

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

UNIVERSITE Abderrahmane MIRABEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière: Génie Mécanique

Spécialité: Installations Energétiques et Turbomachines

Par:

ZIANE RAFIK

HAMDAOUI ABBAS

Thème

**Etude de la stabilité d'un débit sur une paroi courbe : application
aucas d'uncône**

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

Mr. M. ALLOUHE

Rapporteur

Mr. A. DJEMA

Président

Mr. NAITBOUDA

Examineur

Année Universitaire 2021-2022

Remerciements

Nos remerciements vont tout d'abord à notre dieu pour la santé et le courage qu'il nous a donné pour terminer ce modeste travail.

Nous voudrions adresser nos remerciements les plus profonds et les plus sincères à notre encadreur «AMr. ALLOUCHE Moussa».

Nous tenons à témoigner de la confiance qu'il nous a accordée dès le début du mémoire, et du soutien indéfectible qu'il nous a apporté durant tout son déroulement. Nous tenons à remercier très sincèrement l'ensemble des membres du jury qui nous font le grand honneur d'accepter de juger notre travail. Nous remercions aussi tous les enseignants du département G. Mécanique pour tout le savoir que nous avons acquis grâce à eux durant notre formation.

Enfin, Nous remercions toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

À mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon Père.

À la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon Cœur, ma vie et mon bonheur; maman que j'adore.

À ma chère sœur SONIA et mes chers frères ISLEM et ABDU à qui je leur souhaite un avenir radieux pleins de réussite

A tous mes chers amis, qui ont contribué de loin ou de près pour que ce travail soit possible, je vous dis merci.

Dédicaces

À mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon Père.

À

la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon Cœur, ma vie et mon bonheur; maman que j'adore.

À ma chère sœur TINHINANE et mes chers frères HAMOU et AMINE à qui je leur souhaite un avenir radieux pleins de réussite
A tous mes chers amis, qui ont contribué de loin ou de près pour que ce travail soit possible, je vous dis merci.

Sommaire

Remerciement	i
Dédicace	ii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux	vii
NONCLATURE	viii
Introduction Générale	1
Chapitre I: Généralités et revue bibliographie	
1.1. Introduction	2
1.2. Films minces	2
1.2.1. Fluide Newtonien.....	2
1.2.2. Fluides non-newtoniens	2
1.3. Couches minces	3
1.3.1. Définition	3
1.3.2. Les propriétés des couches minces	4
1.3.3. Techniques de dépôt des couches minces	4
1.4. La viscosité.....	5
1.5. Revêtement.....	6
1.5.1. Définition	6
1.5.2. Type de revêtement	6
1.6. Généralités sur la méthode de VOF (Volume Of Fluide)	7
1.6.1. Présentation générale de la méthode de VOF	7
1.6.2. Théorie de la méthode de VOF	7
1.6.3. Approximation de la variable densité pour la méthode VOF	8

1.7. Ecoulement diphasique	9
1.7.1. Systèmes diphasiques dans l'industrie et la nature	9
1.8. Angle de contact	9
1.9. La fraction volumique	10
1.10. Tension superficielle	10
1.10.1. Interface	10
1.11. Revue bibliographique	11
1.12. Conclusion	12

Chapitre II: Présentation du problème

2.1. Introduction	13
2.2. Géométrie et positionnement du problème	13
2.2.1. Surface cylindrique et conique	13
Formulation mathématique	15
2.2.2. Equation de continuité	15
2.3. Equation de conservation de quantité de mouvement	16
2.4. Interpolation près de l'interface sous-fluent	17
2.5. Tension de surface	17
2.6. Réalisation du maillage	19
2.6.1. cas d'un cône	19
2.6.2. cas d'un cylindre	20
2.7. Conclusion	22

Chapitre III: Résultat et discussion

3.1. Introduction	24
3.2. Phases de remplissage	24
3.2.1. Effet de la géométrie (angle de contact)	24
3.2.1.1. Effet de la géométrie sur l'accélération de l'écoulement	25
3.2.1.2. Effet de la géométrie sur l'apparition des doigts	26

3.2.2.Effetdelavitesse	26
3.2.2.1.Effetdelavitesse sur l'apparition des doigts	26
3.2.2.2.Gonflementdefront.....	29
3.2.2.3.Suividesdoigts avec l'avancementdufront.....	32
3.2.2.4.Détachementdefluideetsonéchappementdudemaind'étude	33
3.2.3.Effetdeviscosité.....	33
3.2.3.1.Effetdeviscositésurl'apparitiondesdoigts.....	33
3.2.3.2.Détachementdefluideetsonéchappementdudemaind'étude.....	36
3.3.Phase stationnaire.....	36
3.3.1.Gonflementdefront.....	36
ConclusionGénérale	38
Reference	
bibliographieRésumé	

Listesdesfigures

FigureI.1 :Différentescomportementsdesfluidesnonnewtoniens	3
FigureI.2 :Graphiquethéorique delaviscositédeplusieurstypesdefluidesenfonctiondelacontraintedecisaillement.....	3
FigureI.3 :schémaquireprésentela déférenteméthodepourdéposesunecoucheminces.....	5
FigureI.4 :Courbedeviscositéd'unfluidenewtonien	5
FigureI.5 :Schémadel'écoulementde couetteplan.....	6
FigureI.6 :Tauxdeprésenceenfluide bleudanslesvolumesdecontrôle	8
FigureII.1 :Géométrièdeproblèmecasd'uncône	13
FigureII.2 : Géométrièdeproblèmecasd'uncylindre	14
FigureII.3 :schémadescriptivedel'angledecontact.....	17
Figure II.4 : Schéma décrivant la convention utilise pour définir un rayon de courbure et d'une Surfaceenunpoint.....	18
Figure III.1 : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'angle de la géométrie sur lastructure del'écoulementadifférentestemps($t=0.1, t=0.2s, t=0.3s, t=0.4s, t=0.5s$)	24
Figure III.2 : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de la vitesse de cylindre surl'apparitiondesdoigtsadifférentestemps($t=0.1, t=0.2s, t=0.3s, t=0.35s, t=0.4s$)	26
Figure III.3 : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de la vitesse d'un cône surl'apparitiondesdoigtsadifférentestemps($t=0.1, t=0.2s, t=0.3s, t=0.4s$).....	28
Figure III.4 : Les résultats obtenus sous Fluent représentent le gonflement de front sur les deuxgéométriesavecdesvitessesdifférentesdifférentestemps($t=0.3s, t=0.4s$).....	29
FigureIII.5 :LesrésultatsobtenussousFluentslesnombredesdoigtsavecl'avancementdufront	30
FigureIII.6 :LesrésultatsobtenussousFluentsreprésententundétachementdefluidea($t=0.375s$).....	33
Figure III.7 : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de la viscosité surl'apparitiondesdoigtsdanslecôneadifférentestemps($t=0.2s, t=0.4s, t=0.8s, t=2s$).....	35
FigureIII.8 : LesrésultatsobtenussousFluentsreprésententundétachementdefluidepourlesdeuxcas $\mu=0.01kg/(s\cdot m), \mu=0.1kg/(s\cdot m)$ avecunevitesse de $0.2 (m/s)$	36
Figure III.9 : Les résultats obtenus sous Fluent représentent le gonflement de front sur lesdeuxcas $\mu=0.01kg/(s\cdot m), \mu=0.1kg/(s\cdot m)$ avec unevitessede $0.2(m/s)$	36

Liste des tableaux

Tableau II.1: Les Dimensions des géométries étudiée	15
Tableau II.2: Le nombre de mailles utilisé dans le cône	20
Tableau II.3: les conditions aux limites utilisées dans le cône	21
Tableau II.4: Le nombre de mailles utilisé dans le cylindre	22
Tableau II.5: les conditions aux limites utilisées dans le cylindre	22

NOMENCLATURE

Symboles	Définition	Unité(SI)
F_{SF}	:tension superficielle/unité de volume	N/m^3
e	:Epaisseur	m
g	:Accélération de la pesanteur	ms^{-2}
H	: Hauteur	m
p	:Pression	Pa
$P1_{bas}$:Rayon de base	m
$p1_{haut}$: rayon du haut	m
\vec{n}	:La normale	m
K	: Lacourbure	m^{-1}
E_s	:Energie de surface	J/N
V	:vitesse	m/s

Symboles grecs

μ	:Viscosité dynamique	$Kg/(m \cdot s)$
α_q	:Fraction volumique du q -ième fluide	-
ρ	:Masse volumique	Kg/m^3
∇	:Opérateur nabla	-
ν	:Viscosité cinématique	m^2s^{-1}

γ	:Tension de surface	N/m
----------	---------------------	-----

Indices

Q	: q -ième fluide.
-----	---------------------

Abréviations

VOF	:Volume of fluide
CFD	:Computational Fluid Dynamics

Introduction générale

De nombreux problèmes dans les milieux industriels et naturels impliquent l'écoulement de films liquides minces, dont certains sont entraînés par gravité sur une surface rigide. Il s'agit notamment de l'application des revêtements sur les produits manufacturés et de la répartition de la sauce sur les aliments. Un exemple naturel est l'écoulement de l'eau sur les stalactites qui pendent des plafonds des grottes calcaires. La propagation de lave volcanique est un exemple d'écoulement naturel. La caractéristique récurrente dans tous ces exemples est que le fluide est en contact avec l'air, et conduit le long d'une surface rigide en raison de l'action de la gravité.

Des expériences en laboratoire ont montré qu'un film de fluide newtonien s'écoulant le long d'un plan incliné peut devenir instable en amont et divisé en une série de ruisseaux. Les ruisseaux se développent de manière similaire lorsqu'un film mince est entraîné par une force centrifuge ou par un gradient de tension superficielle. L'instabilité a été étudiée par incorporation des effets en raison de la tension superficielle dans une petite région près du front en amont de l'écoulement, où se développe une crête capillaire avant de se diviser en ruisseaux.

L'écoulement peut être constitué d'une ou plusieurs couches de fluides. Mathématiquement, l'écoulement est décrit par les équations de Navier-Stokes, incompressible. Ces écoulements présentent des phénomènes hydrodynamiques complexes et importants pour les applications industrielles. Dans les écoulements visqueux, les effets inertiels faibles peuvent être l'origine d'instabilités qui se manifestent par l'apparition d'ondes de surface. Ces ondes résultent de la compétition entre les effets de gravités qui déstabilisent aux grandes longueurs d'ondes et les effets de la tension superficielle qui sont stabilisants aux courtes longueurs d'ondes.

Notre étude consiste à la stabilité d'un fluide (liquide newtonien) relâché instantanément à partir du sommet d'un cône tronqué sur sa surface rigide avec une vitesse initiale. La simulation est menée grâce au logiciel Fluent et en utilisant la méthode (VOF). À travers cette étude, nous voulons atteindre le moment où les doigts commencent à apparaître. L'organisation du mémoire est comme suit:

Le premier chapitre est dédié à des généralités sur les fluides newtoniens, les couches minces, les revêtements ainsi que la méthode VOF (volume of fluid).

Le deuxième chapitre consiste à la présentation du problème physique et les équations régissant le phénomène étudié

Le troisième chapitre consiste aux résultats obtenus avec leurs commentaires sont rassemblés lors de notre simulation.

Enfin, le travail est clôturé avec une conclusion générale et des perspectives pour les études postérieures concernant ce domaine d'étude.

Généralité et revue bibliographie

1.1. Introduction

Le domaine des couches minces destinées à l'amélioration de la fonctionnalité des outils ou aux domaines de l'électronique et de l'optique a fait l'objet de plusieurs 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 l'obtention de revêtements présentant une bonne résistance à l'usure, une dureté très élevée et une bonne stabilité thermique et chimique. Ainsi, la durée de vie des outils peut être améliorée de manière significative de 2 à 4 fois.

1.2. Films minces

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

1.2.1. Fluide Newtonien

Un fluide est une matière parfaitement déformable. Cela comprend les gaz, les liquides, même certains solides. Les fluides existants sont nombreux et nous entourent au quotidien. Les fluides, tels que l'eau, sont des fluides newtoniens. En peut dire c'est un fluide qui décrit la majorité des fluides, composés de molécules simples et des 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 indépendante du temps

1.2.2. Fluides non-newtoniens

Un fluide non-newtonien a une structure moléculaire complexe qui n'obéit pas à la loi classique d'un fluide newtonien. Il est défini comme étant un fluide pour lequel le rapport (F/S) n'est pas une constante. En d'autres mots on peut dire que c'est un fluide qui a une courbe non-linéaire.

