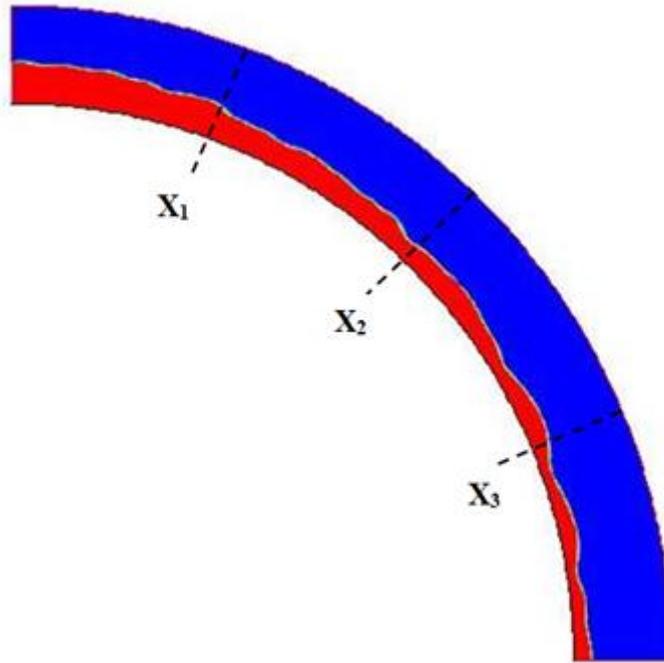
<b>Re</b>	<b>t(s)</b>	<b><math>h_{\min}</math>(m)</b>	<b>X(m)</b>
<b>150</b>	<b>0.6s</b>	<b>0,000338342</b>	<b>0,0309347</b>
	<b>0.8s</b>	<b>0,000253165</b>	<b>0,0475667</b>
	<b>1s</b>	<b>0,000224976</b>	<b>0,059069</b>
<b>300</b>	<b>0.6s</b>	<b>0,000461161</b>	<b>0,0435433</b>
	<b>0.8s</b>	<b>0,000298822</b>	<b>0,0510915</b>
	<b>1s</b>	<b>0,000353619</b>	<b>0,0593678</b>
<b>600</b>	<b>0.6s</b>	<b>0,000581013</b>	<b>0,0558322</b>
	<b>0.8s</b>	<b>0,000568856</b>	<b>0,065</b>
	<b>1s</b>	<b>0,000480779</b>	<b>0,0615675</b>
<b>900</b>	<b>0.6s</b>	<b>0,000760994</b>	<b>0,060239</b>
	<b>0.8s</b>	<b>0,0006874</b>	<b>0,0637648</b>
	<b>1s</b>	<b>0,000776285</b>	<b>0,060609</b>

