

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

Université Abderrahmane MIRA BEJAIA  
Faculté de Technologie  
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par :

**MAZOUZ Lamine**

**ZEMOURI Roujdi**

**Thème**

---

**Simulation numérique d'un écoulement à surface libre sur une sphère**

---

Soutenu le 25/11/2020 devant le jury composé de:

Mr. F.NAIT BOUDA

Président

Mr. M.ALLOUCHE

Rapporteur

Mr. A.DJEMA

Examineur

**Année Universitaire 2019-2020**

# Remerciements

*Nos vifs remerciements seront adressés à :*

*ALLOUCHE Moussa, notre encadreur, pour sa disponibilité et son soutien actif, pour l'attention qu'il nous 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 de la faculté de génie mécanique pour leur contribution en terme de transmission du savoir.*

*Tous ceux qui, d'une manière ou d'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 affectation et leur éternel amour.*

*A mes frères, ma sœur bien-aimés pour leur soutien et leur disponibilité. A mes amis.*

*Lamine MAZOUZ.*

*Je dédie ce travail :*

*À 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.*

*À mon frère, mes sœurs qui ont soutenu tout au long de ce projet. À mes amis et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.*

*Roujdi ZEMOURI*

# Sommaire

<b>Remerciement</b> .....	<b>i</b>
<b>Dédicaces</b> .....	<b>ii</b>
<b>Sommaire</b> .....	<b>iii</b>
<b>Table des figures</b> .....	<b>vi</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>vii</b>
<b>Nomenclature</b> .....	<b>viii</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralité et revue bibliographique</b>	
I.1 Introduction .....	3
I.2 Couche mince.....	3
I.2.1 Définition .....	3
I.2.2 Dépôt de couche mince .....	3
I.2.3 intervention des couches minces.....	3
I.2.4 Méthode de dépôt .....	4
I.2.4.1 Dépôt chimique .....	4
I.2.4.2 Dépôt physique.....	4
I.2.4.3 Dépôt phase liquide .....	4
I.2.4.4 Dip/Spin-coating.....	5
I.2.4.5 Principe de la méthode spin-coating.....	6
I.3 Revêtement.....	6
I.3.1 Définition.....	7
I.3.2 Types des revêtements.....	7
I.3.3 Procédées des revêtements.....	7
I.3.4 L'interface revêtement.....	7
I.4 La viscosité.....	8
I.5 Angle de contact .....	9
I.6 Généralité sur la méthode VOF (volume of fluide).....	9
I.6.1 Présentation générale de la méthode VOF.....	9
I.6.2 Approximation de la variable densité pour la méthode de VOF.....	10

I.6.3 La théorie du modèle VOF.....	10
I.6.4 L'équation de la fraction volumique .....	11
I.7 Conclusion.....	11
<b>Chapitre II : Présentation du problème</b>	
II.1 Introduction .....	12
II.2 Equations de Navier Stokes .....	12
II.2.1 Equations de Navier Stokes pour un fluide incompressible.....	12
II.3 Flux axisymétrique sur une sphère.....	14
II.4 Conclusion.....	17
<b>Chapitre III : Simulation numérique</b>	
III.1 Introduction.....	18
III.2 Outils de simulation Gambit et Fluent.....	18
III.2.1 Gambit.....	18
III.2.2 Notice d'utilisation de Gambit.....	18
III.2.2.1 Vue globale.....	18
III.2.2.2 Détails des principaux menus.....	20
III.2.2.3 Présentation de la géométrie étudiée.....	20
III.2.2.4 Réalisation du maillage .....	21
III.3 Simulation sous Fluent.....	23
III.3.1 Notice d'utilisation de Fluent.....	24
III.3.2 Définir les caractéristiques des fluides utilisés.....	25
III.3.3 Spécification des phases.....	25
III.3.4 Condition d'opération .....	26
III.3.5 Définir les conditions aux limites.....	26
III.3.6 Initialiser la solution.....	27
III.3.7 Lancement des itérations.....	27
III.4 Remarque importante.....	28
<b>Chapitre IV : Résultats et discussions</b>	
IV.1 Introduction .....	29
IV.2 Résultats .....	29
IV.3 Commentaires.....	40
IV.4 Résultats expérimentaux (DAISUKE TAKAGI AND HERBERT E. HUPPERT).....	41

IV.5 Commentaire sur l'expérimental .....	42
IV.6 Comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulation par fluent.	42
IV.4 Conclusion.....	41
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>43</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>44</b>

## Table des figures

Figure II.2 : Esquisse d'un film mince de fluide se répandant de manière axisymétrique au sommet d'une sphère

Figure III.1 : Vue globale de Gambit

Figure III.2 : Type de solver

Figure III.3 : Menu principal de Gambit

Figure III.4 : La géométrie de l'ensemble (deux sphères, cylindre) sous gambit

Figure III.5 : Maillage de la géométrie d'un cylindre

Figure III.6 : Maillage de la géométrie de l'ensemble sur Gambit

Figure III.7 : Choix du modèle VOF sous Fluent

Figure III.8 : Spécification des matériaux sous Fluent

Figure III.9 : Choix spécifique des phases

Figure III.10 : Choix de la pression de référence

Figure III.11 : Conditions aux limites

Figure III.12 : Initialiser

Figure III.13 : Éviration sous Fluent

Figure IV.1 : Effet de l'angle de contact : Evolution du film mince sur la sphère à différents temps ( $t=0s, 1s, 2s$  et  $3s$ ) pour  $\theta_w = 70^\circ$  et  $\mu = 0.6435 \text{ kg/m.s}$

Figure IV.2 : Effet de l'angle de contact : Evolution du film mince sur la sphère à différents temps ( $t=0s, 2s, 4s$  et  $6s$ ), pour  $\theta_w = 110^\circ$  et  $\mu = 0.6435 \text{ kg/m. s}$

Figure IV.3 : Effet de l'angle de contact : Evolution du film mince sur la sphère à différents temps ( $t=0s, 2s$  et  $3s$ ), pour  $\theta_w = 130^\circ$  et  $\mu = 0.6435 \text{ kg/m. s}$

Figure IV.4 : Effet de la viscosité dynamique : Evolution du film mince sur la sphère à différents temps ( $t=0s, 0.1s, 0.2s$  et  $0.3s$ ), pour  $\theta_w = 90^\circ$  et  $\mu = 0.02 \text{ kg/m. s}$ .

Figure IV.5 : Effet de la viscosité dynamique : Evolution du film mince sur la sphère à différents temps ( $t=0s, 0.1s, 0.4s$  et  $0.6s$ ), pour  $\theta_w = 90^\circ$  et  $\mu = 0.02 \text{ kg/m. s}$

Figure IV.6 : Séquence de clichés pris au-dessus d'un ballon de rayon  $R = 23 \text{ cm}$  à six temps différents pour un volume de  $123 \text{ cm}^3$  relâché à partir de son sommet.

## Liste des tableaux

Tableau III.1 : Nombre de maille utilisé dans le cylindre (volume du liquide lâché)

Tableau III.2 : Conditions aux limites utilisées dans l'ensemble

# Nomenclature

Symboles	définitions	unités
$Bo$	nombre de Bond	-
$\alpha_q$	fraction volumique de la q-ieme phase	-
$\rho$	Masse volumique	$kg/m^3$
$P$	pression	pa
$g$	gravité	$m / s^2$
$V$	volume de fluide	$m^3$
$r$	coordonnée radiale	m
$R$	Rayon de la sphère (ballon)	m
$\theta$	Angle azimutal	
$\theta_N$	Angle d'avancement du front	
$\theta_w$	Angle de contact	
$h$	hauteur du film	m
$\mu$	viscosité dynamique	$kg / m. s$
$u$	vitesse	m/s
$t$	temps	s
$L$	longueur	m
$Q$	Débit local	$m^3/s$
$\omega$	vitesse angulaire	rad / s
$i, j$	$i^{i\text{ème}}$ et $j^{j\text{ème}}$ composantes.	-

# **Introduction générale**

# Introduction Générale

Les écoulements par gravité de films liquides apparaissent dans de nombreux phénomènes naturels (ruissellement des eaux superficielles, écoulement de la lave volcanique...) mais aussi dans les procédés industriels (réacteurs chimiques, évaporateurs, condenseurs...) et de revêtement (fibres optiques). Les instabilités qui s'y développent sont de deux types : une instabilité d'origine visqueuse (mode de cisaillement) insensible aux effets de la tension superficielle apparaissant à de faibles inclinaisons du plan et à des nombres de Reynolds élevés et une instabilité d'origine gravitaire (mode inter-facial) dominée par la capillarité et se produisant à des nombres de Reynolds modérés. Les ondes qui en résultent ont une échelle de longueur beaucoup plus grande que l'épaisseur  $h$  du film. Un film liquide tombant représente une couche liquide mince avec une importante surface libre qui s'écoule sur une paroi. L'écoulement peut être constitué d'une ou de plusieurs couches de fluides. 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 VOF (Volume Of Fluid).

Le deuxième chapitre établit les équations régissant le phénomène d'un écoulement bidimensionnel sur une sphère.

Le troisième chapitre est consacré pour la partie numérique, dans cette dernière nous avons présenté les différents programmes utilisés lors de notre simulation que ce soit pour la réalisation de la géométrie ou pour la simulation numérique, les étapes ont été bien expliquées afin de montrer les paramètres et les modèles utilisés dans notre cas.

Le quatrième 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**

## **I.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.

## **I.2 Couche mince**

### **I.2.1 Définition**

Une couche mince (en anglais : *thin film*) est un revêtement dont l'épaisseur peut varier de quelques couches atomiques à une dizaine de micromètres. Ces revêtements modifient les propriétés du substrat sur lesquels ils sont déposés.

### **I.1.3 Dépôt de couche mince**

Le dépôt de couche mince désigne l'ensemble des techniques qui permettent de déposer une couche mince ou film mince de matériau sur un substrat ou sur des couches déposées antérieurement. Le terme « mince » est relatif, mais la plupart des techniques de dépôts permettent typiquement de déposer des épaisseurs de couche de quelques nanomètre. Certains, comme l'épitaxie par jet moléculaire, permettent même de déposer une seule couche atomique à la fois.

### **I.2.3 Intervention des couches minces**

Les films minces interviennent comme éléments constitutifs dans de nombreux processus industriels comme :

- Mise en forme des polymères
- Procédés de revêtements: enduction de surfaces
- Dépôt de couches minces: bandes magnétiques, films photographiques
- Évaporateurs à films tombants (agroalimentaire: production de lait concentré)

- Tours de refroidissement des centrales nucléaires (dissiper la chaleur d'une eau chaude par interaction avec un écoulement d'air à contre-courant). Les films tombants sont au cœur de ces procédés

## **I.2.4 Méthodes de dépôt**

### **I.2.4.1 Dépôt chimique**

Lors d'un dépôt chimique, un fluide précurseur subit une réaction chimique sur une surface solide, laissant une couche solide. Puisque le fluide recouvre l'ensemble de la surface du solide, le dépôt s'effectue sur toute la surface. On peut citer comme exemples le revêtement, le procédé sol-gel, l'enduction centrifuge (souvent appelée *spin-coating*, emprunté de l'anglais), le dépôt chimique en phase vapeur (ainsi que la variante assistée par plasma), ou encore le dépôt de couche atomique.

### **I.2.4.2 Dépôt physique**

Un dépôt physique implique des procédés mécaniques, électromécaniques ou thermodynamiques pour produire une couche mince de solide. Le matériau à déposer sur le substrat est placé dans un environnement tel que les particules qui le composent échappent de sa surface. En face de cette source de matériau se situe une surface plus froide (substrat), qui récupère de l'énergie de ces particules lorsqu'elles arrivent, ce qui permet la formation d'une couche solide. L'ensemble de ce système est maintenu dans une chambre de dépôt sous vide, pour plusieurs raisons. Premièrement, cela rend le mouvement des particules plus rapide, et deuxièmement, cela limite la présence intempestive dans la couche déposée d'atomes ou molécules présentes dans l'atmosphère environnante. On peut citer comme exemples l'évaporation sous vide, la pulvérisation cathodique, le dépôt laser pulsé, le dépôt électrohydrodynamique.

### **I.2.4.3 Dépôt en phase liquide**

Dans cette partie, nous allons nous concentrer sur la description des techniques de dépôt par recouvrement en milieu liquide. Deux types de procédés existent et utilisent soit la force de gravité, soit la force électrochimique afin de former des films minces sur divers substrats.

#### I.2.4.4 Dip/Spin-Coating

Les procédés de dépôt par trempage-retrait (dip-coating) et par centrifugation (spin-coating) sont largement utilisés pour réaliser des revêtements sous forme de films minces sur une grande variété de substrats. Le spin-coating consiste à appliquer un sol de précurseur sur un des côtés d'un substrat en rotation. Dans ce cas, l'épaisseur du film mince diminue lorsque la vitesse de rotation et donc la force centrifuge augmente. Par dip-coating, le substrat est immergé dans le sol de précurseurs et est ensuite retiré du sol à vitesse constante afin d'avoir une épaisseur de film contrôlée et homogène. Plusieurs régimes de dépôt existent au cours de la synthèse du film et influencent son épaisseur. Le premier régime de drainage est bien connu et est régi par la gravité du liquide à vitesse de retrait rapide. Dans ce cas, l'épaisseur du film augmente lorsque la vitesse de retrait augmente. Le second régime, appelé régime capillaire moins étudié est régi par la vitesse d'évaporation des solvants et le phénomène de capillarité. Il a lieu à faible vitesse de retrait. Au cours de ce dépôt, la matière inorganique s'accumule dans le ménisque formé lors de l'évaporation du solvant. Les épaisseurs obtenues sont beaucoup plus importantes. Par ces techniques de dépôt, une grande variété de précurseurs peut être déposée sur des substrats de grande surface, de forme variée, à des coûts peu élevés. La microstructure des films est contrôlée par les paramètres physico-chimiques qui sont liés à la solution sol-gel (concentration, addition de tensioactif, nature des solvants), les paramètres qui dépendent du procédé de mise en forme (vitesse de retrait et atmosphère), et enfin aux traitements thermiques. Cette dernière étape est très importante pour limiter les phénomènes de fissuration, contrôler la taille des pores et la cristallinité des films. Tous ces paramètres influenceront les propriétés électriques des films.

Brincker et al.[4-5] ont été les premiers à coupler le procédé sol-gel au dépôt par « dip-coating », appelé méthode de trempage-retrait. Plus spécifiquement, Atkinson et al.[6] ont étudié les propriétés mécaniques de films minces d'oxyde de cérium synthétisés par voie sol-gel et déposés sur des substrats d'acier. Cette étude a mis en évidence la formation de fissures dans les films minces d'épaisseur trop importante (>600 nm). Par spin-coating, Chen et al.[7] ont déposé des films de ~500 nm d'épaisseur de cérine dopée samarium à base d'une solution polymérique des précurseurs inorganiques et de l'éthylène glycol. Ce sol polymérique, formé d'un polyester chélatant les cations métalliques, est obtenu par l'oxydation de l'éthylène glycol, en milieu acide. De cette manière, à 320°C, des films minces denses ont pu être

déposé par spin-coating sur des substrats de Si et LSCF. Terribile et al.[8, 9] ont proposé la synthèse de film mésoporeux d'oxyde de cérium. A la suite de ces travaux, Brezesinski et al.[10] ont proposé d'utiliser des sols inorganiques contenant des tensioactifs pour synthétiser des films minces mésoporeux d'oxyde de cérium et de zircon. Les films minces présentent une taille de pore centrée sur 10 nm et des nanoparticules de 5-7 nm de diamètre. Ces travaux ont porté sur l'organisation de la porosité dans les films minces nanocristallins [11-12]. Des films minces mésoporeux de CGO cristallisés qui présentent une organisation périodique des pores ont été préparés par la méthode de dip-coating par Hierso et al.[3]. Ces films présentent un réseau de pores interconnectés, qui permettent la diffusion des gaz et des nanoparticules de CGO, connectées entre elles, qui servent à transporter les anions,  $O^{2-}$ , à travers le film. La conductivité de ces films minces mésoporeux a été mesurée par spectroscopie d'impédance et les valeurs sont comparables à celles observées pour des céramiques denses avec des grains de taille nanométriques. Ces résultats montrent que les joints de grains, dans ces films, ne limitent pas le transport des ions  $O^{2-}$

#### **I.2.4.5 Principe de la méthode spin-coating**

La méthode spin-coating consiste en l'étalement d'une goutte à la surface d'un substrat, par force centrifuge. Grâce à cette force due à la rotation d'un « spineur » (ou tournette), le sol tend à recouvrir uniformément toute la surface du substrat. Le liquide en excès est poussé vers l'extérieur du support. Cette méthode permet d'obtenir des couches minces de bonne qualité et de différentes épaisseurs de quelques nanomètres jusqu'à 10 micromètres.