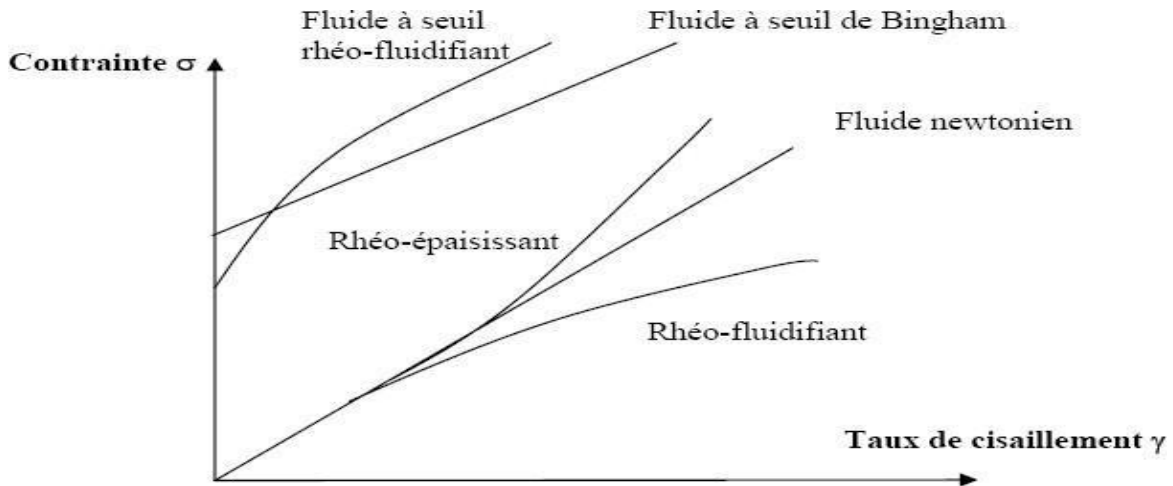


Figure I.1: Différents comportements des fluides non newtoniens.

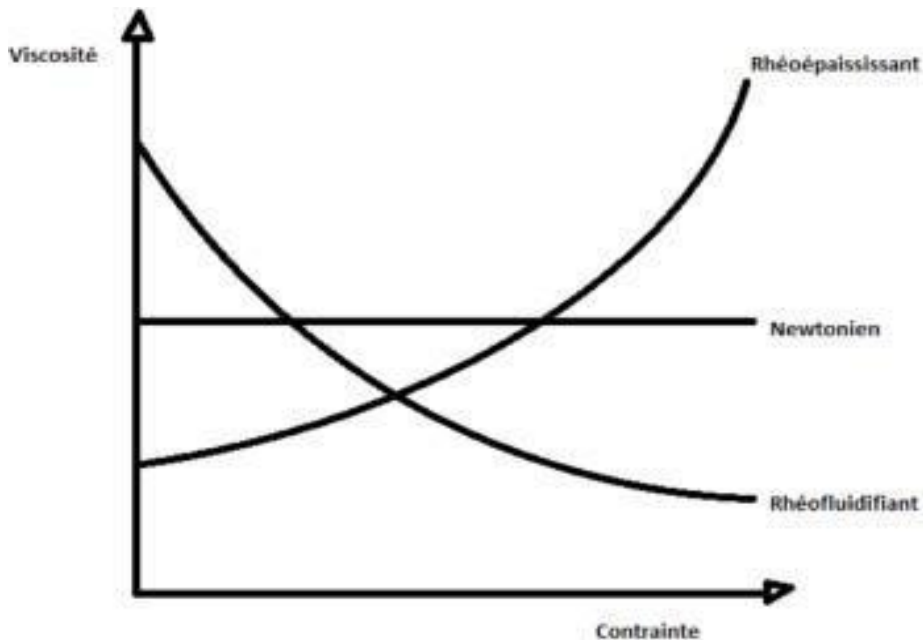


Figure I.2: Graphique théorique de la viscosité de plusieurs types de fluides en fonction de la contrainte de cisaillement.

1.3. Couches minces:

1.3.1. Définition:

Une couche mince est une fine pellicule d'un matériau déposée sur un autre matériau. Ce dernier est appelé «substrat». Le but du dépôt en couches minces est de doter la surface des pièces de propriétés particulières tout en gardant le bénéfice des propriétés massives du substrat.

1.3.2. Les propriétés des couches minces:

Les fonctions préalablement attribuées à un revêtement doivent être définies et traduire par des objectifs opérationnels, en lien avec des propriétés physiques quantifiables. Ainsi, il est possible de demander au système « Substrat + revêtement » de répondre 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

1.3.3. 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 Déposition**), l'ablation laser, l'évaporation thermique, et 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 Déposition – CVD**).
 - **Les autres méthodes** : les méthodes de spray pyrolyse, sol-gel, spin-coating et dip-coating emploient des solutions comme précurseurs.

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

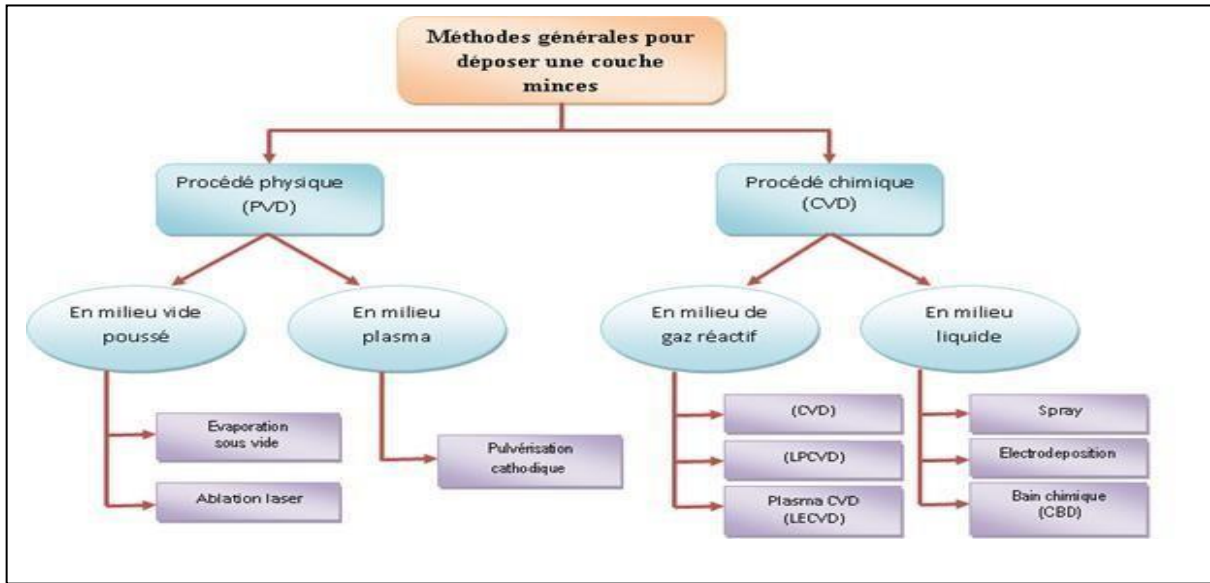


Figure I.3: schéma qui représente la différence de méthode pour déposer une couche mince

1.4. 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 Fig.1.3, cette expérience concerne un fluide visqueux disposé entre deux plans parallèles distants d'une hauteur S . Elle consiste à déplacer relativement à l'autre, l'une des deux parois d'un mouvement permanent de translation rectiligne dans son propre plan. Pour simplifier, on suppose la paroi inférieure fixe et la paroi supérieure mobile à la vitesse U_0

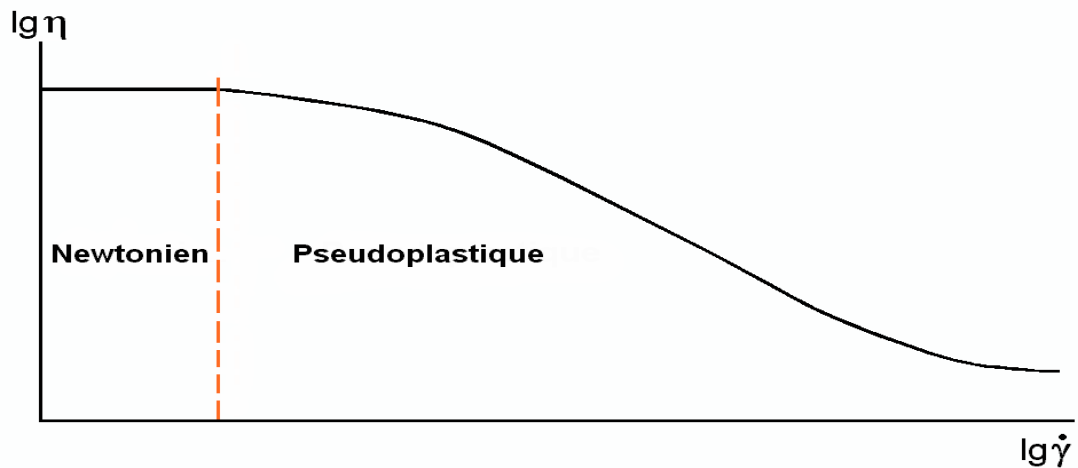


Figure I.4: Courbe de viscosité d'un fluide newtonien.

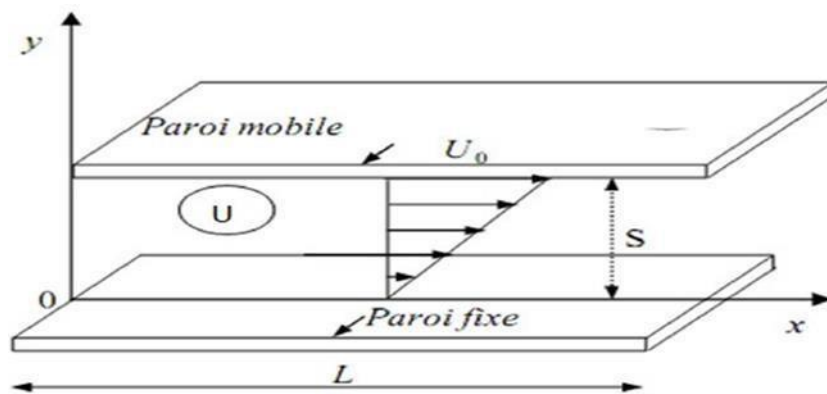


Figure I.5: Schéma de l'écoulement de Couette plan.

1.5. Revêtement:

1.5.1. Définition:

Un revêtement a pour but d'améliorer les propriétés de surface d'un objet. Par exemple, les revêtements peuvent servir pour préserver ou accroître l'apparence, l'adhésion, la résistance à la corrosion, la mouillabilité ou ajuster les propriétés de surface de l'objet considéré face aux contraintes mécanique et aux différents éléments de l'environnement extérieur.

1.5.2. Type de revêtement:

Il existe principalement deux types de revêtements suivant leur composition:

- Revêtement inorganique
- Revêtement organique

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...).

1.6. Généralité sur la méthode de VOF (Volume Of Fluide):

1.6.1. 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 parce qu'elle ne décrit pas l'interface directement, elle suit le mouvement dans la région considérée en attribuant à chaque cellule sur le 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 compliquées peuvent être traitées de manière simple.

Cependant un inconvénient sérieux repose sur 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 dans la génération des courants parasites lorsque l'interface est soumise à l'action des forces de la 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 à la perte de confiance dans l'application de la méthode VOF, mais à la réduction du pas du temps d'intégration et de ce fait engendrent des solutions inexacts.

1.6.2. Théorie de la méthode de VOF:

La formulation VOF c'est une modélisation eulérienne qui permet de résoudre des écoulements à 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 pourvu que la fraction volumique de chacune des phases soit connue le long d'une cellule de calcul.

Donc les variables et les propriétés pour une cellule donnée sont représentatifs pour une phase ou pour le mélange, ça dépend des 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 qui sont:

- $\alpha_q = 0$ 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 I.6: Taux de présence en fluide bleu dans les volumes de contrôle.

1.6.3. 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 du fluide changent de valeur à leur tour, ce qui signifie que la solution de la région change.

Mettre à jour l'écoulement dans une région et l'application des conditions aux limites n'est pas une tâche triviale. Pour cette raison, quelques approximations ont été introduites sur la méthode VOF. Typiquement, cela est faisable en considérant l'écoulement à une seule phase avec une densité variable. La fonction F est utilisée pour définir cette densité. Puisque les équations de l'écoulement sont résolues pour les deux phases, il n'est pas utile d'avoir recours aux conditions limites à l'interface. Malheureusement, cette approche n'est pas praticable pour deux raisons, en premier lieu, la sensibilité de la région gazeuse aux changements de la pression par rapport à la région liquide; la seconde raison est associée à la discontinuité de la composante tangentielle de la vitesse au niveau de l'interface. A cause de leurs différentes réponses aux variations de la pression, les vitesses de la phase liquide et de la phase gazeuse sont très différentes. Dans le modèle VOF à densité variable les interfaces sont déplacées à une vitesse moyenne, mais cela mène souvent à un mouvement illusoire des interfaces.

