

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

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie Mécanique

Spécialité : Installation Énergétique et Turbomachines

Présenté par :

TIGHIDET Wissem

Thème

**RÉALISATION EXPÉRIMENTALE ET SIMULATION NUMÉRIQUE D'UN
BALLOTTEMENT DE FLUIDE NON NEWTONIEN DE TYPE HERSHEY-BULKLEY
DANS UN RÉSERVOIR**

Devant le jury composé de :

Mr. B. MEZIANI	Professeur	Président
Mr. M. ALLOUCHE	M.A.A	Rapporteur
Mr. A. DJEMA	M.C.B	Examineur

Session juin 2018

Remerciement

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de M^r ALLOUCHE, enseignant à l'université Abderrahmane MIRA BEJAIA, je le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire.

Je tiens à remercier le doctorant MAHDAOUI Hamza pour son aide et ses encouragements.

Je tiens à remercier aussi toute l'équipe de Hall de Technologie.

Un merci à M^r MEZIANI d'être président de jury

et

M^r DJEMA d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes profonds remerciements a mes parents, ma famille, mes amis, et a toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenue de prés ou de loin.

Je dédie ce modeste travail à :

MES CHERS PARENTS ;

*Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect,
mon amour éternel et ma considération pour les
sacrifices que vous avez consenti pour mon
instruction et mon bien être.*

*À mes frères, ma sœurs, mes neveux,
à toute ma famille, mes amis, mes collègues, et à
tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour
que ce travail soit possible, je vous dis merci.*

TIGHIDET *Wissem*

SOMMAIRE

Nomenclature	i
Liste des figures	ii
Liste des tableaux	iii
Introduction générale	2
Chapitre I Généralités et revue bibliographique.....	3
I.1 Introduction :	3
I.2 Généralités	3
I.2.1 Ballotement d'un liquide	3
I.2.2 La surface libre	3
I.2.3 la tension superficielle	4
I.2.3.1 Interface liquide-gaz	4
I.2.3.2 Interface liquide-liquide	4
I.2.3.3 Interface Liquide-solide	5
I.3 Rhéologie des fluides	5
I.3.1 Comportement Newtonien	5
I.3.2 Comportement non Newtonien	5
I.3.3 Modèles rhéologiques	6
I.3.3.1 Modèles sans contrainte seuil	6
I.3.3.2 Modèle à contrainte seuil	7
I.4 Vélométrie par image de particules (PIV)	8
I.6 Revue bibliographique :	9
I.7 Conclusion:	19
Chapitre II Présentation du problème	20
I.1 Introduction :	20
II.2 Géométrie et positionnement de problème	20
II.2.1 Réservoir rectangulaire.....	20
II.2.1 Réservoir cylindrique.....	20
II.3 Formulation mathématique	21
II.3.1 Equation de continuité.....	21
II.3.2 Equations de Navier-Stokes.....	21

II.4	Méthode de volume de fluide (VOF).....	21
II.4.1	Equation de taux de présence	22
II.4.2	Propriétés physiques du fluide dans un volume de contrôle	23
II.4.3	Equation de conservation de quantité de mouvement	23
II.4.4	Tension de surface.....	23
II.4.5	Angle de contact	24
II.4.6	Interpolation près de l'interface sous fluent	24
II.4.7	Le schéma explicite sous Fluent.....	25
II.5	Modèle expérimental	26
II.5.1	Mise en place du banc d'essai	26
II.5.1.1	Réservoir rectangulaire.....	26
II.5.1.2	Réservoir cylindrique.....	26
II.5.2	Image de particules vélocimétrie (PIV)	27
II.5.3	Acquisition des images et traitement.....	27
II.5.3.1	DPIV (Vélocimétrie par image numérique des particules)	27
II.5.3.2	PIVmat.....	28
II.6	Conclusion.....	28
Chapitre III Simulation numérique.....		29
III.1	Introduction.....	29
III.2	La présentation des logiciels utilisés	29
III.2.1	Maillage sous Gambit.....	29
III.2.1.1	Démarrage de Gambit.....	29
III.2.1.2	Construction de la géométrie.....	30
III.2.1.3	Le maillage	30
III.2.2	Simulation sous fluent.....	31
III.2.2.1	démarrage de fluent.....	31
III.3	Présentation des deux géométries étudiées.....	32
III.3.1	Réservoir rectangulaire	32
III.3.2	Réservoir cylindrique.....	32
III.3.3	Réalisation du maillage	33
III.3.4	Conditions aux limites	34
III.4	Simulation sous Fluent	34
III.5	Conclusion.....	36

Chapitre IV Résultats et discussion	37
IV.1 Introduction.....	37
IV.2 Effet de la forme du réservoir sur le ballotement.....	37
IV.2.1 Fluide Newtonien.....	37
IV.2.2 Fluide non Newtonien	40
IV.4. 3 Effet de l'excitation sur le ballotement	43
IV.4.3.1 cas réservoir rectangulaire.....	43
IV.4. 3.2 cas réservoir cylindrique	47
IV.4. 4 Effet la nature du fluide	50
IV.4.4.1 Réservoir rectangulaire	50
IV.4.4.1 Réservoir cylindrique	53
IV.5 Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux pour un fluide Newtonien.....	59
IV.6 Conclusion.....	59
Conclusion générale	60

Nomenclature

Lettres latines :

Symboles	Signification	Unité (SI)
A	Amplitude de l'excitation	m
D	Diamètre de cylindre	m
E_s	Energie de surface	N/m
F_{SF}	Force de volume	N/m ³
g	Accélération de la pesanteur	m/s ²
h	Hauteur de fluide	m
H	La hauteur de réservoir	m
k	La courbure	m ⁻¹
k	Consistance	Pa. S ⁿ
l	Largeur de réservoir rectangulaire	m
n	Indice d'écoulement	/
\mathbf{n}	La normal	/
p_1, p_2	Pression capillaire	Pa
R_1, R_2	Rayons dans les directions orthogonales	m
\mathbf{t}	La tangentielle	/
$\mathbf{u}, \mathbf{v}, \mathbf{w}$	Composantes de la vitesse suivant l'axe x, y et z	m/s
v	le volume de la cellule	/
x, y, z	Cordonnées dans l'espace	m

Lettres grecs :

Symboles	Signification	Unité (SI)
α	Fraction volumique	/
$\dot{\gamma}$	Vitesse de cisaillement	s ⁻¹
η	Viscosité de cisaillement	Pa.s
η_0	Viscosité de cisaillement nul	Pa.s
η_∞	Viscosité de cisaillement infini	Pa.s
η_B	Viscosité plastique de Bingham	Pa.s
θ	Angle de contact	Deg (°)
ρ	Masse volumique	Kg/m ³
σ	La tension interfaciale	N/m
τ	Contrainte de cisaillement	Pa
τ_0	Contrainte seuil	Pa
μ	La viscosité dynamique	Pa.s
ν	La viscosité cinématique	m ² /s

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Généralités et revus bibliographique

Figure (I.1) : Illustration du phénomène de ballotement.....	3
Figure (I.2) : Lois de comportement rhéologiques usuelles	8
Figure (I.3) : Schéma de type d'utilisation de la méthode PIV	9
Figure (I.4) : Réfraction d'un rayon émis du point A à travers la surface libre $h(x)$. Ce rayon semblera provenir du point A', et donnera lieu à un déplacement apparent $\delta x = AA'$	10
Figure (I.5) : Vue en perspective de la hauteur de surface reconstruite d'une onde approximativement plane, se propageant de droite à gauche, montrant une légère modulation transversale.....	11
Figure (I.6) : Vue en perspective des ondes circulaires créées par l'impact d'une goutte, à des moments $t = 0,7$ et $t = 0,9$ s après l'impact.....	11
Figure (I.7) : Installation expérimentale montrant la caméra au-dessus de l'interface et l'écran en pointillés situé au fond du réservoir.....	12
Figure (I.8) : Comparaison des résultats 2D et 3D pour la variation de la maximale moyenne de l'élévation de surface libre selon le rapport de fréquence.....	14

Chapitre II

Présentation du problème

Figure (II.1) : La géométrie de réservoir rectangulaire présenté en 3D.....	20
Figure (II.2) : La géométrie de réservoir cylindrique présenté en 3D.....	21
Figure (II.3) : Représentation de taux de présence dans les volumes de contrôle.....	22
Figure (II.4) : Représentation des techniques de reconstruction d'interface.....	25
Figure (II.5) : Représentation de banc d'essai pour le réservoir rectangulaire.....	26
Figure (II.6) : Représentation de banc d'essai pour le réservoir cylindrique.....	27

Chapitre III

Simulation numérique

Figure (III.1) : Schéma récapitulatif d'une simulation complète sous Gambit et Fluent.....	29
Figure (III.2) : Les étapes principales de construction de la géométrie	30
Figure (III.3) : La géométrie de réservoir rectangulaire sous gambit.....	32
Figure (III.4) : La géométrie de réservoir cylindrique sous gambit	33

Chapitre IV

Résultats et discussion

- Figure IV.1** : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de la forme du réservoir sur le ballonnement pour le cas d'un fluide Newtonien a une fréquence $f_r=1\text{Hz}$, et les temps $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$37
- Figure IV.2** : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de la forme du réservoir sur le ballonnement pour le cas d'un fluide Newtonien a une fréquence $f_r=1,5\text{Hz}$, et les temps $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$38
- Figure (IV.3)** : Les résultats obtenus sous Fluent représentent effet de la forme du réservoir sur le ballonnement pour le cas d'un fluide Newtonien a une fréquence $f_r=2\text{Hz}$, et les temps $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$39
- Figure (IV.4)** : Les résultats obtenus sous Fluent représentent effet de la forme du réservoir sur le ballonnement pour le cas d'un fluide non Newtonien a une fréquence $f_r=1\text{Hz}$, et les temps $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$ 40
- Figure (IV.5)** : Les résultats obtenus sous Fluent représentent effet de la forme du réservoir sur le ballonnement pour le cas d'un fluide non Newtonien a une fréquence $f_r=1,5\text{Hz}$, et les temps $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$ 41
- Figure (IV.6)** : Les résultats obtenus sous Fluent représentent effet de la forme du réservoir sur le ballonnement pour le cas d'un fluide non Newtonien a une fréquence $f_r=2\text{Hz}$, et les temps $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$42
- Figure (IV.7)** : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide Newtonien pour des fréquences $f_r= 1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=1\text{s}$43
- Figure (IV.8)** : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide Newtonien pour des fréquences $f_r= 1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=2$44
- Figure (IV.9)** : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide Newtonien pour des fréquences $f_r= 1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=3\text{s}$44
- Figure (IV.10)** : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide non Newtonien pour des fréquences $f_r= 1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=1\text{s}$45
- Figure (IV.11)** : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide non Newtonien pour des fréquences $f_r= 1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=2$45
- Figure (IV.12)** : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide non Newtonien pour des fréquences $f_r= 1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=3\text{s}$46
- Figure (IV.13)** : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide Newtonien pour des fréquences $f_r= 1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=1\text{s}$47
- Figure (IV.14)** : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide Newtonien pour des fréquences $f_r= 1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=2$47

Figure (IV.15) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide Newtonien pour des fréquences $f_r= 1\text{Hz}, 1,5\text{Hz}, 2\text{Hz}$ à $t=3\text{s}$47

Figure (IV.16) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide non Newtonien pour des fréquences $f_r= 1\text{Hz}, 1,5\text{Hz}, 2\text{Hz}$ à $t=1\text{s}$48

Figure (IV.17) Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide non Newtonien pour des fréquences $f_r= 1\text{Hz}, 1,5\text{Hz}, 2\text{Hz}$ à $t=2\text{s}$48

Figure (IV.18) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide non Newtonien pour des fréquences $f_r= 1\text{Hz}, 1,5\text{Hz}, 2\text{Hz}$ à $t=3\text{s}$49

Figure (IV.19) : Les résultats obtenus sous Fluent pour le cas du réservoir rectangulaire, comparaison entre un fluide Newtonien et non Newtonien pour une fréquence $f_r= 1\text{Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$50

Figure (IV.20) : Les résultats obtenus sous Fluent pour le cas du réservoir rectangulaire, comparaison entre un fluide Newtonien et non Newtonien pour une fréquence $f_r= 1,5\text{Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$51

Figure (IV.21) : Les résultats obtenus sous Fluent pour le cas du réservoir rectangulaire, comparaison entre un fluide Newtonien et non Newtonien pour une fréquence $f_r= 2\text{Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$52

Figure (IV.22) : Les résultats obtenus sous Fluent pour le cas du réservoir cylindrique, comparaison entre un fluide Newtonien et non Newtonien pour une fréquence $f_r= 1\text{Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$54

Figure (IV.23) : Les résultats obtenus sous Fluent pour le cas du réservoir cylindrique, comparaison entre un fluide Newtonien et non Newtonien pour une fréquence $f_r= 1,5\text{Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$55

Figure (IV.24) : Les résultats obtenus sous Fluent pour le cas du réservoir cylindrique, comparaison entre un fluide Newtonien et non Newtonien pour une fréquence $f_r= 2\text{Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$56

Figure (IV.25) : comparaison entre les résultats obtenus sous Fluente et les résultats obtenus avec la PIV, a une fréquence $f_r= 1\text{Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$57

Figure (IV.26) : comparaison entre les résultats obtenus sous Fluente et les résultats obtenus avec la PIV, a une fréquence $f_r= 1.5\text{Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$58

Figure (IV.27) : comparaison entre les résultats obtenus sous Fluente et les résultats obtenus avec la PIV, a une fréquence $f_r= 3\text{ Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$59

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre III Simulation numérique

<i>Tableau (III.1)</i> : Le nombre de mailles utilisé dans le cas d'un réservoir rectangulaire.....	33
<i>Tableau (III.2)</i> : Le nombre de mailles utilisé dans le cas d'un réservoir cylindrique.....	34
<i>Tableau (III.3)</i> : les conditions aux limites utilisées dans le cas de réservoir rectangulaire.....	34
<i>Tableau (III.4)</i> : les conditions aux limites utilisées dans le cas de réservoir cylindrique.....	34
<i>Tableau (III.5)</i> : Les propriétés physiques du fluide Newtonien (eau).....	35
<i>Tableau (III.6)</i> : Les propriétés physiques du fluide non-Newtonien (polyox).....	35
<i>Tableau (III.7)</i> : Tableau récapitulatif de classification des phases.....	36

Introduction générale

Introduction générale

Le ballotement peut être défini comme tout mouvement d'un liquide à l'intérieur d'un réservoir. Ce mouvement peut être causé par une excitation extérieure et la forme du contenant.

Lorsque l'excitation est très faible ou très éloigné de la fréquence propre du ballotement, la réponse du mouvement de la surface libre est plane sans discontinuité, on parle alors du ballotement linéaire ; tandis que lorsque la fréquence de l'excitation du réservoir est proche de la fréquence naturelle de mouvement du fluide, des phénomènes plus violents interviennent créant des non linéarités.