En général, le processus de spin-coating peut être divisé en quatre phases :

1. Dépôt du sol sur le substrat (après nettoyage de la surface)
2. Augmentation de la vitesse de rotation du substrat (étape d'accélération) et étalement de la solution
3. À vitesse de rotation constante, l'épaisseur du film est d'abord contrôlée par la viscosité
4. Le substrat tournant à vitesse constante, la taille finale du film est enfin atteinte (contrôlée) après évaporation du solvant

### **I.3 Revêtement**

#### **I.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 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 mécaniques et aux différents éléments de l'environnement extérieur (ultraviolets, eau, oxydation (corrosion), température, moisissures, etc.).

### **I.3.2 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 anticorrosion, photo sensibilité pour les films photographiques, etc.).

### **I.3.3 Procédés de revêtement**

Les principaux procédés de revêtement peuvent être décomposés dans les grandes catégories suivantes :

- enduction : pour appliquer un revêtement sous forme liquide sur un substrat plat ;
- enrobage : pour appliquer un revêtement sous forme liquide sur un substrat de forme quelconque ;
- électrodéposition : dépôt d'un revêtement sous forme ionique sur un revêtement conducteur ;
- revêtement par poudre : utilise une résine plastique ;
- procédés de dépôt sous vide de couches minces :
  - dépôt physique en phase vapeur,
  - dépôt chimique en phase vapeur,
  - procédé sol-gel,
  - épitaxie;

### **I.3.4 L'interface revêtement substrat**

L'objectif d'un revêtement, ou d'une façon plus générale d'un traitement de surface, est de conférer à une surface d'un matériau des propriétés fonctionnelles données. L'interface entre

le revêtement et le substrat détermine l'adhérence du dépôt. Il existe quatre familles d'interface [2], définies comme suit:

1- L'interface abrupte : Elle correspond à un changement brutal de composition chimique entre le dépôt et le substrat qui se fait sur une distance de 0.2 à 0.5nm. Ce type d'interface présente une très faible adhérence car elle est assurée, seulement, par les forces de Van Der Walls [1,2].

2- L'interface de diffusion: elle est caractérisée par changement graduel de la composition chimique dans la zone d'interface. Une variation graduelle est aussi observée dans les propriétés mécaniques (module d'Young, coefficient de dilatation) ainsi qu'une diminution des contraintes résiduelles thermiques et mécaniques [2]. Ce type d'interface présente une bonne adhérence.

3- L'interface composée: elle résulte de la formation d'un composé chimique entre le dépôt et le substrat. Ce type d'interface nécessite une diffusion au préalable. La formation d'un nouveau composé peut provoquer des contraintes résiduelles mécaniques et éventuellement une formation de fissure à l'interface. Généralement ce type d'interface présente une bonne adhérence [2].

4- L'interface pseudo diffusion: elle est définie par un changement graduel de la composition chimique durant le dépôt à la surface. L'adhérence est meilleure en cas de continuité dans la composition du revêtement et du substrat et dans les propriétés mécaniques. Outre ces aspects, l'interface joue également un rôle thermique important. Le rôle de la microstructure formée lors du dépôt est considérable. L'interface est une couche de transition hétérogène, siège de défauts, dislocations, lacunes et composés d'inter diffusion. Elle provoque aussi de fortes chutes de conductivité. Il faut signaler que le procédé d'élaboration des dépôts influe considérablement sur les propriétés des couches [2].

#### **I.4 La viscosité**

La viscosité permet de faire la distinction entre un fluide parfait et un fluide réel. Dans le cas des fluides parfaits, on considère que l'écoulement se déroule sans perte d'énergie. Dans un fluide réel, il existe des forces dites de **viscosité**. Elles sont dues à des frottements qui existent entre les couches de vitesses différentes et sur les parois.

Ce phénomène est une caractéristique de la matière, quel qu'en soit l'état physique : gazeux, liquide ou à la limite solide. Elle intervient fréquemment dans les équations de la mécanique des fluides. Elle traduit, en bref, la résistance d'un fluide à l'écoulement, car elle ralentit le mouvement du liquide au voisinage des parois.

- L'eau, l'huile, le miel coulent différemment : l'eau coule vite, mais avec des tourbillons ; le miel coule lentement, mais de façon bien régulière.
- La **viscosité** (du latin viscum, gui) peut être définie comme la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière.
- La viscosité se manifeste chaque fois que les couches voisines d'un même fluide sont en mouvement relatif, c'est à dire lorsqu'il s'établit un gradient de vitesse.

On peut donc dire de la viscosité qu'elle est la mesure du frottement fluide.

## **I.5 Angle de contact**

L'angle de contact (ou angle de raccordement) 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.

## **I.6 Généralités sur la méthode VOF (Volume Of Fluid)**

### **I.6.1 Présentation générale de la méthode VOF**

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 connue. 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 application.
- 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 quant 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 engendrer des solutions inexacts.

### **I.6.2 Approximation de la variable densité pour la méthode VOF**

L'application des conditions aux limites nécessitent un traitement spécial dans la méthode VOF. Comme l'interface évolue le long de la grille, les cellules remplis 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.

### **I.6.3 La théorie du modèle VOF**

La formulation VOF est basée sur le fait que deux ou plusieurs fluides (ou phases) sont non miscibles. 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 partagés 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 représentatives 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.

Basé sur la valeur locale  $\alpha_q$ , les propriétés et les variables appropriées seront assignés à chaque volume de contrôle dans le domaine.

#### **I.6.4 L'équation de la fraction volumique**

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

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

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

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

### **I.7 Conclusion**

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

# **Chapitre II**

## **Présentation du problème**

# Présentation du problème

## II.1 Introduction

Dans la situation de l'écoulement d'un film mince visqueux qui est considéré comme un écoulement de faible épaisseur, les effets de la viscosité jouent un rôle prédominant dans la dynamique de l'écoulement. Notre travail dans ce chapitre consiste à décrire les équations de Navier-Stokes et les équations régissant le phénomène de l'écoulement à surface libre sur une sphère

## II.2 Equations de Navier stokes

En dynamique des fluides, les équations de Navier-Stokes sont des équations décrivant le mouvement tridimensionnel de substances fluides visqueuses. Ces équations sont nommées d'après Claude-Louis Navier (1785-1836) et George Gabriel Stokes (1819-1903). Dans les situations où il n'y a pas de forts gradients de température dans le fluide, ces équations fournissent une très bonne approximation de la réalité.

### Equation de continuité

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

### Equation de quantité de mouvement

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = \vec{\nabla} p + \mu \vec{\nabla}^2 \vec{u} + \rho \vec{g} \quad 2.2$$

Pour un fluide Newtonien et incompressible les équations précédentes se réduisent à:

### II.2.1 Equations de Navier stokes pour un fluide incompressible

$$\text{div}(\vec{u}) = \vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0 \quad 2.3$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \vec{\nabla}) \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \vec{\nabla} P + \vec{f}_m + \nu \vec{\nabla}^2 u \quad 2.4$$

En coordonnées sphériques avec  $\vec{u} = (u_r, u_\theta, u_\varphi)$

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

Sur l'axe  $r$

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

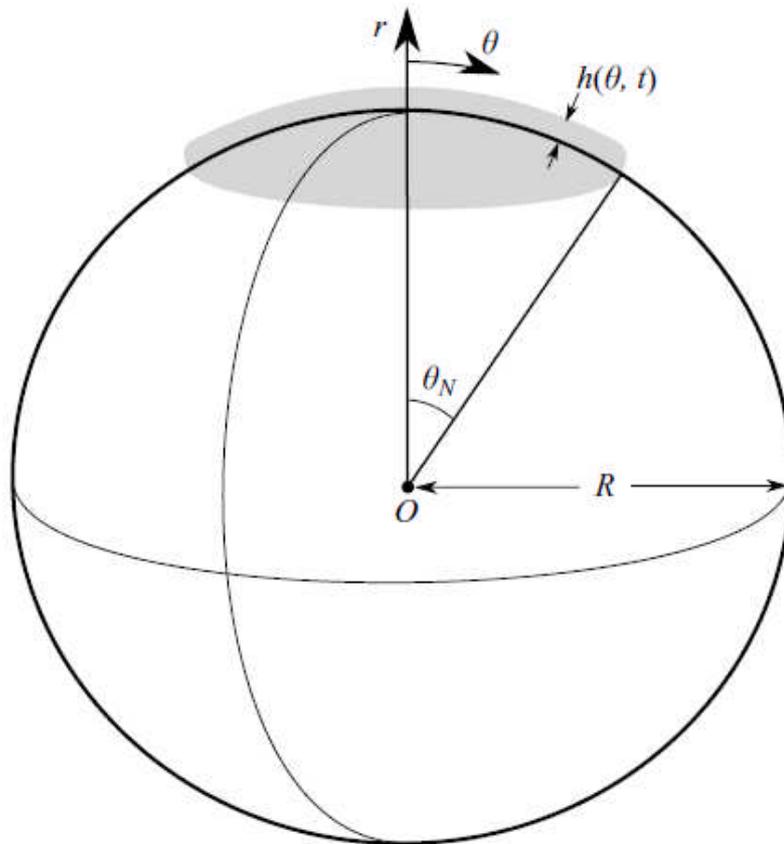
Sur l'axe  $\theta$

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

Sur l'axe  $\varphi$

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

### II.3 Flux axisymétrique sur une sphère



**Figure II.2** Esquisse d'un film mince de fluide se répandant de manière axisymétrique au sommet d'une sphère.

Notre étude se base sur la simulation numérique d'un écoulement à surface libre sur une sphère et compare les résultats obtenus, avec une expérience faite par (D. Takagi H. E. Huppert).

Considérons la surface extérieure d'une sphère rigide représentée par  $r = R$  en coordonnées sphériques, où  $\theta$  est l'habituel angle zénithal par rapport à l'axe vertical. Un volume constant  $V$  de fluide visqueux est libéré instantanément au point haut de la sphère de sorte que l'écoulement résultant soit initialement axisymétrique comme esquissé sur la figure 2. Lorsque l'étendue de l'écoulement, notée  $R\theta_N(t)$ , est beaucoup plus grande que l'épaisseur du film notée  $h(\theta, t)$ , la vitesse d'écoulement  $u(r, \theta, t)$  est majoritairement le long de la surface de la sphère, dans la direction  $\theta$ . En utilisant la théorie de la lubrification, on obtient le profil de vitesse. Ainsi, la vitesse intégrée en profondeur est à nouveau donnée par :

$$Q = \frac{1}{3} g \sin \theta h^3 / \nu \quad . \quad 2.9$$

Substituer (2.9) dans la conservation de masse locale en coordonnées sphériques données par :

$$\partial h / \partial t + (R \sin \theta)^{-1} \partial (\sin \theta Q) / \partial \theta = 0 \quad 2.10$$

On obtient :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{g}{3\nu R \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} (\sin^2 \theta h^3) = 0. \quad 2.11$$

Le volume total de fluide est indépendant du temps et exprimé en :

$$V = 2\pi R^2 \int_0^{\theta_N(t)} h \sin \theta d\theta. \quad 2.12$$

Les équations gouvernantes données par (2.10) avec  $\sin \theta \approx \theta$  et (2.11) peuvent être non dimensionnelles en mettant à l'échelle toutes les longueurs de :

$$l_V \equiv V^{1/3} \quad 2.13$$

et le temps par :

$$T_V \equiv \nu R / g \nu^{2/3} \quad 2.14$$

La courbure du substrat n'apparaît que dans l'échelle de temps et non dans la longueur échelle du débit, tout comme le débit sur une sphère au II.2.

Le système de (2.10) et (2.11) est résolu dans la région au sommet de la sphère, où  $\theta \ll 1$ , en utilisant les mêmes méthodes que précédemment, pour obtenir :

$$h(t) = \left( \frac{3R\nu}{4g} \right)^{1/2} t^{-1/2} \quad . \quad 2.15$$

La solution donnée par (2.14) indique que l'épaisseur de la structure en vrac reste uniforme près du sommet de la sphère. Notez que l'épaisseur de fluide sur une sphère de rayon R donné par (2.14). L'expression (2.14) est également identique à l'épaisseur d'un volume constant V de fluide tourné à une vitesse angulaire  $\omega$  autour de son centre de masse sur un plan, où  $\omega^2 = g / R$  (Melo et al. 1989). La raison mathématique est que les équations régissant la dispersion de fluide près du sommet d'une sphère, (2.10) et (2.11), où  $\sin \theta \approx \theta$  et  $\nu / R = \omega^2$ , se réduisent aux équations correspondantes pour un volume de rotation de fluide.

Physiquement, les fluides se répandant à la fois sur le dessus d'une sphère stationnaire et sur le plan en rotation subit une force corporelle, qui augmente linéairement avec la distance à partir du point de sortie. La force corporelle est la gravité sur la sphère ou centrifuge sur le plan de rotation.

En remplaçant (2.14) par (2.11), on détermine que la longueur du courant est donnée par :

$$R\theta_N(t) = \left( \frac{4V^2g}{3\pi^2R\nu} \right)^{1/4} t^{1/4} \quad 2.16$$

Le rayon du bord d'attaque du flux augmente comme  $t^{1/4}$  tant que les effets sur le flux en vrac dus à la tension superficielle sont faibles.

Une analyse similaire à la précédente indique que la région capillaire, où les forces capillaires sont importantes près du front d'écoulement, sont faibles par rapport à l'écoulement en vrac à condition que :

$$\theta_N \gg Bo_V^{-1/6} V^{1/3} / R. \quad 2.17$$

où  $Bo_V$  est le nombre de Bond défini comme :

$$Bo_V \equiv \rho g V / \gamma R. \quad 2.18$$

La région capillaire devient relativement petite après l'extension du front d'écoulement suffisamment loin. En remplaçant (2.15) par (2.16), nous déterminons que la tension superficielle joue un rôle négligeable dans la région globale de l'écoulement lorsque :

$$t \gg Bo_V^{-2/3} T_V. \quad 2.19$$

Le régime de validité des solutions (2.14) et (2.15) est en outre contraint par :

$$l \ll t / T_V \ll R^4 / V^{4/3}. \quad 2.20$$

qui peut être étudié expérimentalement en libérant du fluide sur une sphère de grand rayon  $R$ . Le volume de fluide doit être suffisamment grand pour que le nombre de Bond n'est pas trop petit pour satisfaire (2.18) et suffisamment petit pour qu'il s'étale sous la forme d'un film mince près du sommet de la sphère pour satisfaire (2.19).

**II.4 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, Une simulation numérique du problème est décrite dans le chapitre suivant.

# **Chapitre III**

## **Simulation numérique**

## III.1 Introduction

La simulation se définit comme l'utilisation ou la résolution de modèles correspondant à un système donné pour étudier le comportement de ce dernier dans un contexte précis. Elle est la suite logique de la modélisation qui est la première approche d'une simulation.

