

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 : Installations Énergétiques et Turbomachines

Par :

Boulanseur Halim

Benyahia Lyes

Thème

**Etude de la stabilité d'un débit de fluide sur une paroi courbe : application
au cas d'une sphère**

Soutenu le 02/10/2022 devant le jury composé de:

Mr. M. ALLOUCHE

Rapporteur

Mr. A. DJEMA

Président

Mr. F. NAIT BOUDA

Examineur

Année Universitaire 2021-2022

Remerciements

Nos vifs remerciements seront adressés à :

ALLOUCHE Moussa, notre encadreur, pour sa disponibilité et son soutien actif, pour l'attention qu'il nous a accordé et pour nous avoir orientés dans le bon sens quant à l'élaboration de ce mémoire.

Aux membres de jury qui ont accepté de juger notre travail.

Tous les enseignants du département de génie mécanique pour leur contribution en terme de transmission de savoir.

Tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont participé à notre formation et à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes chers parents qui m'ont soutenu durant mes études et pour tout le mal qu'ils se sont donnés afin de me faciliter la vie, pour leur bienveillance, leur affection et leur éternel amour.

A mes frères, mes sœurs bien-aimés pour leur soutien et leur disponibilité. A mes amis.

Halim BOULANSEUR

Je dédie ce travail :

A mes parents, aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mes frères, ma sœur qui m'ont soutenu tout au long de ce projet. A mes amis et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

Lyes BENYAHIA

Sommaire

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Sommaire	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
Nomenclature.....	vi
Introduction Générale	1
Chapitre 1 : Généralités et revue bibliographique.....	2
1.1 Généralités sur les écoulements de films minces	2
1.1.1 Films minces	2
1.1.2 Fluide Newtonien	2
1.1.3 Fluide non Newtonien	2
1.1.4 Couches minces	3
1.1.4.1 Définitions.....	3
1.1.4.2 Les propriétés des couches minces.....	3
1.1.4.3 Techniques de dépôt des couches minces.....	3
1.1.2 La viscosité.....	4
1.1.3 Revêtements.....	5
1.1.3.1 Définition	5
1.1.3.2 Types de revêtements	5
1.1.4 Généralités sur la méthode de VOF (Volume Of Fluid)	5
1.1.4.1 Présentation générale de la méthode de VOF	5
1.1.4.2 Théorie de la méthode de VOF	6
1.1.4.3 Approximation de la variable densité pour la méthode VOF.....	7
1.1.5 Ecoulement déphasiques	7
1.1.5.1 Systèmes diphasiques dans l'industrie et la nature	8
1.1.6 Angle de contact.....	8
1.1.7 La fraction volumique	9
1.1.8 Tension superficielle	9
1.2 Revue bibliographique	10

Chapitre 2 : Positionnement de problème.....	11
2.1 Introduction	11
2.2 Modèle physique du problème	11
2.3 Formulations mathématiques.	12
2.3.1 Equation de continuité.....	12
2.3.2 Equation de conservation de quantité de mouvement	13
2.4 Interpolation près de l'interface sous-Fluent	14
2.5 Tension de surface.....	14
2.6 Présentation de la géométrie étudiée sous Gambit.....	15
2.7 Réalisation de maillage	15
2.8 Conditions aux limites.....	16
2.9 Conclusion.....	17
Chapitre 3 : Résultats et discussions	18
3.1 Introduction	18
3.2 Effet de la vitesse débitante.....	18
3.2.1 Effet de la vitesse sur l'accélération du front	18
3.2.2 Effet de la vitesse sur l'apparition des doigts.....	19
3.2.3 Gonflement de front	20
3.3 Effet de l'épaisseur du film à l'entrée de l'écoulement.....	21
3.3.1 Effet de l'épaisseur du film sur l'accélération du front.....	21
3.3.2 Effet de l'épaisseur du film sur l'apparition des doigts	22
3.3.3 Gonflement de front	22
3.4 Conclusion.....	23
Conclusion Générale	24
Références Bibliographiques.....	25
Résumé/Abstract	26

Liste des figures

Figure 1.1 : Schéma qui représente la méthode référence pour déposer une couche mince	4
Figure 1.2 : Courbe de viscosité d'un fluide newtonien.....	4
Figure 1.3 : Taux de présence en fluide bleu dans les volumes de contrôle.....	7
Figure 2.1 : Géométrie du problème cas d'une sphère.....	11
Figure 2.2 : Géométrie du problème cas d'une sphère sous Gambit.....	14
Figure 2.3 : Maillage de la sphère sous Gambit	15
Figure 3.1 : Evolution du film mince sur la sphère à différents temps ($t = 0.16$ s, 0.36 s) pour $e = 4$ mm et ($u_e = 0.2$ m/s, 0.5 m/s).....	19
Figure 3.2 : Effet de la vitesse d'entrée sur l'apparition des doigts à $t = 0.4$ s et ($u_e = 0.2$ m/s, 0.5 m/s).....	20
Figure 3.3 : Les résultats obtenus sous Fluent représentent le gonflement de front à $t = 0.46$ s et ($u_e = 0.2$ m/s, 0.5 m/s)	21
Figure 3.4 : Evolution du film mince sur la sphère à différents épaisseur ($e = 2$ mm, $e = 4$ mm) et $t = 0.16$ s.....	22
Figure 3.5 : 5 effet de l'épaisseur du film sur l'apparition des doigts avec ($e = 2$ mm , $e = 4$ mm) et $t = 0.4$ s.....	22
Figure 3.6 : Les résultats obtenus sous Fluent représentent le gonflement de front avec et ($e = 2$ mm , $e = 4$ mm) à $t = 0.36$ s	23

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Le nombre de maille utilisé dans la géométrie.....	15
Tableau 2.2 : Les conditions aux limites dans le logiciel.....	16

Nomenclature

Symboles	Définition	unités
F_{sf}	force de tension superficielle/unité de volume	N/m^3
e	épaisseur	mm
ρ	masse volumique	kg/m^3
P	pression	pa
g	gravité	m/s^2
V	volume de fluide	m^3
r	coordonnées radiale	m
R	rayon de la sphère	m
E_s	Energie de surface	N
θ_N	angle d'avancement du front	
θ_w	angle de contact	
h	hauteur du film	m
μ	viscosité dynamique	$kg/m.s$
u	vitesse	m/s
t	temps	s
L	longueur	m
Q	débit local	m^3/s
ω	vitesse angulaire	rad/s
\vec{n}	la normale	

Introduction générale

Introduction Générale

Les écoulements des films minces sont rencontrés dans de nombreux domaines industriels, naturels et de revêtement. La stabilité de l'interface entre deux ou plusieurs couches de fluides visqueux en écoulement laminaire a fait l'objet de nombreux travaux tant du point de vue théorique qu'expérimental. Une partie de ces études concernent la stabilité de l'interface s'écoulant par gravité sur des surfaces planes. Une seconde partie concerne l'étude des écoulements sur des parois courbes. Le moteur de l'écoulement peut être un gradient de pression, un cisaillement ou alors la gravité comme dans notre travail : Un film liquide qui s'écoule par gravité sur une paroi courbe, représente une couche liquide mince avec une importante surface libre. L'écoulement peut être constitué d'une ou de plusieurs couches de fluide. Mathématiquement, l'écoulement est décrit par les équations de Navier Stokes incompressibles en prenant en compte la faible épaisseur de l'écoulement. Ces écoulements présentent des phénomènes hydrodynamiques complexes et importants pour les applications industrielles. Dans les écoulements visqueux, des effets inertiels faibles peuvent être à l'origine d'instabilités qui se manifestent par l'apparition d'ondes de surface. Ces ondes résultent de la compétition entre les effets de la gravité qui déstabilisent aux grandes longueurs d'ondes et les effets de la tension superficielle qui sont stabilisants aux courtes longueurs d'ondes. Parallèlement à ces ondes gravitaires, le cisaillement d'un liquide par un gaz peut entraîner l'apparition d'ondes à l'interface.

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les couches minces, les revêtements et la méthode de VOF (Volume Of Fluide).

Le deuxième chapitre établit la géométrie et les équations nécessaires pour étudier le phénomène.

Le troisième chapitre résume les résultats obtenus sur les cas étudiés.

Finalement, nous clôturons notre travail avec une conclusion générale et des perspectives pour les études postérieures concernant ce domaine d'étude.

Chapitre I
Généralités et revue
bibliographique

1.1 Généralités sur les écoulements de films minces

Le domaine des couches minces destinées à l'amélioration de la fonctionnalité des outils, ainsi qu'aux secteurs de l'électronique et de l'optique, a fait l'objet de nombreuses études scientifiques et industrielles. En effet, dans le domaine de la mécanique, le développement des différentes techniques de dépôt et la maîtrise des paramètres opératoires ont permis d'obtenir des revêtements présentant une bonne résistance à l'usure, une dureté très élevée, ainsi qu'une stabilité thermique et chimique remarquable. Ainsi, la durée de vie des outils peut être significativement améliorée, de 2 à 4 fois.