**Tableau III.1:**Emplacement de la hauteur minimal du film liquide en fonction de nombres de Reynolds.

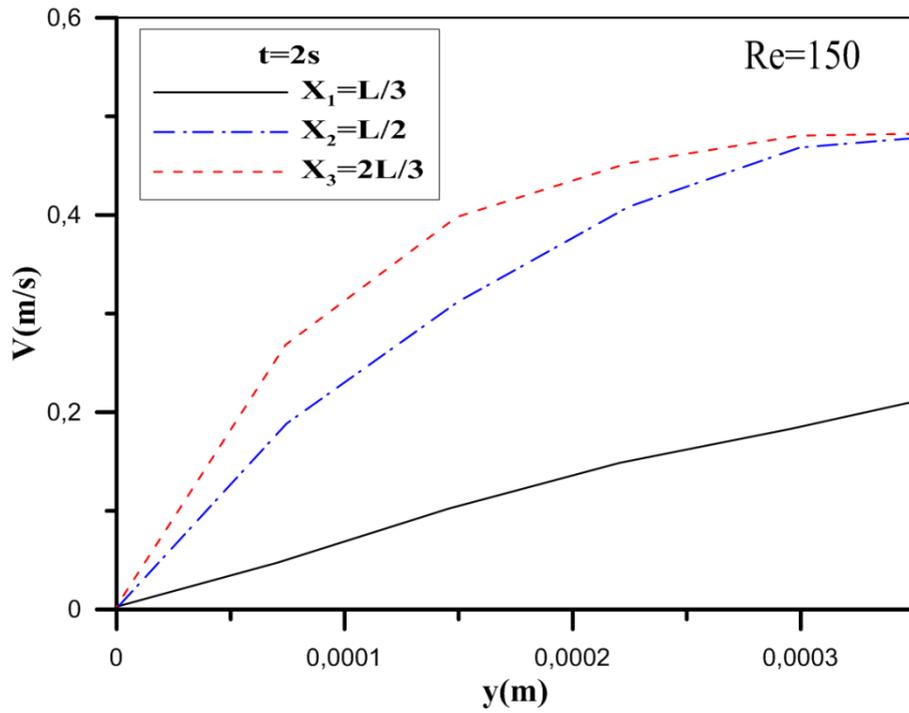
### III.5.2 Profils de vitesses :

#### III.5.2.1 Etude Effet de position :

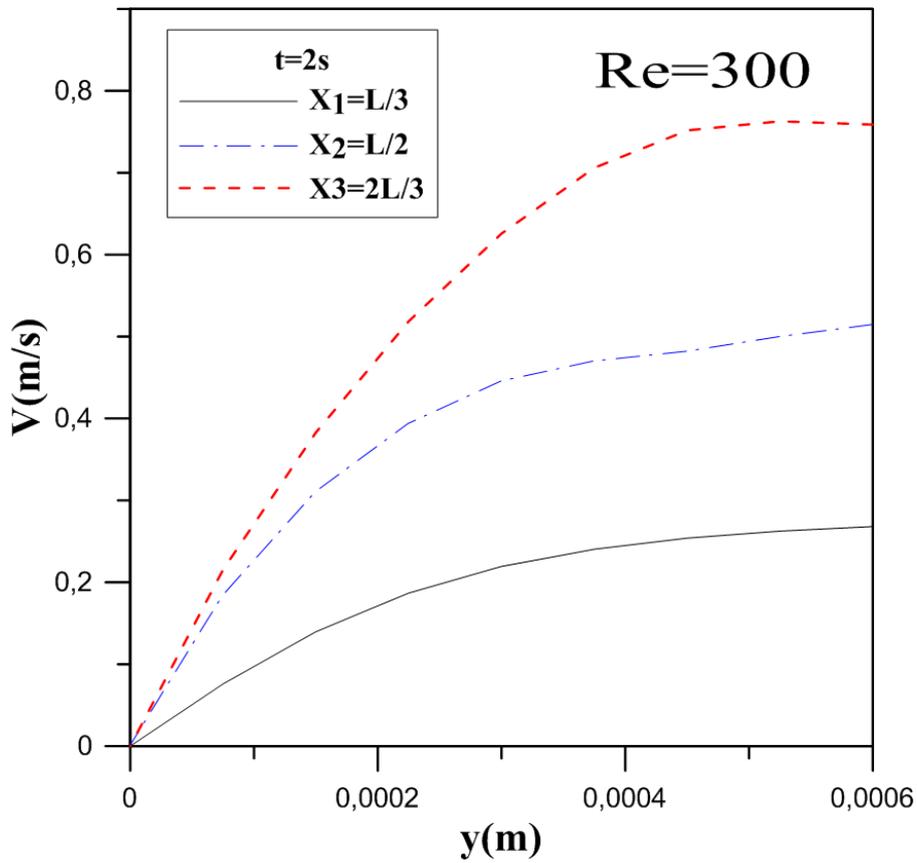
Les profils de vitesse en fonction de  $y$  sont tracés dans les zones  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  de sorte que ces profils à diverses positions peuvent être dessinés dans un seul graphe. Les positions où les profils de vitesse tracé sont indiquées et numérotées par des lignes discontinuées dans la figure accompagnant figure III.7 avec  $V = \sqrt{u^2 + v^2}$ .