## III.2 Outil de simulation Gambit et fluent

### III.2.1 Gambit

GAMBIT est un logiciel qui permet de créer des maillages pouvant être utilisés en particulier sous FLUENT.

Le meilleur est un prétraitement au logiciel de simulation. Il permet de générer un maillage structuré ou non structuré en coordonnées cartésiennes, polaires, cylindriques ou axisymétriques. Il peut réaliser des maillages complexes en deux ou trois dimensions avec des mailles de type rectangle ou triangle.

### III.2.2 Notice d'utilisation de gambit

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

#### III.2.2.1 Vue globale

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

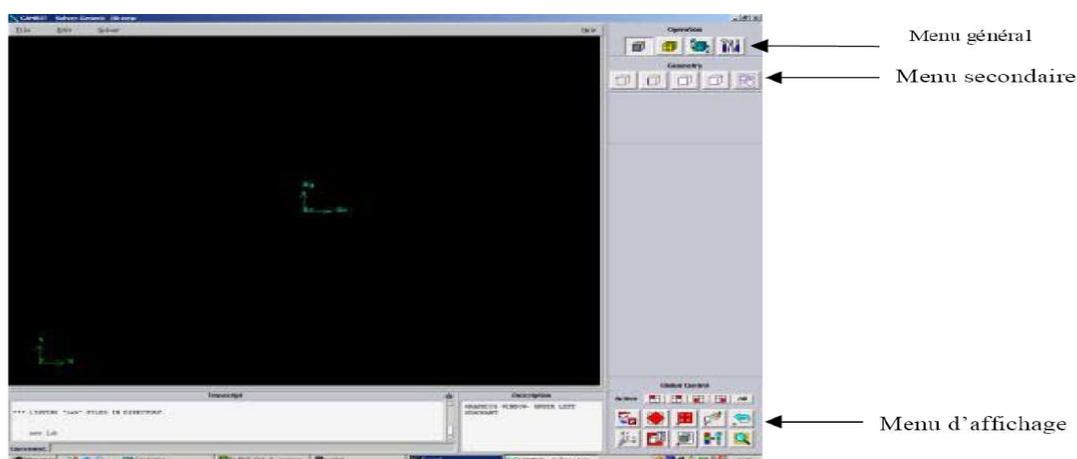
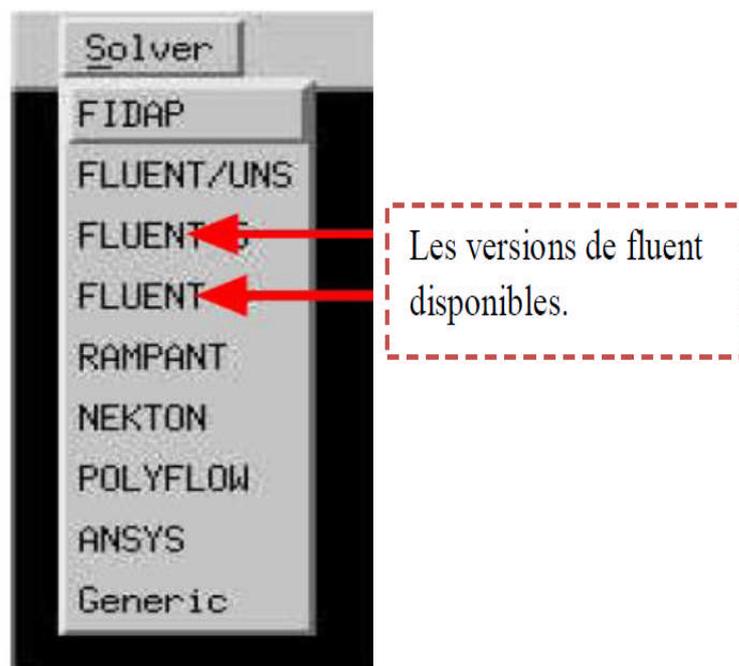


Figure III.1 Vue globale de Gambit

Astuce : La première chose à faire quand on entre sur Gambit est de nommer le système qu'on va construire de telle manière de ne pas le perdre bêtement.

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

Important : Avant même de créer la géométrie il faut choisir le type de solver; c'est-à-dire le type de logiciel (ici fluent) qu'on va utiliser par la suite (choisir la bonne version du logiciel dans notre cas choisir Fluent 6).



**Figure III.2** Type de solver

Vient maintenant le moment de créer la géométrie à étudier Deux possibilités se présentent :

- Créer point par point (extrémités) le système, ligne, face, volume (conseillé pour des géométries complexes) ce qui est notre cas.
- Créer des surfaces simples existantes (cube, cylindre, sphère...) puis extruder pour obtenir les volumes ou les surfaces voulus.

### III.2.2.2 Détails des principaux menus

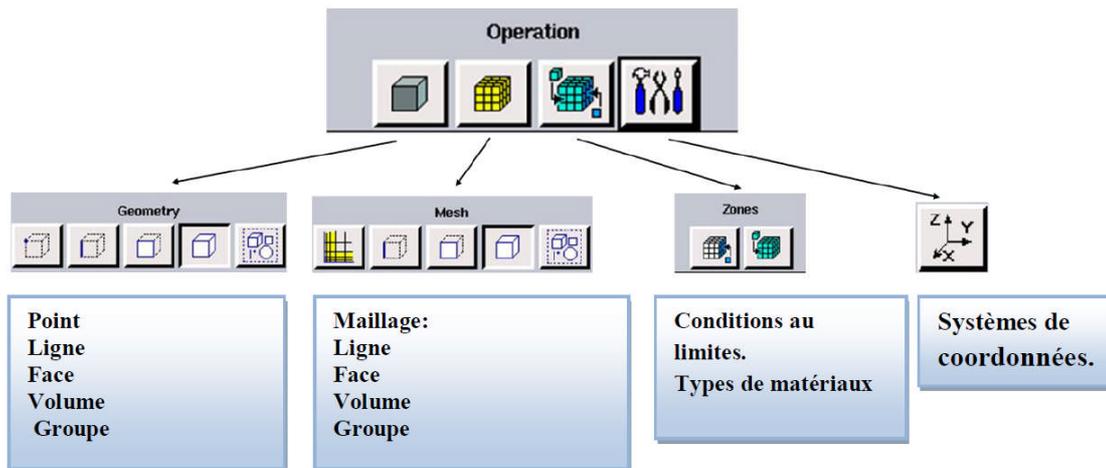
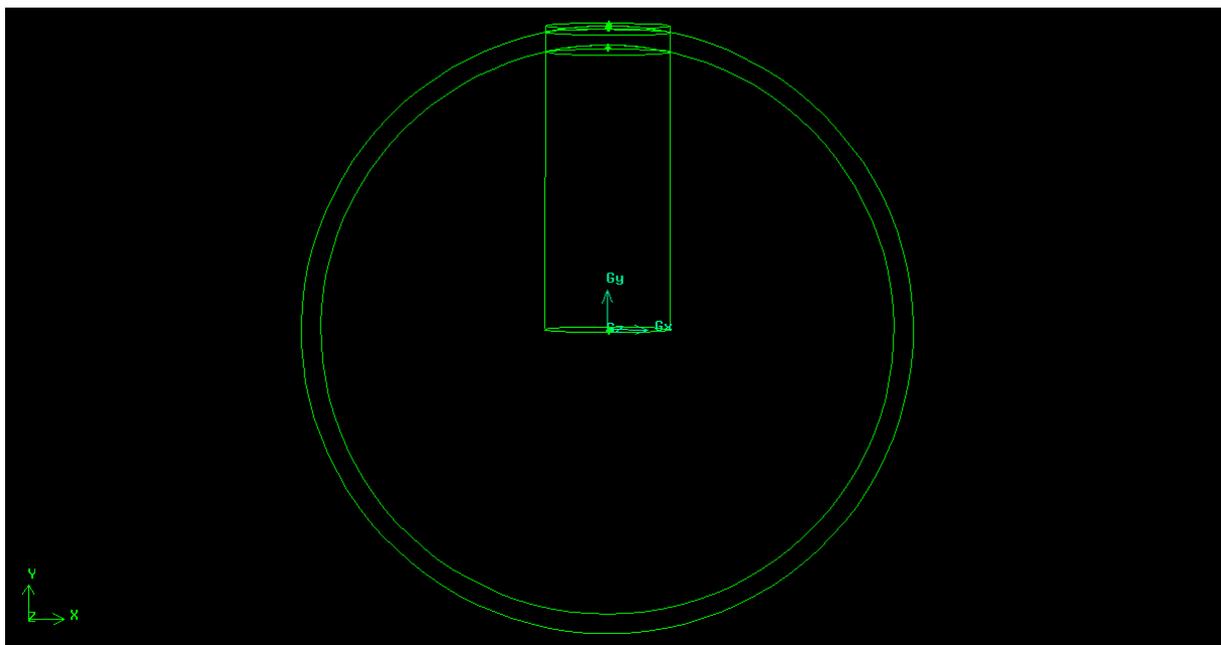


Figure III.3 Menu principal de Gambit

### III.2.2.3 Présentation de la géométrie étudiée

Cette géométrie correspond à deux sphères et un cylindre 3D de dimensions on donne  $R_{s1}=23m$ ,  $R_{s2}=24.566m$ , hauteur d'un cylindre  $H=24.566m$ ,  $R_C = 5m$



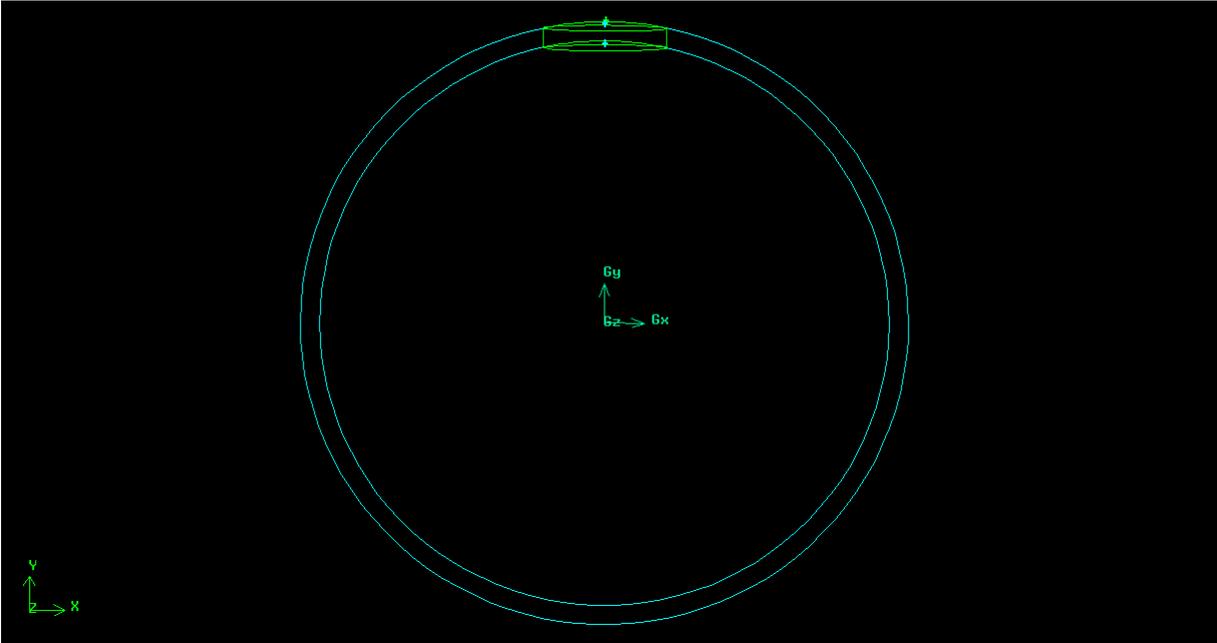


Figure III.4 La géométrie de l'ensemble (deux sphères, cylindre) sous gambit.

III.2.2.4 Réalisation du maillage

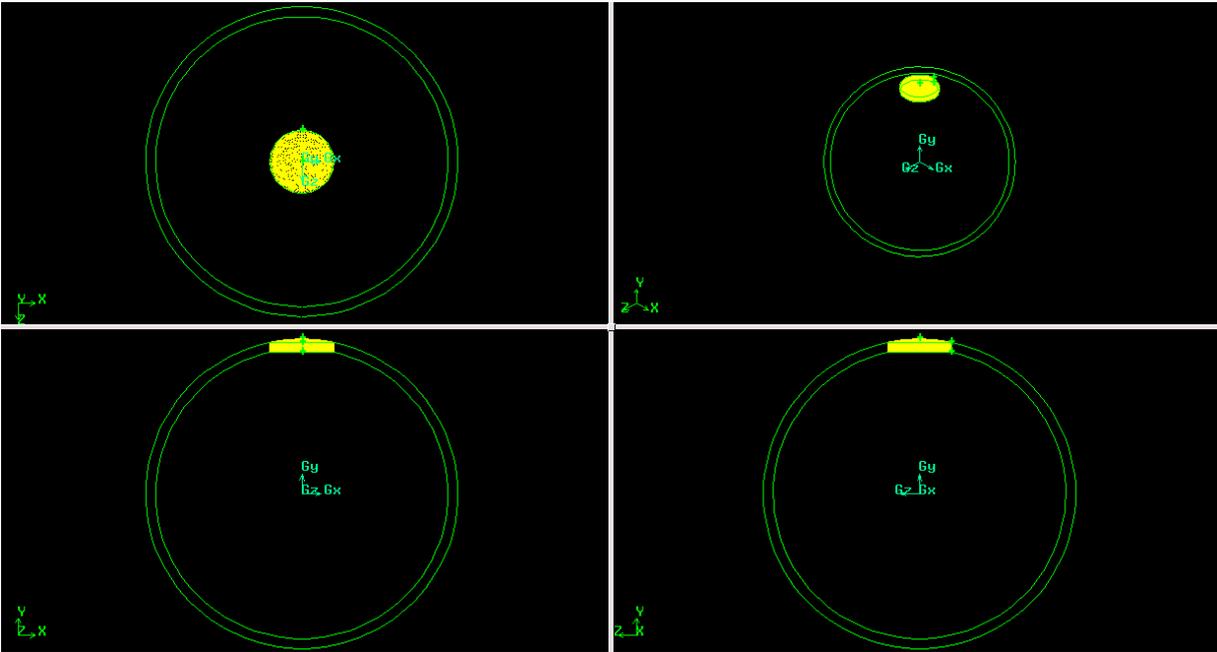
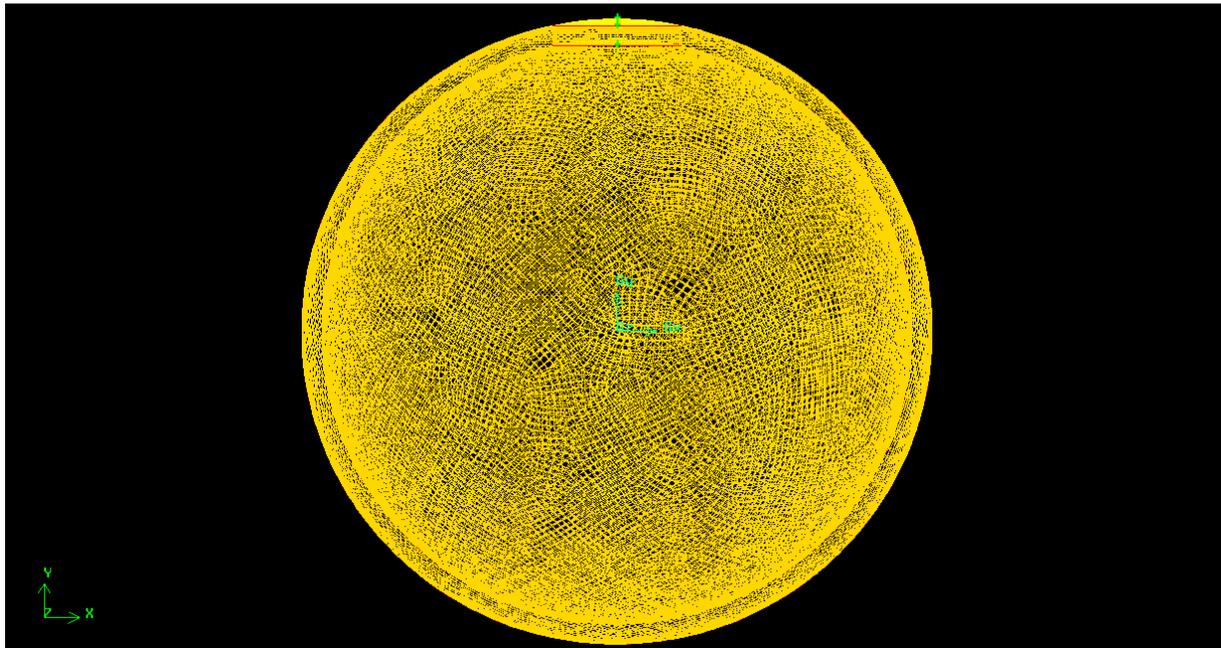