1.1.1 Film mince

On appelle film liquide mince une lamelle de liquide dont l'épaisseur, typiquement micrométrique, peut varier de quelques nanomètres à quelques millimètres pour des films d'extension métrique.

1.1.2 Fluide Newtonien

Un fluide est une matière parfaitement déformable. Cela inclut les gaz, les liquides et même certains solides. Les fluides sont nombreux et nous entourent au quotidien. Les fluides, tels que l'eau, sont des fluides newtoniens. On peut dire qu'il s'agit de fluides qui décrivent la majorité des fluides, composés de molécules simples et présentant les caractéristiques suivantes :

- Les contraintes de cisaillement sont proportionnelles au gradient de vitesse.
- La viscosité est indépendante de la vitesse de cisaillement.

Les contraintes s'annulent immédiatement lorsque l'écoulement est arrêté et sont indépendantes du temps.

1.1.3 Fluide non-Newtonien

Un fluide non-newtonien possède une structure moléculaire complexe qui n'obéit pas à la loi classique des fluides newtoniens. Il est défini comme un fluide pour lequel le rapport (F/S) n'est pas constant. En d'autres termes, on peut dire qu'il s'agit d'un fluide dont la courbe de comportement est non linéaire.

1.1.4 Couches Minces

1.1.4.1 Définition

Une couche mince est une fine pellicule de matériau déposée sur un support appelé «substrat». L'objectif du dépôt de couches minces est d'apporter des propriétés spécifiques à la surface des pièces, tout en conservant les avantages des propriétés massives du substrat.

1.1.4.2 Les propriétés des couches minces

Les fonctions attribuées à un revêtement doivent, en définitive, se traduire par des objectifs opérationnels liés à des propriétés physiques quantifiables. Ainsi, il est possible d'exiger du système « substrat + revêtement » qu'il réponde au cahier des charges suivant :

- Une ténacité élevée
- Une parfaite adhésion sur le substrat
- Une grande résistance à la formation et à la progression des fissures
- Une faible conductivité et diffusivité thermique
- Une haute résistance à l'oxydation
- Une épaisseur adéquate
- Une fonction barrière de diffusion

1.1.4.3 Techniques de dépôt des couches minces

Les méthodes utilisées pour le dépôt des couches minces peuvent être divisées en deux groupes, basés sur la nature du processus physique ou chimique de dépôt.

- **Les méthodes physiques :** Elles incluent le dépôt physique en phase vapeur, dit « PVD » (Physical Vapor Deposition), l'ablation laser, l'évaporation thermique, la pulvérisation cathodique (« sputtering ») et l'épitaxie à couche atomique.
- **Les méthodes chimiques :** Elles incluent les méthodes de dépôt en phase gazeuse et en phase liquide.

Les méthodes en phase gazeuse sont : le dépôt chimique à phase vapeur (Chemical Vapor Deposition – CVD).

Les autres méthodes, telles que la spray pyrolyse, le sol-gel, le spin-coating et le dip-coating, emploient des solutions comme précurseurs.

La figure I.3 résume le paragraphe ci-dessus.

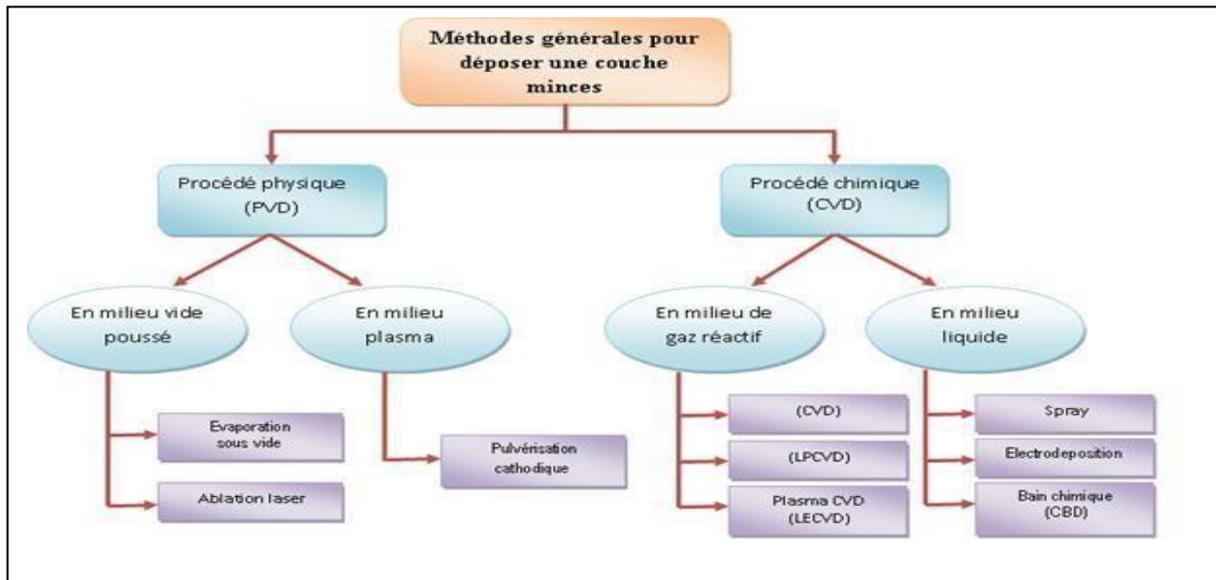


Figure 1.1 : Schéma qui représente la méthode référence pour déposer une couche mince.

1.1.2 La viscosité

La notion de viscosité est associée à la résistance qu'oppose tout fluide à sa mise en mouvement. Pour préciser cette propriété de façon plus quantitative, nous considérons l'expérience de "Couette" en écoulement plan. Telle qu'elle est schématisée à la figure I.3, cette expérience concerne un fluide visqueux disposé entre deux plans parallèles distants d'une hauteur S . Elle consiste à déplacer l'une des deux parois relativement à l'autre par un mouvement permanent de translation rectiligne dans son propre plan. Pour simplifier, on suppose que la paroi inférieure est fixe et que la paroi supérieure est mobile à la vitesse U_0 .

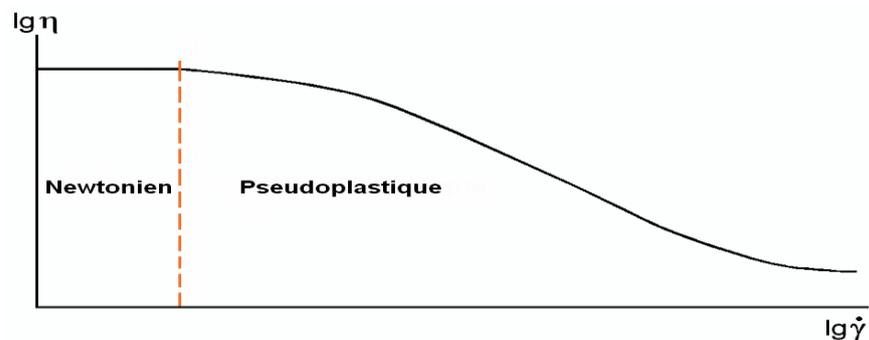


Figure 1.2 : Courbe de viscosité d'un fluide newtonien.

1.1.3 Revêtement

1.1.3.1 Définition

Un revêtement a pour but d'améliorer les propriétés de surface d'un objet. Par exemple, les revêtements peuvent servir pour préserver ou améliorer l'apparence, l'adhésion, la résistance à la corrosion, la mouillabilité ou ajuster les propriétés de surface de l'objet considéré face aux contraintes mécaniques et aux différents éléments de l'environnement extérieur (ultraviolets, eau, oxydation (corrosion), température, moisissures, etc.).

1.1.3.2 Types de revêtement

Il existe principalement deux types de revêtements suivant leur composition :

- revêtement inorganique
- revêtement organique, comme le revêtement en plastique.

Les revêtements inorganiques sont composés uniquement d'un matériau métallique ou céramique. Les revêtements organiques sont composés principalement d'un matériau polymère qui fait office de liant pour des « pigments » qui fournissent les fonctionnalités désirées au revêtement (couleur, protection anticorrosion, photo sensibilité pour les films photographiques, etc.).

1.1.4 Généralités sur la méthode de VOF (Volume Of Fluid)

1.1.4.1 Présentation générale de la méthode de VOF

La méthode du volume des fluides est une méthode utilisée en mécanique des fluides numérique pour le traitement des écoulements diphasiques. C'est l'une des méthodes standard dans ce domaine et elle est presque exclusivement utilisée avec la discrétisation en volume finis. Cette méthode est différente des autres méthodes car elle ne décrit pas l'interface directement, mais suit le mouvement dans la région considérée en attribuant à chaque cellule du maillage une fraction volumique du fluide. D'où la dimension de la partie de chaque cellule qui appartient au fluide en écoulement connu. Par conséquent, la méthode VOF a deux avantages majeurs :

- Contrairement à la paramétrisation, aucun élément de calcul supplémentaire n'est nécessaire. Le maillage utilisé pour calculer le champ de vitesse peut être utilisé pour une nouvelle publication.