1.7. Écoulement diphasique:

Les écoulements diphasiques sont une discipline transversale. Ils procèdent de la mécanique des fluides à laquelle est lié le transfert de chaleur ou parfois le transfert de matière. Dans la première situation, on nomme cette discipline la thermo hydraulique (thermal-hydraulique). À l'origine, ces disciplines sont nées et ont été développées notamment pour le génie nucléaire et le génie chimique (nuclear engineering, chemical engineering). Leur développement n'est pas à ce jour aussi avancé que la mécanique des fluides traditionnelle et en particulier, l'utilisation des outils de mécanique des fluides numériques reste très largement encore 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 gouttes 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, disons que les écoulements diphasiques en sont au stade de développement de l'hydraulique au début du siècle dernier.

1.7.1. 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 manifestement des domaines où l'on produit délibérément des écoulements diphasiques, comme le génie chimique, où pour les besoins des procédés deux phases sont mises en contact, un liquide et un gaz par exemple, 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, par exemple diphasique car leurs méthodes de description sont analogues à celles des écoulements diphasiques. En énergie on produit dans une chaudière de la vapeur en portant à ébullition le liquide et l'écoulement diphasique est délibérément produit.

1.8. 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, elles s'appliquent aussi aux interfaces liquide-liquide et solide-solide.

1.9. La fraction volumique:

Lesuividel'interfaceentrelesphasesestaccompliparlasolutiondel'équationdelaccontinuitépour la fraction volumique d'une (ou plus) phase (s). Pour la q -ième phase, Cette équation est de la forme suivante:

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (I.1)$$

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

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

1.10. 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 jusqu'à ce qu'il n'y ait plus d'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:

$$E_s = \gamma \cdot S$$

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].

1.10.1. Interface:

Une interface peut être définie comme une surface formant une frontière mobile commune entre deux parties de matière ou d'espace. Cependant l'épaisseur de celle-ci peut être discutée à l'échelle moléculaire lorsqu'elle sépare deux milieux physiques. On considérera, pour la suite,

que l'interface est d'épaisseur nulle. Pour décrire l'évolution de l'interface nous avons deux approches possibles:

- L'approche lagrangienne qui consiste à décrire un ensemble de point.
- L'approche eulérienne qui consiste à définir l'interface par un scalaire.

1.11. Revue bibliographique:

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-eulérienne arbitraires. Cette méthode s'est avérée plus flexible et plus efficace que d'autres méthodes pour traiter des configurations de limites libres 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 Computational Fluid Dynamics (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 à une étude des paramètres importants pour la modélisation de Ravitaillement de carburant. Les paramètres importants sont le maillage et la taille du pas de temps. Les différents maillages étudiés lors de ce projet sont un maillage prismatique et un maillage hexagonal. Toutes les mailles de prisme 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 le VOF implicite est recommandé comme méthode de discrétisation.

1.12. Conclusion:

A partir de ce chapitre nous avons donné une description qualitative sur les couches minces, revêtements, les fluides newtoniens et non-newtonien et les différents modèles de dépôt. Et de plus une généralité sur la méthode Volume of fluid (VOF).

Présentation du problème

2.1. Introduction:

Ce chapitre est consacré à la présentation du modèle physique, les équations qui régissent la stabilité d'un fluide sur une surface conique en se basant sur la méthode VOF utilisée sous fluent, ainsi que le modèle expérimental réalisé et étudié.

2.2. Géométrie et positionnement du problème:

2.2.1. Surface cylindrique et conique:

Nous libérons du liquide instantanément avec une vitesse initiale et avec l'effet de gravité. Le liquide est considéré incompressible et l'écoulement est laminaire. Les paramètres géométriques du cylindre et du cône sont:

- la hauteur H , le rayon $P_{1(int-haut)}$, l'épaisseur e_1, e_2 , l'angle 90° pour le cylindre.

- la hauteur H , le rayon $P_{1(int-haut)}, P_{1(int-bas)}$, l'épaisseur e_1, e_2 , l'angle 60° pour le cône.

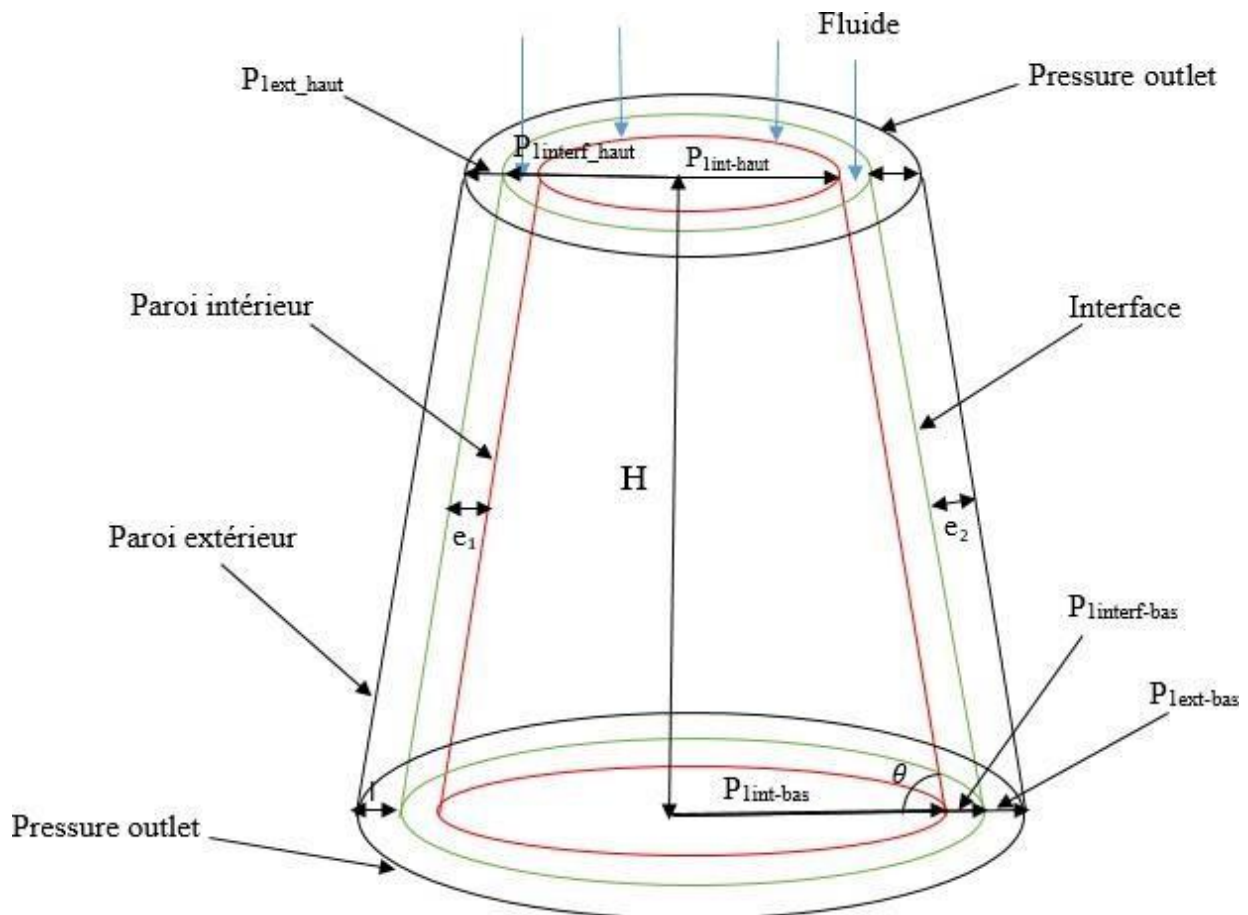


Figure II.1: Géométrie de problème cas d'un cône tronqué.

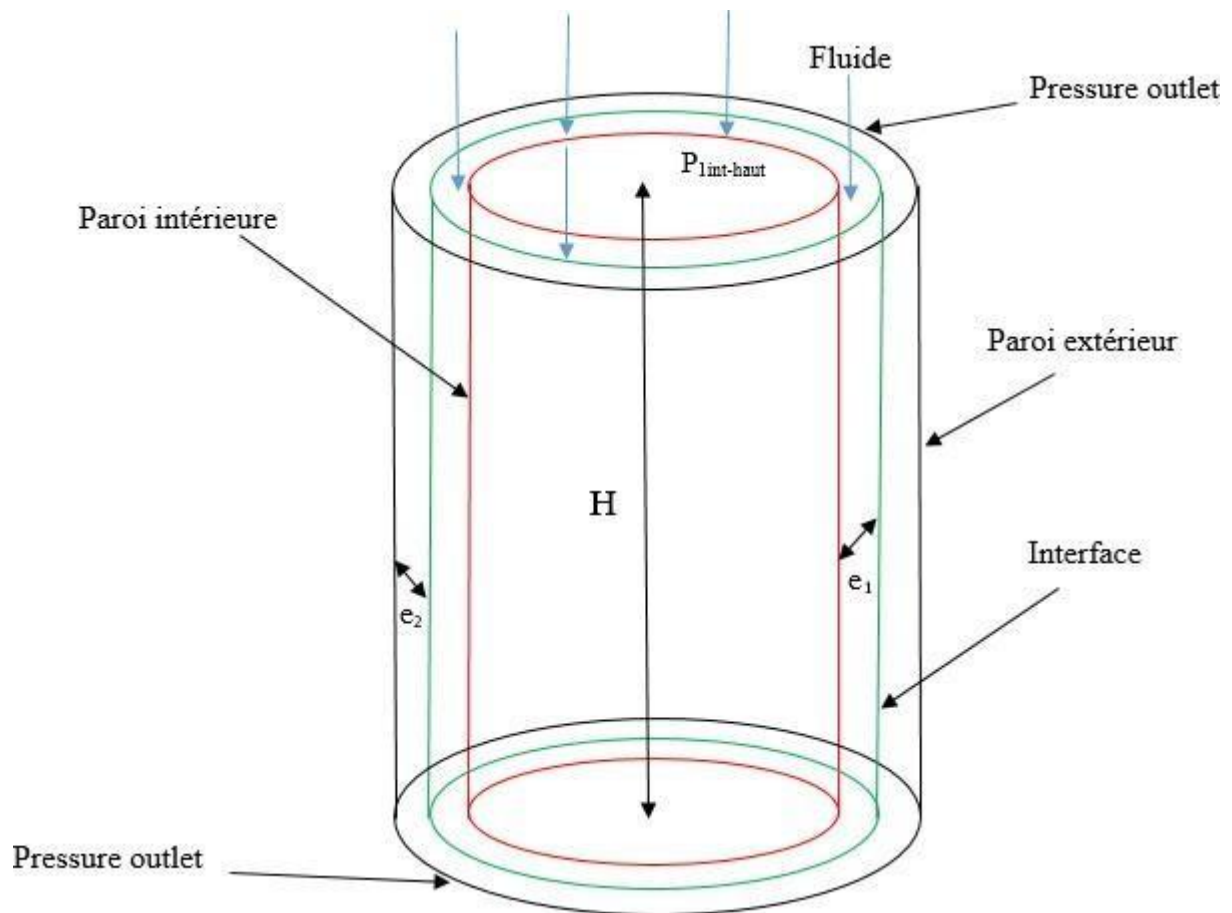


Figure II.2 : Géométrie de problème cas d'un cylindre

Donc pour calculer $P_{1\text{int-bas}}$ (cône) on a cette relation:

$$\tan\theta = \frac{H}{(P_{1\text{int-bas}}) - (P_{1\text{int-haut}})} \quad (\text{II.1})$$

$$P_{1\text{int-bas}} = P_{1\text{int-haut}} + \frac{H}{\tan\theta}$$

Pour calculer l on a cette relation:

$$l = e \sin\theta \quad (\text{II.2})$$

Tableau II.1: Les Dimensions des géométries étudiées.

Angle	$\theta=60$	$\theta=90$
$H(m)$	0.5	0.5
$\mu(kg/m-s)$	0.001	0.001
$e(m)$	0.004	0.004
(m/s)	0.5	0.5
	0.2	0.2
P_{1ext_haut}	0.236928	0.238
P_{1int_haut}	0.23	0.23
$P_{1interf_haut}$	0.236928	0.234
P_{1int_bas}	0.518675	0.23
P_{1ext_bas}	0.523139	0.238
$P_{1interf_bas}$	0.525603	0.234

Formulation mathématique :

2.2.2. Equation de continuité:

L'équation de continuité est utilisée pour décrire le transport de la quantité de matière conservée, et définit également la conservation de la masse. L'établissement de cette équation locale repose sur le bilan de masse de fluide au sein d'un élément de volume pendant un temps (dt) élémentaire.