Figure III.5 Maillage de la géométrie d'un cylindre



**Figure III.6** Maillage de la géométrie de l'ensemble (deux sphères, cylindre) sur Gambit

<b>Domaine</b>	<b>Mailles</b>
<b>Largeur</b>	<b>62</b>
<b>Hauteur</b>	<b>12</b>
<b>Disque Bas</b>	<b>320</b>
<b>Disque Haut</b>	<b>320</b>

**Tableau III.1** Le nombre de mailles utilisé dans le cylindre

**III.2.2.5 Conditions aux limites**

<b>Zones</b>	<b>Types</b>
<b>Sphère creuse</b>	<b>Wall</b>
<b>Extérieure creuse</b>	<b>Pressur_outlet</b>
<b>Intérieure</b>	<b>Interior</b>
<b>Disque bas</b>	<b>Wall</b>
<b>Disque extérieure</b>	<b>Pressur_outlet</b>

**Tableau III.2** les conditions aux limites utilisées dans l'ensemble (deux sphère, cylindre)

**III.3 Simulation sous Fluent**

La simulation en Mécanique des Fluides Numérique (Computational Fluid Dynamics : CFD), est utilisée pour la modélisation, la visualisation et l'analyse des écoulements fluides et transferts thermiques. Elle permet aux utilisateurs d'optimiser les performances des nouveaux concepts, tout en réduisant le cycle de commercialisation, les risques associés et les coûts.

Depuis plus de 10 ans, Fluent, leader mondial en Simulation numérique des écoulements Fluides logiciels et services. S'emploie à offrir la solution de simulation la plus adaptée, que ce soit pour l'ensemble de l'industrie, la recherche ou la formation des ingénieurs de demain. Cette solution passe par des services d'assistance technique, d'études à façon, et par des formations personnalisées.

### III.3.1 Notice d'utilisation de fluent

Fluent est un code CFD commercial très utilisé dans l'industrie. Il permet de résoudre les écoulements fluides (champs de vitesses, de température...), c'est la raison pour laquelle on la choisi pour réaliser notre simulation. Pour calculer on passe par les étapes suivantes :

1. Démarrer la version Fluent 3ddp
2. Importer de maillage File→Read→case
3. Choisir le modèle multiphasique de Volume de fluide **define→models→multiphase →vof**

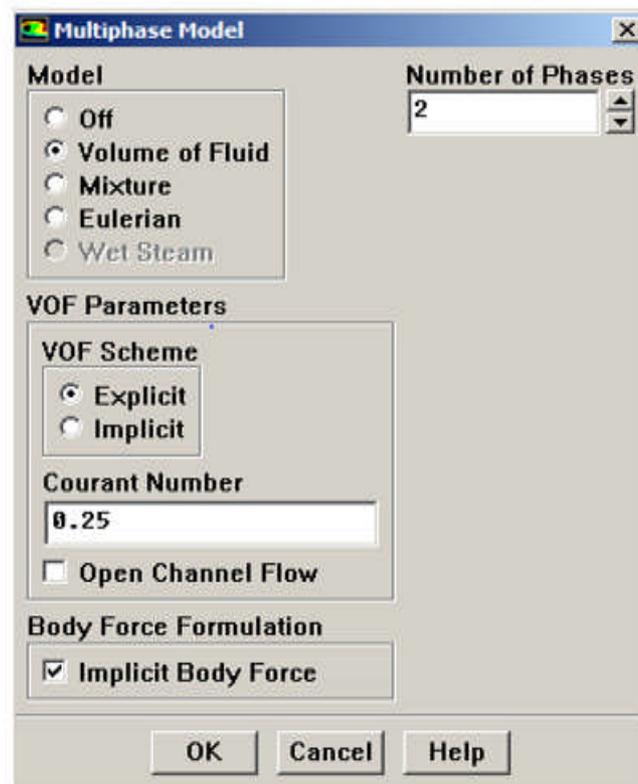


Figure III.7 Choix du model VOF sous Fluent

### III.3.2 Définir les caractéristiques des fluides utilisés Materials→fluid→Creat

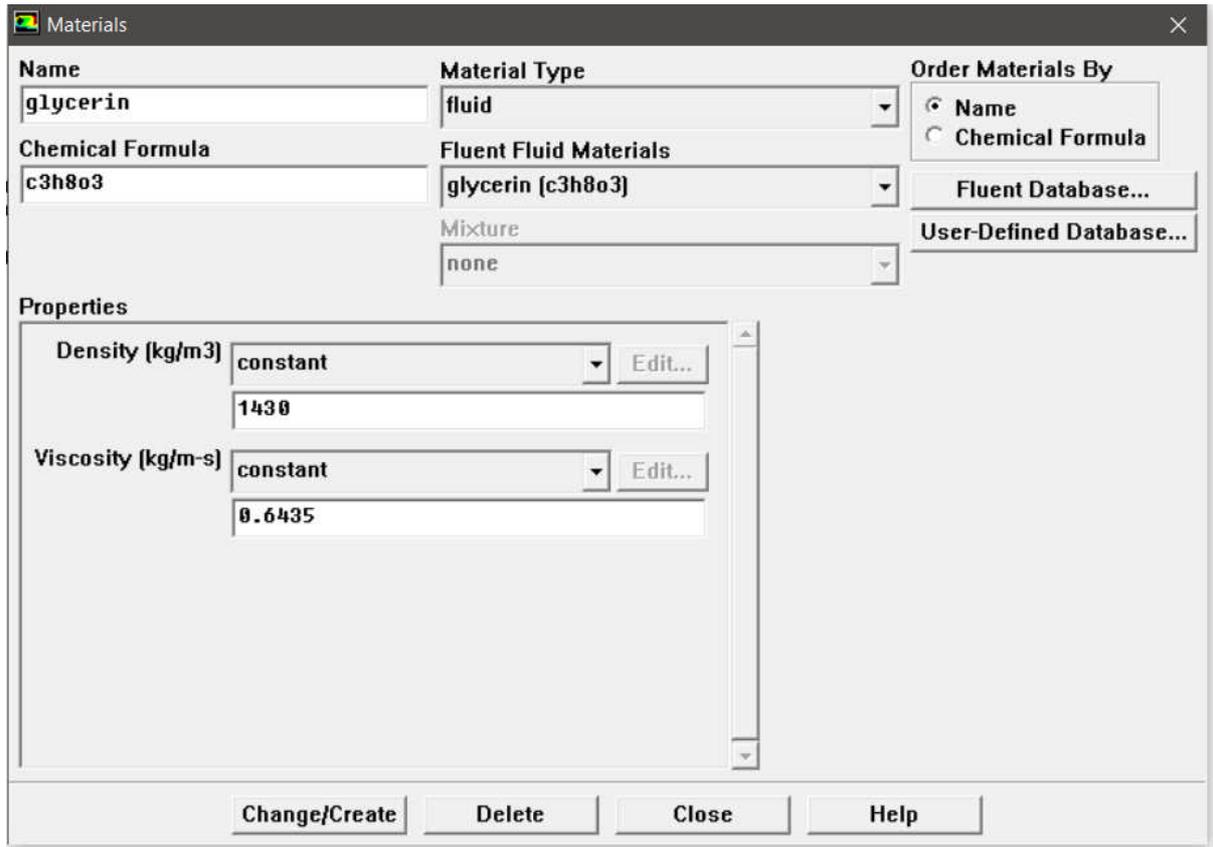


Figure III.8 Spécification des matériaux sous Fluent

### III.3.3 Spécification des phases define→phases

Phase 1 =air

Phase 2 = glycerin

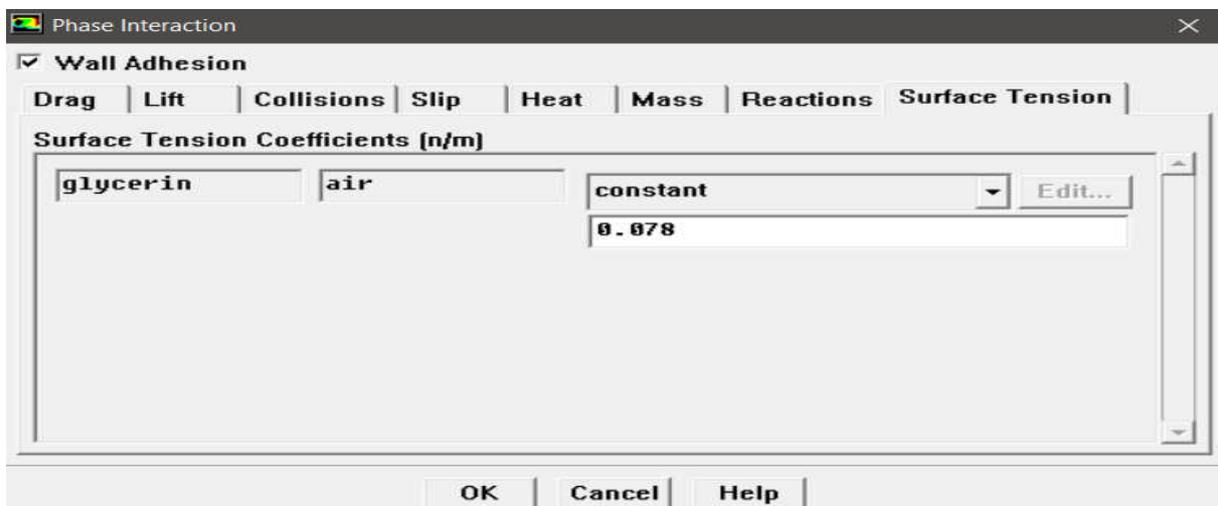


Figure III.9 Choix spécifique des phases

### III.3.4 Condition d'opération define → operation conditions

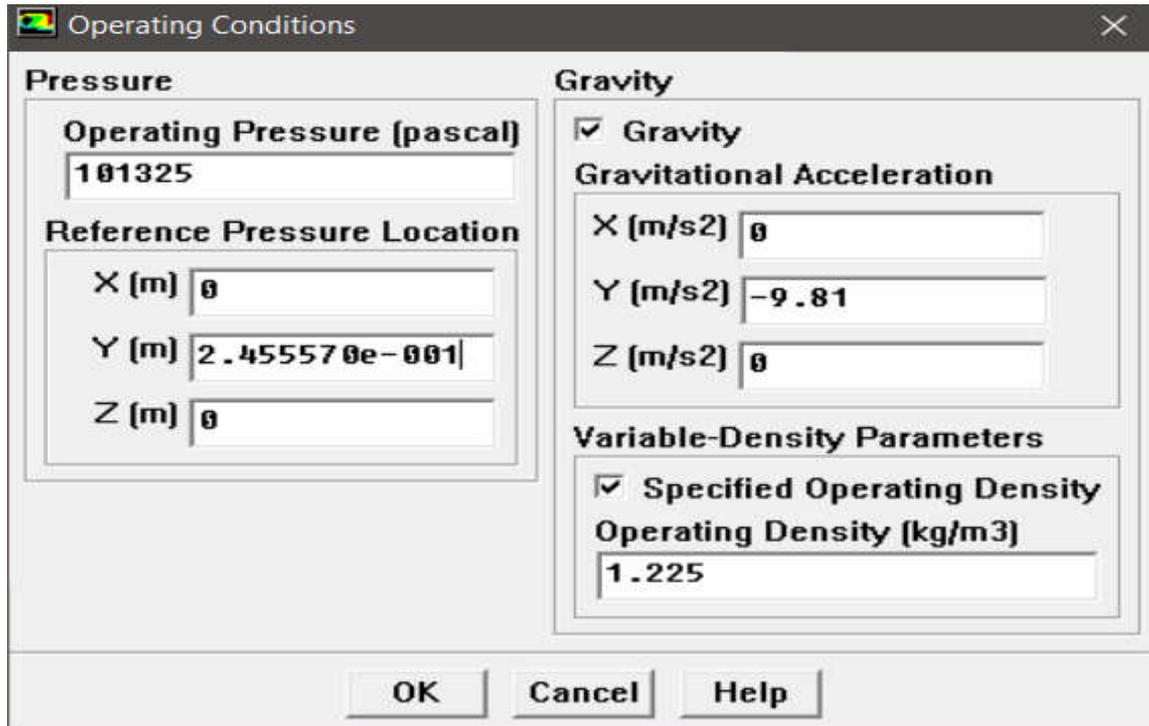


Figure III.10 Choix de la pression de référence

### III.3.5 Définir les conditions aux limites : define → boundary conditions

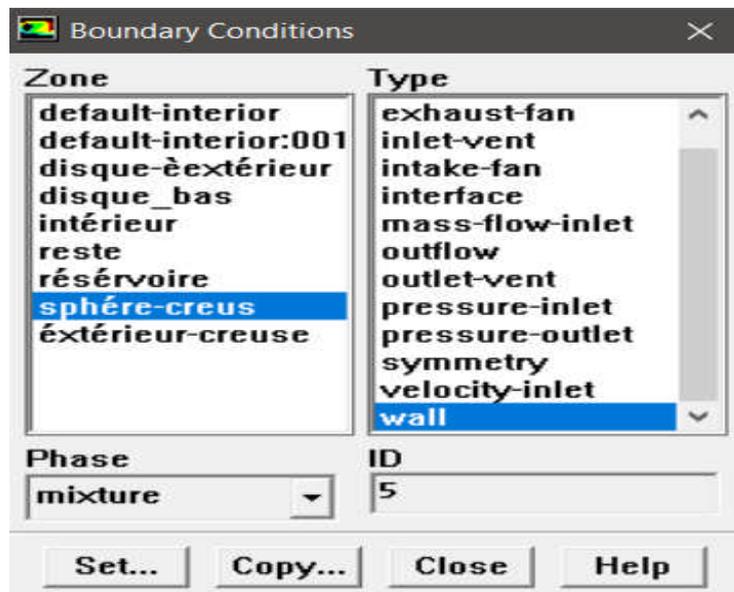


Figure III.11 Condition aux limites

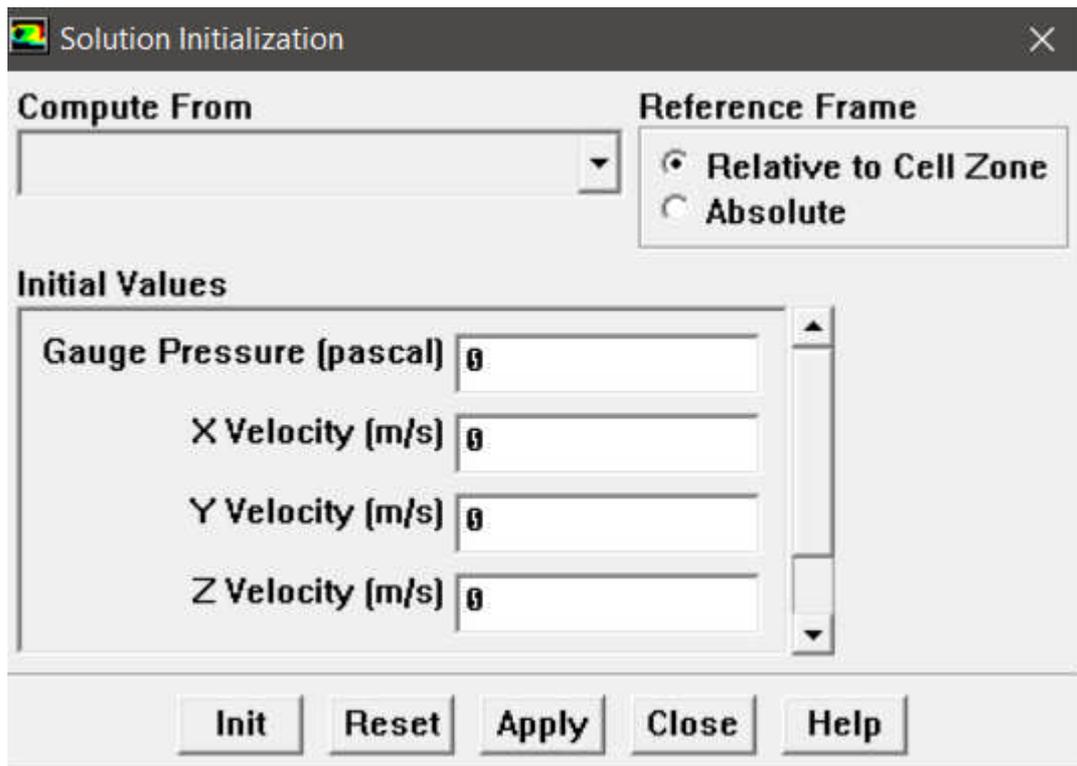
**III.3.6 Initialiser la solution** Solve→initialize