Cette étude est consacrée à l'étude de ballotement, dans un premier cas en utilisant un fluide Newtonien dans un réservoir rectangulaire et cylindrique, puis en utilisant un fluide non Newtonien, dans le but de suivre la déformation de la surface libre en suivant une méthode numérique de volumes finis et une étude expérimentale.

Ce mémoire est articulé autour de quatre chapitres complétés d'une introduction générale et d'une conclusion générale.

Le Premier chapitre, est dédié à des généralités sur le ballotement a surface libre ainsi que les différents modèles rhéologiques des fluides, et une revue bibliographique sur le thème.

Le deuxième chapitre consiste à la présentation du problème physique, et la méthode de volume de fluide (VOF) utilisée en mécanique des fluides numériques qui est permet de suivre la position de l'interface. Ce chapitre contient aussi une présentation de modèle expérimental avec l'analyse de PIV.

Le troisième chapitre, plus particulièrement orienté sur une étude CFD au moyen d'un code commercial "Fluent" et le logiciel de construction de géométrie et de maillage "Gambit". Plusieurs simulations 3D de ballotement dans les deux cas de géométries (rectangulaire et cylindrique) en utilisant deux fluides un Newtonien et l'autre non Newtonien sont menées, suivant un modèle numérique en volumes finis dans le but de suivre la déformation de la surface libre et la détermination de sa hauteur.

Le dernier chapitre rassemble tout les résultats obtenus numériquement et expérimentalement pour les différents cas étudiés avec les commentaires.

En fin, une conclusion générale reprend les différents apports et résultats issus de ces travaux.

Chapitre I

Généralité et revue bibliographique

I.1 Introduction :

Ce chapitre est dédié au rappels des notions de base relatives à l'étude de ballotement de deux liquides de modèles rhéologiques différents à surface libre dans un réservoir, ainsi qu'une synthèse bibliographique sur les travaux consacré dans ce domaine.

I.2 Généralités

I.2.1 Ballotement d'un liquide

Le ballotement d'un liquide signifie tout mouvement de la surface du liquide à l'intérieur d'un réservoir soumis a une excitation extérieure.

Lorsque l'excitation est très faible ou très éloigné de la fréquence propre du ballotement, la réponse du mouvement de la surface libre est plane sans discontinuité, on parle alors de ballotement linéaire ; tandis que lorsque la fréquence de l'excitation du réservoir est proche de la fréquence naturelle de mouvement du fluide, des phénomènes plus violents interviennent créant des non linéarités.

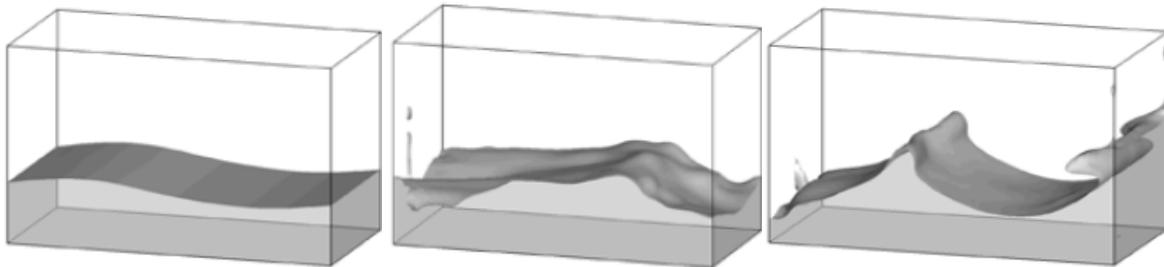


Figure (I.1): Illustration du phénomène de ballotement [7].

Selon les informations contenues dans l'article [19] ; les effets non linéaires du ballotement sont selon trois classes :

- les effets non linéaires dus à la géométrie du réservoir et qui sont apparents même pour des vagues de faible amplitude.
- les effets non linéaires dus aux larges amplitudes.
- les effets non linéaires dus au couplage de différents modes de ballotement.

I.2.2 Surface libre

La surface libre d'un liquide contenu dans un récipient est la surface qui est en contact avec l'air, sa pression a l'interface est généralement égale à la pression atmosphérique. Quelle que soit la position du récipient, cette surface au repos est toujours plane et horizontale, et si le récipient est étroit, la surface libre n'est plus plane mais légèrement courbée vers le bas. Le

paramètre hydraulique qui permet d'évaluer cette interface est la distance verticale entre le fond du récipient et l'interface.

I.2.3 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 :

$$E_s = \gamma \times S \quad (I.1)$$

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].

I.2.3.1 Interface liquide-gaz

Le gaz exerce une pression sur le liquide car ses molécules (du gaz) exercent une attraction ou une répulsion sur les molécules à la surface du liquide. On peut quand même négliger cette force car le gaz a une densité très faible par rapport au liquide.

On peut donc dire que la pression du gaz, l'attraction par l'intérieur du liquide, et la gravité influent directement sur la forme de la surface du liquide.

I.2.3.2 Interface liquide-liquide

Dans une interface liquide-liquide, on parle de liquide miscibles ou de liquides non miscibles. Si deux liquides sont miscibles ils se mélangent et forment une phase, dans le cas contraire (cas non miscibles) ils forment deux phases bien distinctes (exemple de l'eau et l'huile). Les molécules de liquides non miscibles subissent deux forces : une attraction vers l'intérieur et une répulsion par rapport aux molécules de l'autre liquide.

La forme de l'interface liquide-liquide est, donc engendré par les forces d'attraction intra-liquide, la force de répulsion inter-liquide, et la pesanteur.

I.2.3.3 Interface Liquide-solide

C'est le même principe que l'interface liquide-liquide. En cas de répulsion entre un liquide et un solide, la goutte sur le solide va se consolider et ne pas s'étaler. Dans le cas d'attraction la goutte va s'étaler.

I.3 Rhéologie des fluides

La rhéologie est l'étude des phénomènes de déformation de la matière sous l'effet de contraintes. Le comportement rhéologique d'un fluide se traduit par une relation entre le tenseur des contraintes et le tenseur des vitesses de déformation pour ce fluide. Cette relation peut être linéaire ou non-linéaire dans le cas d'un fluide non-Newtonien ou encore fluide complexe.

Il est nécessaire de connaître le comportement de cette matière pour sa mise en œuvre ; la distribution des contraintes et des déformations est présentée sous forme tensorielle. Les relations reliant ces champs sont appelées lois de comportement.

I.3.1 Comportement Newtonien

Un fluide Newtonien est un fluide dont la viscosité ne dépend pas des contraintes qui lui sont appliquées. Autrement dit sa viscosité dynamique est une propriété constante du fluide qui ne dépend que de la pression ou de la température ; sa viscosité sera donc constante quelque soient les contraintes exercées. La contrainte de cisaillement est proportionnelle à la vitesse de cisaillement. Ce fluide peut être généralisé et sa loi de comportement peut se mettre sous la forme suivante :

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

τ : La Contrainte de cisaillement.

$\dot{\gamma}$: Vitesse de cisaillement.

I.3.2 Comportement non Newtonien

On dit d'un fluide qu'il est non-Newtonien lorsque sa courbe d'écoulement est non linéaire ; c'est-à-dire que la viscosité ne dépend pas seulement de la température mais aussi d'une contrainte appelée contrainte de cisaillement. La viscosité dépend aussi chez un certains types de fluides non-Newtoniens de la durée pendant la quelle cette contrainte est appliquée.

Les comportements rhéologiques les plus usuels :

- Le comportement rhéofluidifiant :

Très souvent dans les solutions de polymère ou les suspensions, la viscosité diminue quand le cisaillement auquel est soumis le fluide croît. Ce phénomène peut être dû, dans le cas des suspensions à l'orientation des entités en suspension dans le sens d'écoulement ou leur réorganisation sous l'effet du cisaillement. Dans le cas des solutions, cela peut être dû à un alignement de molécule ou une destruction de structures moléculaires [17].

- Le comportement rhéoépaississant :

Le rhéoepaississement est le comportement opposé à la rhéofluidification et correspond à une augmentation de la viscosité lorsque la contrainte de cisaillement augmente.

Dans la plus part des cas connus, le comportement rhéoépaississant n'est observé que sur une gamme limitée de taux de cisaillement. Le fluide possède également un comportement rhéofluidifiant à des taux de cisaillement plus faible.

I.3.3 Modèles rhéologiques

I.3.3.1 Modèles sans contrainte seuil

❖ Modèles en loi de puissance

Appelés aussi fluides d'Ostwald de Waele, leur comportement rhéologique est décrit par une loi de puissance de type :

$$\tau = k\dot{\gamma}^n \quad (\text{I.3})$$

Où k représente la consistance du fluide et n l'indice de fluidification.

Cette loi décrit le cas des fluides à comportement rhéofluidifiant ($n < 1$), rhéoépaississant ($n > 1$) ou Newtonien pour ($n = 1$).

❖ Modèle de cross

Ce modèle est comme celui de Carreau-yassuda, tient compte des limites du comportement rhéologique. Aux faibles contraintes de cisaillement, on observe généralement un comportement Newtonien, avec un plateau de viscosité appelée viscosité à cisaillement nul et

désigné par « η_0 ». Aux cisaillements élevés, un deuxième plateau apparaît et la viscosité est appelée viscosité à cisaillement infini désignée par « η_∞ ».

Le modèle de cross s'écrit :

$$\frac{\eta - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (\lambda \dot{\gamma})^n} \quad (\text{I.4})$$

Où λ et n sont des constantes ; λ est un temps caractéristique de relaxation. η_0 et η_∞ sont les viscosités respectives à cisaillement nul et infini.

I.3.3.2 Modèle à contrainte seuil

❖ Modèle de Bingham

Pour le liquide Benthamien, ou, la tension de cisaillement varie linéairement avec la vitesse de cisaillement mais à la différence des fluides newtoniens, il est nécessaire d'appliquer une force minimale pour mettre le fluide en mouvement. Cette force correspond à la tension limite (critique) de cisaillement τ_0 . L'équation rhéologique d'état de ce modèle est caractérisée par deux constantes (τ_0 et η_B) :

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + \eta_B \dot{\gamma} & \tau > \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (\text{I.5})$$

Avec :

η_B : Viscosité plastique de Bingham.

❖ Modèle de Herschel-Bulkley

Ce modèle permet de décrire la plupart des fluides plastiques, la courbe d'écoulement de tels fluides finit par devenir rectiligne au-delà d'une certaine contrainte critique appliquée. L'équation rhéologique de ce modèle est donnée par la formule suivante :

$$\begin{cases} \tau = \tau_0 + k \dot{\gamma}^n & \tau > \tau_0 \\ \dot{\gamma} = 0 & \tau \leq \tau_0 \end{cases} \quad (\text{I.6})$$

Où k est la consistance du fluide, n son indice d'écoulement et τ_0 la contrainte seuil.

On note que ce modèle peut facilement être modifié pour décrire les modèles précédemment cités.

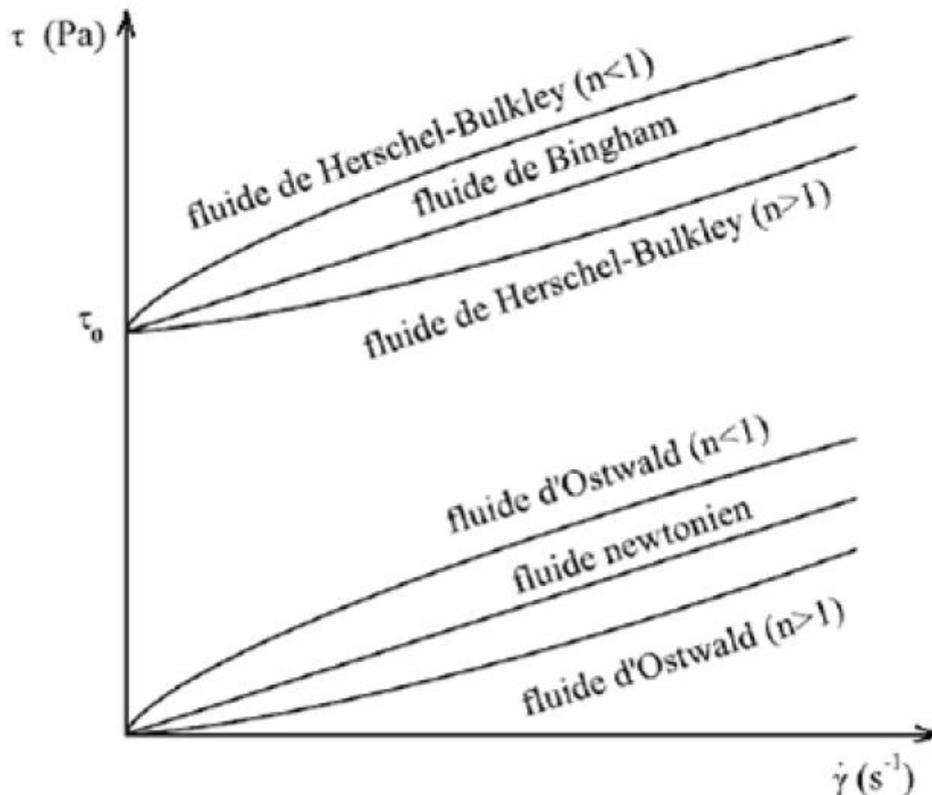


Figure (I.2): Lois de comportement rhéologiques usuelles [16].

I.4 Vélométrie par image de particules (PIV)

La PIV ou vélocimétrie par image de particules est une technique d'imagerie dédiée à la mesure de champs de vitesse d'un fluide, son principe repose sur la prise des images des particules traçantes dispersées à la surface ou à l'intérieur du fluide à des instants rapprochés d'un même plan que l'on souhaite étudier, et déterminer le déplacement d'une population donnée de particules, entre les deux prises de vue.

Il est obtenu par traitement mathématique (le plus souvent type corrélation) entre les images, chaque image est divisée en petites zones (fenêtre dont la taille est typiquement de 16x16 ou 32x32 pixels). Les déplacements obtenus dans l'image sont alors convertis en vitesses réelles dans l'expérience. L'utilisation d'une seule caméra, donc d'un seul point de vue, ne permet que la mesure des deux composantes transversales de la vitesse.