Pour le cas instationnaire et tridimensionnelle cette équation s'écrit comme suit:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{(\rho u)}{\partial x} + \frac{(\rho v)}{\partial y} + \frac{(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.3})$$

L'écoulement incompressible donc:

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

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

\vec{v} : Vecteur de vitesse

Où « ρ » est la masse volumique, et u, v, w, sont respectivement des composantes de vecteur vitesse dans la direction x, y, z.

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 :

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q \quad (\text{II.4})$$

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

$$\mu = \frac{\sum \alpha_q \rho_q \mu_q}{\sum \alpha_q \rho_q} \quad (\text{II.5})$$

2.3. Equation de conservation de quantité de mouvement:

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla} \cdot [\mu (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{F}_{SF} \quad (\text{II.6})$$

\vec{F} : tension superficielle / unité de volume.

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 et les 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 pour ajuster la surface normale dans les cellules proches de la paroi. Cette condition aux limites dites dynamique entraîne l'ajustement de la courbure de la surface est calculé comme suit:

$$n = n_w \cos \theta_w + t_w \sin \theta_t \quad (\text{II.7})$$

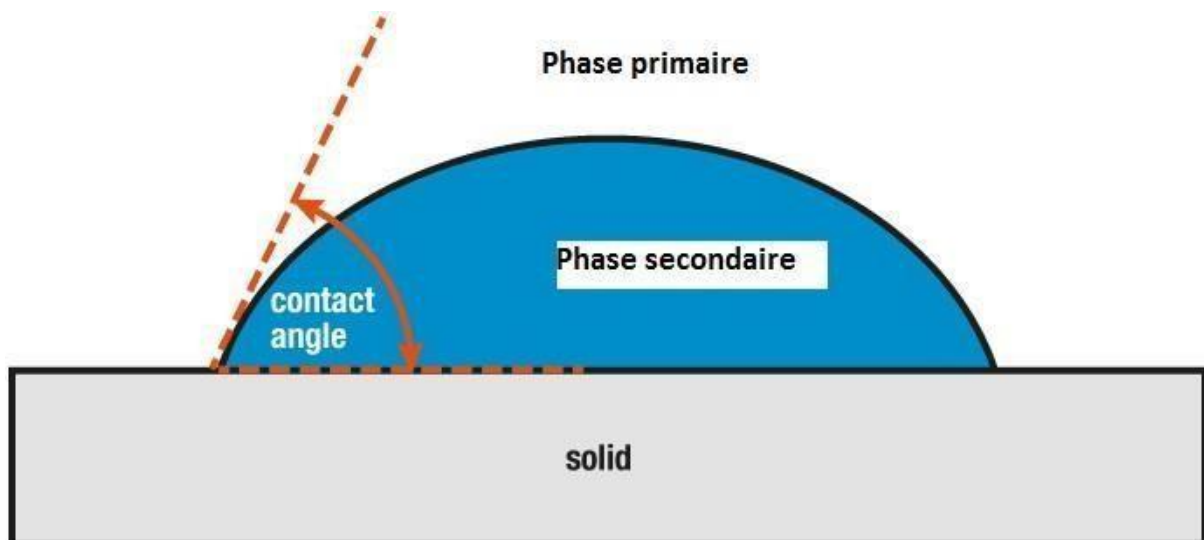


Figure II.3: schéma descriptif de l'angle de contact.

2.4. Interpolation près de l'interface sous fluent:

L'équation permettant de suivre l'interface dans son mouvement (équation d'advection sur les 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 de l'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:

Pour 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 considérées, 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 les directions orthogonales R_1 et R_2 :

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

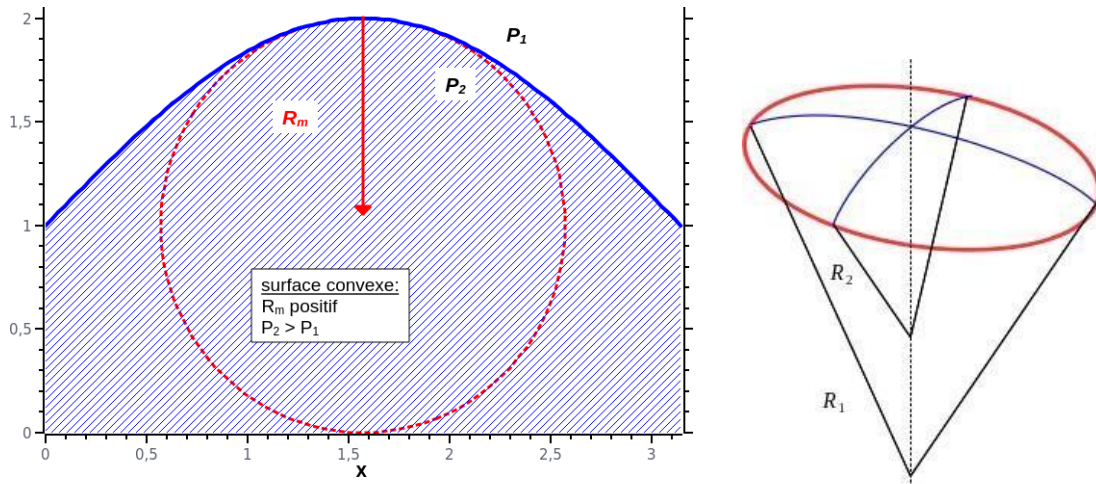


Figure II.4: Schéma décrivant la convention utilisée pour définir un rayon de courbure et d'une surface en un point.

La force à la l'interface peut être exprimée comme une force volumique en utilisant le théorème de divergence. Cette force de volume est le terme source F_{SF} dans l'équation de quantité de mouvement qui dépend aussi du coefficient de tension de surface γ qui s'exprime en (N/m):

$$F_{SF}^{\vec{}} = \gamma \frac{\alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2}{k \vec{n} \cdot \vec{n}^{(+)}} \quad (II.9)$$

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

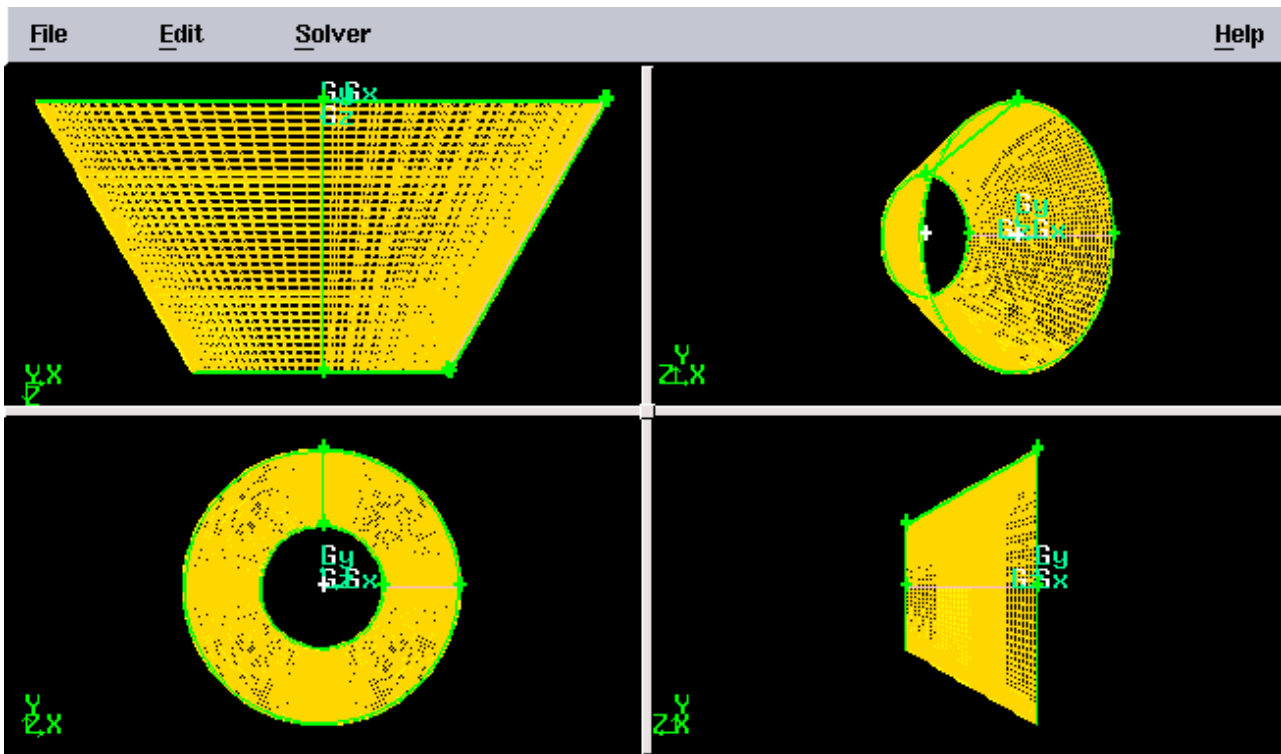
$$\vec{n} = \vec{\nabla} \alpha_2 \quad (II.10)$$

Et:

$$k = -(\vec{\nabla} \cdot \vec{n}) = \frac{1}{|\vec{n}|} \left[\frac{1}{|\vec{n}|} \cdot \vec{\nabla} \cdot |\vec{n}| - (\vec{\nabla} \cdot \vec{n}) \right] \quad (II.11)$$

2.6. Réalisationdumaillage :

2.6.1. Casd'uncône:



FigureII.5Maillagedecône.

TableauII.2Lenombredemaillesutilisédanslecône.

Domaine	Mailles
Arc1	36
Acr2	72
Hauteur	34
Epaisseur	12

Tableau II.3 les conditions aux limites utilisées dans le logiciel.

Zones	Types
Paroi	Wall
Entrée liq	Velocity inlet
Entrée air	Wall
sortie liq	Pressur_outlet
sortie air	Pressur_outlet
Interface	Interior
Extérieure	Pressur_outlet
épaisseurs	Interior

2.6.2. Cas d'un cylindre:

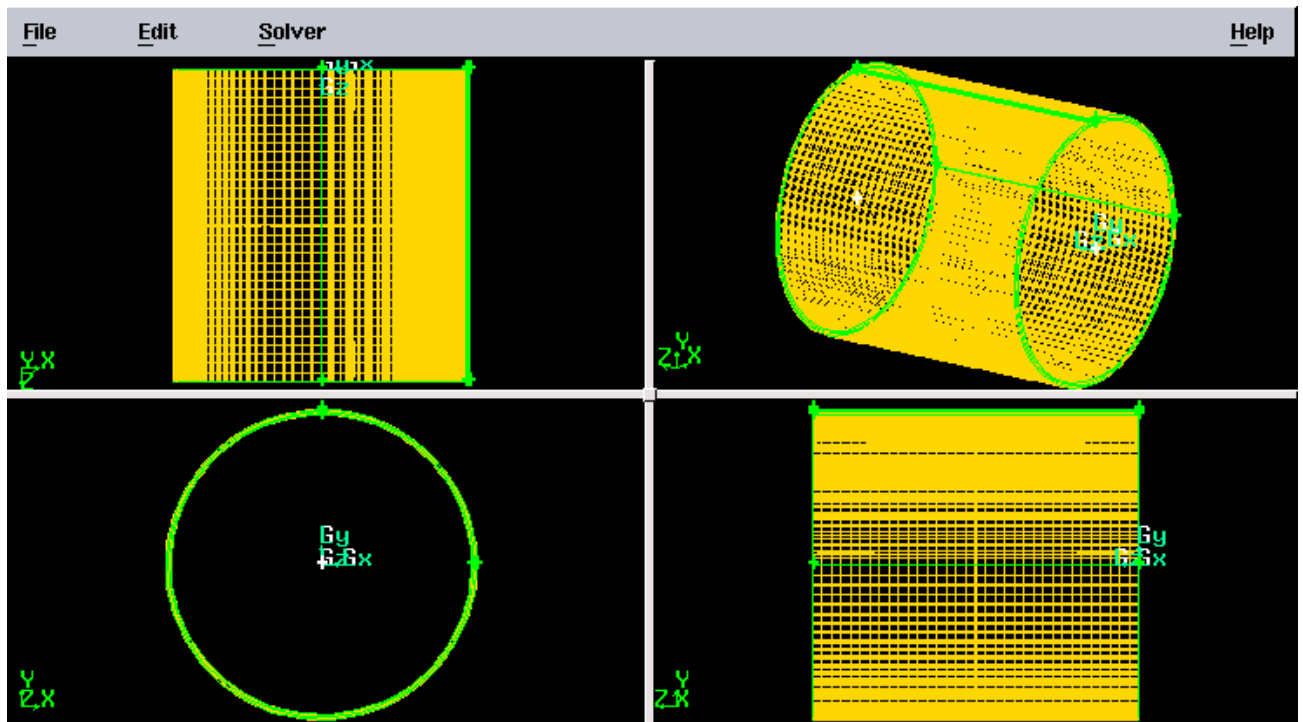


Figure II.6 Maillage de la géométrie d'un cylindre.