Figure III.12 Initialiser

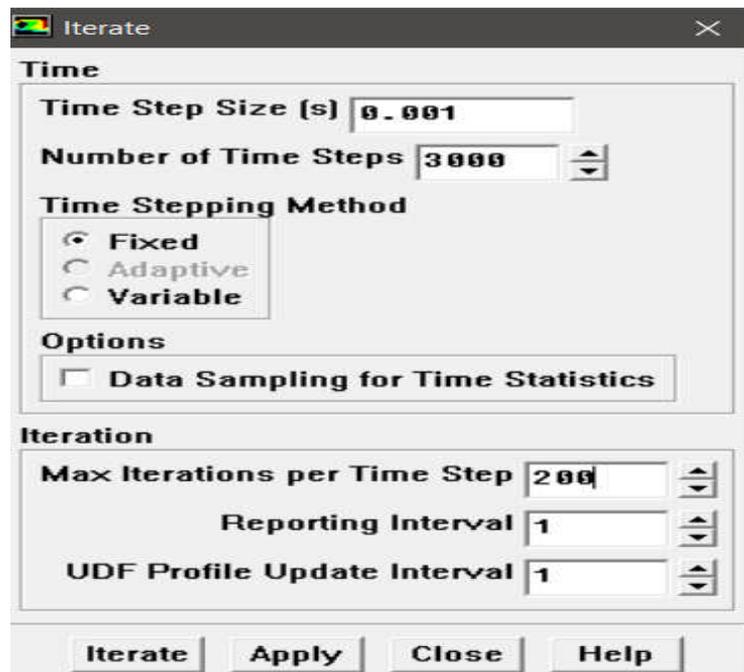
**III.3.7 lancement des itérations** solve→iterate

Figure III.13 Itérations sous fluent

### III.4 Remarque importante

Les résidus sont calculés à partir des corrections dans les variables ; pression, vitesse, température... du problème entre la présente itération et l'itération précédente.

Dans la plupart des cas, le critère de convergence par défaut dans FLUENT (résiduel) est suffisant. La solution converge quand les résidus atteignent  $10^{-3}$ .

# **Chapitre IV**

## **Résultats et discussions**

# Résultats et discussions

## IV. 1. Introduction

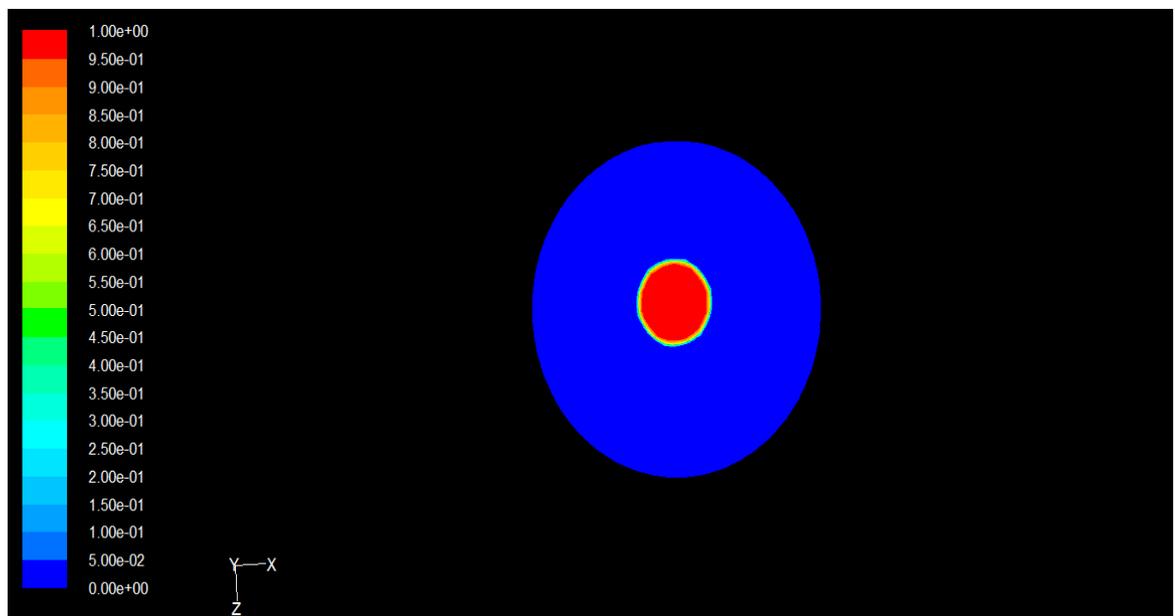
Dans ce chapitre on va présenter les différents résultats obtenus après différentes simulations réalisées sur Fluent

## IV.2. Résultats

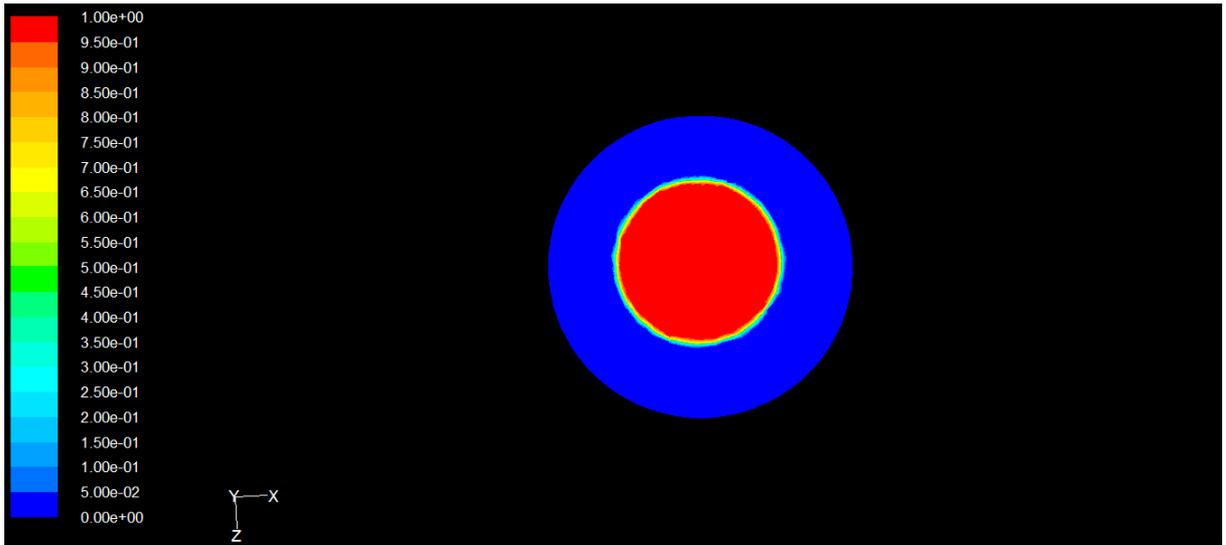
On a réalisé de différents essais en fixant la masse volumique ( $\rho = 1430 \text{ kg/m}^3$ ), la tension superficielle ( $\gamma = 0.078 \text{ N/m}$ ), et en variant la viscosité et l'angle de contact  $\theta_w$ .

### Effet de l'angle de contact

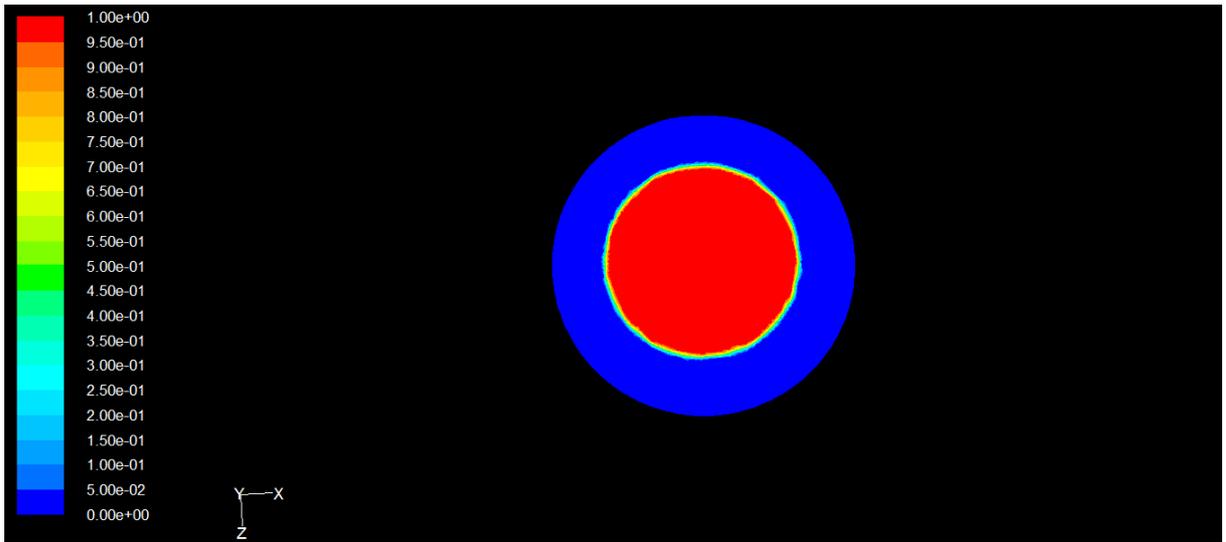
- Angle de contact  $\theta_w = 70^\circ$   $\mu = 0.6435 \text{ kg/m.s}$