**Figure III.7:** Illustration schématique des positions auxquelles les profils de vitesse sont analysés.

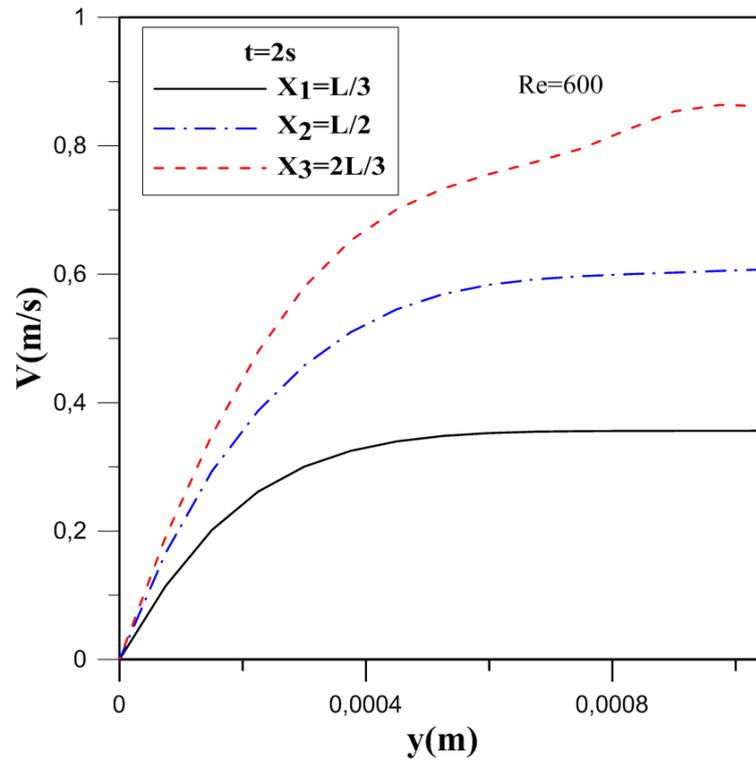


**Figure III.7.1:** Profile de vitesse à diverse positions  $X_1, X_2, X_3$  pour  $Re=150$ ,  
 $q_v=1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