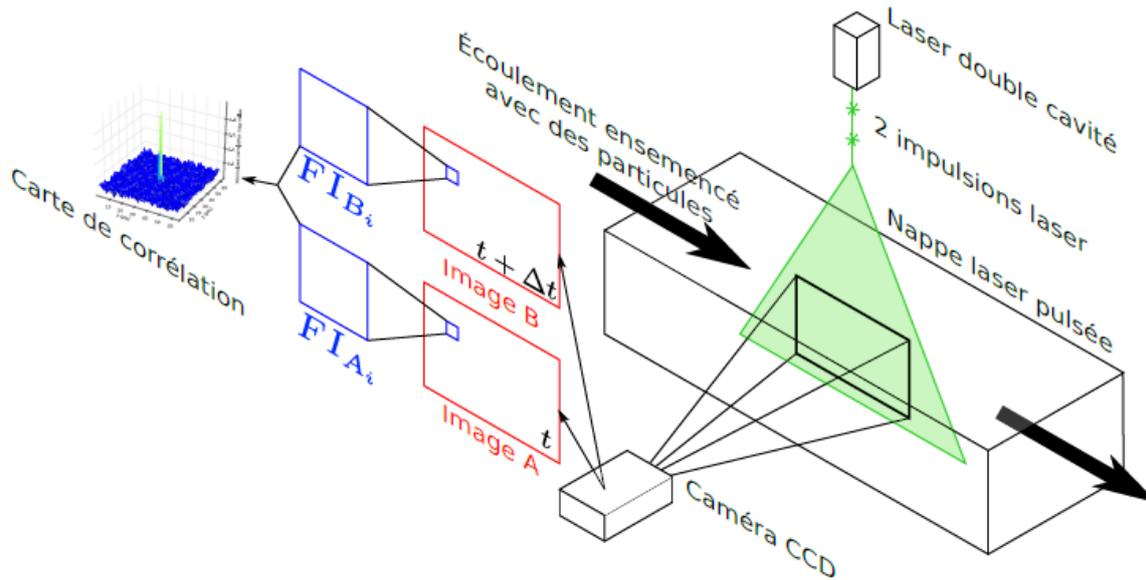


Figure (I. 3): Schéma de type d'utilisation de la méthode PIV [18].

I.6 Revue bibliographique :

Marc Rabaud et al [1] :

Ont présenté une méthode de mesure non intrusive de la déformation d'une interface fluide au cours du temps. Cette méthode est basée sur l'analyse du déplacement apparent d'un motif aléatoire de points dû à la réfraction de l'image sur la surface, *Figure (I. 4)*. Le champ de déplacement δr de l'image déformée est calculé à chaque instant par corrélation avec une image de référence pour laquelle l'interface était au repos à l'aide du logiciel de PIV DaVis. La hauteur d'eau $h(x, y, t)$ est ensuite reconstruite sous Matlab, par une intégration numérique de l'équation suivante :

$$h(x, y, t) = \left(h_0^2 - \frac{2}{\alpha} \nabla^{-1} \delta r(x, y, t) \right)^{1/2} \quad (\text{I.7})$$

Une mesure de l'amplitude des ondes tous les millimètres peut être facilement obtenue, et ce avec une résolution de 0,4 %. Cette méthode est utilisable même pour des pentes très prononcées. La vraie limitation est l'apparition de caustiques, pour des courbures trop fortes, qui interdisent la mesure du déplacement apparent. Cette méthode n'est pas limitée aux liquides transparents. En effet, dans le cas du mercure par exemple, elle permet aussi de travailler de la même manière en réflexion en plaçant le motif de points dans l'air. Par ailleurs, dans le cas de déplacements très importants des taches entre l'image de référence et l'image à l'instant t , il est possible de calculer le champ de déplacement entre deux instants plus proches t_1 et t_2 . Dans ce cas, le déplacement peut être plus faible mais il faut faire une

intégration temporelle en plus de l'intégration spatiale pour reconstruire la hauteur $h(x, y, t_2)$. Enfin, pour des phénomènes relativement lents (par exemple l'étalement d'un fluide visqueux), une excellente résolution peut être obtenue en travaillant avec un appareil photo numérique (résolution jusqu'à 10 Mégapixels).

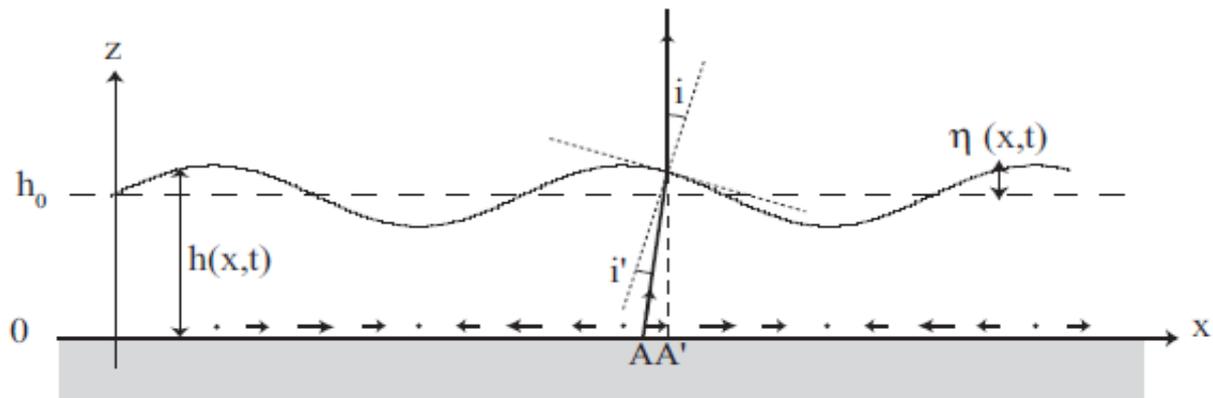


Figure (I. 4): Réfraction d'un rayon émis du point A à travers la surface libre $h(x)$. Ce rayon semblera provenir du point A', et donnera lieu à un déplacement apparent $\delta x = AA'$.

Frédéric Moisy et al [2] :

Une méthode optique pour la mesure de la topographie instantanée de deux fluides transparents, appelée Schlieren synthétique en surface libre (FS-SS), est présentée dans cet article. Cette méthode est basée sur l'analyse d'un motif de points aléatoires visualisés à travers une interface déformée. Le champ de déplacement apparent entre l'image réfractée et une image de référence obtenue du motif est prise lorsque l'interface air / eau est plate. Le champ de déplacement δr entre chaque image et l'image de référence est obtenu par l'algorithme DIC disponible dans le logiciel commercial DaVis. Une intégration numérique de ce champ de déplacement, basée au moins sur l'inversion de l'opérateur de gradient est utilisée pour la reconstruction de la hauteur de surface instantanée, permettant une excellente résolution spatiale avec un faible coût de calcul. Des expériences de validation utilisant un modèle solide transparent avec une surface ondulée ou des ondes planes à une interface eau-air sont présentées, *Figure (I. 5)*, ainsi que des mesures supplémentaires résolues dans le temps d'ondes circulaires, *Figure (I. 6)*.

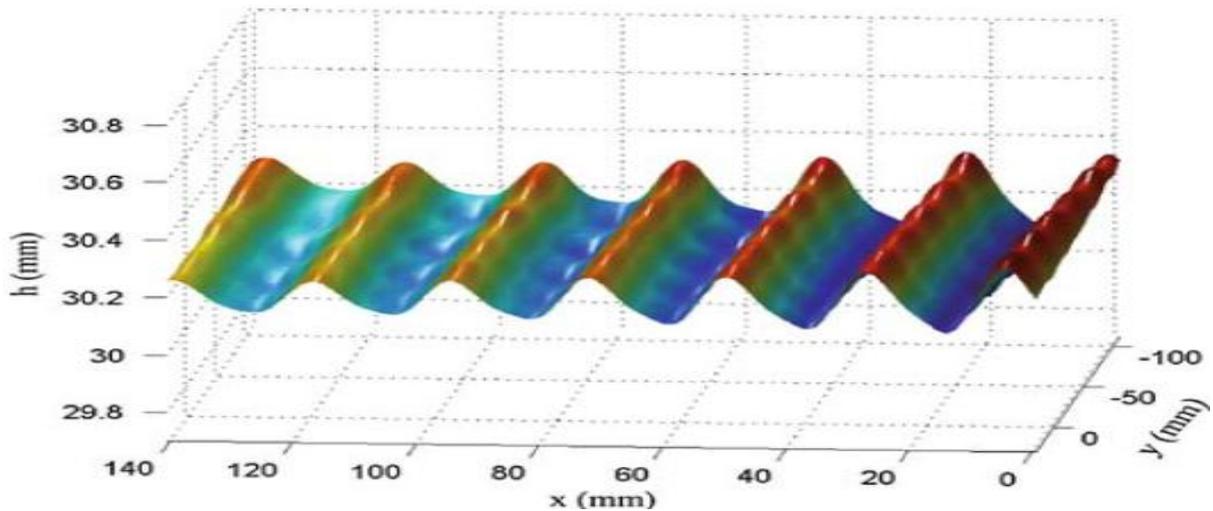


Figure (I. 5): Vue en perspective de la hauteur de surface reconstruite d'une onde approximativement plane, se propageant de droite à gauche, montrant une légère modulation transversale.

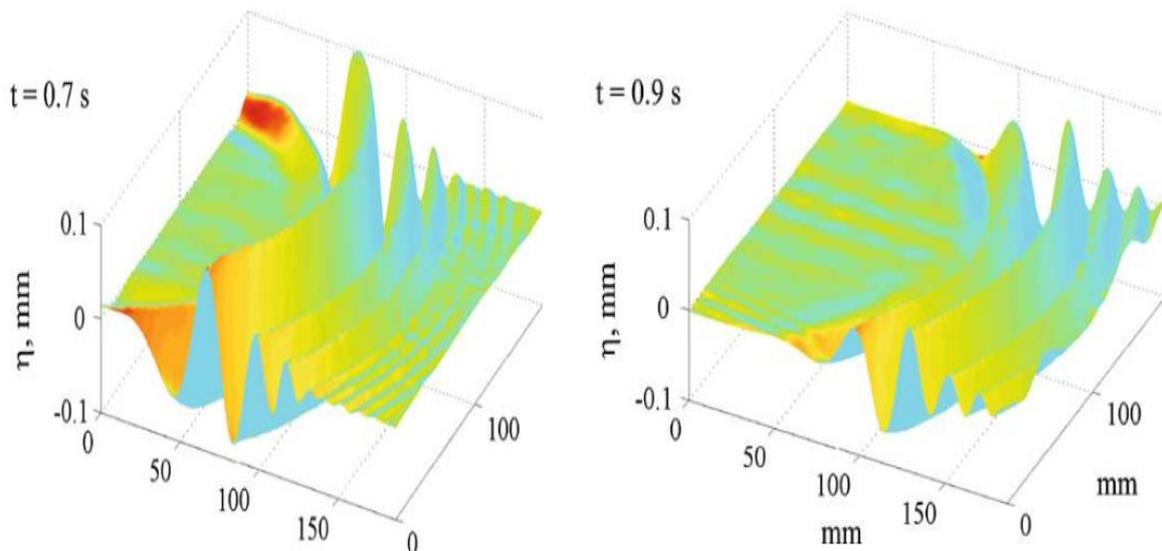


Figure (I. 6): Vue en perspective des ondes circulaires créées par l'impact d'une goutte, à des moments $t = 0,7$ et $t = 0,9$ s après l'impact.

M Rabaud et F Moisy [3] :

Ont présenté une méthode optique permettant de mesurer la déformation complète de la surface de la mer, qui est dérivée de la technique PIV (vélocimétrie par imagerie de particules), actuellement utilisée en mécanique des fluides pour déterminer la vitesse du fluide dans un plan. Dans le présent procédé, une caméra imprime des points aléatoires sur un écran plan à travers l'interface air / eau, *Figure (I. 7)*. Une première image de référence est prise lorsque l'interface est plate, et les images prises lorsque l'interface est déformée sont comparées à la référence. Les points observés à travers l'interface déformée apparaissent déplacés sur une faible distance $\delta r(x, y)$.

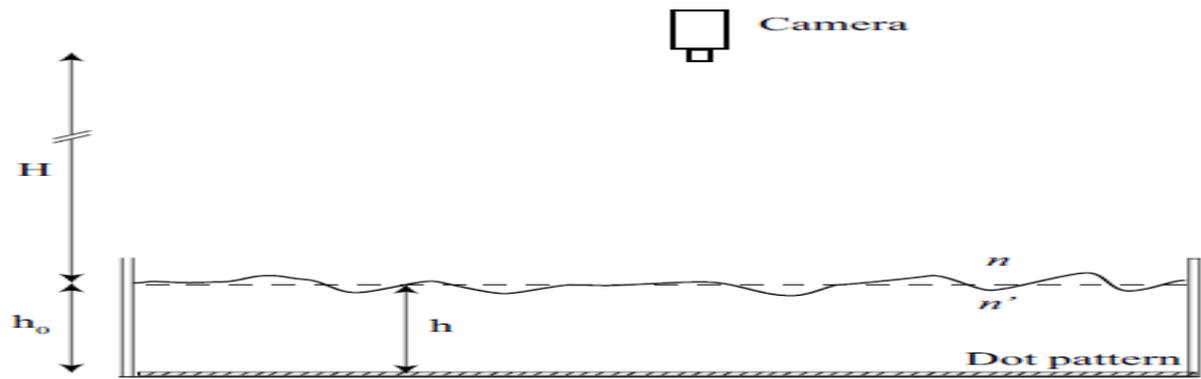


Figure (I. 7): Installation expérimentale montrant la caméra au-dessus de l'interface et l'écran en pointillés situé au fond du réservoir.

Cette méthode peut être utile dans les essais de remorquage et devrait permettre des comparaisons détaillées avec la déformation de surface calculée et aider ainsi à valider les programmes de prédiction de vitesse. La technique a déjà été testée à petite échelle et montre une très bonne résolution. Elle peut facilement s'adapter à de plus grandes échelles sans trop de difficulté, car elle ne nécessite pas de matériel spécial ou de compétences optiques critiques.

C. W. HIRT et B. D. NICHOLS [4] :

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 cellules eulériennes ou lagrangiennes-eulériennes arbitraires. Cette méthode s'est avérée plus flexible et plus efficace que d'autres méthodes pour traiter des configurations de limites libres compliquées. Et elle est particulièrement utile car elle utilise un minimum d'informations stockées, traite automatiquement les frontières libres et peut facilement être étendu aux calculs tridimensionnels. Pour illustrer la méthode, une description est donnée pour un code hydrodynamique incompressible, SOLA-VOF, qui utilise la technique VOF pour suivre des surfaces de fluide libres.

Kristoffer Johansson [5] :

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.