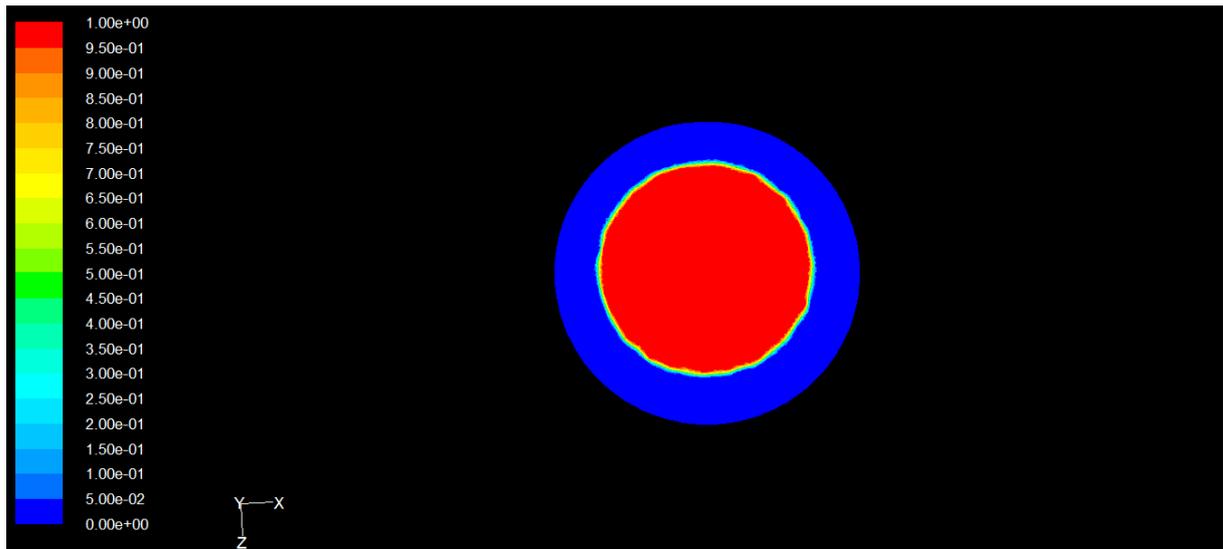
$t = 0\text{s}$



$t = 1s$



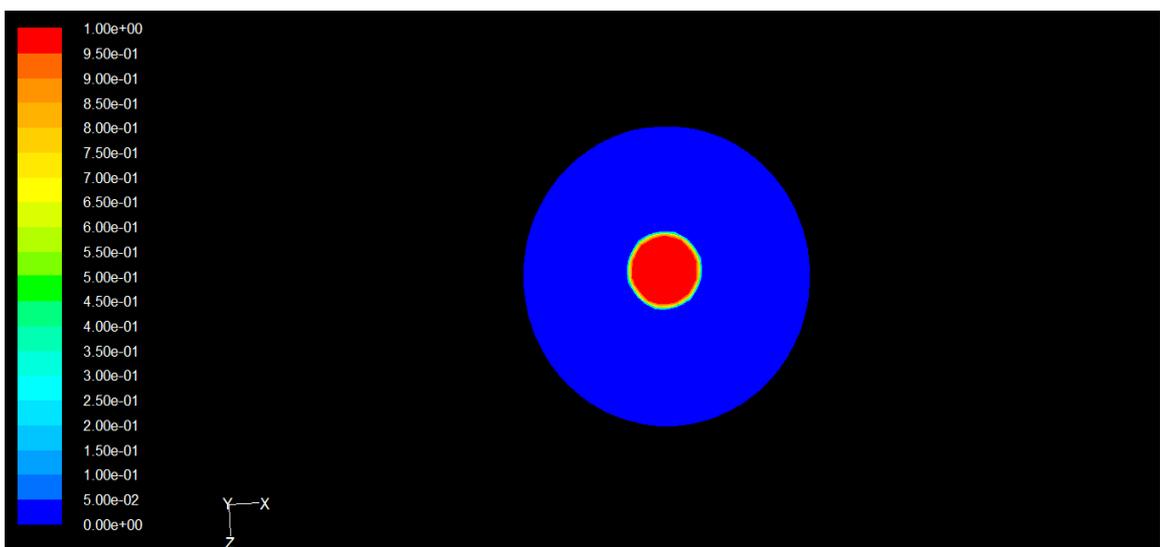
$t = 2s$



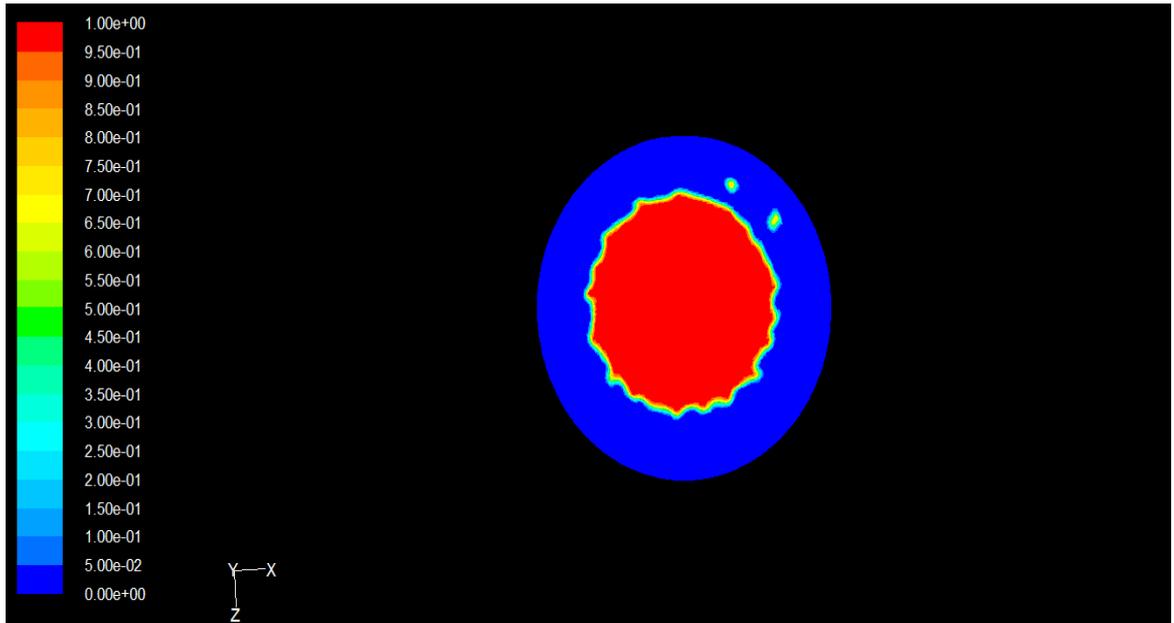
t = 3s

**Figure.IV.1** Effet de l'angle de contact : Evolution du film mince sur la sphère à différents temps (t=0s, 1s,2s et 3s) pour  $\theta_w = 70^\circ$  et  $\mu = 0.6435 \text{ kg/m.s}$

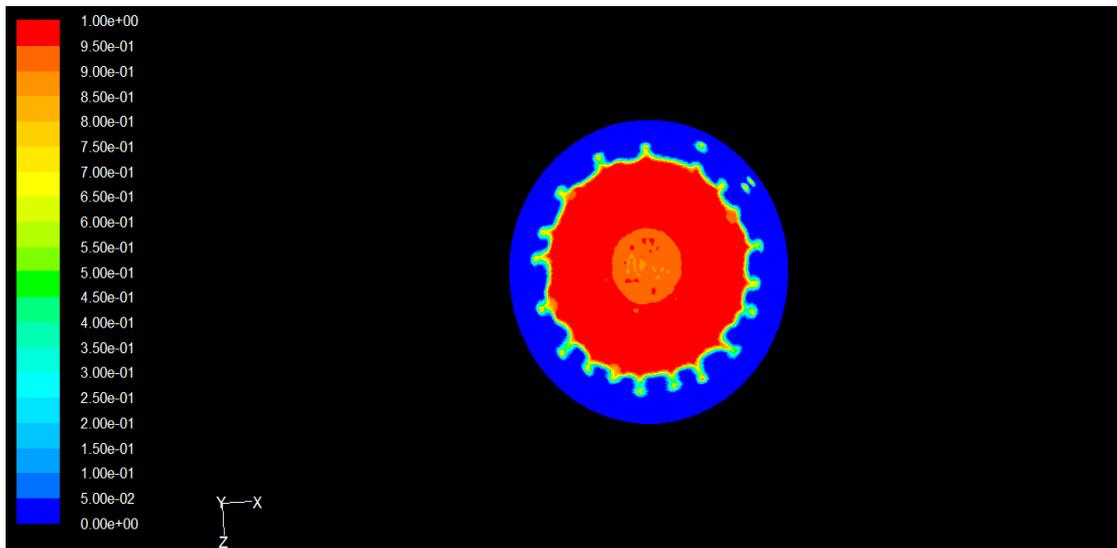
➤ Angle de contact  $\theta_w = 110^\circ$   $\mu = 0.6435 \text{ kg/m.s}$



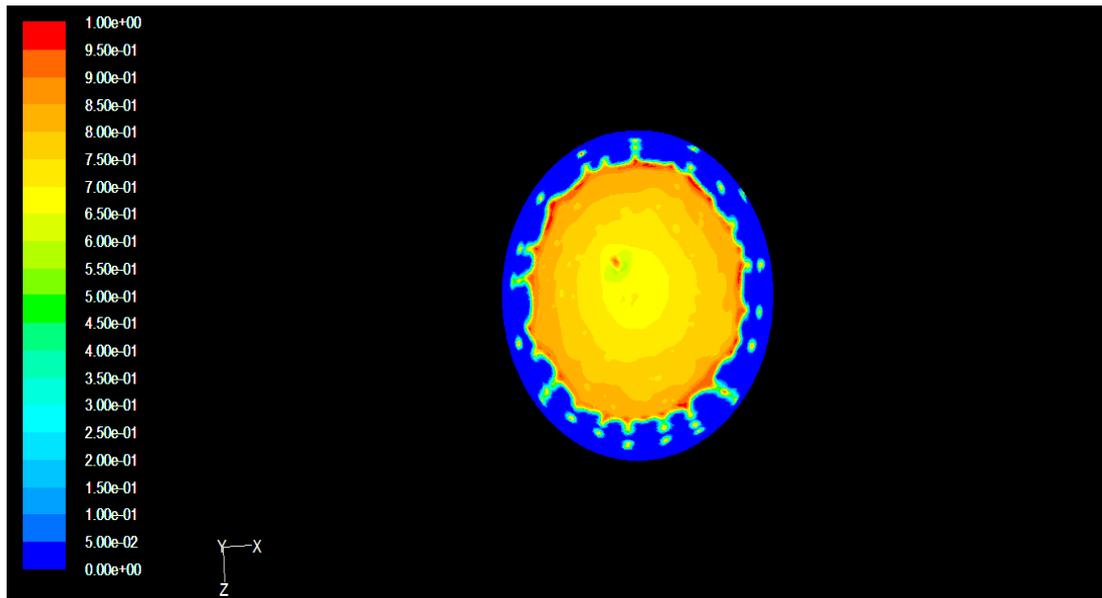
t = 0s



$t = 2s$



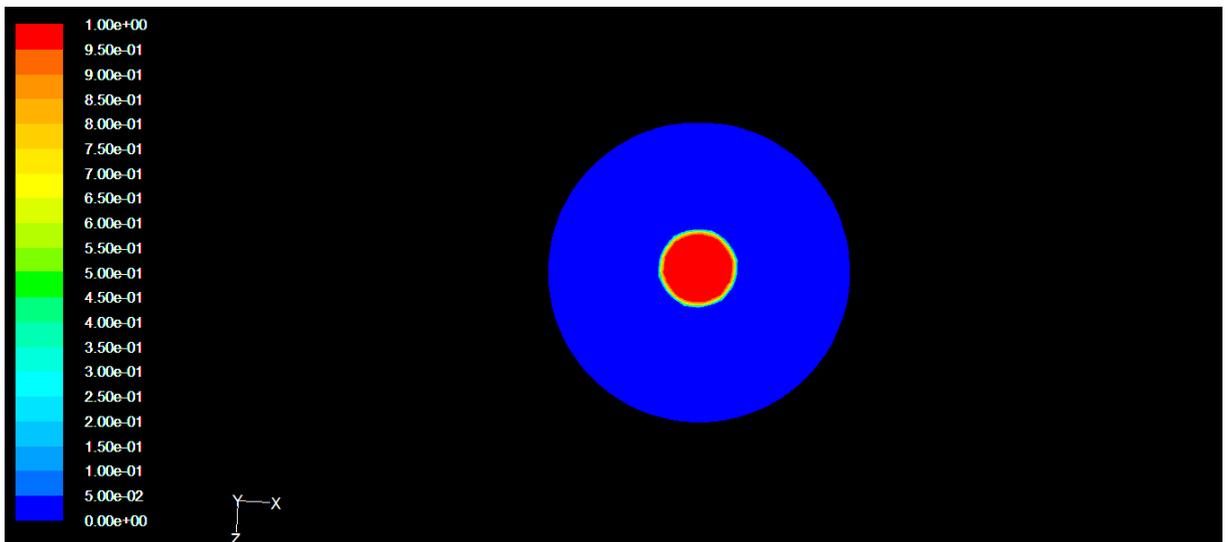
$t = 4s$



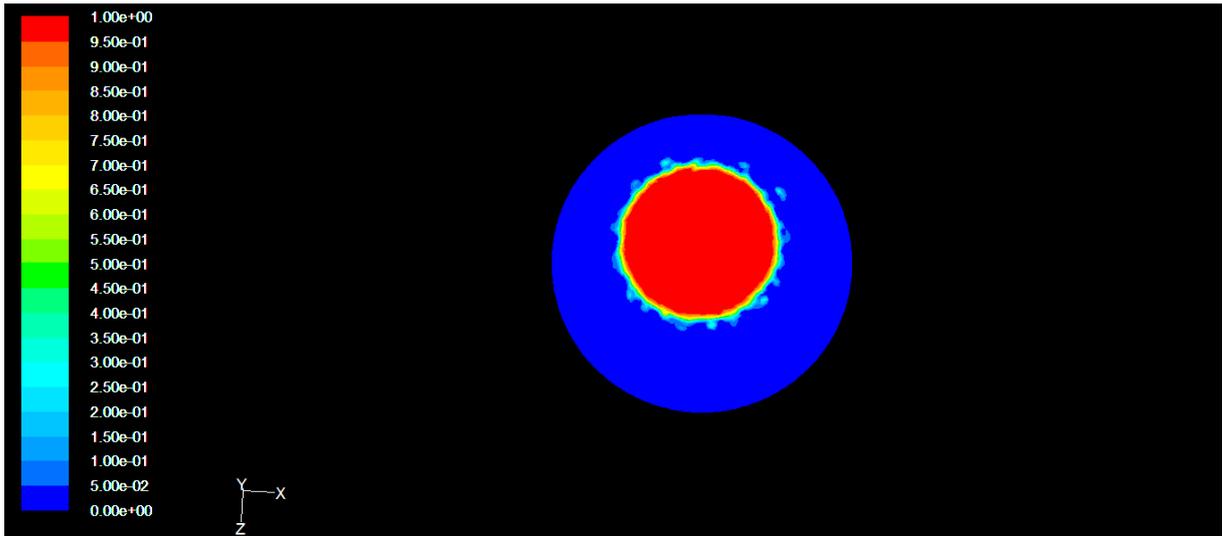
t = 6s

**Figure.IV.2** Effet de l'angle de contact : Evolution du film mince sur la sphère à différents temps (t=0s, 2s,4s et 6s), pour  $\theta_w = 110^\circ$  et  $\mu = 0.6435 \text{ kg/m.s}$

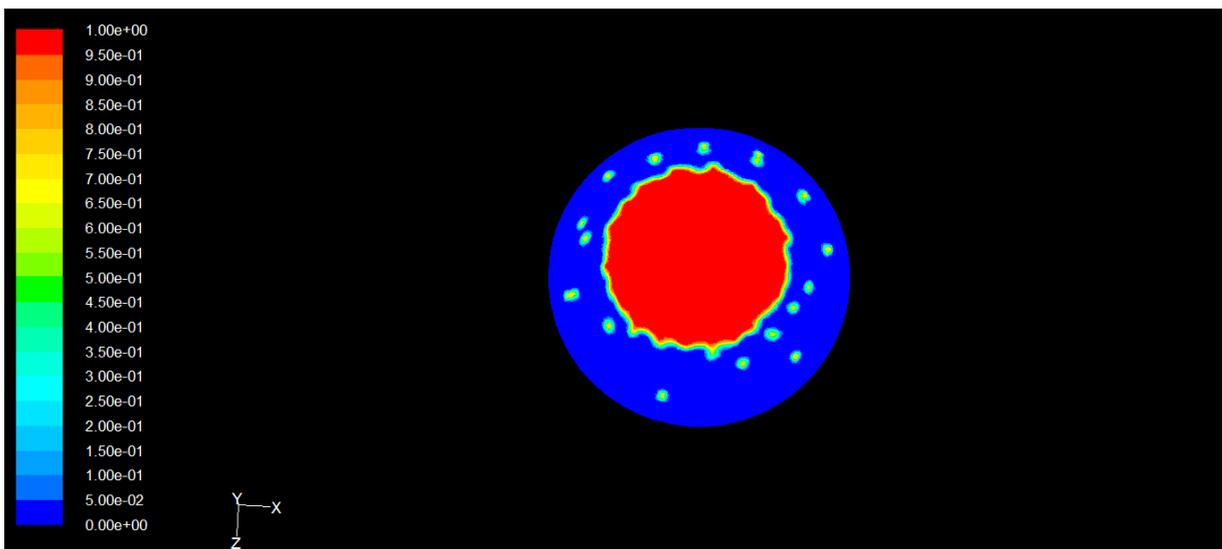
➤ Angle de contact  $\theta_w = 130^\circ$   $\mu = 0.6435 \text{ kg/m.s}$