- Les topologies complexes peuvent être traitées de manière simple.

Cependant, un inconvénient sérieux réside dans le fait qu'il est très difficile de calculer la courbure de l'interface à l'aide de ce type de formalisme. Par conséquent, il n'est pas simple d'appliquer cette approche aux problèmes présentant des courbures.

Un grand problème que peut rencontrer la méthode VOF est la génération de courants parasites lorsque l'interface est soumise à l'action des forces de tension superficielle ou lorsqu'il existe des forces de volume, et quand l'interface n'est pas exactement alignée avec les lignes du maillage. Ces problèmes ne contribuent pas seulement à la perte de confiance dans l'application de la méthode VOF, mais entraînent également une réduction du pas de temps d'intégration, ce qui génère des solutions inexactes.

1.1.4.2 Théorie de la méthode de VOF

La formulation VOF est une modélisation eulérienne qui permet de résoudre des écoulements de deux fluides ou plus, non miscibles entre eux.

Pour chaque phase supplémentaire que vous ajoutez au modèle, une variable est introduite : la fraction volumique de la phase. Dans chaque volume de contrôle, les fractions volumiques de toutes les phases sont égales à l'unité. Toutes les variables et propriétés sont partagées par les différentes phases et représentent des valeurs moyennes en volume, à condition que la fraction volumique de chacune des phases soit connue le long d'une cellule de calcul.

Ainsi, les variables et les propriétés pour une cellule donnée sont représentatifs d'une phase ou du mélange, selon les valeurs de la fraction volumique.

En d'autres termes, la fraction volumique du q -ième fluide dans une cellule de calcul est désignée par trois conditions :

- $\alpha_q = 0$: La cellule est vide (du q -ième fluide)
- $\alpha_q = 1$: La cellule est pleine (du q -ième fluide)
- $0 < \alpha_q < 1$: La cellule contient l'interface entre les fluides.

0,95	0,8	0,3	0	0
1	1	1	0,6	0
1	1	1	1	0,3
1	1	1	1	0,8
1	1	1	1	0,95

Figure 1.3 : Taux de présence en fluide bleu dans les volumes de contrôle.

1.1.4.3 Approximation de la variable densité pour la méthode VOF

L'application des conditions aux limites nécessite un traitement spécial dans la méthode VOF. Comme l'interface évolue le long de la grille, les cellules remplies de fluide changent de valeur autour d'elles, ce qui signifie que la solution de la région change. Mettre à jour l'écoulement dans une région et appliquer les conditions aux limites n'est pas une tâche triviale. Pour cette raison, quelques approximations ont été introduites dans la méthode VOF. Typiquement, cela est faisable en considérant l'écoulement comme un seul fluide avec une densité variable. La fonction FFF est utilisée pour définir cette densité. Puisque les équations de l'écoulement sont résolues pour les deux phases, il n'est pas nécessaire d'avoir recours aux conditions aux limites à l'interface. Malheureusement, cette approche n'est pas praticable pour deux raisons : d'une part, la sensibilité de la région gazeuse aux changements de pression par rapport à la région liquide ; d'autre part, la discontinuité de la composante tangentielle de la vitesse au niveau de l'interface. À cause de leurs différentes réponses aux variations de pression, les vitesses de la phase liquide et de la phase gazeuse sont très différentes. Dans le modèle VOF à densité variable, les interfaces se déplacent à une vitesse moyenne, mais cela mène souvent à un mouvement illusoire des interfaces.

1.1.5 Ecoulement diphasiques

Les écoulements diphasiques sont une discipline transversale. Ils proviennent de la mécanique des fluides à laquelle sont liés la thermodynamique ou parfois le transfert de matière. Dans la première situation, on nomme cette discipline la thermo-hydraulique. À l'origine, ces disciplines ont été développées notamment pour le génie nucléaire et le génie chimique. Leur développement n'est pas à ce jour aussi avancé que celui de la mécanique des fluides traditionnelle et, en particulier, l'utilisation des outils de mécanique des fluides numériques reste largement du domaine de la recherche.

Pour décrire simplement l'état des connaissances, disons que l'on sait décrire, avec une précision suffisante pour les besoins pratiques, les écoulements et les transferts de chaleur en conduite, et qu'une bonne partie des mécanismes contrôlant certains écoulements dispersés à bulles ou à gouttelettes sont suffisamment bien connus pour qu'il soit possible d'en déduire des modèles raisonnables. Pour donner une image simplifiée et faire un parallèle avec l'avancement de la mécanique des fluides, on peut dire que les écoulements diphasiques en sont au stade de développement de l'hydraulique au début du siècle dernier.

1.1.5.1 Systèmes diphasiques dans l'industrie et la nature

Les domaines industriels concernés par les écoulements diphasiques vont être brièvement présentés. Les motivations d'études sont assez différentes dans chaque branche, et quelques éléments explicatifs seront alors apportés.

Il y a manifestation des domaines où l'on produit délibérément des écoulements diphasiques, comme le génie chimique, ou pour les besoins des procédés où deux phases sont mises en contact, par exemple un liquide et un gaz, pour produire une nouvelle espèce à leur interface commune. Bien que la notion thermodynamique de phase soit relative à l'un des trois états courants de la matière — solide, liquide, ou gaz —, on continue par extension à considérer les écoulements liquide-liquide comme diphasiques, car leurs méthodes de description sont analogues à celles des écoulements diphasiques. En énergétique, on produit dans une chaudière de la vapeur en portant à ébullition le liquide, et l'écoulement diphasique est délibérément produit.

1.1.6 Angle de contact

L'angle de contact d'un liquide sur un solide est l'angle dièdre formé par la surface du solide et celle du liquide le long de leur ligne de contact.

La notion d'angle de contact n'est pas limitée aux interfaces solide-liquide ; elle s'applique aussi aux interfaces liquide-liquide et solide-solide.

1.1.7 La fraction volumique

Le suivi de l'interface entre les phases est accompli par la solution de l'équation de continuité pour la fraction volumique d'une (ou plusieurs) phase(s). Pour la q -ième phase, cette équation est de la forme suivante :

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad 1.1$$

La fraction volumique de la phase fondamentale sera calculée en se basant sur la condition suivante :

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad 1.2$$

1.1.8 Tension superficielle

La force existant entre deux milieux différents et qui est présente lors de la création d'une interface s'appelle la tension superficielle, ou tension de surface. Elle existe tant qu'il y a une interface. Une interface est la jonction ou surface de contact située entre deux milieux. La création d'une interface est toujours accompagnée d'une consommation d'énergie. On note l'énergie de surface :

$$E_s = \gamma \cdot S$$

Où :

- E_s : Énergie de surface
- γ : Tension superficielle
- S : Section

Cette tension traduit l'augmentation de l'énergie lors de l'accroissement de la surface du fluide. C'est un phénomène physico-chimique lié aux interactions moléculaires à la surface du liquide. Elle s'exprime en tant que force par unité de longueur [N/m].

1.2 Revue Bibliographique

C.W. Hirt et B.D. Nichols [1]

C.W. HIRT et B.D. NICHOLS [1] ont présenté une technique en volume de fluide (VOF) comme un moyen simple et efficace pour traiter numériquement des frontières libres incorporées dans un maillage de calcul de cellule eulérienne ou lagrangien-eulérien arbitraire. Cette méthode s'est avérée plus flexible et plus efficace que d'autres méthodes pour traiter des configurations de limite libre compliquées. Elle est particulièrement utile car elle utilise un minimum d'informations stockées, traite automatiquement les frontières libres et peut facilement être étendue aux calculs tridimensionnels. Pour illustrer la méthode, une description est donnée pour un code hydrodynamique incompressible, SOLVA-VOF, qui utilise la technique VOF pour suivre la surface de fluide libre.

Kristoffer Johansson [2] :

L'auteur de cette thèse a effectué une étude sur la précision de la prévision du remplissage de carburant avec la dynamique des fluides computationnelle (CFD), en utilisant une méthode de volume de fluide (VOF), qui est une méthode de suivi d'interface utilisée pour un écoulement multiphasique. L'objectif de cette thèse est d'essayer de développer une méthode pour prédire le remplissage de carburant, ce qui est important pour la modélisation du ravitaillement de carburant. Les paramètres importants sont le maillage et la taille du pas de temps. Les différents maillages étudiés lors de ce projet incluent un maillage prismatique et un maillage hexagonal. Toutes les mailles prismatiques créées ont montré un résultat similaire ou meilleur dans la simulation de remplissage de carburant. Les simulations indiquent qu'il est possible de simuler le remplissage de carburant avec le volume de fluide ; et la méthode de discrétisation VOF implicite est beaucoup plus stable que la VOF explicite, et la VOF implicite est recommandée comme méthode de discrétisation.