B. MEZIANI et al [6] :

Ont présenté une étude du ballonnement dans un réservoir rectangulaire en présence d'une excitation dynamique verticale. L'écoulement étudié est régi par l'équation de continuité (qui est réduite à une divergence nulle de la vitesse car le fluide est considéré incompressible) et l'équation de mouvement, ainsi que les conditions aux limites associées dont celles exprimées sur la frontière mobile qui sont ensuite linéarisées. La tension de surface était incluse et son effet qui n'intervient qu'aux petites échelles fait augmenter les fréquences propres de la surface libre quand le fluide étudié est trop léger ou dans des expériences hydrodynamiques en microgravité ou lorsqu'on s'intéresse au ballonnement dans des réservoirs de petite échelle de longueur. Autrement, ces effets sont masqués par l'influence de la gravité. Cette approche linéaire est bien adaptée tant que l'amplitude des oscillations reste faible devant la longueur d'onde. L'introduction d'une excitation dynamique verticale de type sinusoïdale donne un problème d'oscillations paramétriques régi par l'équation de Mathieu qui montre l'existence des zones stables et instables. Un diagramme de stabilité est donné en fonction des paramètres du problème. L'analyse du ballonnement dans les zones stables montre des effets non linéaires. Ces effets dépendent de la fréquence et de l'amplitude de l'excitation dynamique.

Jae Hwan Jung et al [7] :

Ont étudié l'effet des modes de fréquence naturelle sur le ballonnement de liquides dans des réservoirs rectangulaires 2-D et 3-D en utilisant une méthode de détermination de niveau basée sur la méthode des volumes finis. Afin d'examiner l'effet des modes de fréquence naturelle sur le ballonnement liquide, ils ont considéré une large gamme de rapports de fréquence en Hz ($0,5 \leq f_r \leq 3,2$) qui couvre les modes de fréquence naturelle allant de 1 à 5. Pour tous les cas considérés dans cette étude, le niveau de remplissage est de 30% de la hauteur du réservoir, et le mouvement du réservoir est une surtension pure avec l'amplitude d'excitation fixe de 0,025 L. Ils ont confirmé que le premier mode de la fréquence propre du fluide dans un réservoir rectangulaire est nettement la fréquence de résonance, à base des résultats de déformations de la surface libre pour différents rapports de fréquence. Sinon, à la

fréquence propre du second mode, il n'y a pas d'augmentation soudaine de l'amplitude de l'élévation de la surface libre. Cependant, à $f_r = 1\text{Hz}$, le ballonnement est considérablement supprimé, ce qui entraîne une onde calme avec une élévation relativement plus faible de la surface libre, puisque les ondes subissent une interférence destructive. Aux modes supérieurs de $f_r = 3\text{Hz}$, $f_r = 4\text{Hz}$ et $f_r = 5\text{Hz}$, la surface libre présente une déformation irrégulière avec des ondes non linéaires à chaque instant. Cependant, la déformation de la surface libre devient plus faible à mesure que le mode fréquence naturelle augmente.

Les résultats 3D ont confirmé la dépendance de la surface libre et la pression maximale moyenne des parois sur le rapport de fréquence des résultats 2D, *Figure (I. 8)*. Cependant, la pression maximale moyenne des résultats bidimensionnels est plus grande que celle des résultats tridimensionnels, en particulier au premier mode de la fréquence propre, qui pourrait être induite par l'effet 3D.

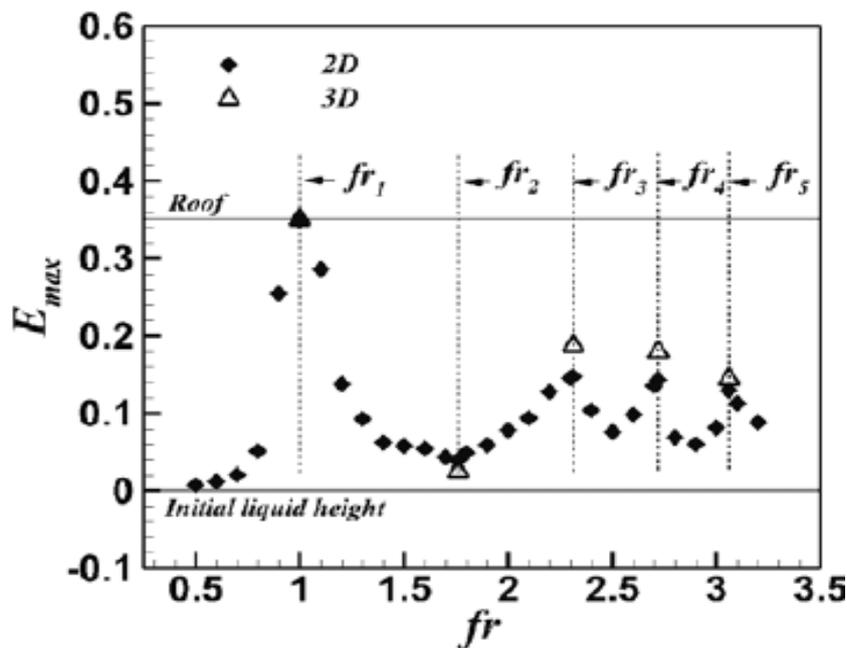


Figure (I. 8): Comparaison des résultats 2D et 3D pour la variation de la maximale moyenne de l'élévation de surface libre selon le rapport de fréquence.

Y. Zhang et al [8] :

Ont présenté un nouveau design de structure de déflecteur appelé déflecteur en mousse à cellules ouvertes pour un dispositif anti-ballonnement dans l'huile réservoir. A fin de relevé la meilleure conception des baffles, des simulations numérique sur le ballonnement de liquide avec divers baffles ont été réalisée en utilisant FLUENT avec le modèle Volume de fluide (VOF). Quatre types de baffles ont été étudiés : sans déflecteur, déflecteur parallèle conventionnel, déflecteur transversal et métal à alvéoles ouverts mousses déflecteurs. La

distribution de la vitesse de l'huile, le barycentre et l'occupation du pétrole dans le processus de ballonnement est révélé dans le cas d'un véhicule accélérant et tournant respectivement. Ils ont trouvé que le dernier type réduit la vélocité d'huile, augmenter la valeur de l'occupation du pétrole dans l'entrée du tuyau d'aspiration du réservoir d'huile et abaisser le barycentre de l'huile se comparant évidemment avec les autres types. En ce qui concerne la même densité de pores de mousse de métal à cellules ouvertes, quand la porosité de la mousse de métal à cellules ouvertes est inférieure à un effet sur le ralentissement du ballonnement de liquide, mais il y a peu d'écart entre différentes porosités pour la valeur absolue.

Vincenzo Armenia et al [9] :

Ont étudié le ballonnement de l'eau dans des réservoirs ouverts rectangulaires. Deux modèles mathématiques différents ont été utilisés, respectivement les équations de Reynolds Averaged Navier Stokes (RANSE) et l'approximation de the Shallow Water aux équations d'Euler(SWE).

Quatre profondeurs de liquide dans les hypothèses de l'eau peu profonde, et un large éventail de conditions d'excitation ont été étudiés numériquement et expérimentalement. Les RANSE sont résolus en utilisant une forme modifiée de la méthode MAC bien établie (SIMAC) capable de traiter avec précision le mouvement de surface libre et les contraintes visqueuses sur les parois rigides. Les équations d'eau moins profonde sont résolues à l'aide d'un algorithme simple et puissant (CEDE) capable de gérer de grandes vagues d'impact sur les parois des réservoirs. Successivement, afin de valider les algorithmes mentionnés et pour une meilleure compréhension du phénomène de ballonnement, des essais expérimentaux ont été menés sur une largeur de 0,5 m. Il a été démontré que RANSE fournit des solutions plus précises que SWE pour les petites ou moyennes amplitudes d'excitation. En particulier dans cet article, il est prouvé que l'approximation de l'eau peu profonde peut être efficacement adoptée dans la profondeur du liquide au rapport de la largeur du réservoir = 0,15, lors de l'examen du problème de ballonnement. En augmentant le niveau d'eau à l'intérieur du réservoir, les résultats montrent SWE grand désaccord qualitatif et quantitatif avec les expériences. Néanmoins, dans le cas de l'excitation d'amplitude, quand les grandes vagues de rupture sont attendues, SWE fournissent une assez bonne estimation des vagues induites par le ballonnement.

Enfin, une simple configuration de déflecteur à l'intérieur du réservoir a été envisagée. Par l'analyse des résultats numériques, il a été observé que la présence d'un baffle verticale au

milieu du réservoir modifie considérablement la réponse du ballonnement par rapport à la configuration du baffle. Il produit un effet de saut, entraînant un faible grossissement des charges dynamiques sur les parois verticales par résonance, et une forte réduction des charges dynamiques dans la condition de résonance.

Abdallah Bouabidi et al [10] :

Ont étudié l'effet d'un baffle vertical sur le ballonnement de liquides dans un réservoir rectangulaire bidimensionnel. Le code de logiciel commercial "FLUENT" est utilisé comme plateforme de calcul dans cette étude basé sur les équations de Navier-Stokes pour le fluide visqueux, et incompressible.

La méthode du volume de fluide a été utilisée pour simuler un écoulement diphasique. Ils ont confirmé que la hauteur du déflecteur a un effet direct sur les résultats hydrodynamiques. En fait, lorsque la hauteur du baffle augmente, le ballonnement liquide est supprimé en raison de l'augmentation de l'effet de blocage de baffle, qui entraîne une viscosité et une dissipation d'énergie supplémentaires, également connu sous le nom d'humidité hydrodynamique.

Liming Dai et al [11] :

Ont étudié le comportement dynamique non linéaire du ballonnement liquide dans un support en tenant compte des effets de la viscosité et de la gravité du liquide sur le ballonnement non linéaire tridimensionnel du liquide dans un support soumis à des excitations périodiques. Lorsque l'amplitude de l'excitation externe est correctement faible, le ballonnement dans le support peut être périodique ou quasipériodique. Le ballonnement peut être stable et réduit lorsque la viscosité du liquide est suffisamment grande. L'amplitude de ballonnement augmente de façon non linéaire avec la réduction de l'accélération gravitationnelle. Le ballonnement du liquide peut être instable si l'accélération gravitationnelle atteint une certaine valeur faible. Cependant, l'effet de la variation de l'accélération gravitationnelle sur la fréquence du ballonnement est insignifiant selon les résultats de la recherche. Cependant, et selon les résultats obtenus la viscosité du liquide joue un rôle important dans le comportement dynamique non linéaire de ballonnement du liquide.

Dongya Zhao et al [12] :

Ont développé un code numérique basé sur la théorie du flux potentiel est développé pour prédire les réponses tridimensionnelles dans les réservoirs rectangulaires de GNL sous

excitation forcée. En utilisant ce code, l'élévation de la surface libre interne et les charges de ballonnement sur les réservoirs de liquide sont obtenues à la fois dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel. Dans le modèle mathématique, le potentiel d'accélération est résolu dans le calcul de la pression sur les réservoirs et le modèle d'amortissement artificiel est utilisé pour tenir compte de la dissipation d'énergie pendant le ballonnement. La méthode des éléments de frontières (BEM) est utilisée pour résoudre les problèmes. Les résultats du calcul numérique sont comparés aux résultats publiés pour déterminer l'efficacité et la précision du code numérique. Les propriétés de glissement dans des réservoirs rectangulaires partiellement remplis sous des excitations de translation et de rotation sont étudiées. Ils ont constaté que le ballonnement sous des excitations horizontales et rotatives ont des propriétés similaires. Pour un réservoir de liquide soumis à une excitation par rotation, les réponses au ballonnement, y compris l'amplitude et la phase, sont sensibles à l'emplacement du centre de rotation. De plus, des essais expérimentaux ont été menés pour analyser les effets visqueux du ballonnement et valider la faisabilité des modèles d'amortissement artificiel. Les résultats montrent que le modèle d'amortissement artificiel avec modification des conditions aux limites des murs a une meilleure applicabilité pour simuler le ballonnement sous différents niveaux de remplissage et excitations.

Vaibhav Singala et al [13] :

Ont étudié le ballonnement d'un réservoir de carburant partiellement rempli de kérosène a été simulée dans en utilisant le modèle multiphasique Volume de Fluide (VOF). A l'aide des simulations ils ont comparé l'amplitude du ballonnement dans le réservoir avec et sans l'utilisation des baffles. L'analyse CFD a été réalisée par un Logiciel commercial a volume fini ANSYS FLUENT 12.0. Le réservoir a été mis en mouvement avec une accélération de $9,81 \text{ m/s}^2$ dans la direction + X pendant 1,5 seconde. Le carburant était également sous l'action de la gravité dans la direction -Z. Il a été constaté à partir des simulations transitoires CFD de l'interface liquide de kérosène que le ballonnement dans le réservoir de carburant était significativement réduit avec l'introduction de baffles dans le réservoir. L'effet d'amortissement des baffles était clairement visible dans les résultats obtenus.

Haitao Zhang et Beibei Sun [14] :

Ont développé une méthode de différence finie pour l'analyse des ondes de ballonnement non linéaires 2D, et utilisée dans les réservoirs par la théorie du flux potentiel.

Après σ -transformation, le domaine fluide est transformé en un rectangle, et un schéma prédicteur-correcteur pour la surface libre est utilisé dans l'itération du temps; alors l'équation directrice et les conditions aux limites sont approximativement linéarisées et résolues à chaque pas de temps. Les résultats ont été comparés avec des solutions analytiques et numériques dans d'autres littératures, qui démontrent l'efficacité et la précision de cette méthode numérique. Les antécédents de l'élévation de la surface libre et des forces de clapot dans la première et la troisième situation de résonance sont également présentés et analysés.

Le phénomène de battement de ballottement dans le réservoir sous différents aspects et sous la même excitation ont été simulés numériquement par cette méthode. Les résultats obtenus montrent que le changement du rapport d'aspect produit un effet beaucoup plus fort dans les systèmes de ballottement à faible allongement. De plus, la non-linéarité de ballottement diminue la force de ballottement. L'effet du facteur non linéaire dépend de la violence du ballottement.

X Zhang et al [15] :

Dans cet article, une simulation numérique de l'écoulement en surface libre dans un conteneur est présentée en utilisant un auto-développé code FV en maille mobile. Dans le premier cas de ballottement, les parois du conteneur sont considérées comme rigides et le profil de surface libre du fluide a été capturé. L'amplitude calculée correspond à la simulation dans la littérature. Dans le deuxième cas de ballottement, les parois latérales sont traitées comme des poutres élastiques et le fluide considéré comme visqueux. Un problème FSI est résolu en couplant avec un code FE. La réponse de la structure au mouvement du fluide est étudiée et la fréquence critique d'agitation liée à une grande déformation. La troisième simulation est un écoulement de surface libre visqueux devant un obstacle submergé dans un réservoir. Le champ d'écoulement montre à la fois un effet non-visible tel que la dispersion des ondes, et un effet visqueux tel que la séparation des bulles. Toutes ces simulations démontrent la capacité et l'efficacité de cette méthode numérique pour modéliser à la fois les problèmes de surface libre et de FSI. La fréquence critique qui conduit à une grande déformation des parois du réservoir. Une autre simulation numérique implique le passage de la surface libre comme un obstacle submergé placé dans le réservoir pour montrer la séparation du flux et les tourbillons. Tous ces cas démontrent la capacité de cette méthode numérique à modéliser des problèmes pratiques complexes.