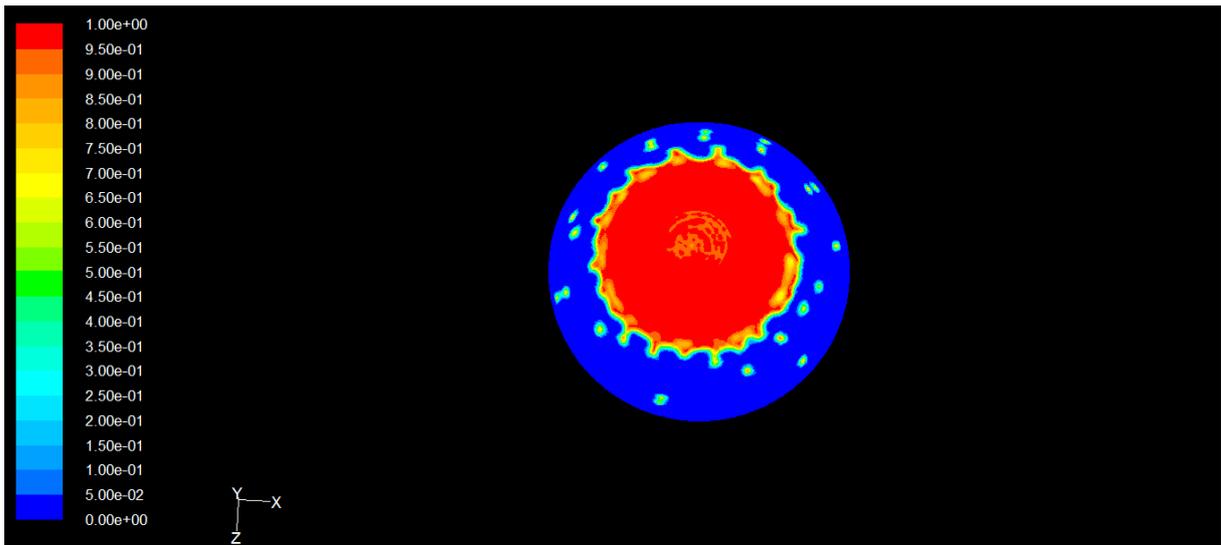
t = 0s



$t = 1s$



$t = 2s$

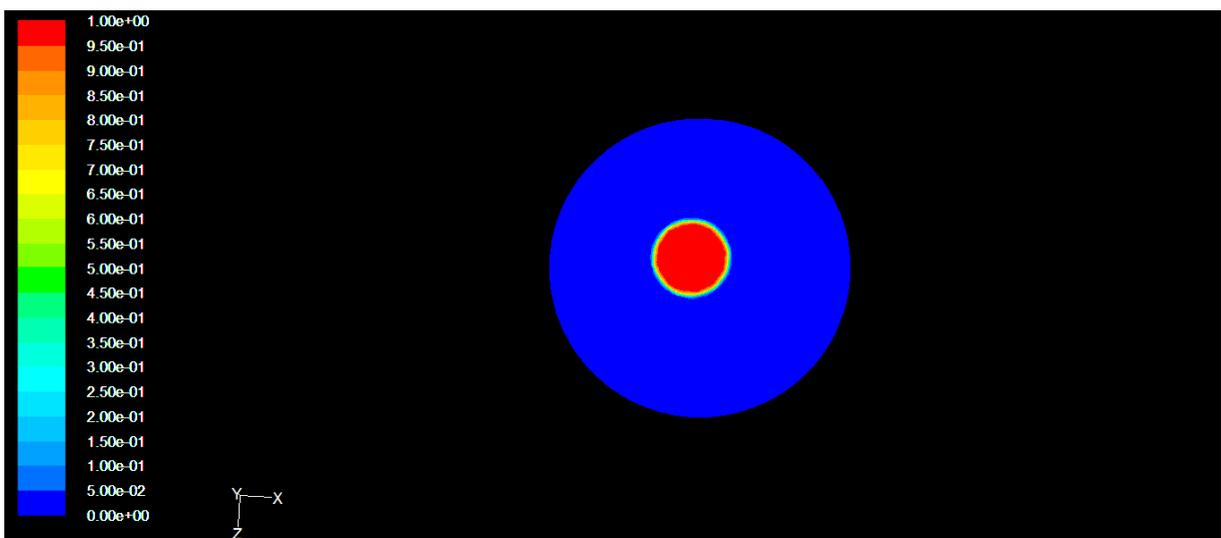


t = 3s

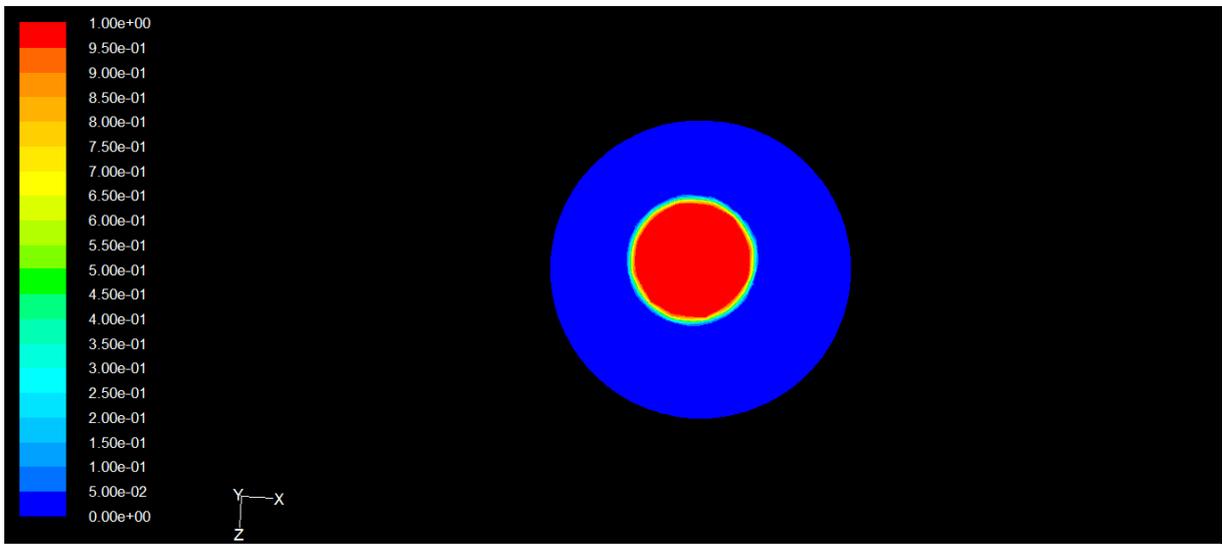
**Figure.IV.3** Effet de l'angle de contact : Evolution du film mince sur la sphère à différents temps (t=0s, 2s et 3s), pour  $\theta_w = 13^\circ$  et  $\mu = 0.6435 \text{ kg/m.s}$

**Effet de la viscosité dynamique**

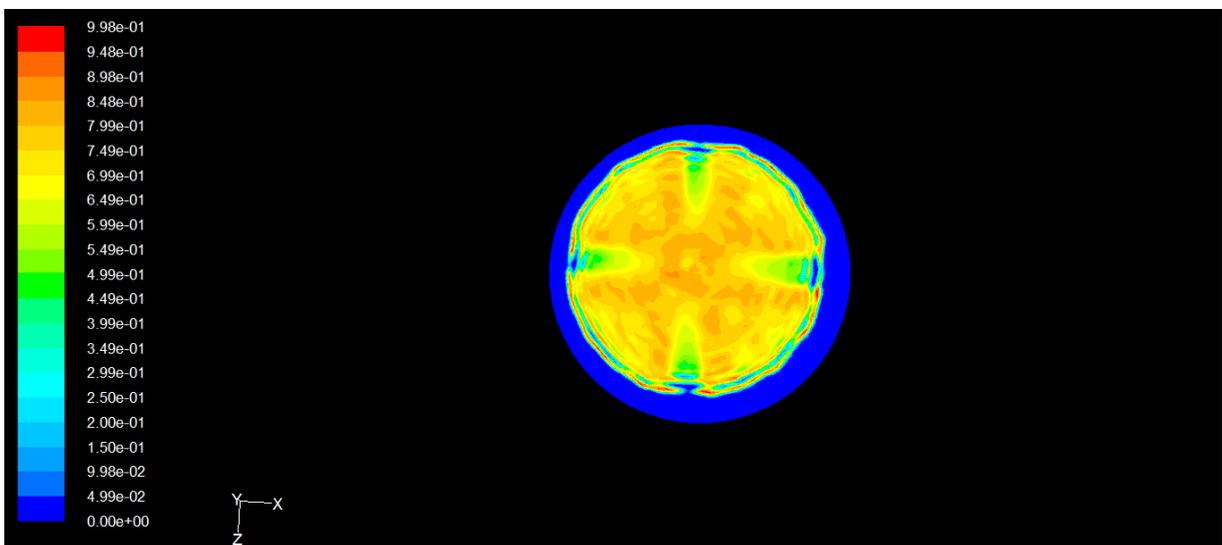
➤ Angle de contact  $\theta_w = 90^\circ$   $\mu = 0.01 \text{ kg/m.s}$



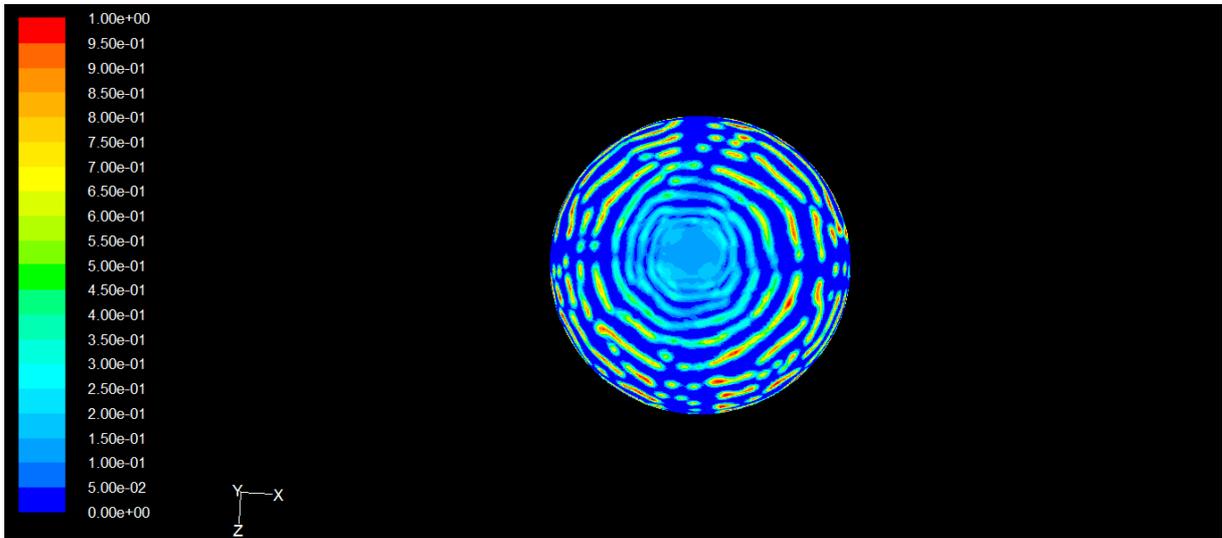
t = 0s



$t = 0.1s$



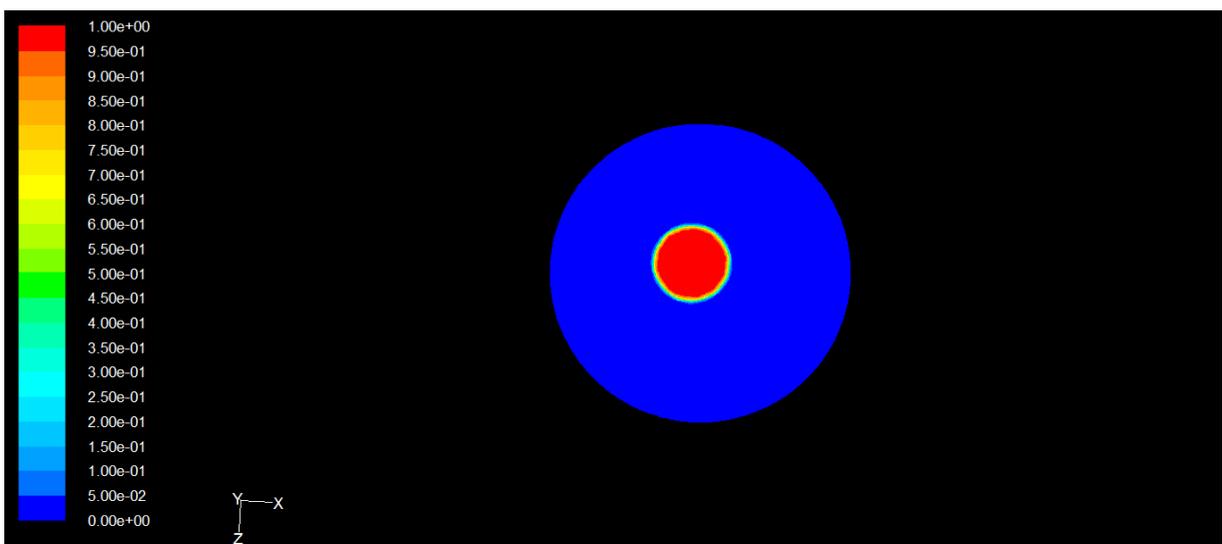
$t = 0.2s$



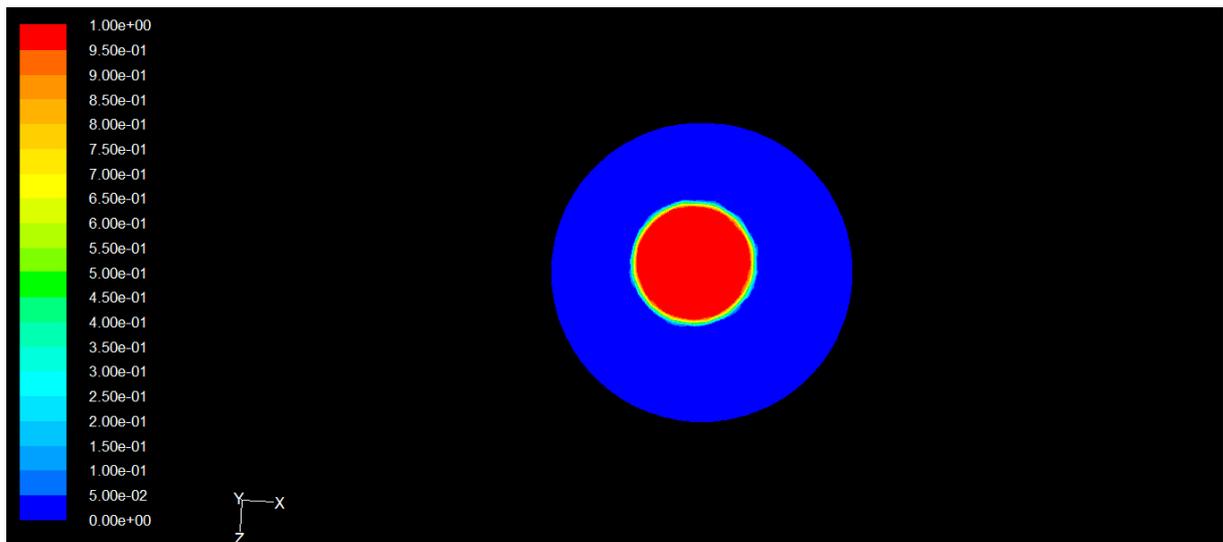
$t = 0.3s$

**Figure.IV.4** Effet de la viscosité dynamique : Evolution du film mince sur la sphère à différents temps ( $t=0s, 0.1s, 0.2s$  et  $0.3s$ ), pour  $\theta_w = 90^\circ$  et  $\mu = 0.01 \text{ kg/m.s}$

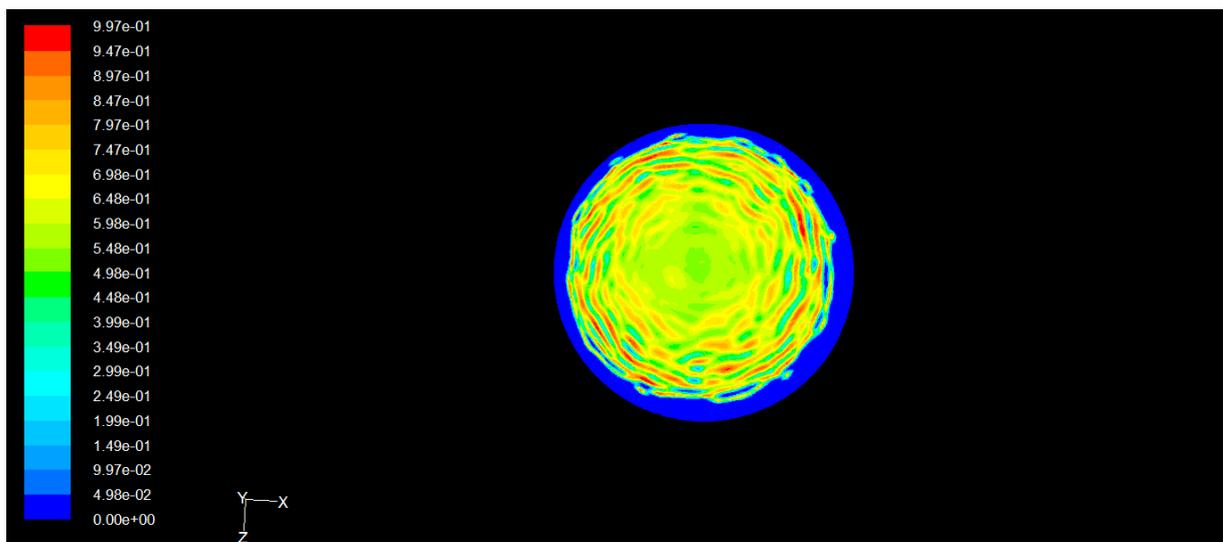
➤ Angle de contact  $\theta = 90^\circ$   $\mu = 0.02 \text{ kg/m.s}$