Gopala, V. R. & van Wachem, B. G. M. (2008) [3] :

Cet article présente une revue détaillée des applications de la méthode VOF dans les écoulements à surface libre et les fluides immiscibles. Gopala et van Wachem passent en revue les développements récents de la méthode, en mettant l'accent sur ses avantages dans les simulations nécessitant la capture précise des interfaces. Les auteurs soulignent l'efficacité de la VOF pour traiter les écoulements autour de géométries complexes, comme les parois courbes, et discutent de l'importance de l'affinement du maillage pour améliorer la précision des résultats. Cet article est particulièrement pertinent pour la modélisation des écoulements sur des surfaces sphériques, car il propose des solutions aux défis posés par les interfaces multiples et les phénomènes de rupture

Adelson, P. (2018) [4] :

Adelson étudie l'application de la méthode VOF aux écoulements diphasiques dans des canaux courbes, similaires aux écoulements autour d'une sphère. L'étude met en lumière les instabilités aux interfaces fluides, prédisant avec précision la rupture d'interface et le

détachement de la couche limite. Ces résultats sont essentiels pour comprendre la stabilité des écoulements sur des surfaces courbes, notamment en ce qui concerne les transitions de phase et les interactions fluides.

C.J. LAWRENCE étal [5] :

Dans cet article, ils présentent une description théorique de l'écoulement et de la diffusion dans un film fluide non newtonien et obtiennent une prévision approximative de l'épaisseur finale du film.

J. GU et al [6] :

La planétisation de films polymères revêtus par centrifugation est d'une grande importance pour le procédé lithographique dans l'industrie microélectronique. La rétention du solvant est un facteur important pour déterminer le profil du revêtement pendant la filature. BULLWINKEIL et CAMPBELL ont évalué les deux différentes méthodes de mesure de la concentration. Dans cet article, BULLWINKEIL et CAMPBELL décrivent deux techniques pour mesurer la concentration moyenne de solvant dans le film pendant la filature. Une technique d'interférométrie laser est utilisée pour la mesure en ligne. Une technique de chromatographie par perméabilité de gel hors ligne (GPC) est effectuée pour évaluer la méthode optique. L'exactitude et les limites de la technique optique sont discutées. La technique optique est également utilisée pour analyser la structure de la surface du revêtement pendant la filature.

NATHALIE FRAYSSE et al [7] :

Les auteurs de cette publication ont réalisé une étude expérimentale sur l'apparition et l'évolution des ruisseaux centrifuges, qui vise à étudier l'influence sur l'instabilité de diverses conditions expérimentales, propriétés de mouillage du liquide (tension superficielle Et angle de contact), et viscoélasticité du fluide. A partir des quels, ils sont montré qu'un changement de l'angle de contact et/ou tension superficielle influe directement sur le rayon critique, ce qui à son tour, affecte le nombre des doigts observés. Et que La longueur d'onde instable est indépendante de la taille de la goutte et de la vitesse de rotation.

PHILIPPE H. TRINH et al [8] :

Dans cette publication, les auteurs ont étudié théoriquement et expérimentalement la stabilité hydrodynamique de la suspension d'un film fin mince en poudre sous une surface incurvée. Ils ont utilisé les équations en couches minces, bien connues à partir de la théorie du flux visqueux, pour fournir une description du rôle de la courbure du substrat en présence des forces gravitationnelles.

Chapitre II

Positionnement du problème

2.1 Introduction

Dans ce chapitre on va présenter le modèle physique ainsi la géométrie du problème et les équations nécessaires pour étudier la problématique qui est dans ce cas la stabilité d'un débit de fluide sur une paroi courbe en utilisant la méthode de VOF.

2.2 Modèle physique du problème

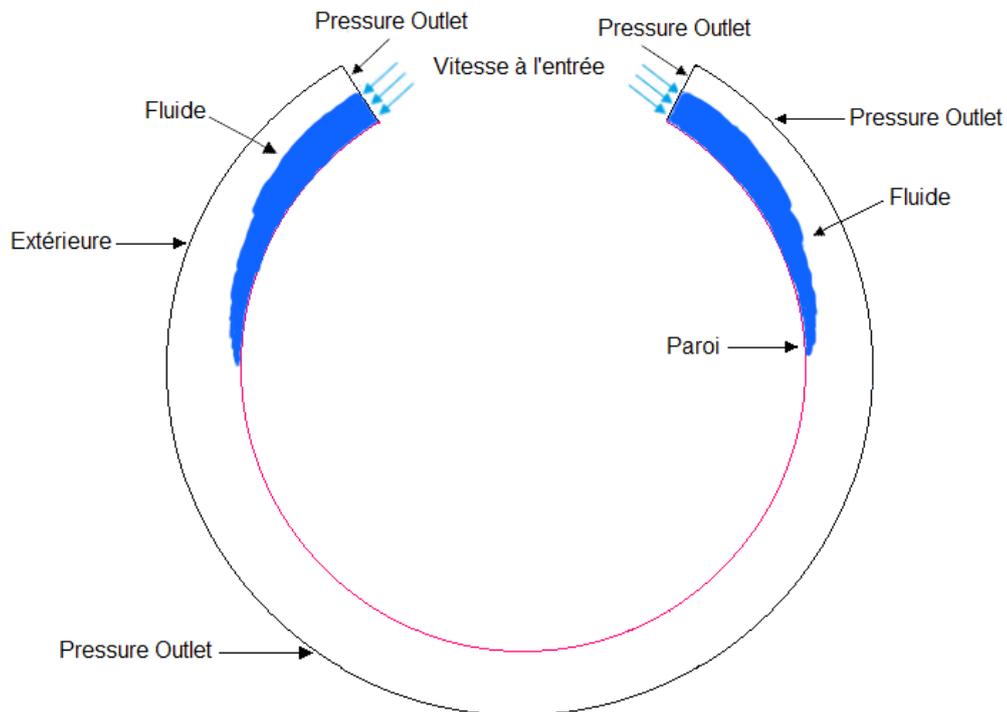


Figure 2.1 Géométrie du problème cas d'une sphère

Notre étude se base sur la simulation numérique d'un écoulement à surface libre sur une sphère. En considérant un débit d'un fluide arrivant au sommet de la sphère avec une vitesse u_e et une hauteur e à l'entrée (épaisseur du film e). La surface extérieure de la sphère est supposée rigide représentée par son rayon $r = R$ en coordonnées sphériques. L'écoulement résultant peut être considéré comme axisymétrique (figure 2.1).

2.3 Formulations mathématiques

2.3.1 Equation de continuité

Cette équation reste inchangée et décrit la conservation de la masse pour un fluide incompressible.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad 2.1$$

Écoulement incompressible donc :

$$\rho = \text{cst}$$

$$\text{div} \vec{u} = 0$$

\vec{u} : Vecteur de vitesse de composantes (u_r, u_θ, u_φ) dans le repère sphérique (r, θ, φ) et ρ la masse volumique du mélange.

Propriétés physiques du fluide dans un volume de contrôle :

Un milieu multiphasique, est traité comme un fluide unique dont les propriétés physiques (masse volumique, viscosité) dans chaque cellule de calcul sont moyennées en fonction de la fraction volumique de la phase :

La masse volumique d'un fluide dans un volume de contrôle ρ :

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad 2.2$$

La viscosité dynamique du mélange, en utilisant aussi la fraction volumique de la phase qui s'écrit comme suit:

$$\mu = \frac{\sum \alpha_q \rho_q \mu_q}{\sum \alpha_q \rho_q} \quad 2.3$$

2.3.2 Equation de conservation de quantité de mouvement

Une seule équation de bilan de quantité de mouvement est écrite pour tout le domaine :

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = - \vec{\nabla} p + \vec{\nabla} [\mu (\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}_{sf} \quad 2.4$$

F_{sf} : force de tension superficielle par unité de volume.