I.7 Conclusion:

Après les définitions de grandes lignes et les recherches bibliographique sur les différents travaux réalisés sur ce thème. Tout ce travail a été fait pour pouvoir aborder le modèle physique étudié, qui est présenté dans le chapitre suivant.

Chapitre II

Présentation du problème

I.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré à la présentation du modèle physique, les équations qui régissent le phénomène de ballonnement à surface libre en se basant sur la méthode VOF utilisée sous Fluent, ainsi que le modèle expérimental réalisé et étudié.

II.2 Géométrie et positionnement de problème

II.2.1 Réservoir rectangulaire

On considère un fluide à surface libre, incompressible et tridimensionnel dans un réservoir de géométrie rectangulaire de longueur L , de largeur l et de hauteur H , h est la hauteur de fluide à l'intérieur de réservoir. Le fluide est soumis à une excitation horizontale $\dot{X}(t) = A \sin(\omega t)$, les coordonnées utilisées sont des coordonnées cartésiennes (x, y, z) .

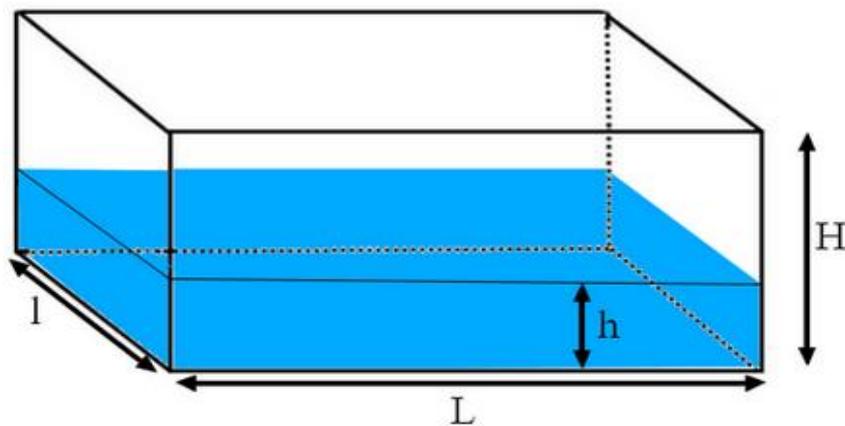


Figure (II.1) : La géométrie de réservoir rectangulaire présenté en 3D.

II.2.1 Réservoir cylindrique

Dans la deuxième configuration, on considère un fluide à surface libre, incompressible et tridimensionnel dans un réservoir de géométrie cylindrique de hauteur H , de diamètre D , h est la hauteur de fluide à l'intérieur de réservoir. Le fluide est soumis à une excitation horizontale $\dot{X}(t) = A \sin(\omega t)$, les coordonnées utilisées sont des coordonnées des coordonnées cartésiennes (x, y, z) .

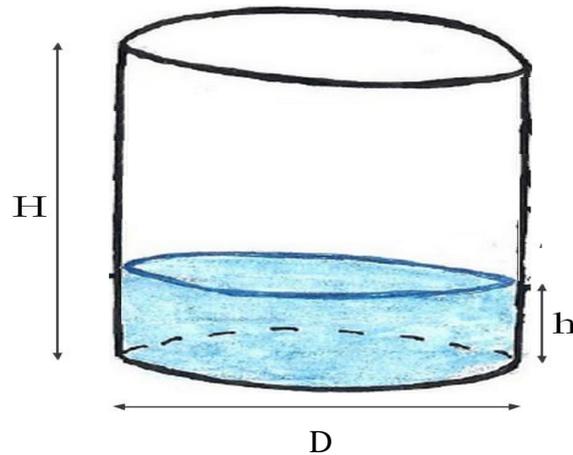


Figure (II.2) : La géométrie de réservoir cylindrique présenté en 3D.

II.3 Formulation mathématique

II.3.1 Equation de continuité

L'équation de continuité est utilisée pour décrire le transport de la quantité 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 « t » élémentaire.

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (\text{II.1})$$

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

Cette équation se réduit pour un fluide incompressible à :

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (\text{II.2})$$

II.3.2 Equations de quantité de mouvement

L'équation de quantité de mouvement décrit la relation entre le tenseur des taux de déformation et le tenseur des contraintes, et s'écrit comme suit :

$$\rho \frac{D\mathbf{V}}{Dt} = -\mathbf{grad}(P) + \mathit{div}\boldsymbol{\tau} + \mathbf{F}_{SF} \quad (\text{II.3})$$

Dans le cas d'un fluide Newtonien : $\boldsymbol{\tau} = 2\mu\mathbf{D}$

II.4 Méthode de volume de fluide (VOF)

La méthode de volume de fluide est utilisée en mécanique des fluides numériques, elle repose sur le fait que deux ou plusieurs fluides (ou phases) qui ne s'interpénètrent pas. Cette

méthode est particulièrement adaptée dans le cas à interfaces fortement déformées, puisque elle permet de suivre la position de l'interface dans un maillage fixe ou en mouvement du domaine dans lequel se propage l'interface.

L'idée fondatrice de la méthode VOF est d'utiliser une fonction discrète liée au maillage et qui représente la fraction volumique d'un fluide dans chaque volume de contrôle ; le taux de présence, notée α_k , représente la fraction volumique d'un fluide dans chaque volume de contrôle. Si elle vaut 0 ou 1, le volume ne contient qu'un seul des deux fluides. Par contre si sa valeur est comprise entre ces deux bornes ; le volume contient un mélange diphasique, donc l'interface est présente.

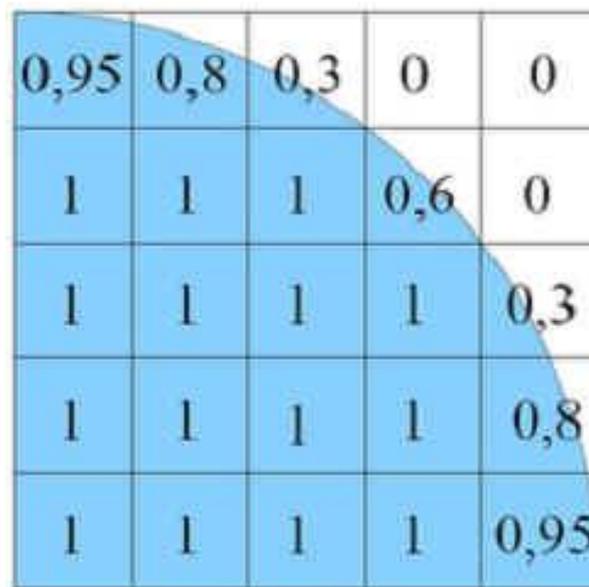


Figure (II. 3) : Représentation de taux de présence dans les volumes de contrôle.

II.4.1 Equation de taux de présence

Le suivi de l'interface entre les phases est accompli par la solution d'une équation de continuité pour la fraction volumique d'une ou plusieurs phases. Présenté par l'équation d'advection :

$$\frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla \alpha_k = 0 \quad (\text{II.4})$$

α_k Représente La fraction volumique d'un fluide dans chaque maille, et varie entre 0 et 1 pour un fluide considéré.

II.4.2 Propriétés physiques du fluide dans un volume de contrôle

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

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

$$\rho = \sum \alpha_k \rho_k \quad (\text{II.5})$$

La viscosité dynamique du mélange, en utilisant aussi les taux de présence comme coefficient, s'écrit comme suit :

$$\mu = \frac{\sum \alpha_k \rho_k \mu_k}{\sum \alpha_k \rho_k} \quad (\text{II.6})$$

II.4.3 Equation de conservation de quantité de mouvement

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

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu(\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T)] + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{SF} \quad (\text{II.7})$$

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 de phases et les effets d'adhérence a la paroi.

II.4.4 Tension de surface

Pour le cas où la tension de surface est considérée comme constante le long de la surface et ou seules les forces normales à l'interface sont considérées, montre que la chute de pression, appelée pression capillaire, à travers la surface dépend de coefficient de surface σ , et de la courbure de surface mesuré par deux rayon dans les directions orthogonales R_1 et R_2 :

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

La Force à la surface 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 de coefficient de surface σ :

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

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

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

Avec :

α_2 : Fraction volumique de l'eau

Et :

$$k = -(\nabla \mathbf{n}) \quad (\text{II.11})$$

II.4.5 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 dite dynamique entraîne l'ajustement de la courbure de la surface est calculé comme suit :

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_w \cos \theta_w + \mathbf{t}_w \sin \theta_t \quad (\text{II.12})$$

Où \mathbf{n}_w et \mathbf{t}_w sont respectivement les vecteurs unitaires normale et tangentiel à la paroi.

Et θ_w est l'angle entre la paroi et la tangente à l'interface de la paroi.

II.4.6 Interpolation près de l'interface sous fluent

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

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

La figure ci-dessous montre la forme d'interface, avec les méthodes de reconstruction « Georeconstruction » et « Donor-acceptor » de Fluent.

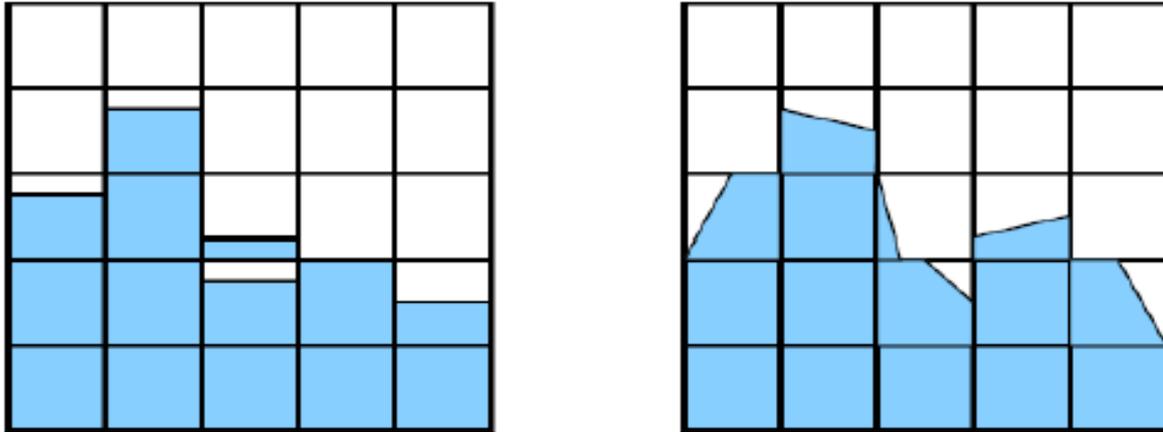


Figure (II.4) : Representation des techniques de reconstruction d'interface.

II.4.6 Le schéma explicite sous Fluent

L'équation de la fraction volumique ne sera pas résolue pour la phase primaire ; cette dernière sera calculée en fonction de la contrainte suivante :

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1 \quad (\text{II.13})$$

L'équation de la fraction volumique peut être résolue soit par une discrétisation temporelle implicite ou explicite. Pour cette étude la résolution par la discrétisation explicite est la plus adéquate. Les schémas de discrétisation disponibles avec le schéma VOF explicite sont : First Order Upwind, Second Order Upwind, CICSAM, HRIC modifier et QUICK.

$$\frac{\alpha_k^{n+1} + \rho_k^{n+1} - \alpha_k^n \rho_k^n}{\Delta t} v + \sum_f (\rho_k U_f^n \alpha_{k,f}^n) = [\sum_{\alpha=1}^n (\dot{m}_{p\alpha} - \dot{m}_{\alpha p}) + S_{\alpha k}] v \quad (\text{II.14})$$

Ou

- $n+1$: indice pour le nouveau pas de temps (actuel).
- n : indice pour le pas de temps précédent.
- $\alpha_{k,f}$: la valeur de la fraction volumique, calculée à partir de First Order Upwind, Second Order Upwind, ou bien CICSAM, HRIC modifié et QUICK.
- v : le volume de la cellule.
- U_f : le flux de volume, basé sur la vitesse normale.

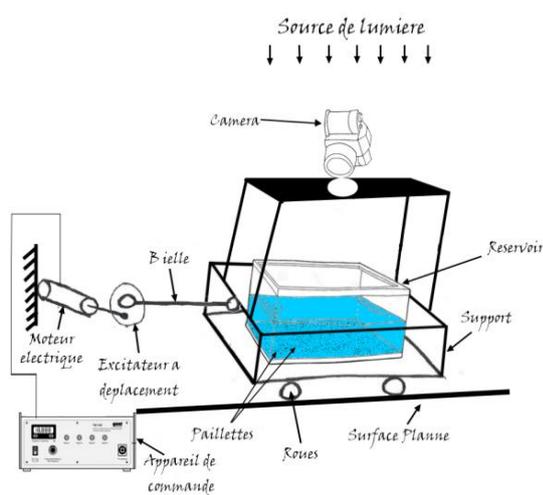
II.5 Modèle expérimental

II.5.1 Mise en place du banc d'essai

II.5.1.1 Réservoir rectangulaire

Réalisation d'un réservoir rectangulaire, avec des dimensions de longueur $L=0,22\text{m}$, largeur $l=0,18\text{m}$, et de hauteur $H=0,08\text{m}$. Les quatre parois verticales sont conçus en plexiglas, et la base est en verre, deux plaques de verre très fines entre ces deux plaques un couche de particules, une caméra placé en haut du réservoir d'une hauteur h_c .

Le réservoir est soumis à une excitation horizontale générée par un exciteur, ce réservoir est rempli de fluide à une hauteur $h=0,02\text{m}$, une fois l'excitateur est en marche, le phénomène de ballotement est apparu pour des différentes fréquences allant de 1 jusqu'à 2Hz, et d'amplitude $A=0,006\text{m}$.



A. Schématisation



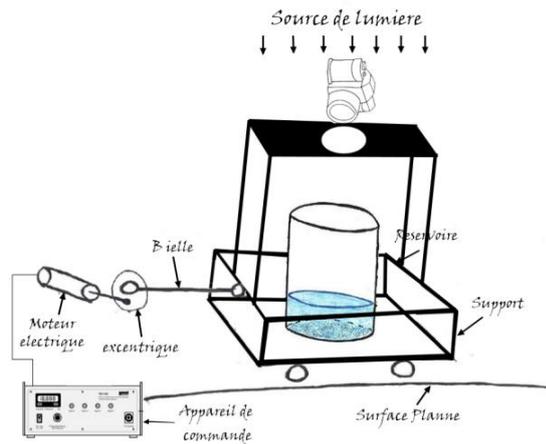
B. Image réelle

Figure (II.5) : Représentation de banc d'essai pour le réservoir rectangulaire.