TableauII.4Lenombredemaillesutilisédanslecylindre.

Domaine	Mailles
Arc1	36
Acr2	72
Hauteur	34
épaisseur	12

TableauII.5lesconditionsauxlimitesutiliséesdanscylindre.

Zones	Types
Parois	Wall
Entréeliq	Velocityinlet
Entrée air	Wall
sortieliq	Pressur_outlet
sortie air	Pressur_outlet
Interface	Interior
Extérieure	Pressur_outlet
Epaisseurs	Interior

2.7. Conclusion:

Après avoir cerné les différentes équations qui décrivent l'écoulement d'un fluide sur une surface cylindrique et conique, le modèle adéquat utilisé pour le calcul de ce phénomène, un maillage grâce au logiciel gambit, une simulation numérique du problème a été faite grâce au logiciel de calcul Fluent. Les résultats des simulations ont été mentionnés dans le chapitre suivant.

Résultats et discussion

3.1 Introduction :

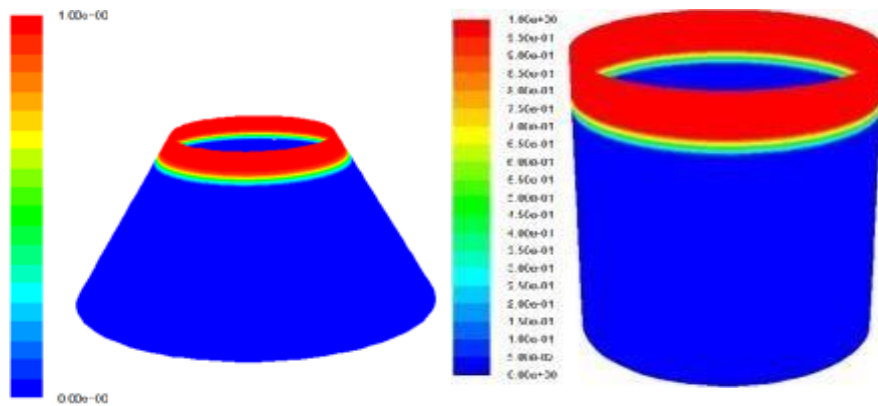
Ce chapitre, consiste à présenter les différents résultats obtenus à partir des simulations numériques sous Fluent sur l'écoulement du fluide newtonien sur une surface conique et cylindrique. On a réalisé différents essais en fixant la masse volumique de l'eau ($\rho=1000 \text{ kgm}^3$), la tension de surface ($\gamma=0.073 \text{ N/m}$), ainsi que la masse volumique de l'air ($\rho=1.225 \text{ kgm}^3$), et en variant la vitesse débitante au sommet du cône.

3.2 Phases de remplissage:

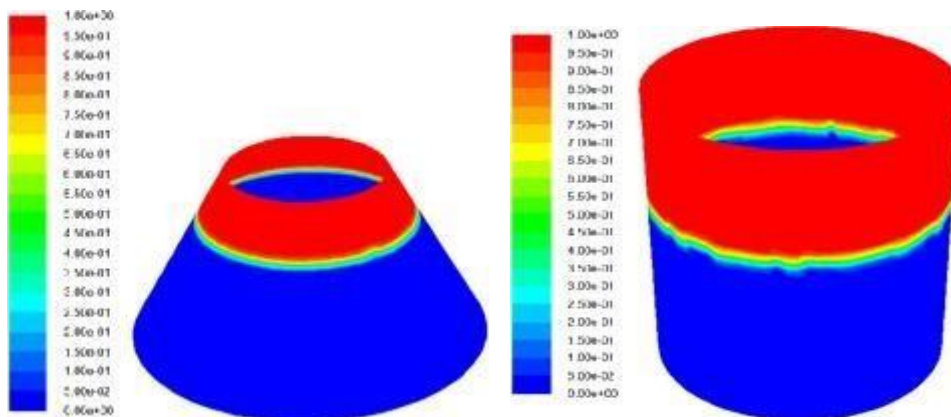
3.2.1 Effet de la géométrie (angle de contact) :

On fixe la vitesse débitante (0.2m/s) et la viscosité μ (0.001 kg/ms) et on fait varier l'angle du cône: angle du cône $\theta=60^\circ, 90^\circ$.

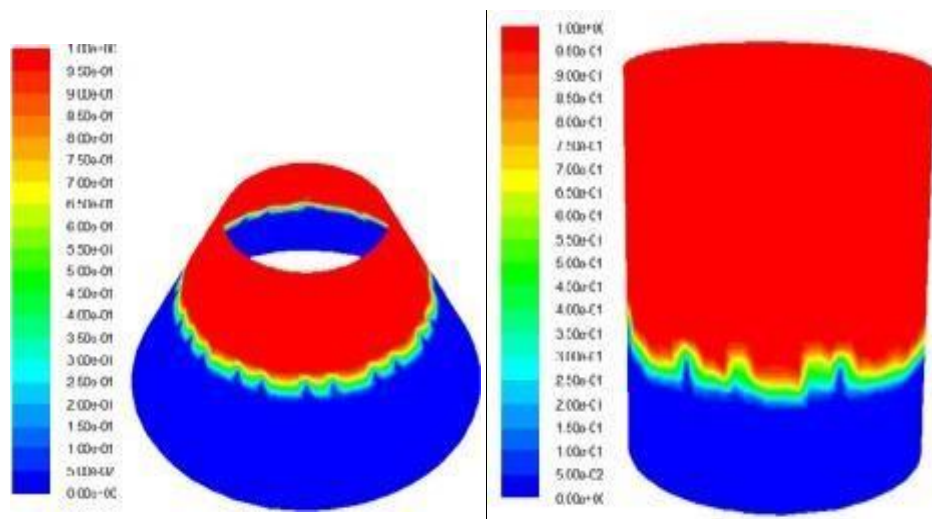
- La hauteur de cône et de cylindre = 0.5m
- l'épaisseur ($e_1; e_2$) de cylindre: 4mm
- l'épaisseur ($e_1; e_2$) de cône: 4mm



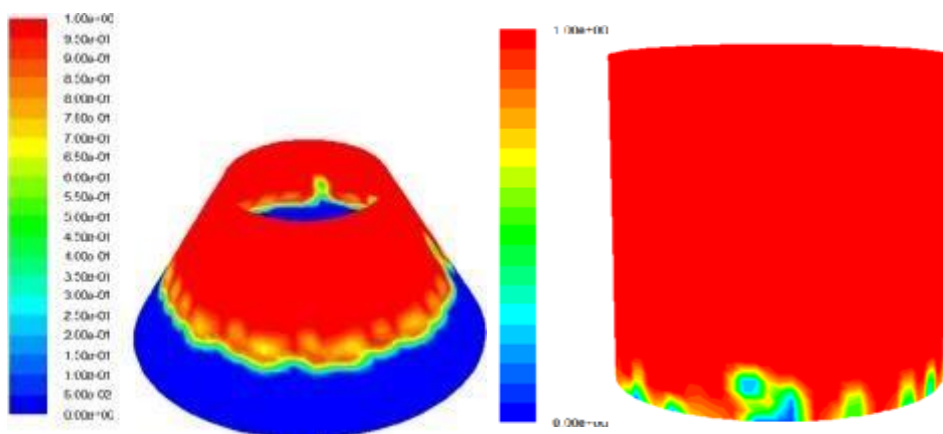
t= 0.2s



t=0.3s



t=0.4s



t=0.5s

Figure III.1: Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'angle du cône sur la structure de l'écoulement à différents temps ($t=0.2s, t=0.3s, t=0.4s, 0.5s$).

3.2.1.1 Effet de la géométrie sur l'accélération de l'écoulement :

At=0s le fluide arrive sur le cône et le cylindre avec une vitesse débitante égale à 0.2 (m/s). On constate que le fluide avance plus rapidement sur le cylindre que sur le cône. L'accélération du fluide sur le cylindre est causé par le fait que le moteur de l'écoulement qui est l'accélération de la pesanteur g est totale dans ce cas par contre dans le cas du cône uniquement la composante $g \sin \theta$ est responsable de l'écoulement.

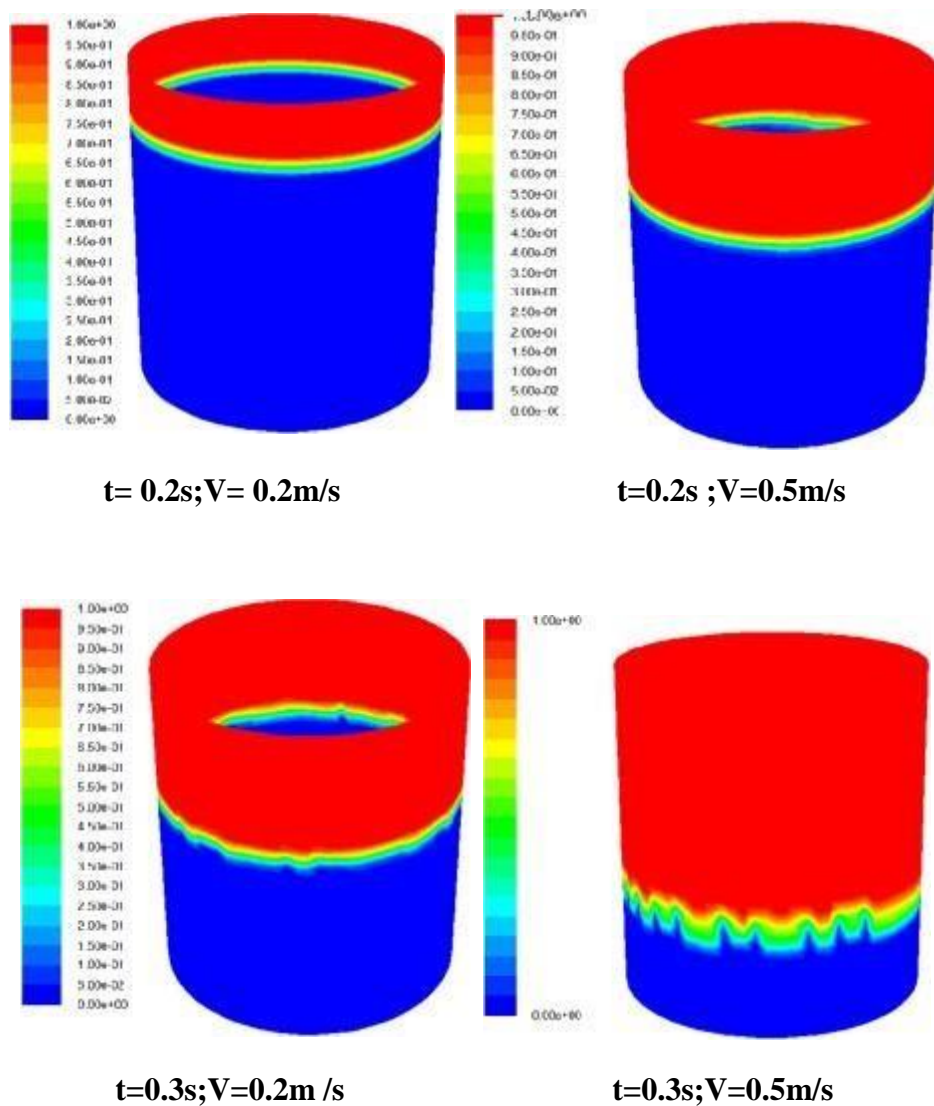
3.2.1.2 Effet de la géométrie sur l'apparition des doigts :

On peut voir sur les figures l'apparition des doigts, donc a $t=0.2s$ l'apparition des doigts n'est visible plus dans les deux géométries jusqu'à $t=0.3s$, les doigts s'apparaitre uniquement sur le cylindre, au moment $t=0.4s$ les doigts commencent à apparaitre sur le cône.