La projection de l'équation de quantité de mouvement sur les trois axes s'écrit :

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{2u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} + \frac{u_\theta \cot \theta}{r} + \frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} = 0 \quad 2.5$$

Sur l'axe r

$$\rho \left[\frac{\partial u_r}{\partial t} + \frac{u_r \partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta \partial u_r}{r \partial \theta} + \frac{u_\varphi \partial u_r}{r \sin \theta \partial \varphi} - \frac{u_\theta^2}{r} - \frac{u_\varphi^2}{r} \right] = -\frac{\partial p}{\partial r} + \rho g_r + \mu \left[\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u_r}{\partial r} - \frac{2u_r}{r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} + \frac{\cot \theta \partial u_r}{r^2 \partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 \theta}{\partial \varphi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \varphi} - \frac{2u_\theta \cot \theta}{r^2} - \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} \right] + F_{SFr} \quad 2.6$$

Sur l'axe θ

$$\rho \left[\frac{\partial u_\theta}{\partial t} + \frac{u_r \partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_r u_\theta}{r} + \frac{u_\theta \partial u_\theta}{r \partial \theta} + \frac{u_\varphi \partial u_\theta}{r \sin \theta \partial \varphi} - \frac{u_\varphi^2 \cot \theta}{r} \right] = -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} + \rho g_\theta + \mu \left[\frac{\partial^2 u_\theta}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial r} - \frac{u_\theta}{r^2 \sin^2 \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} + \frac{\cot \theta \partial u_\theta}{r^2 \partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \varphi^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{2 \cos \theta}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial u_\varphi}{\partial \varphi} \right] + F_{SF\theta} \quad 2.7$$

Sur l'axe φ

$$\rho \left[\frac{\partial u_\varphi}{\partial t} + \frac{u_r \partial u_\varphi}{\partial r} + \frac{u_r u_\varphi}{r} + \frac{u_\theta \partial u_\varphi}{r \partial \theta} + \frac{u_\theta u_\varphi \cot \theta}{r} + \frac{u_\varphi \partial u_\varphi}{r \sin \theta \partial \varphi} \right] = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial p}{\partial \varphi} + \rho g_\varphi + \mu \left[\frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u_\varphi}{\partial r} - \frac{u_\varphi}{r^2 \sin \theta} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial \theta^2} + \frac{\cot \theta \partial u_\varphi}{r^2 \partial \theta} + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2 u_\varphi}{\partial \varphi^2} + \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} + \frac{2}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial u_r}{\partial \varphi} \right] + F_{SF\varphi} \quad 2.8$$

Il est important de tenir compte, dans un milieu diphasique, des effets de la tension de surface le long de l'interface entre les deux phases ainsi que des effets d'adhérence à la paroi.

Angle de contact :

En cas d'adhérence à la paroi, l'angle de contact que fait le fluide avec les parois permet d'ajuster la surface normale dans les cellules proches de la paroi. Cette condition aux limites, dite dynamique, entraîne l'ajustement de la courbure de la surface, qui est calculée comme suit :

$$n = n_w \cos(\theta_w) + t_w \sin(\theta_t) \quad 2.9$$

2.4 Interpolation près de l'interface sous Fluent

L'équation permettant de suivre l'interface dans son mouvement (équation d'advection sur le taux de présence) peut être traitée numériquement soit à l'aide d'un schéma temporel implicite. La qualité de la méthode VOF dépendra de la discrétisation de cette équation, mais aussi des méthodes de reconstruction d'interface, développées pour améliorer sa description.

Ces méthodes de reconstruction permettent de calculer les flux convectifs et diffusifs à travers les faces des volumes de contrôle.

2.5 Tension de surface

Dans le cas où la tension de surface est considérée comme constante le long de la surface et où seules les forces normales à l'interface sont prises en compte, on montre que la chute de pression, appelée pression capillaire, à travers la surface dépend du coefficient de tension de surface γ et de la courbure de l'interface mesurée par deux rayons dans des directions orthogonales, R_1 et R_2 .

$$P_1 - P_2 = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad 2.10$$

La force à l'interface peut être exprimée comme une force volumique en utilisant le théorème de la divergence. Cette force de volume constitue le terme source F_{SF} dans l'équation de quantité de mouvement, qui dépend également du coefficient de tension de surface γ , exprimé en N/m.

$$F_{sf} = \gamma \frac{\alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2}{\frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)} K \vec{n} \quad 2.11$$

Où \vec{n} est la normale à l'interface et K la courbure, qui sont définies respectivement par:

$$\vec{n} = \vec{\nabla} \alpha_2 \quad 2.12$$

Et

$$K = -(\vec{\nabla} \cdot \vec{n}) = \frac{1}{|\vec{n}|} \left[\left(\frac{1}{|\vec{n}|} \vec{\nabla} \right) \cdot \vec{n} - (\vec{\nabla} \cdot \vec{n}) \right] \quad 2.13$$

2.6 Présentation de la géométrie étudiée sous Gambit

Cette géométrie correspond à trois sphères, on donne $R_{s1} = 23$ m, $R_{s2} = 23.2$ m, $R_{s3} = 23.4$ m

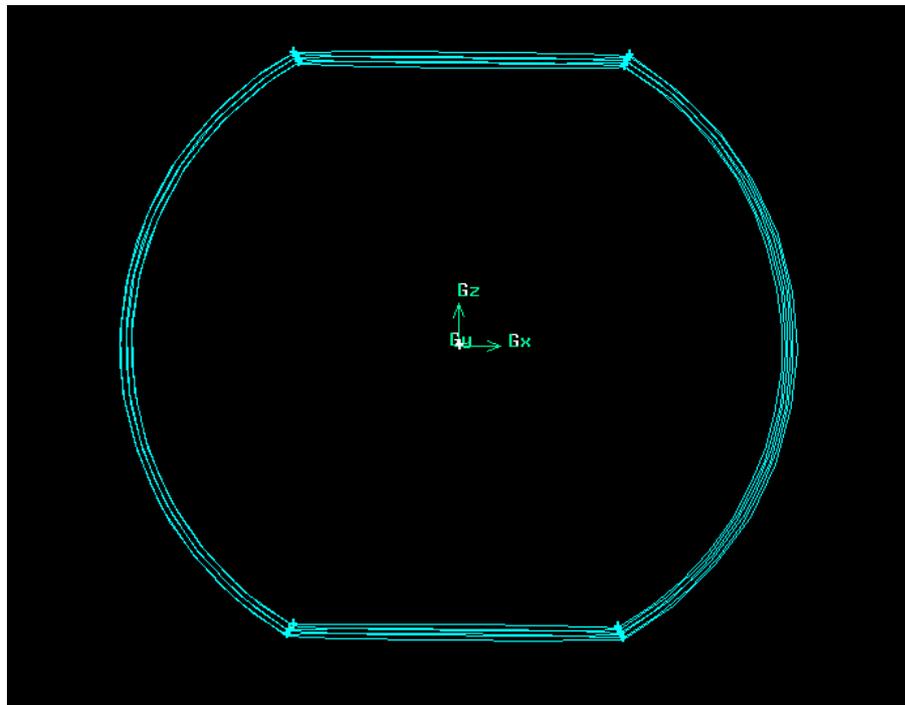


Figure 2.2 La géométrie du problème cas d'une sphère sous Gambit

2.7 Réalisation du maillage

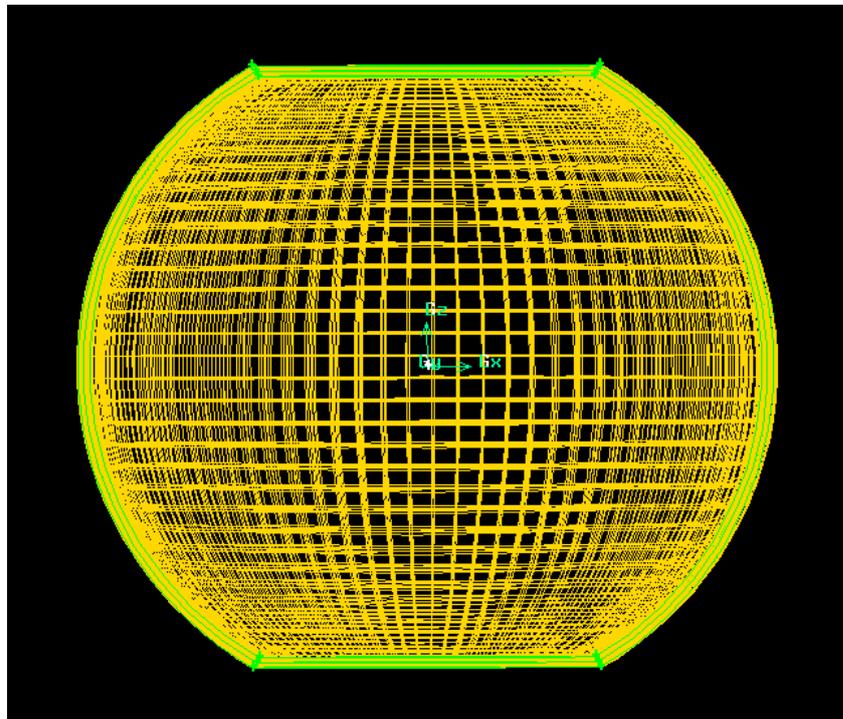


Figure 2.3 Maillage de la sphère sous Gambit

Domaine	Mailles
Hauteur	35
Arc 1	46
Arc 2	51
Epaisseur	20

Tableau 2.1 Le nombre de mailles utilisé dans la géométrie

2.8 Conditions aux limites

Zones	Types
Entree	Velocity inlet
Sortie	Pressure_outlet
Paroi	Wall
interface	Interior
Extérieure	Pressure_outlet

Tableau 2.2 Les conditions aux limites dans le logiciel

2.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les équations gouvernant le mouvement d'un écoulement à surface libre sur un substrat courbe (sphère), en utilisant l'équation de continuité et l'équation de la quantité de mouvement, ainsi nous avons présenté le modèle physique et la géométrie du problème.