II.5.1.2 Réservoir cylindrique

Réalisation d'un réservoir cylindrique, avec des dimensions de diamètre $D=0,24\text{m}$, et de hauteur $H=0,075\text{m}$. La surface latérale de ce réservoir est en PVC, et la base est en verre, deux plaques de verre très fines entre ces deux plaques un couche de particules, une caméra placé en haut du réservoir d'une hauteur h_c .

Le réservoir est soumis à une excitation horizontale générée par un exciteur, ce réservoir est à moitié rempli de fluide à une hauteur de $h=0,02\text{m}$, une fois l'excitateur est en marche, le phénomène de ballotement est apparu pour des différentes fréquences allant de 1 jusqu'à 2Hz, et d'amplitude $A=0,006\text{m}$.



A. Schématisation



B. Image réelle

Figure (II.6) : Représentation de banc d'essai pour le réservoir cylindrique.

II.5.2 Image de particules vélocimétrie (PIV)

La PIV, ou vélocimétrie par images de particules, est une technique optique dédiée à la mesure de champs de vecteurs vitesse. De manière générale, le principe repose sur la prise de deux images successives (A et B) d'un même plan que l'on souhaite étudier. Ce dernier estensemencé avec des traceurs (particules), et son concept est de déterminer le déplacement d'une population donnée de particules, entre les deux prises de vue. Il est obtenu par traitement mathématique (le plus souvent de type corrélation) entre les images A et B. Les déplacements obtenus dans l'image sont alors convertis en vecteurs vitesses.

II.5.3 Acquisition des images et traitement

Un enregistrement de vidéo de la surface étudiée est fait, en utilisant une caméra, montée sur le dispositif, à une hauteur h_c , perpendiculaire à la surface libre, et centrée. La vidéo sera ensuite transférée vers un ordinateur, et découpée en images à des instants précis, puis l'enregistrées avec le format qui convient; le traitement de ces images se fait sous Matlab (grâce à un code de calcul).

II.5.3.1 DPIV (Vélocimétrie par image numérique des particules)

DPIV est une extension sous Matlab, qui permet d'obtenir les vecteurs des particules ensemencées. Par un système de calibration on mesure la distance réelle en cm de notre réservoir divisé par le nombre de pixels de la caméra utilisé afin de définir notre domaine. Ce domaine est ensuite découpé en mailles de façon très précise qui permet de suivre les particules.

La corrélation se fait entre l'image A à l'instant (t) qu'on appelle image de référence, avec une autre image B a l'instant (t+ Δt), qui permet de transférer le déplacement des particules en champs de vecteurs qui seront ensuite enregistrés dans un fichier.

II.5.3.2 PIVmat

Le toolbox de PIVmat contient un ensemble de fonctions de lignes de commande permettant d'importer, de post-traiter et d'analyser les champs de vecteurs a 2 et 3 composantes de DPIV, suivant les caractéristique principales suivantes :

- Importer des champs de vecteurs à partir de DPIV, et chargé le fichier.
- Affichage des vecteurs vitesses.
- Définir la hauteur de la surface libre en introduisant h_0 la hauteur entre le fond de réservoir et la surface libre, le h_c la hauteur entre le fond de réservoir et la caméra, n qui est l'indice de réfraction de fluide utilisé, et les coordonnées de centre de l'image utilisée.

II.6 Conclusion

Après avoir cerné les différentes équations qui décrivent le ballonnement à surface libre, le modèle adéquat utilisé pour le calcul de ce phénomène, et avoir expliqué l'analyse de PIV ainsi que son principe, une simulation numérique du problème est décrite dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Simulation numérique

III.1 Introduction :

La simulation numérique occupe une place primordiale, offre un très large éventail de fonctionnalités pour modéliser les phénomènes de mécanique des fluides, et permet de faire moins d'hypothèses, ainsi de traiter des problèmes relativement complexes. De plus ; elle peut être moins coûteuse qu'une approche expérimentale.

Ce chapitre est pour présenter les logiciels utilisés pour cette simulation, ainsi la méthode de discrétisation utilisée (volumes finis).

III.2 La présentation des logiciels utilisés

Le logiciel Gambit est un mailleur 2D/3D; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il génère des fichiers *.msh pour Fluent. Fluent est un logiciel qui permet de résoudre et simuler des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques par la méthode des volumes finis.

Gambit regroupe trois fonctions :

- Définition de la géométrie du problème,
- Le maillage et sa vérification,
- La définition des frontières (des conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs.

III.2.1 Maillage sous Gambit

III.2.1.1 Démarrage de Gambit

Le chemin de l'application de Gambit est le suivant :

: \Fluent.Inc\gambit2.3.16\ntx86\gambit.exe



Figure (III.1) : Lancement de Gambit.

III.2.1.2 Construction de la géométrie

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

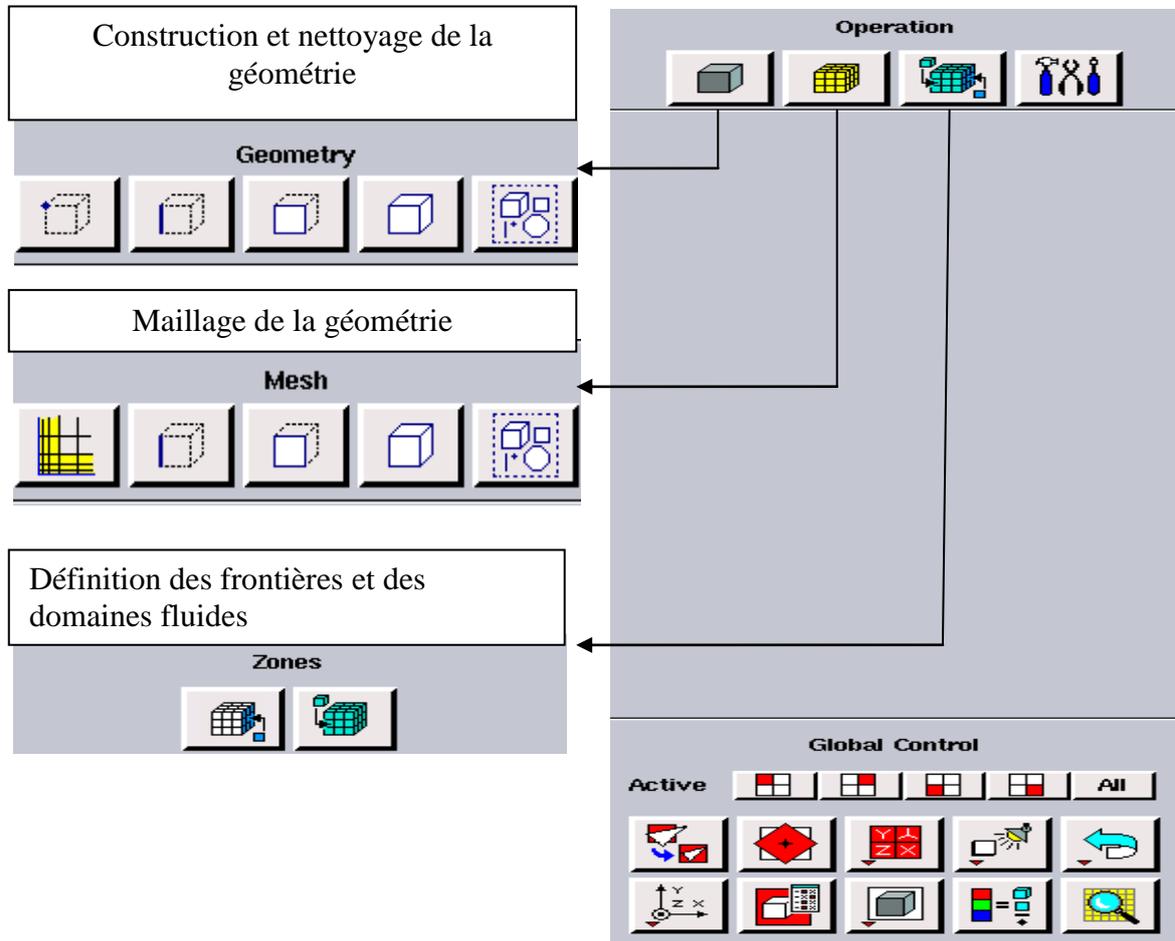


Figure (III.2) : Les étapes principales de construction de la géométrie.

III.2.1.3 Le maillage

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. Ce menu permet de mailler en particulier une ligne de la géométrie, à savoir disposer les nœuds avec des conditions particulières (utilisation d'un ratio pour modifier la pondération du maillage, application de formes différentes de maillage). Il existe plusieurs types de choix de maillage :

- **Maillage structuré (quadra/hexa)**

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc, il est Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent. Par contre il est Difficile à le générer et à obtenir une bonne qualité de maillage dans le cas d'une géométrie complexe.

- **Maillage non structuré (tri/tétra)**

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition, il peut être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments.

- **Maillage hybride**

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

III.2.2 Simulation sous fluent

ANSYS Fluent est un code de calcul dans la CFD 'Computational Fluid Dynamics' qui modélise par la méthode des volumes finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes. Ce solveur offre toutes les capacités physiques nécessaires pour la modélisation des écoulements fluides, des turbulences, des transferts de chaleur et des réactions chimiques.

Des modèles spécifiques sont proposés pour modéliser les phénomènes de combustion interne, d'aéroacoustique ainsi que les turbomachines et les systèmes multiphasiques, ce qui nous a amené à choisir FLUENT comme solveur pour la problématique traitée.

III.2.2.1 Démarrage de fluent

Lancer Fluent à l'aide d'un raccourci dans le menu démarrer, choisir la version de Fluent à utiliser, après avoir lancé Fluent et importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit **File**→**Read**→**mesh**. Fluent donne la possibilité de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs **mesh**→**check**, Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème **mesh**→**Scale**.

L'option **Solver** permet de choisir le type de solveur le plus approprié au problème traité, ainsi le régime d'écoulement stationnaire ou instationnaire. Après **Solver**, vient **Models** qui permet de choisir le modèle qui convient au problème. Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir

de la bibliothèque des données de Fluent **Materials**, avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence **Operating Conditions**. Ensuite, il faut choisir les conditions aux limites, et fixer les valeurs des conditions aux limites.

L'étape qui vient permet d'initialisé le calcul de problème traité **Solution Initialization**, puis choisir le nombre des itérations et commencé le calcul **Run Calculation**→**Calculate**.

III.3 Présentation des deux géométries étudiées

III.3.1 Réservoir rectangulaire

La première géométrie correspond à un réservoir rectangulaire 3D de dimensions $L=220\text{mm}$, largeur $l=180$, et de hauteur $H=60\text{mm}$. Le domaine d'étude est réparti en deux domaines:

1ere domaine : fluide.

2eme domaine : air.

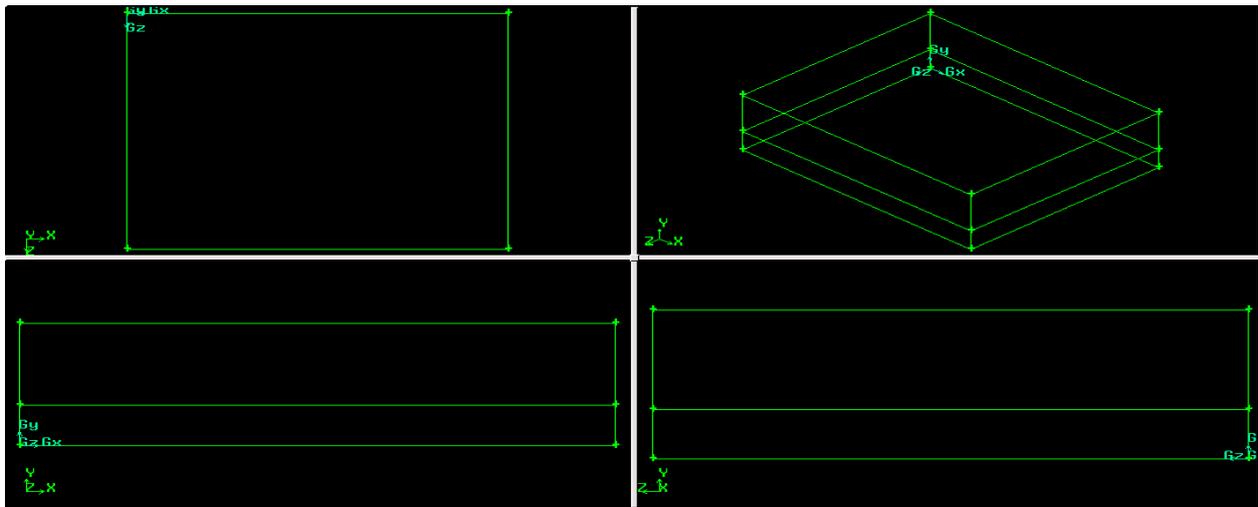


Figure (III.3) : La géométrie de réservoir rectangulaire sous gambit.

III.3.2 Réservoir cylindrique

Cette deuxième géométrie correspond à un réservoir cylindrique 3D de hauteur $H=60\text{mm}$, et de diamètre $D=120\text{mm}$. Le domaine d'étude est divisé en 2 :

1ere domaine : fluide.

2eme domaine : air.

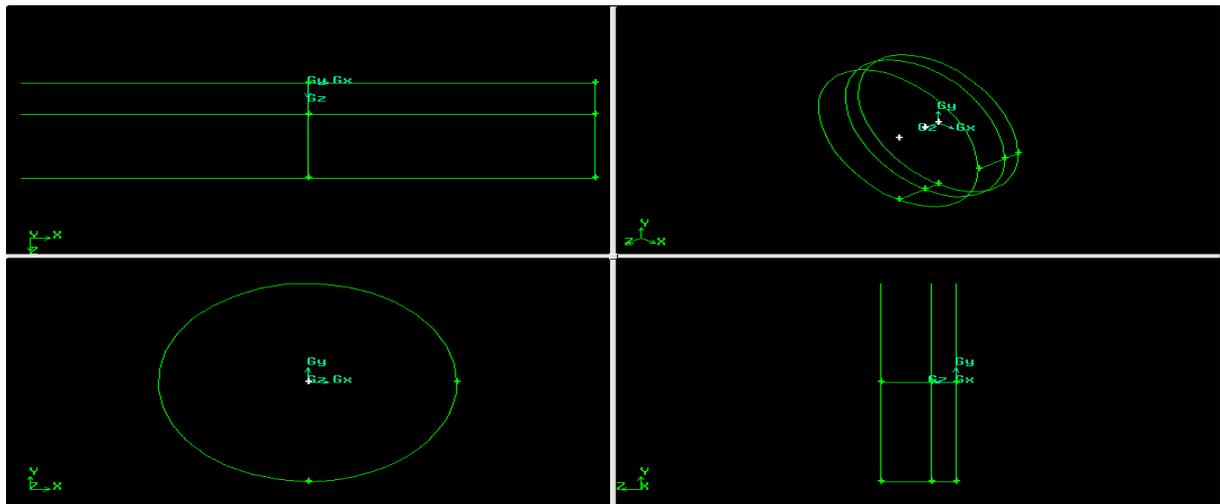


Figure (III.4) : La géométrie de réservoir cylindrique sous gambit.