3.2.2 Effet de la vitesse :

3.2.2.1 Effet de la vitesse sur l'apparition des doigts :

a) cas particulier: (géométrie cylindrique)



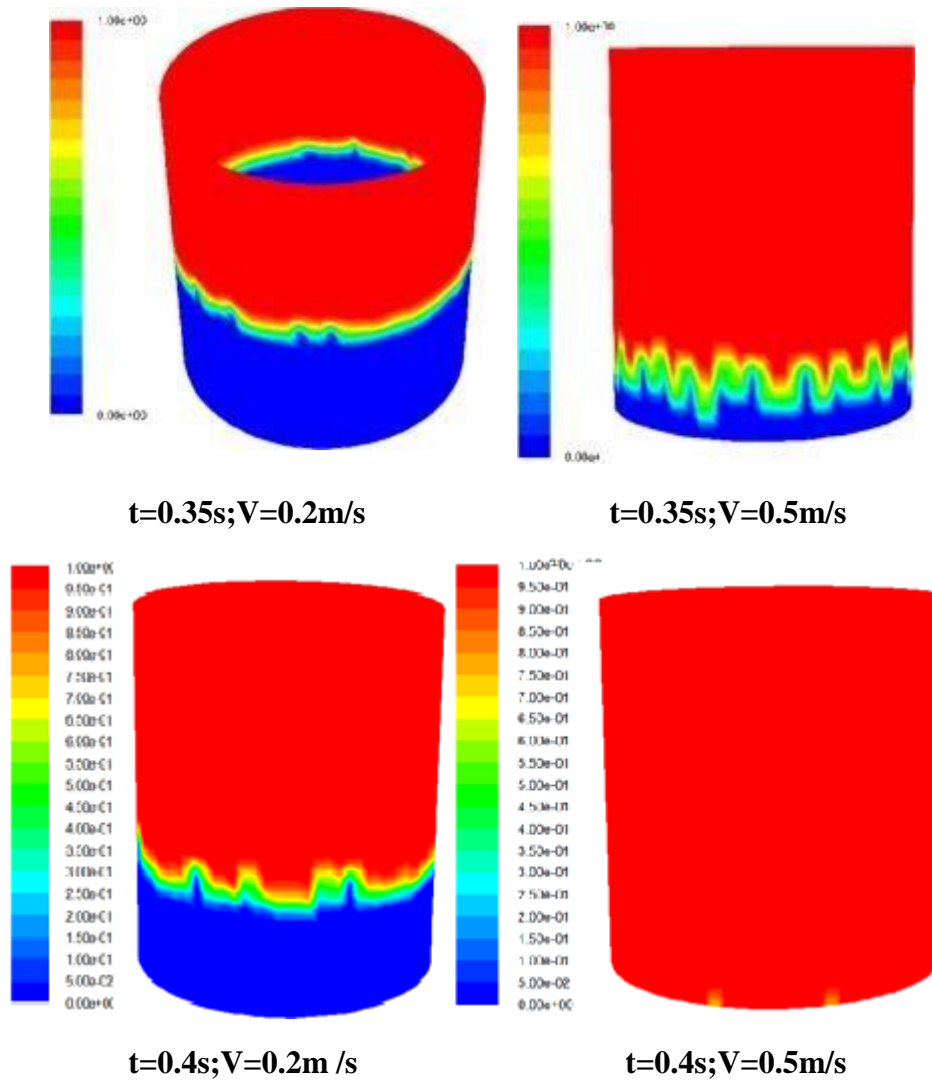
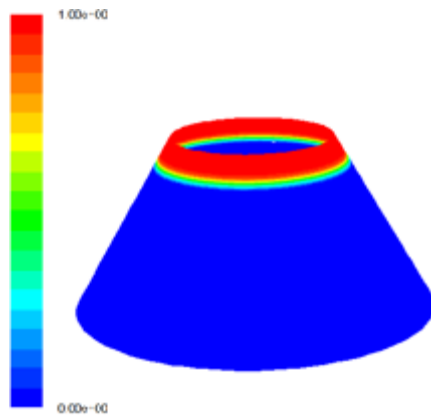


Figure III.2 : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de la vitesse sur l'apparition des doigts dans le cylindre à différents temps ($t=0.2s, t=0.3s, t=0.35s, 4s$).

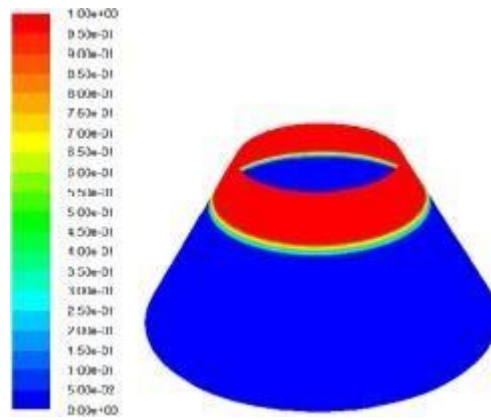
Apparitions des doigts

on peut voir sur les figures d'apparition des doigts, donc à $t=0.2s$ l'apparition des doigts ne se voit plus dans les deux les géométrie jusqu'à $t=0.3s$, les doigts s'apparaitre uniquement sur le cylindre quia une vitesse de $5(m/s)$, au moment $t=0.35s$ les doigts commencent à apparaitre sur le cylindre quia une vitesse $2(m/s)$

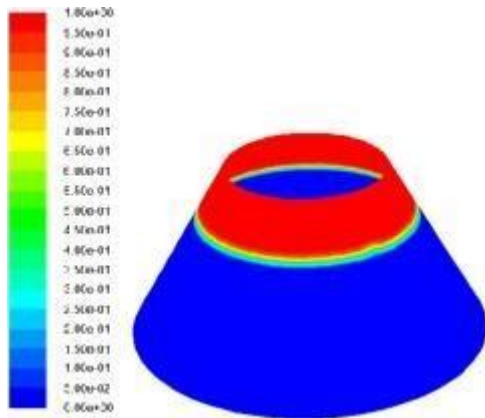
b) Cas d'un cône d'angle 60° :



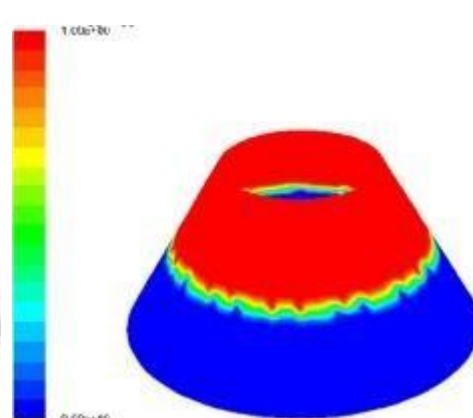
$t=0.2s; V=0.2m/s$



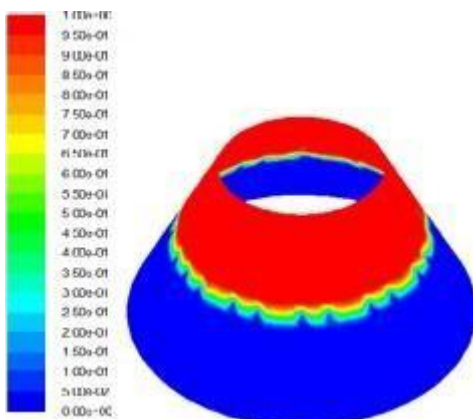
$t=0.2s; V=0.5m/s$



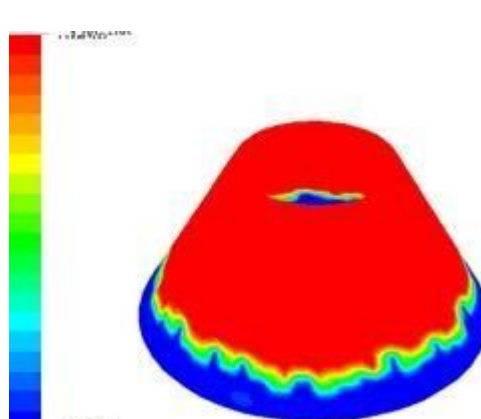
$t=0.3s; V=0.2m/s$



$t=0.3s; V=0.5m/s$



$t=0.4s; V=0.2m/s$



$t=0.4s; V=0.5m/s$

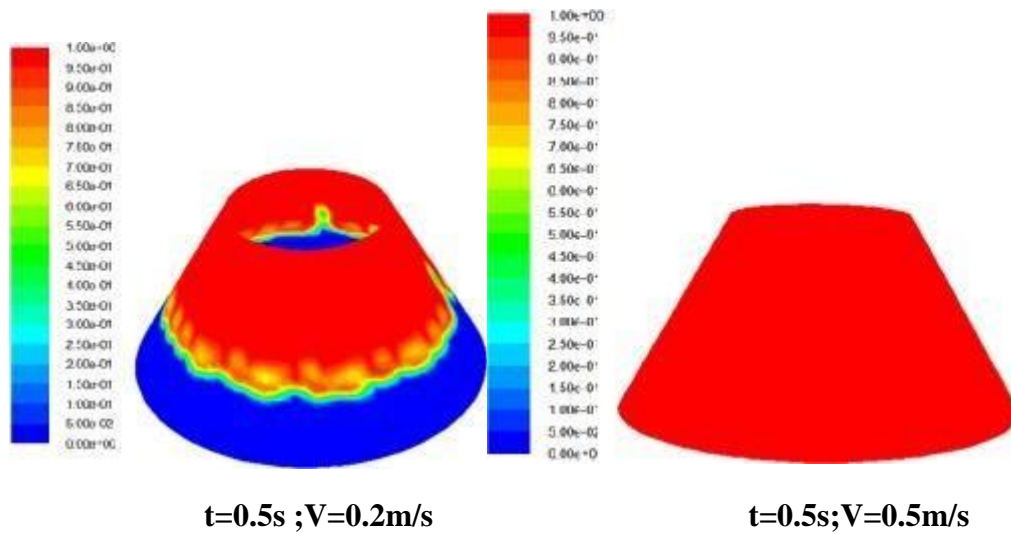


Figure III.3: Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de la vitesse sur l'apparition des doigts dans le cône à différents temps ($t=0, t=0.1, t=0.2s, t=0.3s, t=0.4s, t=0.5s$).

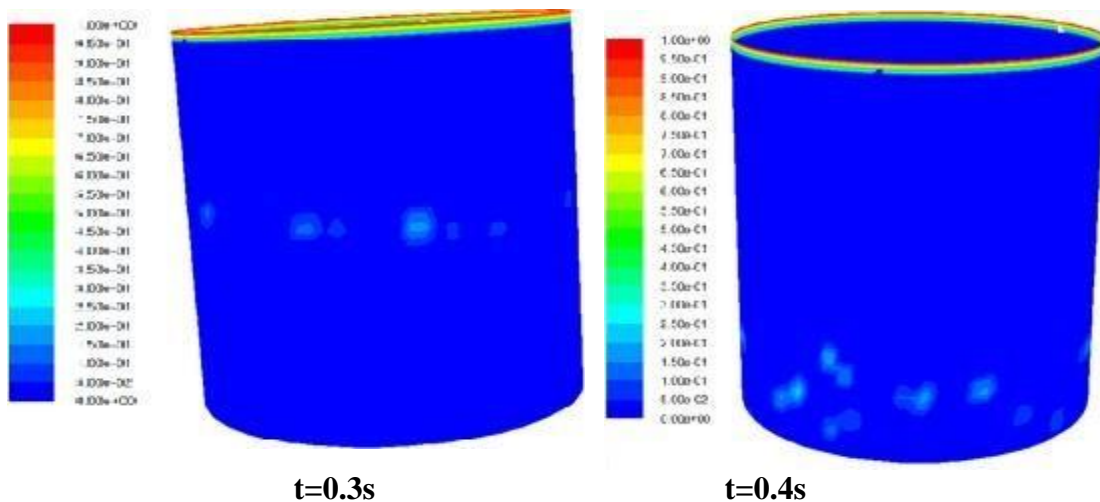
Apparitions des doigts

On peut voir sur les figures d'apparition des doigts, donc à $t=0.2s$ l'apparition des doigts n'est visible plus dans les deux cônes jusqu'à $t=0.3s$, les doigts s'apparaissent uniquement sur le cône qui a une vitesse de 5(m/s), au moment $t = 0.4s$ les doigts commencent à apparaître sur le cône qui a une vitesse 2(m/s).