Chapitre III

Résultats et discussions

3.1 Introduction

Ce chapitre présente les différents résultats obtenus à partir des simulations numériques réalisées sous Fluent sur l'écoulement d'un fluide newtonien sur une surface sphérique. Nous avons effectué divers essais en fixant la masse volumique du liquide ($\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$), la tension superficielle ($\gamma = 0,072 \text{ N/m}$) et la viscosité du liquide $\mu_\ell = 0.001 \text{ kg/ms}$, et tout en faisant varier la vitesse d'entrée u_e et l'épaisseur du film e à l'entrée.

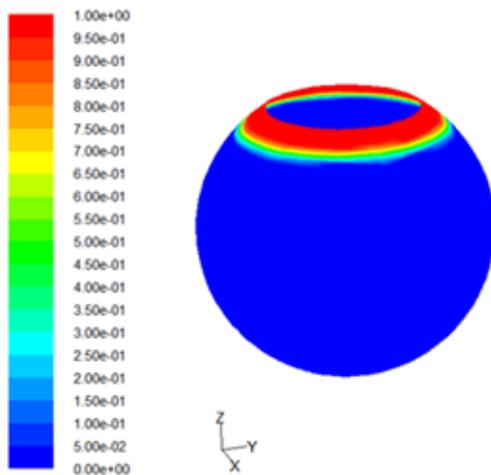
Les propriétés de l'air sont fixées comme suit, dans toutes les expériences menées.

$$\rho_a = 1.225 \text{ kg/m}^3, \quad \mu_a = 10^{-5} \text{ kg/ms}$$

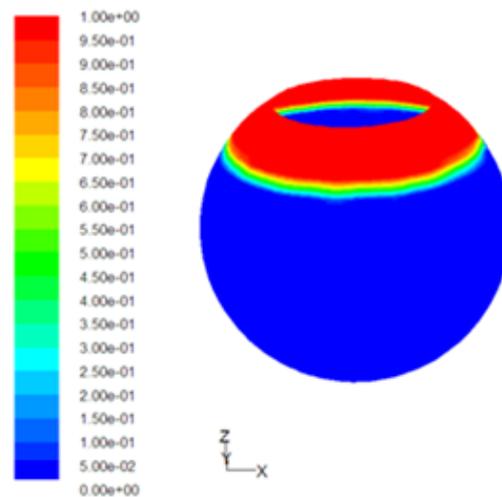
3.2 Effet de la vitesse débitante

On a réalisé différents essais en fixant l'épaisseur du film $e = 4 \text{ mm}$. Et en variant la vitesse d'entrée u_e .

3.2.1 Effet de la vitesse sur l'accélération du front



$t = 0.16 \text{ s}$, $u_e = 0.2 \text{ m/s}$



$t = 0.16 \text{ s}$, $u_e = 0.5 \text{ m/s}$

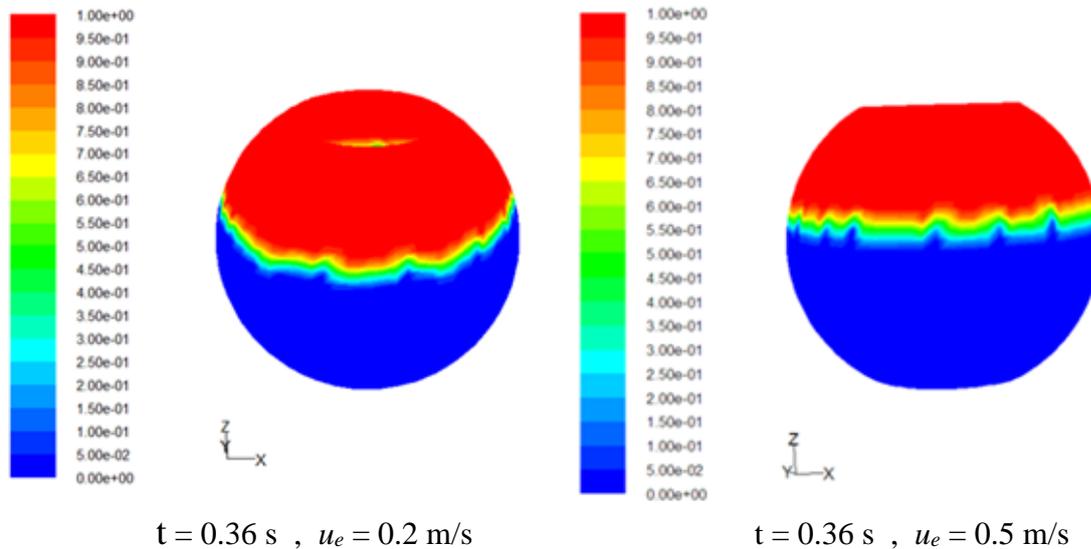


Figure 3.1 Evolution du film mince sur la sphère à différents temps ($t = 0.16$ s, 0.36 s) pour $e = 4$ mm et ($u_e = 0.2$ m/s, 0.5 m/s)

Commentaires

On constate que le fluide avance plus rapidement dans le cas de la vitesse 0.5 m/s par rapport à la vitesse 0.2 m/s

A $t = 0.16$ s la structure du front de l'écoulement prend une forme plane circulaire pour les deux cas de vitesse (0.5 m/s et 0.2 m/s).

A $t = 0.36$ s on remarque un début d'apparition des doigts sur les deux sphères mais avec accentuation pour le cas 0.5 m/s.

3.2.2 Effet de la vitesse sur l'apparition des doigts

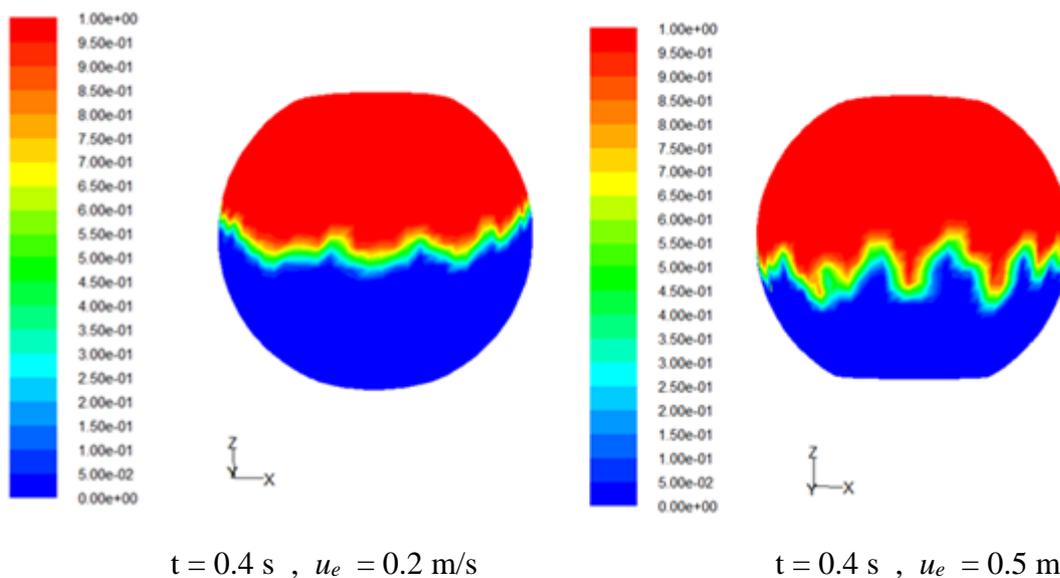


Figure 3.2 Effet de la vitesse d'entrée sur l'apparition des doigts à $t = 0.4$ s et ($u_e = 0.2$ m/s, 0.5 m/s)

Commentaires

A $t = 0.4$ s l'amplitude de l'instabilité au front d'écoulement se développe et développe une série de doigts qu'on peut voir clairement sur la sphère avec une vitesse d'entrée $u_e = 0.5$ m/s, et sur la sphère avec une vitesse d'entrée $u_e = 0.2$ m/s on peut apercevoir un début d'apparition de doigts.