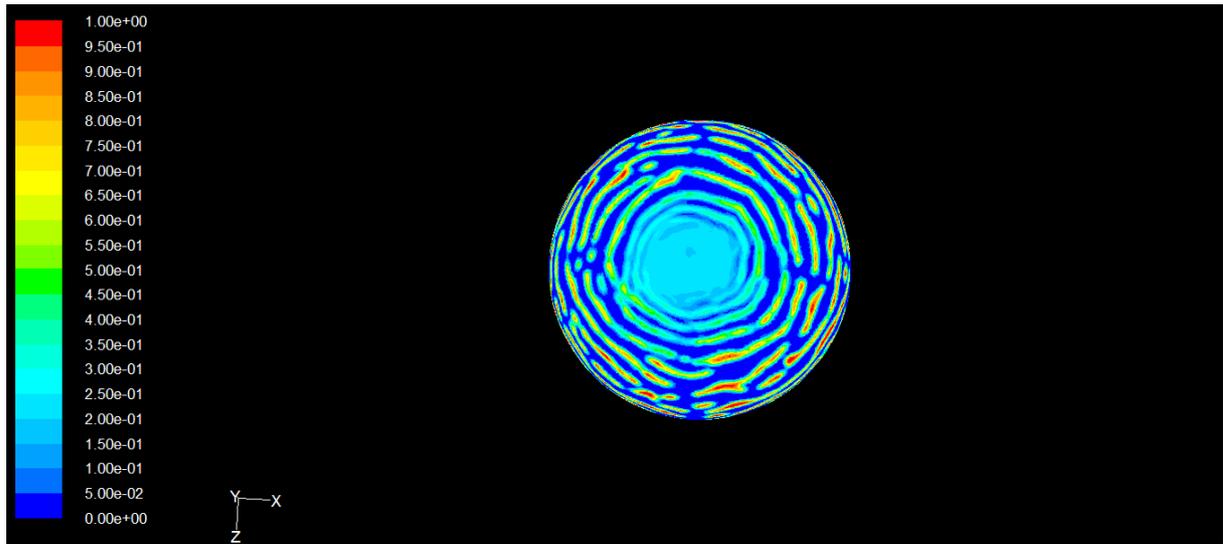
$t = 0s$



$t = 0.1s$



$t = 0.4s$



$t = 0.6s$

**Figure.IV.5** Effet de la viscosité dynamique : Evolution du film mince sur la sphère à différents temps ( $t=0s, 0.1s, 0.4s$  et  $0.6s$ ), pour  $\theta_w = 90^\circ$  et  $\mu = 0.02 \text{ kg/m. s}$

### IV.3. Commentaires

#### Variation de l'angle de contact

- Angle de contact  $\theta_w = 70^\circ$   $\mu=0.6435$  kg/m.s

À  $t = 0s$  le fluide est libéré, 1s après la structure de l'écoulement prend une forme de plan circulaire, 2s après la libération, l'écoulement reste sensiblement axisymétrique, la structure de l'écoulement ne change pas même après 3s.

- Angle de contact  $\theta_w = 110^\circ$   $\mu=0.6435$  kg/m.s

À  $t = 0s$  le fluide est libéré, 2s après sa libération, des modèles vagues commencent à se développer au bord d'attaque du fluide, 4s après sa libération l'amplitude de l'instabilité au front d'écoulement se développe et développe une série de doigts, 6s après, le fluide se mélange avec l'air ce qui explique le changement de la couleur, les doigts se détachent en créant des goulettes au sur la surface de la sphère.

- Angle de contact  $\theta_w = 130^\circ$   $\mu=0.6435$  kg/m.s

À  $t = 0s$  le fluide est libéré, 1s après la structure de l'écoulement continue à prendre une forme de plan circulaire, 2s après la libération des modèles vagues commencent à se développer au front de l'écoulement, des gouttelette se détachent et s'écoulent sur la sphère, 3s après des doigts apparaissent et les gouttelettes continuent à s'écouler jusqu'à se détacher carrément de la sphère.

#### Variation de l'angle de la viscosité dynamique

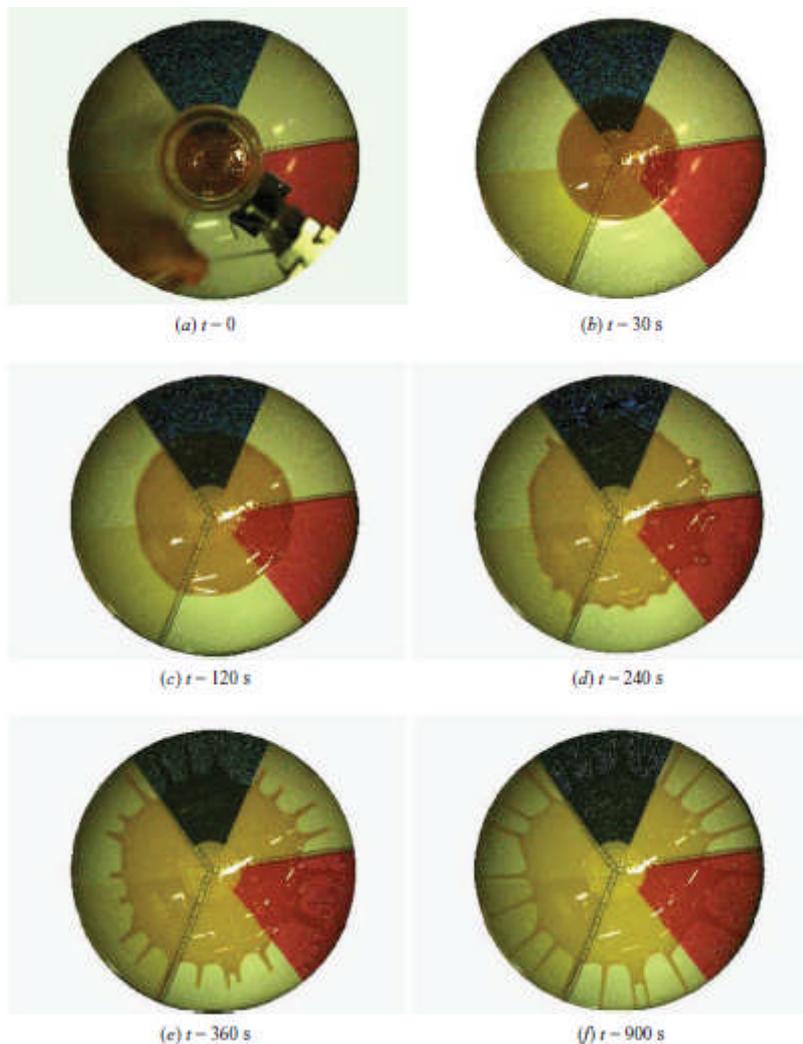
- Angle de contact  $\theta_w = 90^\circ$   $\mu= 0.01$  kg/m.s

À  $t = 0s$  le fluide est libéré, 0.1s après la structure de l'écoulement prend une forme de plan circulaire, 0.3s après la libération du fluide, il commence à se déformer et à se séparer, à 0.5s le fluide est complètement dispersé en créant des cercles au tour de la sphère jusqu'à se détacher de la sphère.

- Angle de contact  $\theta_w = 90^\circ$   $\mu= 0.02$  kg/m.s

À  $t = 0$ s le fluide est libéré, 0.1s après la structure de l'écoulement continue a prendre une forme de plan circulaire, à 0.4s l'écoulement continue a s'écouler au tour de la sphère, 0.6s après l'écoulement est dispersé en créant des cercles au tour de la sphère.

#### IV.4. Résultats expérimentaux (DAISUKE TAKAGI AND HERBERT E. HUPPERT)



**Figure IV.6 :** Séquence de clichés pris au-dessus d'un ballon de rayon  $R = 23$  cm à six temps différents pour un volume de  $123 \text{ cm}^3$  relâché à partir de son sommet.

## IV.5 Commentaire sur la partie expérimentale

(a) Le fluide est libéré en soulevant rapidement une porte cylindrique. (b) 30 s plus tard, la structure de l'écoulement continue à prendre une forme de plan circulaire. (c) 120 s après la libération, le débit reste sensiblement axisymétrique. (d) 240 s après la libération, des modèles vagues commencent à se développer au bord d'attaque du fluide. (e) 360 s après la libération, l'amplitude de l'instabilité au front d'écoulement se développe et développe une série de ruisseaux. (f) 900 s après la libération, les ruisseaux continuent de couler le long de la surface du ballon, se détachant finalement du dessous (pas montré). Les paramètres expérimentaux sont la viscosité cinématique  $\nu = 4,5 \times 10^2 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  et tension superficielle  $\gamma = 78 \text{ mN m}^{-1}$  (Llewellyn, Mader & Wilson 2002).

## IV.6. comparaison entre les résultats expérimentaux et les résultats de simulation par fluent

Les résultats obtenus par simulation, par Fluent, ne correspondent pas tout à fait avec les résultats expérimentaux, puisque dans l'étude expérimentale la valeur de l'angle de contact n'est pas précisée, qui est un élément essentiel dans l'apparition des doigts. Ce qui nous a conduit à faire différents essais en variant l'angle de contact, inconnu du problème, afin de cerner sa valeur et approcher au mieux les résultats expérimentaux. Dans les simulations qu'on a mené on a remarqué que les résultats les plus proches dans la forme à ceux de l'expérience correspondent à un angle de contact de  $\theta_w = 110^\circ$ .

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Nous avons analysé la stabilité de la surface libre d'un film fluide visqueux s'écoulant par gravité 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 fluide (V O F). On a fixé les deux paramètres : la masse volumique et la tension superficielle et on a fait varier l'angle de contact et la viscosité du fluide pour suivre l'étalement du film sur la surface de la sphère à différents temps.

On peut tirer les conclusions suivantes :

- la viscosité est un paramètre qui définit la vitesse de la dissipation du fluide, quand la viscosité augmente la vitesse de la dissipation diminue.
- La viscosité n'affecte pas l'apparition des doigts.
- L'angle de contact joue un rôle majeur dans la dissipation du fluide sur un substrat. La variation de l'angle de contact peut varier la forme de l'écoulement et sa vitesse.
- L'angle de contact joue un rôle primordial dans l'apparition des doigts et la stabilité de l'écoulement. Dans notre cas on a distingué, après les différents essais, qu'il se trouve dans l'intervalle  $[100^\circ ; 115^\circ]$ .

# **Références**

## **Bibliographiques**

## Références Bibliographiques

- (1) Y. Lee, G. Jeon, H. Bae, H. Yang, *Thin Solid Films*, 414, 420-421 (2002).
- (2) M. Nordine, M. Larosson, S. Hogmark, *Surface and Coatings Technology*, 106, 234- (1998).
- (3) Hierso, J.; Sel, O.; Ringuede, A.; Laberty-Robert, C.; Bianchi, L.; Grosso, D.; Sanchez, C., Design, Synthesis, Structural and Textural Characterization, and Electrical Properties of Mesoporous Thin Films Made of Rare Earth Oxide Binaries. *Chem. Mat.* **2009**, 21, (11), 2184-2192.
- (4) Brinker, C. J.; Hurd, A. J.; Frye, G. C.; Ward, K. J.; Ashley, C. S., SOL-GEL THIN-FILM FORMATION. *J. Non-Cryst. Solids* **1990**, 121, (1-3), 294-302.
- (5) Atkinson, A.; Guppy, R. M., MECHANICAL STABILITY OF SOL-GEL FILMS. *J. Mater. Sci.* **1991**, 26, (14), 3869-3873.
- (6) Chen, C. C.; Nasrallah, M. M.; Anderson, H. U., SYNTHESIS AND CHARACTERIZATION OF (CeO<sub>2</sub>)<sub>0.8</sub>(SmO<sub>1.5</sub>)<sub>0.2</sub> THIN-FILMS FROM POLYMERIC PRECURSORS. *J. Electrochem. Soc.* **1993**, 140, (12), 3555-3560.
- (7) Terribile, D.; Trovarelli, A.; Llorca, J.; de Leitenburg, C.; Dolcetti, G., The preparation of high surface area CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> mixed oxides by a surfactant-assisted approach. *Catal. Today* **1998**, 43, (1-2), 79-88.
- (8) Terribile, D.; Trovarelli, A.; Llorca, J.; de Leitenburg, C.; Dolcetti, G., The synthesis and characterization of mesoporous high-surface area ceria prepared using a hybrid organic/inorganic route. *J. Catal.* **1998**, 178, (1), 299-308.
- (9) Brezesinski, T.; Antonietti, M.; Groenewolt, M.; Pinna, N.; Smarsly, B., The generation of mesostructured crystalline CeO<sub>2</sub>, ZrO<sub>2</sub> and CeO<sub>2</sub>-ZrO<sub>2</sub> films using evaporation-induced self-assembly. *New J. Chem.* **2005**, 29, (1), 237-242.
- (10) Brezesinski, T.; Fattakhova-Rohlfing, D.; Sallard, S.; Antonietti, M.; Smarsly, B. M., Highly crystalline WO<sub>3</sub> thin films with ordered 3D mesoporosity and improved electrochromic performance. *Small* **2006**, 2, (10), 1203-1211.
- (11) Brezesinski, T.; Fischer, A.; Iimura, K.; Sanchez, C.; Grosso, D.; Antonietti, M.; Smarsly, B. M., Generation of self-assembled 3D mesostructured SnO<sub>2</sub> thin films with highly crystalline frameworks. *Adv. Funct. Mater.* **2006**, 16, (11), 1433-1440.

(12). Stefanov, P.; Atanasova, G.; Stoychev, D.; Marinova, T., Electrochemical deposition of CeO<sub>2</sub> on ZrO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thin films formed on stainless steel. *Surf. Coat. Technol.* **2004**, 180, 446-449.

Acheson, D. J. 1990 *Elementary Fluid Dynamics*. Oxford University Press.

Goodwin, R. & Homsy, G. M. 1991 Viscous flow down a slope in the vicinity of a contact line. *Phys. Fluids A: Fluid Dyn.* **3**, 515.

Huppert, H. E. 1982 Flow and instability of a viscous current down a slope. *Nature* **300** (5891), 427–429.

Melo, F., Joanny, J. F. & Fauve, S. 1989 Fingering instability of spinning drops. *Phys. Rev. Lett.* **63** (18), 1958.

Troian, S. M., Herbolzheimer, E., Safran, S. & Joanny, J. F. 1989 Fingering instabilities of driven spreading films. *Europhys. Lett.* **10**, 25–30.

## Résumé

Ce travail est consacré à l'étude d'un écoulement de film mince, à surface libre, sur la surface d'une sphère par force de gravité. Elle s'agit d'une simulation numérique menée sous le logiciel Fluent. Le suivi de la surface libre du film mince se fait par la méthode VOF (volume of fluid). La masse volumique du fluide et la tension superficielle ont été fixées et les effets de la viscosité et de l'angle de contact ont été analysés.

**Mots clés :** Angle de contact, dissipation, écoulement, Fluent, surface libre, sphère, tension de surface, VOF.

## Abstract

This work is devoted to the study of a free surface thin film flow on the surface of a sphere by force of gravity. It is a numerical simulation carried out under the Fluent software. The free surface of the thin film is tracked by the VOF (volume of fluid) method. Fluid density and surface tension were fixed and the effects of viscosity and contact angle were analyzed.

**Keywords:** Contact angle, dissipation, flow, Fluent, free surface, sphere, surface tension, VOF.