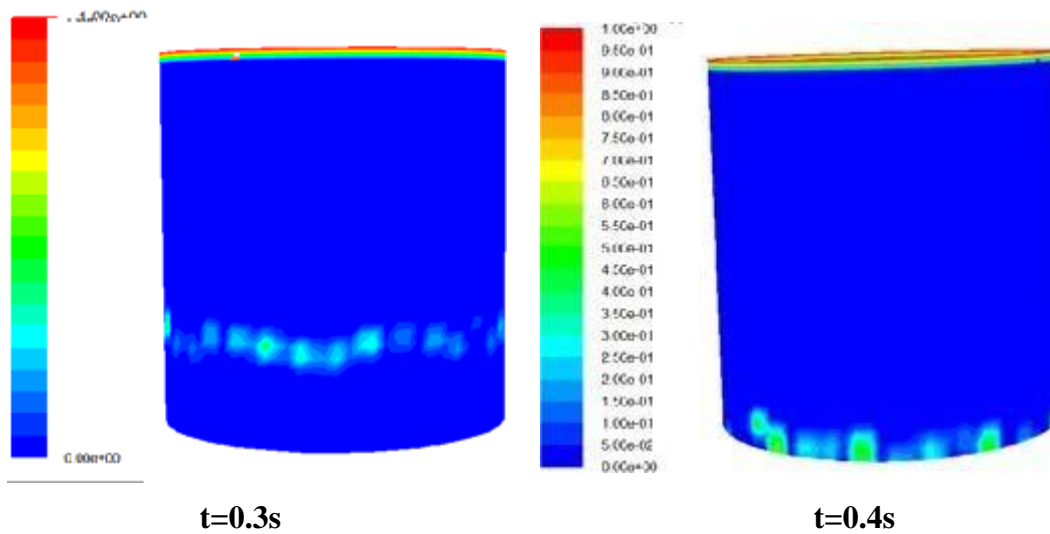
3.2.2.2 Gonflement de front:

➤ **Cas d'un cylindre:**

Un cylindre avec une vitesse de 0.2 (m/s) et une viscosité de 0.001(kg/s-m)



Maintenant avec le même cylindre mais avec une vitesse de 0.5(m/s)



➤ Cas d'un cône:

En un cône avec une vitesse de 0.2(m/s) et une viscosité de 0.001(kg/s-m)

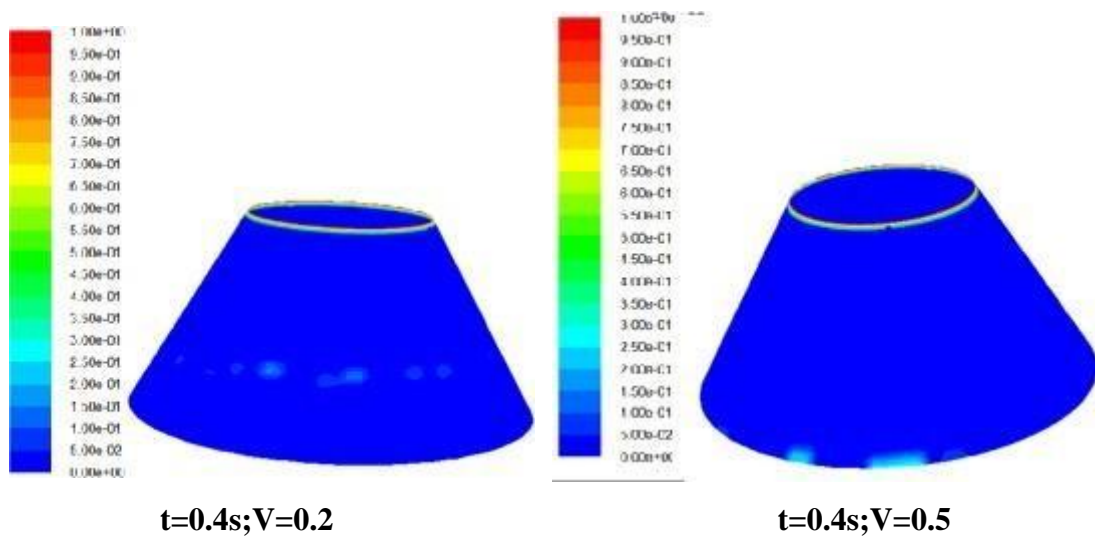


Figure III.4 : Les résultats obtenus sous Fluent représentent le gonflement de front sur les deux géométries avec des vitesses différentes et les différents temps ($t=0.3s$, $t =0.4s$).

Commentaire:

On peut remarquer qu'il y a des taches sur le front de l'interface qui vue que il y a un gonflement sur le front.

3.2.2.3 Suivi des doigts avec l'avancement du front:

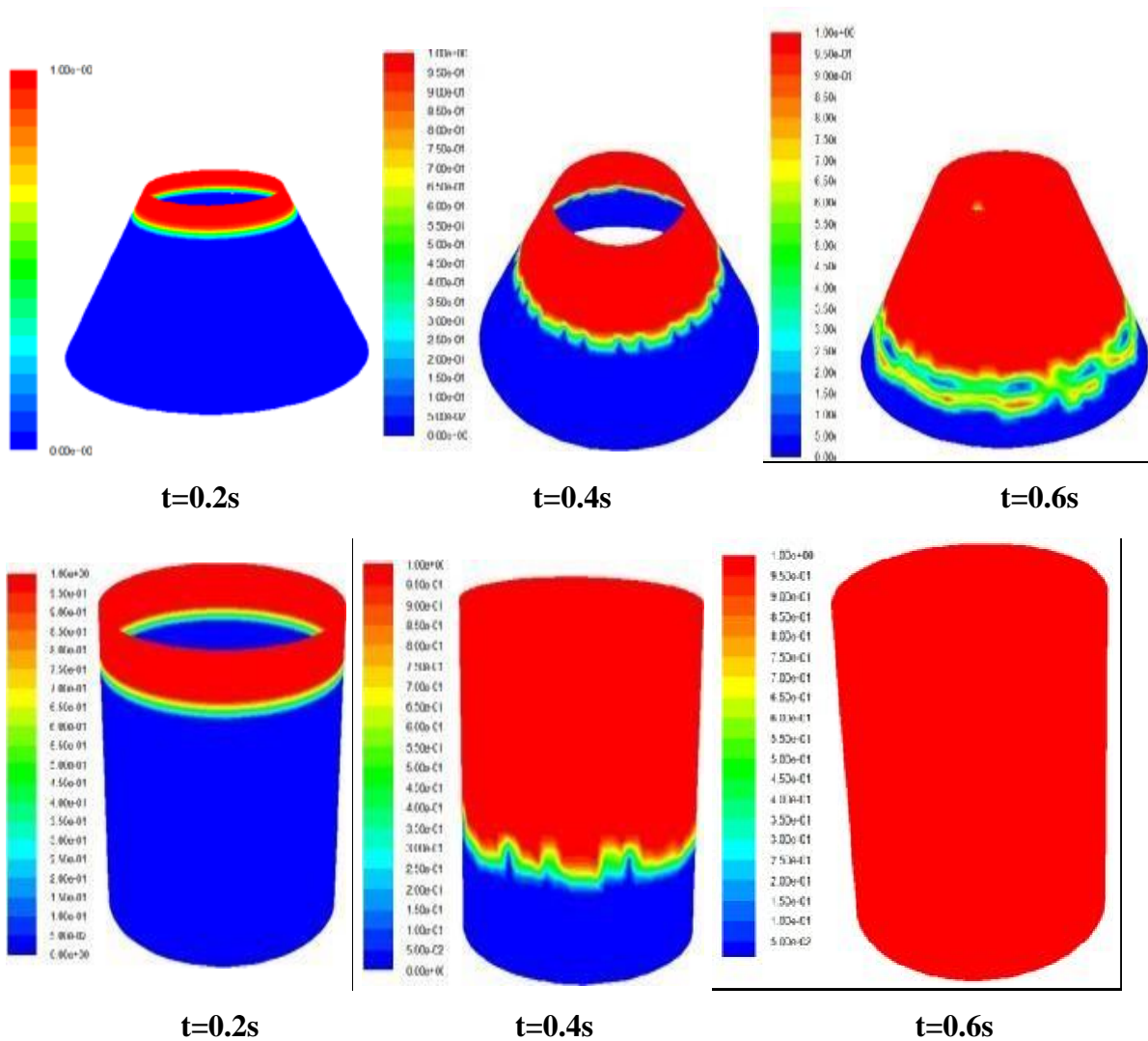


Figure III.5 : Les résultats obtenus sous Fluent les nombre des doigts avec l'avancement du front.

Commentaire:

L'apparition des doigts ne se voit plus dans le début et la fin de deux géométries, les doigts s'apparaitre en abondance ou milieu des deux géométries,

3.2.2.4 Détachement de fluide et son échappement du demain d'étude:

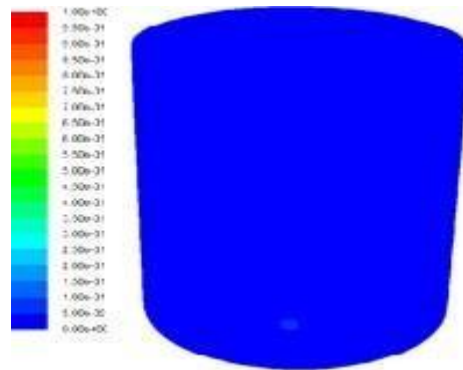


Figure III.6: Les résultats obtenus sous Fluent représentent un détachement de fluide à $t=0.375s$.

Observation:

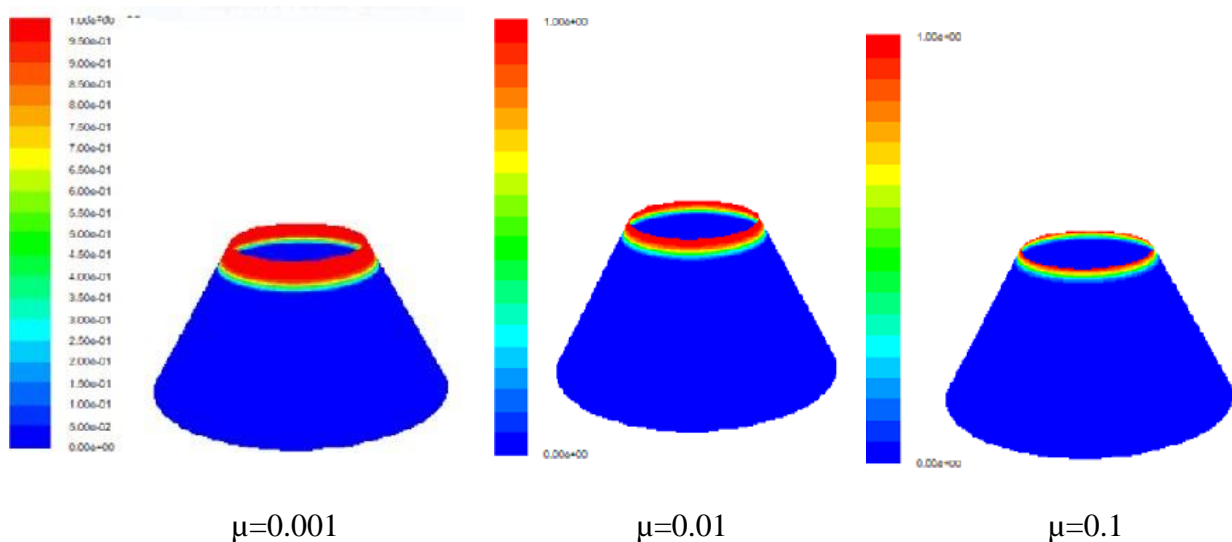
À $t=0.375s$, on a capté une tache sur la face extérieure du demain qui dé passe l'interface qui vu de dire que il y a un détachement de goutte d'eau.

3.2.3 Effet de viscosité:

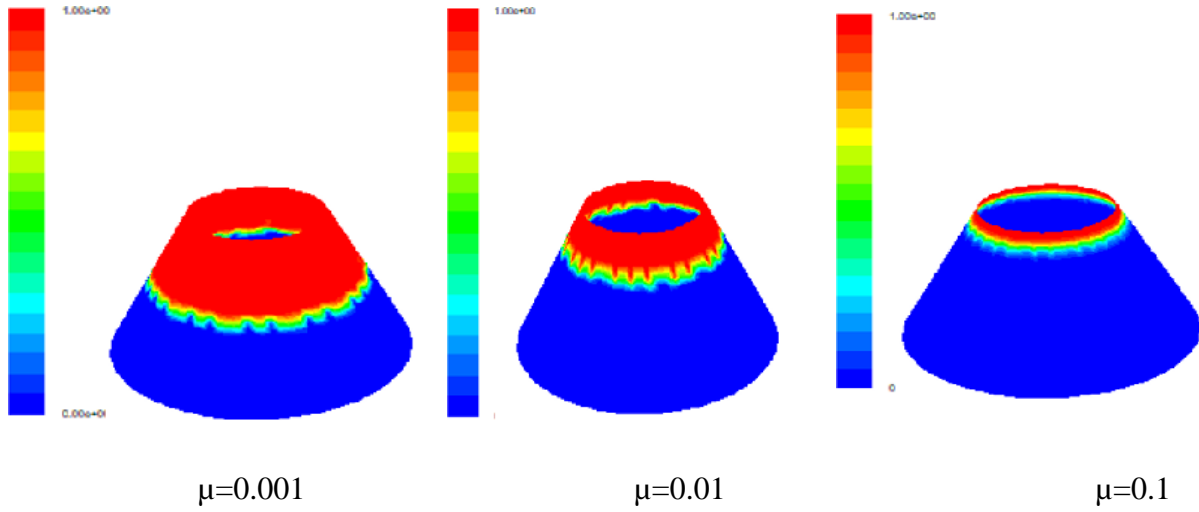
3.2.3.1 Effet de viscosité sur l'apparition des doigts :

On fixe la vitesse initiale ($0,2m/s$) et on fait varier la viscosité μ :