3.2.3 Gonflement du front

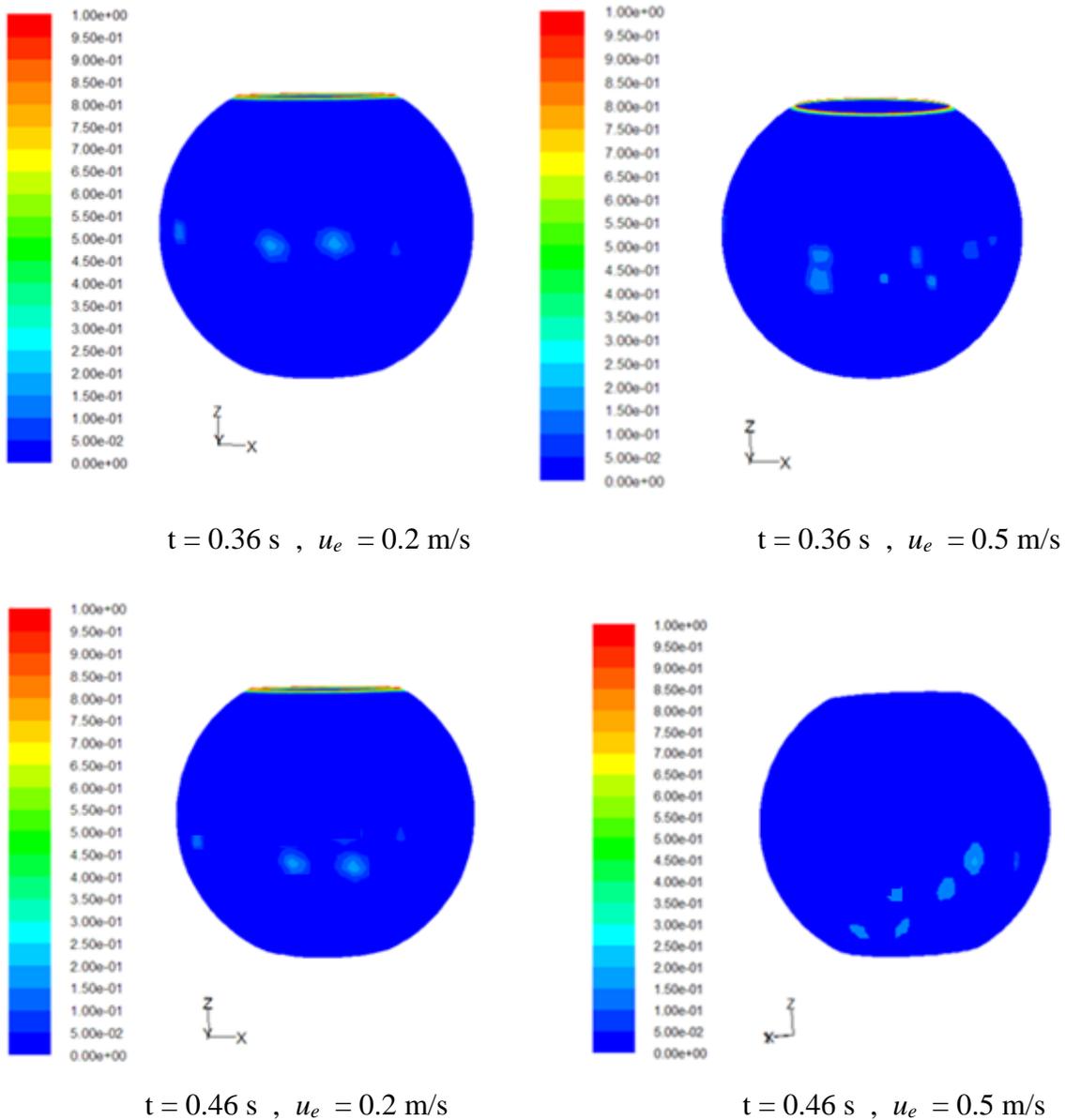


Figure 3.3 Les résultats obtenus sous Fluent représentent le gonflement de front à $t = 0.46$ s et ($u_e = 0.2$ m/s, 0.5 m/s)

Commentaires

A $t = 0.36$ s on peut remarquer qu'il y a une apparition des taches sur le front dans les deux cas de vitesse d'entrée, ce qui veut dire qu'il y a un gonflement sur le front.

A $t = 0.46$ s on peut voir que les taches sur le front sont multipliés et sont devenue beaucoup plus visible.

3.3 Effet de l'épaisseur du film à l'entrée de l'écoulement

On a réalisé différents essais en fixant la vitesse d'entrée $u_e = 0.2$ m/s. et en variant l'épaisseur du film e à l'entrée.

3.3.1 Effet de l'épaisseur du film à l'entrée sur l'accélération du front

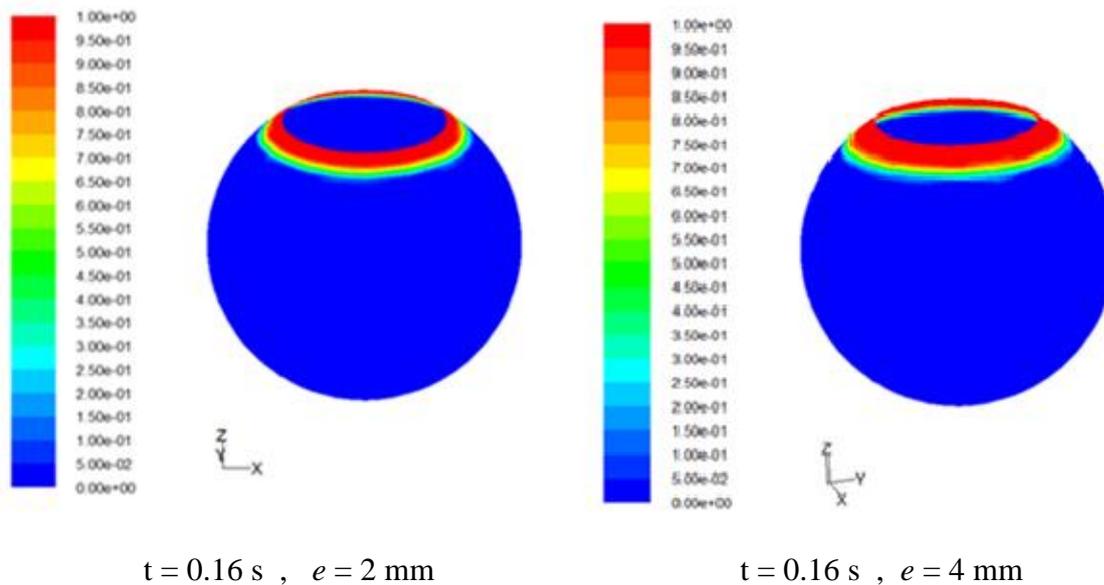
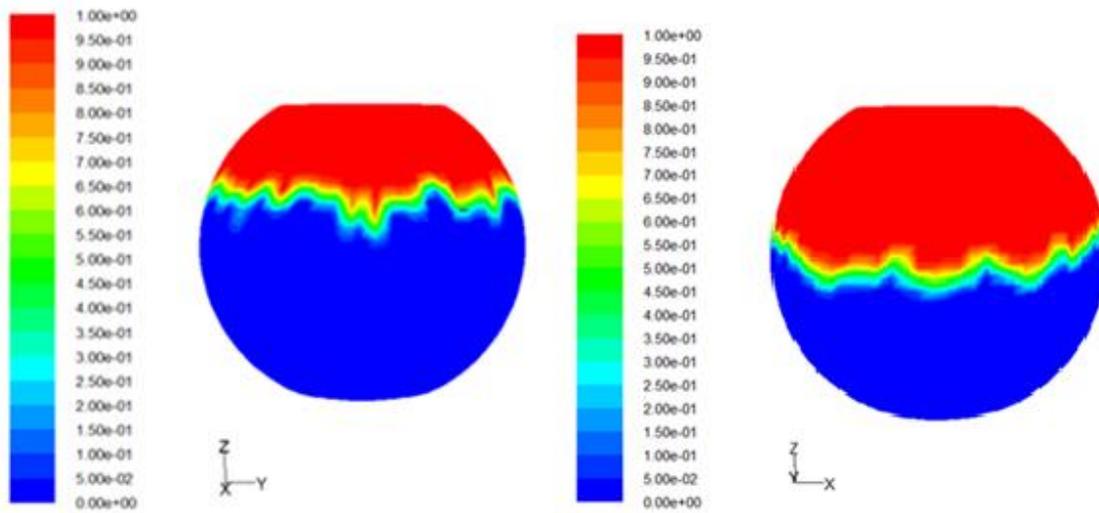


Figure 3.4 Evolution du film mince sur la sphère à différents épaisseur ($e = 2$ mm, $e = 4$ mm) et $t = 0.16$ s.

Commentaires

A $t = 0.16$ s la structure de l'écoulement prend une forme de plan circulaire dans les deux cas d'épaisseurs ($e = 2$ mm et $e = 4$ mm).