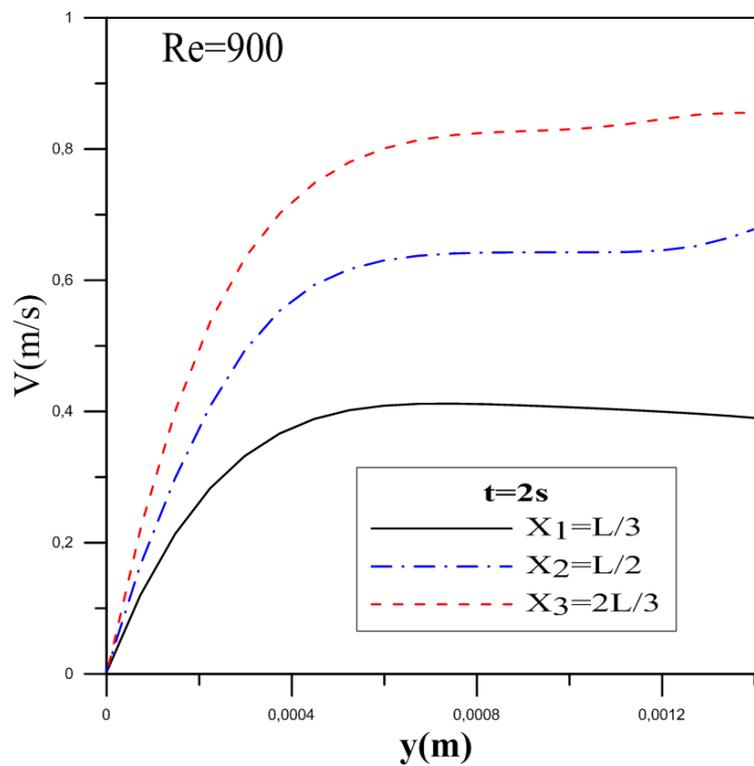


**Figure III.7.2:** Profile de vitesse à diverse positions  $X_1, X_2, X_3$  pour  $Re= 300$ ,  $q_v=3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Les figures III.7. (1,2) représentent la variation de la vitesse à différentes positions  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  pour les nombres de Reynolds  $Re=150$  et  $300$  et les débits  $q_v=1.5 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  et  $3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  à  $t=2\text{s}$ , premièrement on voit que l'évolution de la vitesse dans les zones  $X_1$  et  $X_3$  tend vers une stabilité, par contre la région  $X_2=L/2$  n'a pas atteint la stabilité. Nous remarquons aussi que les variations des vitesses évoluent progressivement dans chaque zone du domaine, cette variation en  $X_2$  prend une valeur plus remarquable par rapport aux autres zones, et ainsi à l'entrée du domaine  $X_1=L/3$  est plus faible qu'aux zones  $X_2$ ,  $X_3$ .

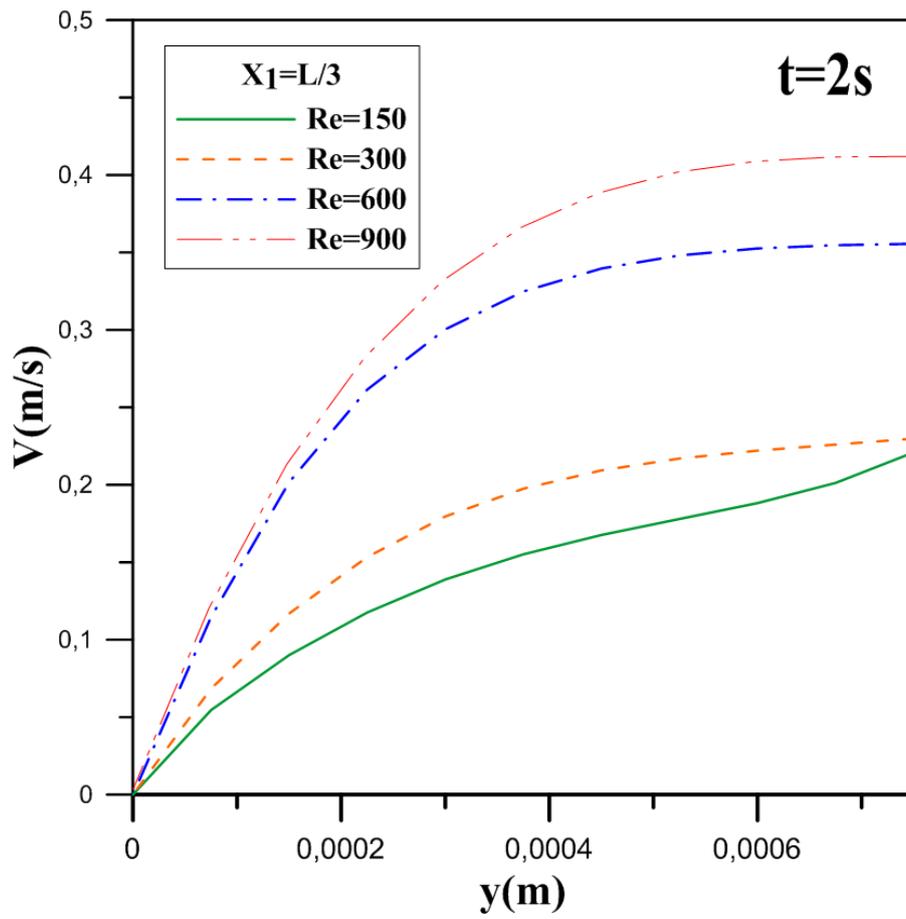


**Figure III.7.3:** Profile de vitesse à diverse positions  $X_1, X_2, X_3$  pour  $Re=600$ ,  
 $q_v=6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