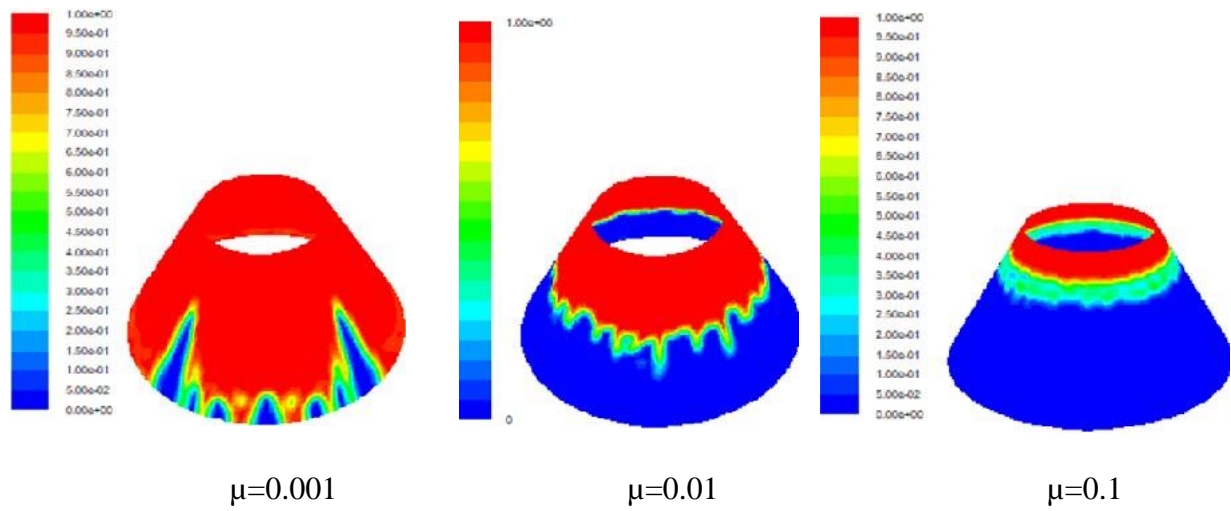
➤ $At = 0,2s$



➤ $At = 0,4s$



➤ $At = 0,8s$



➤ At= 2s

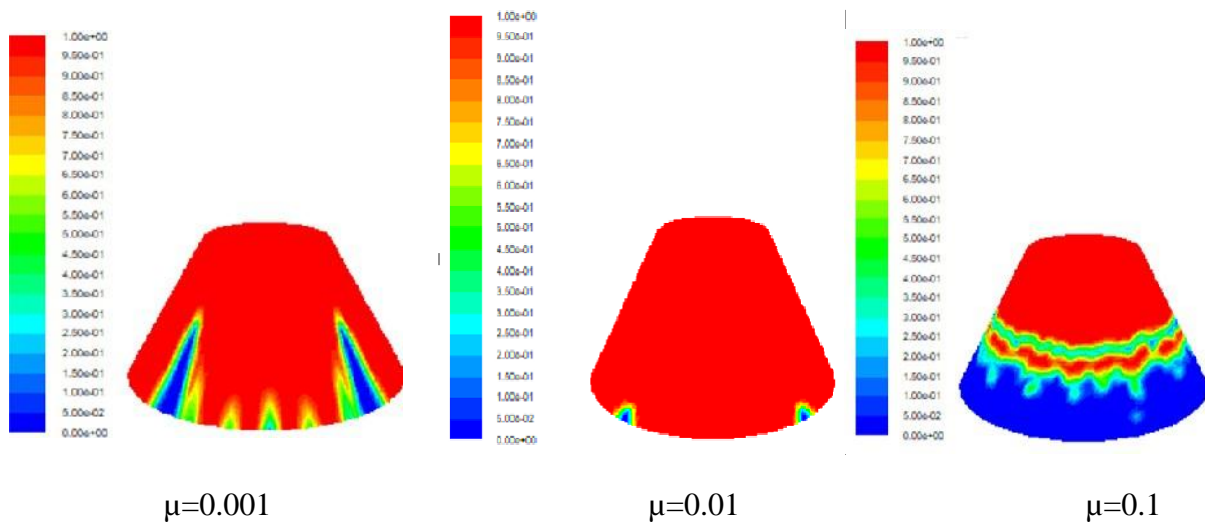


Figure III.7 : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de la viscosité sur l'apparition des doigts dans le cône à différents temps ($t=0.2s, t=0.4s, t=0.8s, t=2s$).

Apparitions des doigts

on peut voir sur les figures l'apparition des doigts, donc à $t= 0.2s$ l'apparition des doigts n'est plus dans les trois cas jusqu'à $t=0.4s$, les doigts s'apparaissent uniquement sur le cône $\mu=0.001\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$, au moment $t = 0,8s$ les doigts commencent à apparaître sur les deux cas ($\mu=0.001\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$ et $\mu=0.01\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$), au moment $t=2s$ les doigts s'apparaissent sur les trois cas ($\mu=0.001\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}), \mu=0.01\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m}), \mu=0.1\text{kg}/(\text{s}\cdot\text{m})$).

3.2.3.2 Détachement de fluide et son échappement du domaine d'étude:

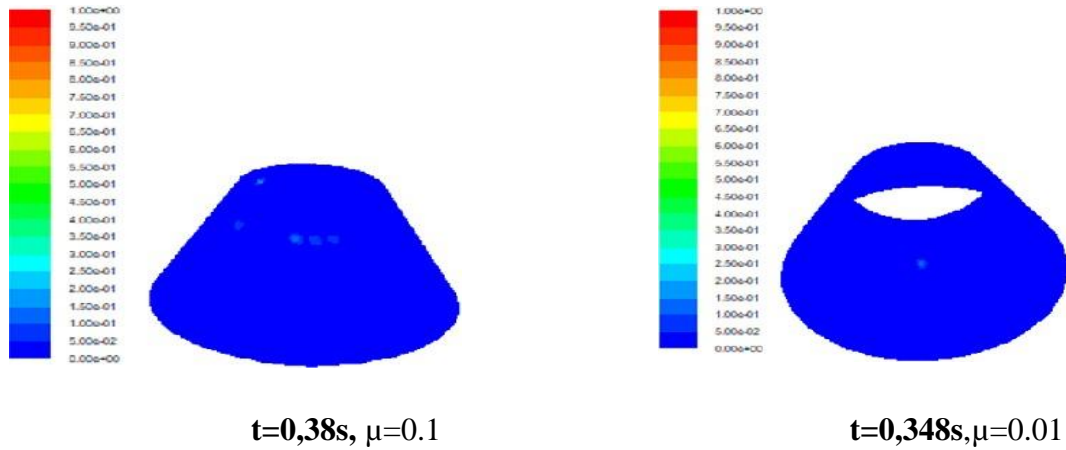


Figure III.8:

Les résultats obtenus sous Fluent représentent un détachement de fluide pour les deux cas $\mu=0.01 \text{ kg/(s-m)}$, $\mu=0.1 \text{ kg/(s-m)}$ avec une vitesse de 0.2 (m/s) .

3.3 Phase stationnaire :

3.3.1 Gonflement de front:

Enauncône avec une vitesse de 0.2 (m/s) et une viscosité de 0.1 (kg/s-m) et de $0,01 \text{ (kg/s-m)}$.

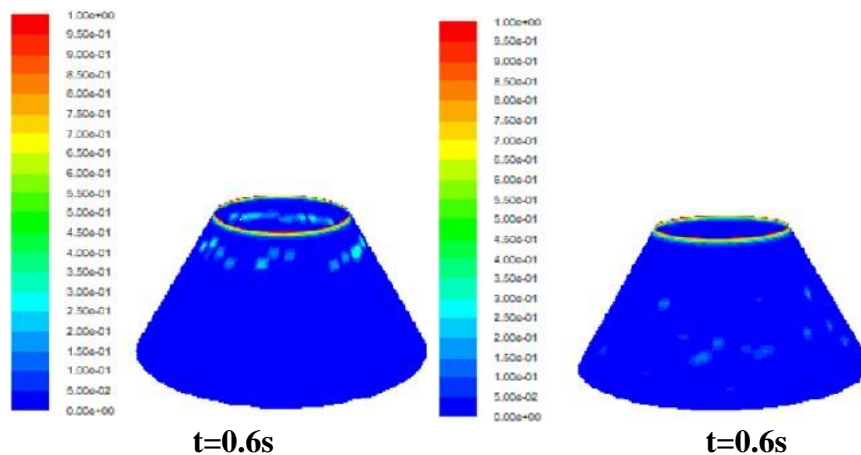


Figure III.9 : Les résultats obtenus sous Fluent représentent le gonflement de front sur les deux cas $\mu=0.01 \text{ kg/(s-m)}$, $\mu=0.1 \text{ kg/(s-m)}$ avec une vitesse de 0.2 (m/s) .

Commentaire:

On peut remarquer qu'il y a des taches sur le front de l'interface ce qui montre un gonflement sur le front.

Observation:

$AT=0.38$ son a capté une tache sur la face extérieure du dôme qui dépasse l'interface qui veut dire qu'il y a un détachement de goutte d'eau.

Conclusion

Lors de cette étude, il a été mis en évidence la capacité du logiciel Fluent à modéliser l'écoulement d'un fluide dans deux géométries différentes, et d'étudier la stabilité d'un écoulement et sa répartition sur une surface conique avec une vitesse initiale, donc nous avons eu à partir de cette étude les résultats suivants :

- L'écoulement sur le cylindre est plus rapide que sur le cône.
- L'évolution du fluide sur le cylindre 0.5 (m/s) est plus rapide que sur le cylindre 0.2 (m/s) .
- L'évolution du fluide sur le cône 0.5 (m/s) est plus rapide que sur le cône 0.2 (m/s) .
- la vitesse initiale joue un rôle très important sur l'apparition des doigts.
- l'apparition des doigts à la vitesse 0.5 (m/s) apparaît plus rapidement que à la vitesse 0.2 (m/s) .
- l'apparition de gonflement de front sur le cône et le cylindre.
- $AT=0.375$ il y a un détachement de fluide.
- Le nombre de doigts s'apparait en abondance au milieu des deux géométries.

Conclusion générale

L'écoulement d'un fluide newtonien sur une surface conique, a été étudié lors de ce mémoire. L'objectif c'est d'étudier la stabilité d'un écoulement et sa répartition sur une surface conique en considérant l'arrivée d'un débit par le sommet.

Une simulation numérique du problème physique a été établie interprétant le phénomène d'écoulement d'un fluide newtonien sur une surface conique. La géométrie a été faite sous le logiciel « Gambit ». L'étude a été réalisée sur un logiciel de calcul de simulation numérique « Fluent » en utilisant la méthode volume of fluid (VOF). On a donc fixé les paramètres tels que la masse volumique et la viscosité du fluide, la hauteur H et le rayon du sommet du cône $P_{\text{int-haut}}$ ainsi que l'épaisseur du film e à l'arrivée du débit, ensuite a fait varier la vitesse débitante du film pour deux cas de configuration un de cône 60° et un cylindre (cône 90°).

On peut tirer donc les conclusions suivantes:

- L'angle du cône joue un rôle très important sur la vitesse de l'écoulement
- L'évolution du fluide sur le cylindre est plus rapide que sur le cône.
- la vitesse débitante à l'arrivée du fluide sur le sommet du cône affecte d'une manière considérable l'apparition des doigts.
- La déstabilisation du film par l'apparition des doigts plus prononcée et rapide pour les vitesses plus importantes
- l'apparition de gonflement de front du film pour les deux cas de figures cône et cylindre

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 within large size column equipped with structured packing. Chemical Engineering Science, 62, 7196-7204 (2007)
- [5]. P. Augeul, C. Dannane, H. Merelle, K. Saintilan, visualisation numérique d'écoulement multiphasique, institut national des sciences appliquées, Rouen Normandie, pp 3-4, (2020).

Résumé

Ce travail a pour objectif d'étudier la stabilité d'un écoulement et sa répartition sur une surface conique en considérant l'arrivée d'un débit par le sommet. Elle s'agit d'une simulation numérique sous le logiciel Fluent, basée sur la méthode VOF (volume of fluid), pour du cône. La masse volumique et la tension superficielle ont été fixées, et les effets de l'angle du cône et de la vitesse sur l'apparition des doigts ont été analysés.

Mots clés: VOF, angle de contact, surface conique, Fluent, surface libre, doigts, tension de surface.

Abstract

This work aims to study the stability of a flow and its distribution on a conical surface by considering the arrival of a flow from the top. This is a numerical simulation using Fluent software, based on the VOF (volume of fluid) method, for different cone configurations. The density and surface tension were fixed, and the effects of cone angle and speed on finger appearance were analyzed.

Keywords: VOF, contact angle, conical surface, Fluent, free surface, fingers, surface tension.