3.3.2 Effet de l'épaisseur du film à l'entrée sur l'apparition des doigts



$t = 0.4 \text{ s}$, $e = 2 \text{ mm}$

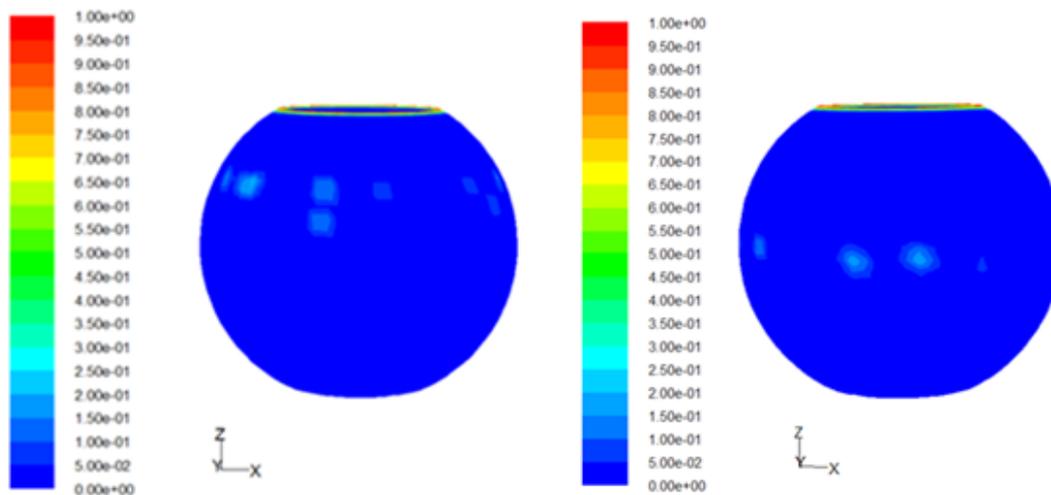
$t = 0.4 \text{ s}$, $e = 4 \text{ mm}$

Figure 3.5 effet de l'épaisseur du film sur l'apparition des doigts avec ($e = 2 \text{ mm}$, $e = 4 \text{ mm}$) et $t = 0.4 \text{ s}$.

Commentaires

A $t = 0.36 \text{ s}$ on peut remarquer un changement de la structure de l'écoulement avec un début du forme des doigts.

3.3.3 Gonflement du front



$t = 0.36 \text{ s}$, $e = 2 \text{ mm}$

$t = 0.36 \text{ s}$, $e = 4 \text{ mm}$

Figure 3.6 Les résultats obtenus sous Fluent représentent le gonflement de front avec et ($e = 2 \text{ mm}$, $e = 4 \text{ mm}$) à $t = 0.36 \text{ s}$

Commentaires

On remarque à $t = 0.36$ s des taches due au gonflement du front sur les deux cas d'épaisseur ($e = 2$ mm et $e = 4$ mm). Seulement les taches apparaissent plus tôt sur le cas $e = 2$ mm par rapport au cas $e = 4$ mm.

3.4 Conclusion

Lors de cette étude, il a été mis en évidence la capacité du logiciel Fluent à modéliser l'écoulement d'un fluide dans une géométrie sphérique et à étudier la stabilité d'un écoulement ainsi que sa répartition sur une surface sphérique avec une vitesse initiale. Ainsi, à partir de cette étude, nous avons obtenu les résultats suivants :

- L'évolution du fluide sur la sphère à $u_e = 0,5$ m/s est plus rapide que sur la sphère avec à $u_e = 0,2$ m/s.
- La vitesse initiale joue un rôle très important dans l'apparition des doigts.
- L'apparition des doigts à la vitesse d'entrée 0,5 m/s se fait plus rapidement qu'à la vitesse d'entrée 0,2 m/s.
- Apparition de gonflements au niveau du front sur la sphère

Conclusion générale

Conclusion Générale

Nous avons analysé la stabilité de la surface libre d'un débit d'un film fluide visqueux s'écoulant sur un substrat courbe formé par une sphère. Une modélisation mathématique du problème physique a été établie interprétant le phénomène d'écoulement d'un film mince à surface libre. L'étude a été réalisée sur un logiciel de simulation numérique "Fluent" en utilisant la méthode volume of fluid (V O F). On a fixé les deux paramètres : la masse volumique et la tension superficielle et on a fait varier la vitesse d'entrée et l'épaisseur du film à l'entrée, pour suivre l'étalement du film sur la surface de la sphère à différents temps.

On peut tirer les résultats les plus importants suivant :

- L'augmentation du débit à l'entrée accélère l'étalement du film sur la surface de la sphère.
- La vitesse à l'entrée (débit) est un paramètre qui affecte le temps d'apparition des doigts, quand la vitesse à l'entrée augmente la dissipation du fluide accélère et les doigts apparaissent plus rapidement.
- Le gonflement du front apparaît plutôt près de l'entrée pour une épaisseur à l'entrée plus faible que dans le cas d'une épaisseur plus grande ou il apparaît plus loin de l'entrée.
- Le temps de l'apparition des doigts est plus court pour des vitesses à l'entrée plus grande (ou pour des débits plus importants).

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] C. W. HIRT AND B. D. NICHOLS, Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico 87545, JOURNAL OF COMPUTATIONAL PHYSICS 39, 201- 225 (1981).
- [2] Kristoffer Johansson, Numerical Simulation of Fuel Filling with Volume of Fluid, Master of Science Thesis [Innovative and Sustainable Chemical Engineering], Department of Chemistry and Bioscience Division of Chemical Reaction Engineering CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY Gothenburg, Sweden, 2011.
- [3]. W. F. Noh ET P. Woodward, Simple Line Interface Calculation, lecture notes in physics, vol, 59, p. 330-340, United States.
- [4]. Raynal L. and Royon-lebeaud A., A multi-scale approach for CFD calculations of gas-liquid flow with in large size column equipped with structured packing. Chemical Engineering Science, 627196 - 7204 (2007).
- [5]. P. Augeul, C. Dannane, H. Merelle, K. Saintilan, visualisation numérique d'écoulement multiphasique, institut nationale des sciences applique, Rouen Normandie, pp3-4, (2020).
- [6]. Gopala, V. R. & van Wachem, B. G. M. (2008). "Volume of Fluid Methods for Immiscible-Fluid and Free-Surface Flows." Chemical Engineering Journal, 141(1-3), 204-221.
- [7]. Adelson, P. (2018). Application of Volume of Fluid Method for Numerical Simulation of Two-Phase Flow in a Curved Channel. Thèse de master, University of Toronto.
- [8]. Liovic, P., Lakehal, D., & Najjar, F. (2003). "Large-Eddy Simulation of Turbulent Free-Surface Flows Using the Volume-of-Fluid Method." International Journal for Numerical Methods in Fluids, 41(11), 1277-1303.
- [9] C.J. LAWRENCE ET W. ZHOU; Spin coating of non-Newtonian fluids; Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, P. 137-187, 39, (1991).

[10] J. GU, M. D. BULLWINKEIL et G. A. CAMPBELL; Solvent concentration measurement for spin coating; Journal of Applied Polymer Science, Vol 57, P.717-725, (1995).

[11] PHILIPPE H. TRINH, HYOUNGSOO KIM, NAIMA HAMMOUD, PETER D. HOWELL, S. JONATHAN CHAPMAN, et HOWARD A.STONE ; Curvature suppresses the rayleigh-taylor instability; Physics of fluids 26, 051704 (2014).

[12] NATHALIE FRAYSSE et GEORGE M. HOMSY ; An experimental study of rivulet instabilities in centrifugal spin coating of viscous Newtonian and non Newtonian fluids ; Phys. Fluids, Vol. 6, No.4, April 1994.

Résumé

Ce travail consiste à l'étude de stabilité d'un débit d'un écoulement de film mince, à surface libre, sur la surface tronquée d'une sphère. Elle s'agit d'une simulation numérique, en utilisant le logiciel Fluent. Le suivi de la surface libre du film mince et le front de l'écoulement se fait par la méthode VOF (Volume Of Fluid). La masse volumique et la viscosité du fluide et la tension superficielle ont été fixées. Les effets de la vitesse et de la hauteur du film à l'entrée sur l'apparition des doigts et le gonflement du front de l'écoulement ont été analysés.

Mots clés : Débit, Doigts, Ecoulement, Film mince, Gonflement de Front, Fluent, sphère, surface libre, VOF.

Abstract

This work consists of the study of the stability of a flow rate of a thin film, with a free surface, on the truncated surface of a sphere. This is a numerical simulation, using Fluent software. Monitoring the free surface of the thin film and the flow front is done by the VOF (Volume Of Fluid) method. The density and viscosity of the fluid and the surface tension were fixed. The effects of the velocity and height of the film at the inlet on the appearance of fingers and the swelling of the flow front were analyzed.

Keywords : flow rate, fingers, free surface, Fluent, thin film, fluid, sphere, swelling of the front, VOF.