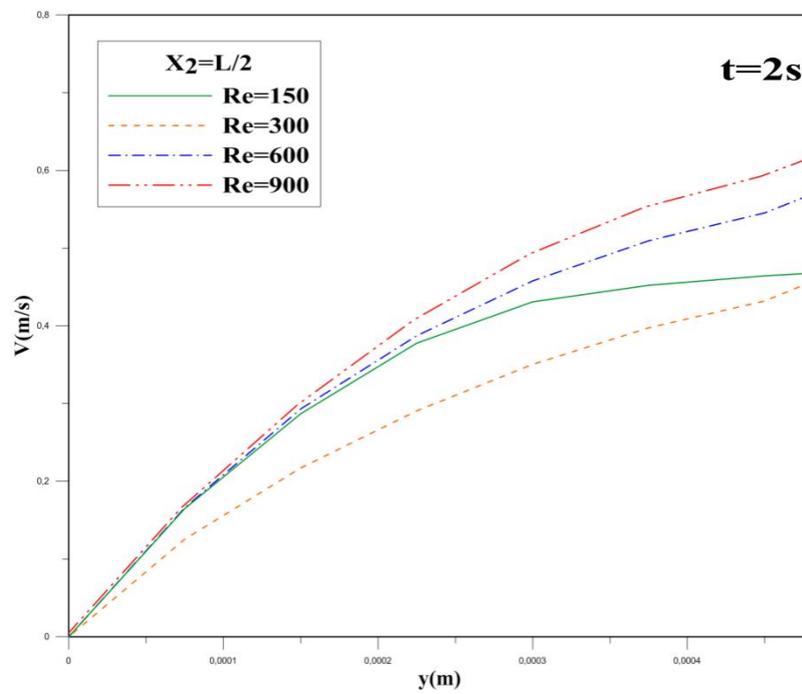


**Figure III.7.4:** Profile de vitesse à diverse positions  $X_1, X_2, X_3$  pour  $Re=900$ ,  
 $q_v=9 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ .

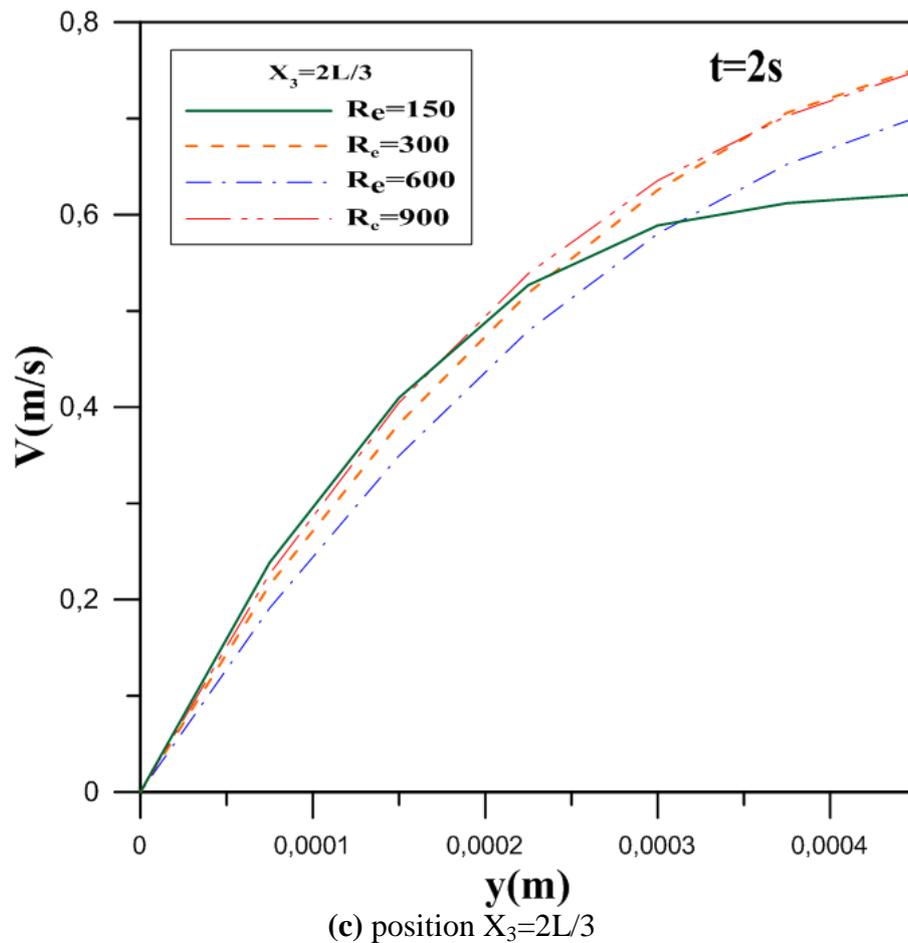
Les figures III.7. (3,4) représentent la variation de la vitesse à différentes positions  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  pour les nombres de Reynolds  $Re=600$  et  $900$  et les débits  $qv=6 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s et  $9 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s à  $t=2$ s, premièrement on voit que l'évolution de la vitesse dans toutes les zones  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  tend vers une stabilité. Nous remarquons aussi que les variations des vitesses s'évoluent progressivement dans chaque zone du domaine, cette variation en  $X_2=L/2$  prend une valeur plus remarquable par rapport aux autres zones, et ainsi à la sortie du domaine  $X_3=2L/3$  est plus faible qu'aux zones  $X_2$ ,  $X_1$ .



(a) position  $X_1=L/3$



(b) position  $X_2=L/2$



**Figure III.8. (a),(b),(c):** Profile de vitesse à différents nombres de Reynolds  $Re(150,300,600,900)$  pour diverse positions  $X_1, X_2, X_3$ .

La figure III.8. (a), (b), (c) représente la variation de la vitesse à différents nombres de Reynolds  $Re$  (150, 300, 600, 900) aux points  $X_1, X_2, X_3$  à  $t=2s$ , nous constatons les remarques suivantes : l'évolution de la vitesse converge vers une stabilité. Les variations de vitesses évoluent d'une manière parabolique, cette dernière au point  $Re=900$  est la variation la plus importante.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire est une contribution à la compréhension globale du problème de la rupture d'un film liquide s'écoulant par gravité avec différentes nombre de Reynolds le long d'une paroi cylindrique, l'objectif principal de ce travail consiste à contrôler la rupture d'un film liquide mince en utilisant la méthode de volume of fluid (VOF) pour le suivi des surfaces libres et le schéma numérique a été appliqué à la simulation de film liquide mince en 2 dimensions, la hauteur de fluide a été fixée pour la géométrie pour différentes nombre de Reynolds.

Cette démarche nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

- l'augmentation nombre de Reynolds entraîne l'instabilité de l'écoulement ainsi qu'une augmentation de la hauteur des vagues.
- le processus de scission des ondes et les emplacements des zones de rupture sur le film (variation de la hauteur minimal) varient avec le temps.
- les variations des vitesses évoluent progressivement dans chaque zone du domaine pour différent nombre Reynolds.

Le modèle numérique développé dans le cadre de la présente étude ouvre la voie à d'autres études du phénomène de rupture film liquide dans des géométries plus complexes, ainsi pour différents fluides.