III.3.3 Réalisation du maillage :

- Réalisation de maillage pour le réservoir rectangulaire

Domaine	Mailles
Hauteur liquide	20
Hauteur air	40
Longueur	55
Largeur	45

Tableau (III.1) : Le nombre de mailles utilisé dans le cas d'un réservoir rectangulaire.

- **Réalisation de maillage pour le réservoir cylindrique**

Domaine	Mailles
Hauteur liquide	20
Hauteur air	40
Grand arc	141
Petit arc	47

Tableau (III.2) : Le nombre de mailles utilisé dans le cas d'un réservoir cylindrique.

III.3.4 Conditions aux limites :

- **Réservoir rectangulaire**

Zones	Types
Fond	wall
Interface	interior
haut	Pressur-outlet
Parois latérales (liquide/air)	wall

Tableau (III.3): les conditions aux limites utilisées dans le cas de réservoir rectangulaire.

- **Réservoir cylindrique**

Zones	Types
Fond	wall
Interface	interior
haut	Pressure-outlet
Paroi latérale liquide	wall
Paroi latérale air	wall

Tableau (III.4): les conditions aux limites utilisées dans le cas de réservoir cylindrique.

III.4 Simulation sous Fluent

Une fois la géométrie est prête, vient l'étape de la résolution numérique de problème par le solveur Fluent. Le calcul passe par les étapes suivantes :

- 1 Démarrer la version Fluent 3ddp.
 - 2 Importer le maillage **File**→**Read**→**mesh**.
 - 3 Définir le modèle et le Solveur utilisé.
 - 4 Choisir le modèle multiphasique de Volume de fluide.
 - 5 Définir les caractéristiques des fluides utilisés, qui sont chargé a partir de la bibliothèque de données sous fluent, **Materials**→**fluid**→**Creat/Edit**.
- **Caractéristiques de fluide Newtonien (eau)**

Densité [kg/m^3]	1000
Viscosité [$kg/m s$]	0.001

Tableau (III.5) : Les propriétés physiques du fluide Newtonien (eau).

- **Caractéristiques de fluide non-Newtonien (polyox) qui est décrit par le modèle de Herschel-Bulkley**

Consistance $K[kg/m s]$	0,578
Contrainte seuil τ [Pa]	1,441
Indice de puissance $n [-]$	0,5593

Tableau (III.6) : Les propriétés physiques du fluide non-Newtonien (polyox).

6 Spécification des phases :

Phase	Matériaux
Phase 1	Air
Phase 2	Fluide (eau/Polyox)

Tableau (III.7) : Tableau récapitulatif de classification des phases.

7 Définir les conditions aux limites : **Define**→**boundary conditions**.

8 Importation de l'UDF (User Define Function)

L'UDF est un programme défini, écrit dans un langage de programmation C++, ensuite compilé sous Fluent afin de définir des fonctions variables, que le logiciel ne possède pas par défaut.

9 Définition des zones mobiles pour cela,

Define→**Dynamic**→**parameters** : sélectionner dynamic mesh pour rendre disponible le menu Zone. Alors ;

Define→**Dynamic mesh**→**Zone** : permet de définir le type de zone dynamique, ensuite choisir toutes les zones dynamiques dans zones names et le centre de gravité.

10 Initialiser la solution : **Solution**→**initialize**

→Patch : choisir air comme première phase, et le fluide comme deuxième phase.

III.5 Conclusion :

Ce chapitre, est pour mettre en évidence le phénomène de ballotement sous Fluent en choisissant la méthode de volume de fluide qui permet de visualiser les problèmes à surface libre.

Chapitre IV

Résultats et discussion

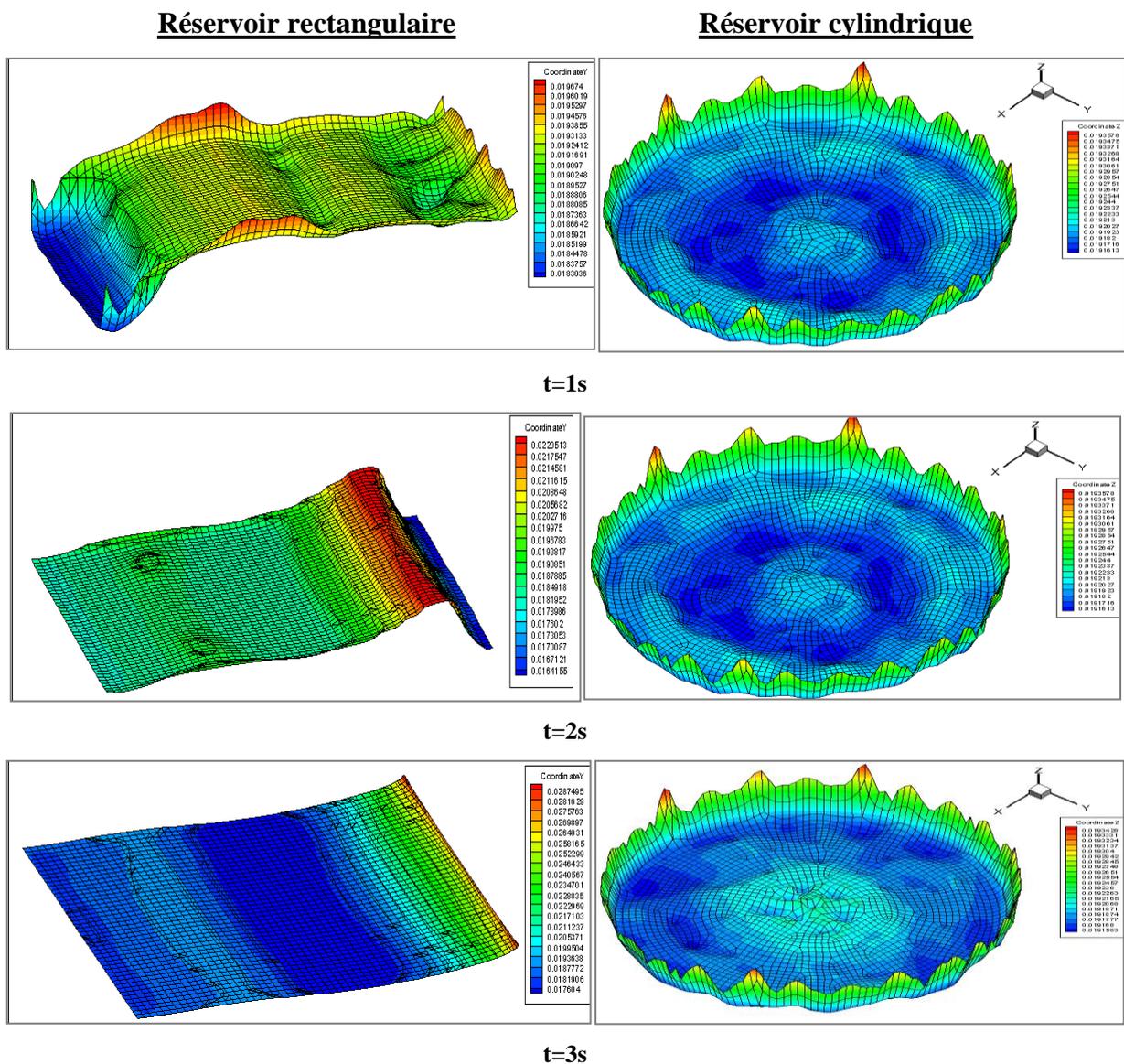
IV.1 Introduction

Ce chapitre, consiste à présenter les résultats de ballottement obtenus à partir des simulations numériques, et des résultats expérimentaux. Pour deux géométries différentes, et deux fluides de nature différents.

La première partie de ce chapitre est consacrée sur l'effet de la forme du réservoir sur le ballottement, la deuxième partie est sur l'effet de l'excitation en faisant varier les fréquences, et la dernière partie est consacrée sur l'effet de la nature du fluide sur le ballottement.

IV.2 Effet de la forme du réservoir sur le ballottement

IV.2.1 Fluide Newtonien



Figure(IV.1) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de la forme du réservoir sur le ballottement pour le cas d'un fluide Newtonien a une fréquence $f=1\text{Hz}$, et les temps $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$.

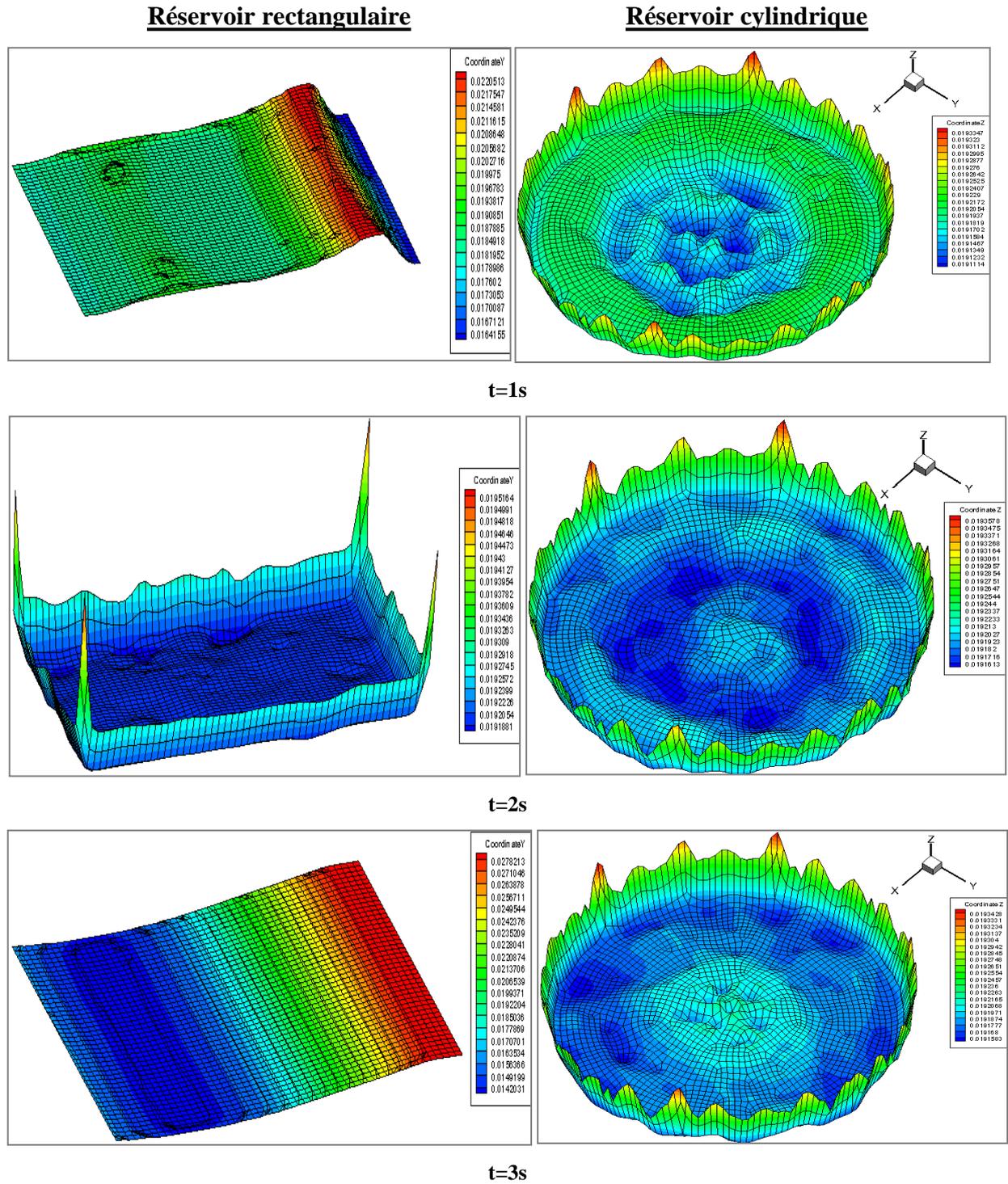


Figure (IV.2) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de la forme du réservoir sur le ballottement pour le cas d'un fluide Newtonien a une fréquence $f_r=1,5\text{Hz}$, et les temps $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$.

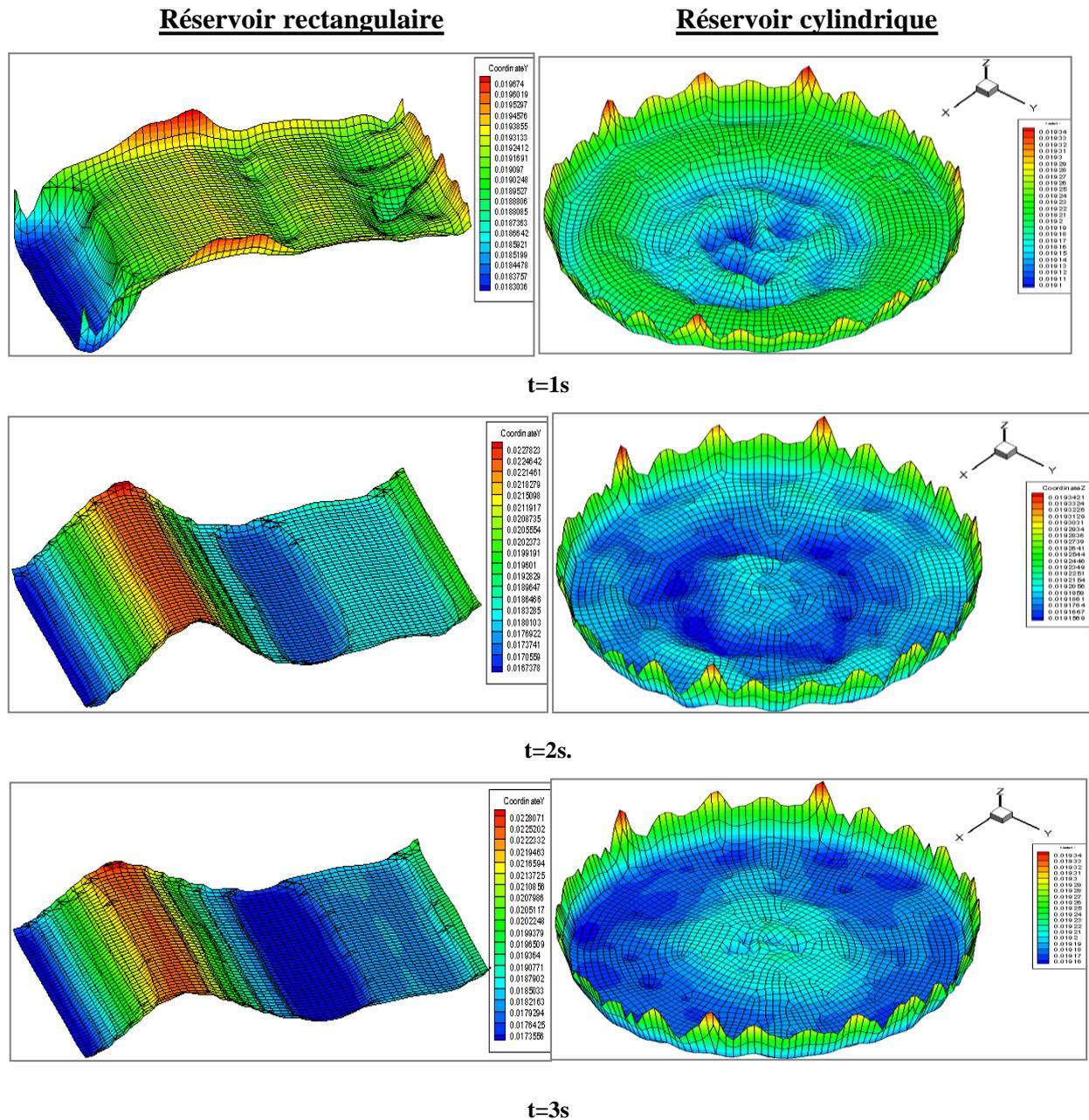


Figure (IV. 3) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent effet de la forme du réservoir sur le ballonnement pour le cas d'un fluide Newtonien a une fréquence $f_r=2Hz$, et les temps $t=1s$, $t=2s$ et $t=3s$.