# **Références Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

- 1-[1] Vazquez, José, ECOLE NATIONALE DU GENIE DE L'EAU ET DE L'ENVIRONNEMENT DE STRASBOURG...HYDRAULIQUE GENERALE, page 20.
- 2- [2] Solesio, Jean-Noël, stabilité et métrologie des films liquide, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1978.
- 3- [3] O.Hakim, Etude de l'écoulement d'un film liquide sur un plan inclinée. , Mécanique des fluides et énergétique, thèse Doctorat (2019).
- 4- [4] SOLESIO J.N. ,1, Instabilités des films liquides isothermes, CEA-R-4835 1977.
- 5- [5]Laouar et Laouar, « Stabilité Interfaciale d'un Film Liquide Ruisselant »2010.
- 6- [6] Zarbane, « ÉTUDE NUMÉRIQUE ET EXPÉRIMENTALE DU COMPORTEMENT D'UN FILM LUBRIFIANT SOUMIS A UN CHARGEMENT PÉRIODIQUE » 2009.
- 7- [7] Champougny, « Génération et rupture de films liquides minces » 2016, Page 42.
- 8- [8] Champougny, « Génération et rupture de films liquides minces » 2016, Page 44.
- 9- [9] P.L. Kapitza and S.P. Kapitza. Wave flow of thin liquid layers.Zh.Eksp.Teor.Fiz., 19 :105–120,1949.
- 10- [10] D. J. Benney, "Long waves on liquid films," J. Math. Phys.45,150–155(1966).
- 11- [11] A. B. Thompson, D. Tseluiko, and D. T. Papageorgiou, "Falling liquid films with blowing and suction," J. Fluid Mech. 787, 292–330 (2016).
- 12- [12] Yih, C.-S. , Stability of liquid flow down an inclined plane. Phys. Fluids 6 : 321-34, (1963).
- 13- [13] Ruckenstein, E., et Jain, R. K., 1974, "Spontaneous Rupture of Thin Liquid Films", Chemical Society, Faraday Transactions, 270, pp. 132-146.

14- [14] Wilkes, J.O. and Nedderman, P. (1962) "The measurement of velocities in thin films of liquid", Chem. Eng. Sci., 17, 177-187.

15- [15] Jones, L.O. and Whitaker S., (1966) "Experimental study of falling liquid films", AIChE Journal, 12, 525-529.

16- [16] Protalsky, S. and Clegg, A.J., "An experimental study of falling liquid films", Chem. Eng. Sci., 27, 1257-1265 (1972).

17- [17] Gstoehl D (2004) measurement of falling film thickness around a horizontal tube using a laser measurement technique, Heat Transfer Engineering 25, 28-34.

18- [18] Herbaut et al., « Analyse du film lacrymal et évaluation de sa qualité optique » volume 42, numéro 3, page 226-243, 2019.

19- [19] C. W. Hirt and B. D. Nichols. *Volume of Fluid (VOF) method for the dynamics of freeboundaries*. Journal of Computational Physics, 39 :201–225, January 1981.

## Résumé

L'objectif principal de cette étude est d'aborder le phénomène de la rupture d'un film liquide, Nous nous sommes intéressés à une méthode pleinement numérique, cette approche aboutit à contrôler la hauteur minimal de la rupture, on a conclu les résultats de la simulation en utilisant la méthode VOF du logiciel FLUENT.

Mots clés : film liquide, rupture, simulation, Fluent, écoulement, volume of fluide (VOF), Surface libre, paroi cylindrique, hauteur film liquide.

---

## Abstract

The main objective of this study is to address the phenomenon of the rupture of a liquid film, we are interested in a fully numerical method, this approach results in controlling the minimum height of the rupture, we concluded the results of the simulation using the VOF method of the software FLUENT.

Keywords: liquid film, rupture, simulation, Fluent, flow, volume of fluid (VOF), free surface, cylindrical wall, liquid film height