Observation

Une comparaison a été faite pour le fluide Newtonien (qui est l'eau dans cette étude) dans deux géométries différentes (rectangulaire et cylindrique), en fixant la fréquence à des temps allant de 1s à 3s, avec une hauteur initiale de fluide $h= 0,02$ m pour les deux formes.

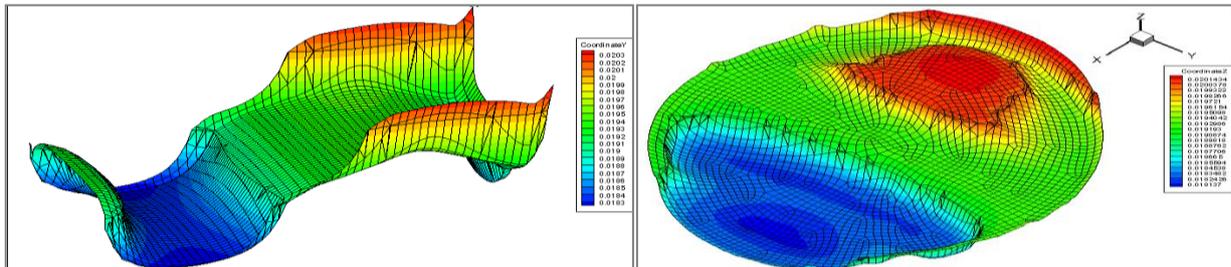
Pour le cas rectangulaire, apparition d'un ballonnement quasiment linéaire, pour $f_r=1,5Hz$ a $t=2s$ adhérence de fluide sur les parois ainsi sur les angles du réservoir qui sont des angles vifs, ce qui montre que le ballonnement est devenu non linéaire.

Pour le cas cylindrique le ballottement est non linéaire, apparition des modes de ballottement.

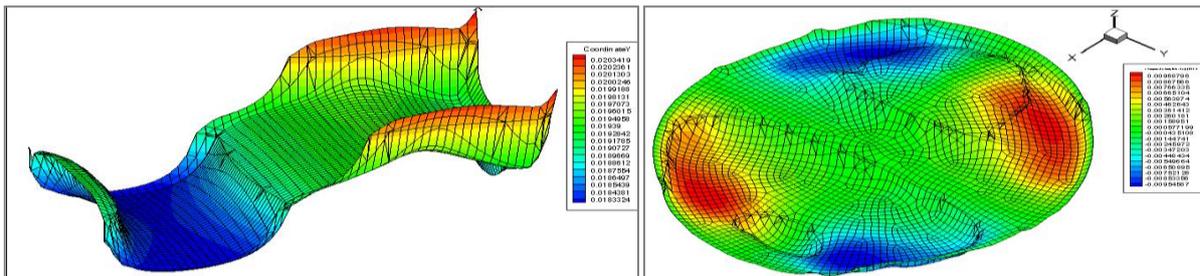
IV.2.2 Fluide non Newtonien

Réservoir rectangulaire

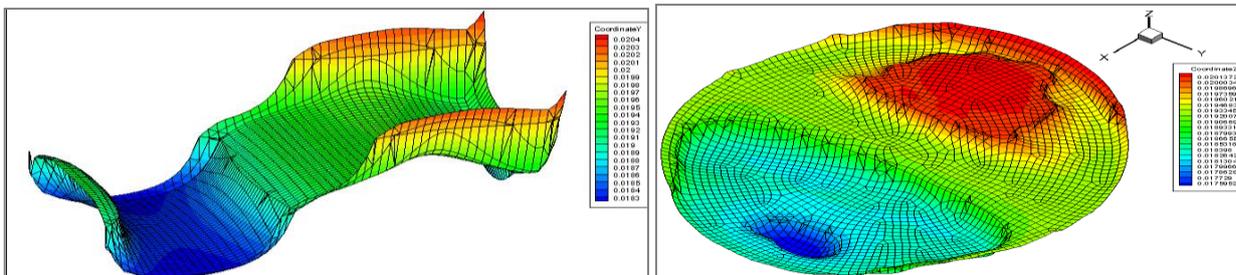
Réservoir cylindrique



t=1s



t=2s



t=3s

Figure (IV.4) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent effet de la forme du réservoir sur le ballottement pour le cas d'un fluide non Newtonien a une fréquence $f_r=1\text{Hz}$, et les temps $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$.

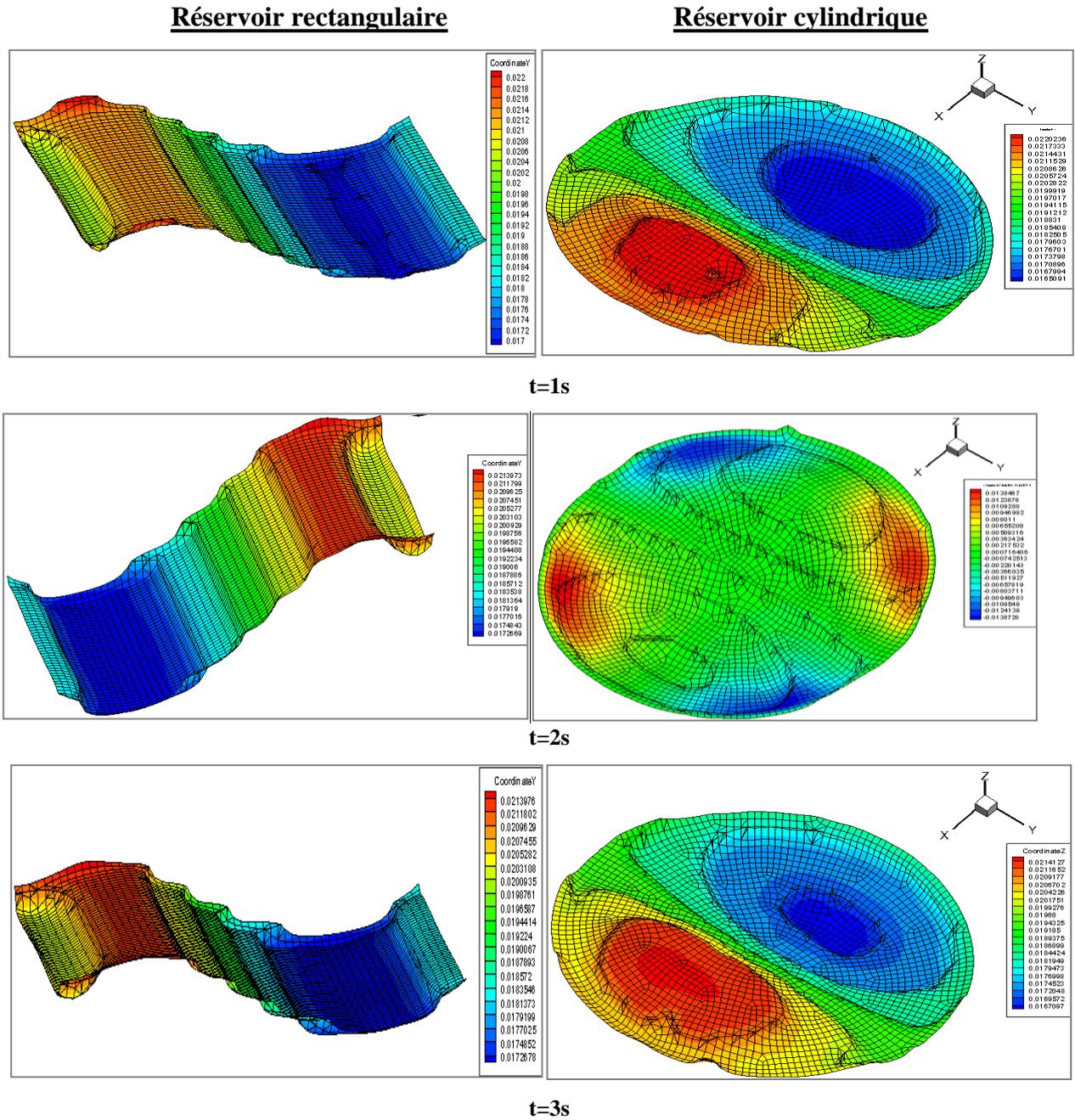


Figure (IV.5) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent effet de la forme du réservoir sur le ballotement pour le cas d'un fluide non Newtonien a une fréquence $f=1,5\text{Hz}$, et les temps $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$.

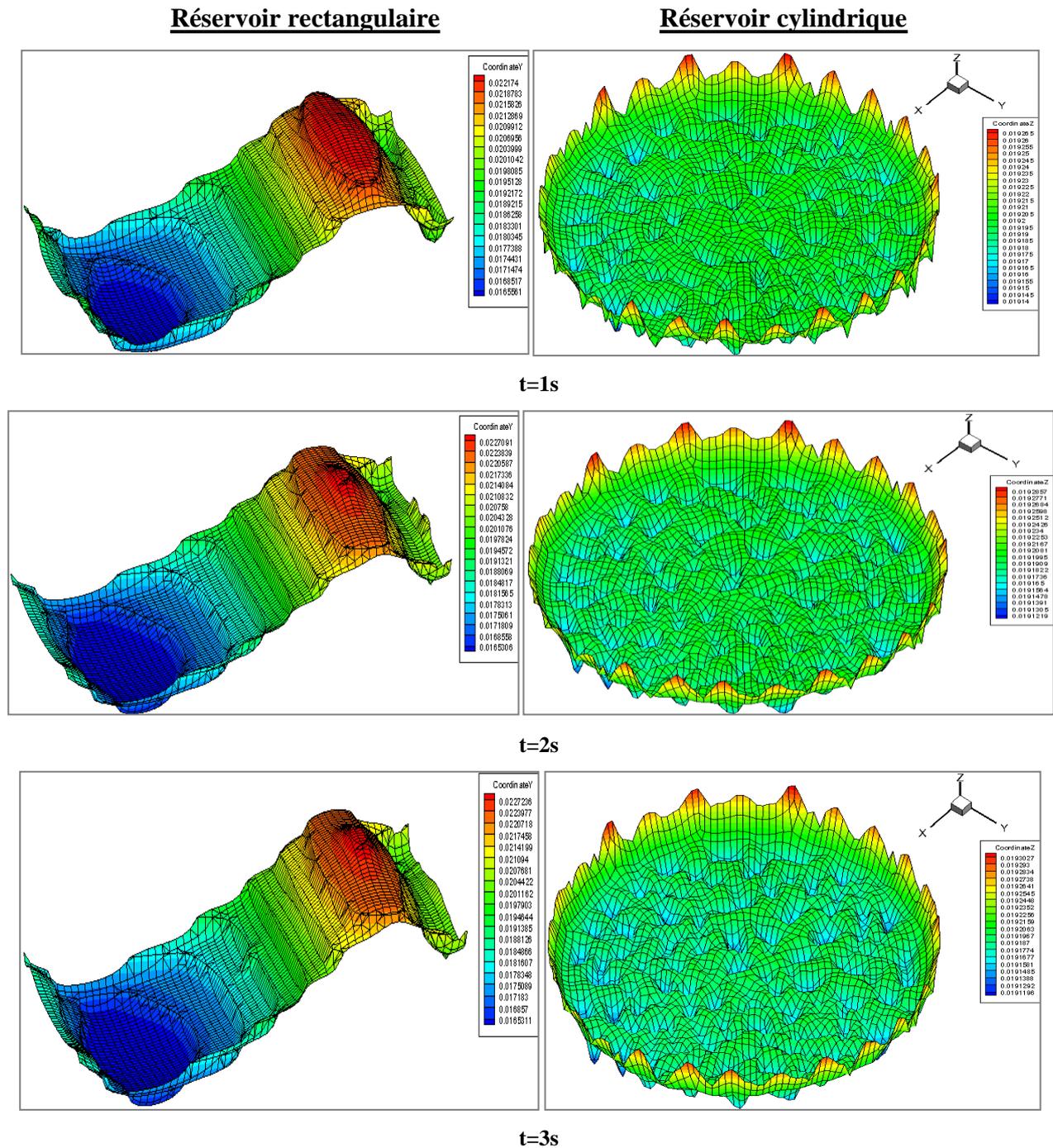


Figure (IV.6) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent effet de la forme du réservoir sur le ballottement pour le cas d'un fluide non Newtonien a une fréquence $fr=2\text{Hz}$, et les temps $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$.

Observation

Une comparaison a été faite pour le fluide Newtonien (qui est le Polyox dans ce cas) dans deux géométries différentes (rectangulaire et cylindrique), en fixant la fréquence à des temps allant de 1s à 3s, avec une hauteur initiale de fluide $h= 0,02\text{ m}$ pour les deux formes.

Pour les deux cas de géométries apparition de ballonnement non linéaire avec des formes de modes antisymétriques, en augmentant la fréquence ($fr=2\text{Hz}$) le ballonnement du réservoir cylindrique devient non linéaire, apparition de plusieurs modes.

Il a été observé que la forme du réservoir à un impacte très important sur le phénomène du ballonnement, et les modes de ballonnement sont affectée par la géométrie du réservoir, et que le ballonnement dans le cas du réservoir cylindrique est le plus favorisé.

IV.4.3 Effet de l'excitation sur le ballonnement

IV.4.3.1 Cas réservoir rectangulaire

- Cas de fluide Newtonien

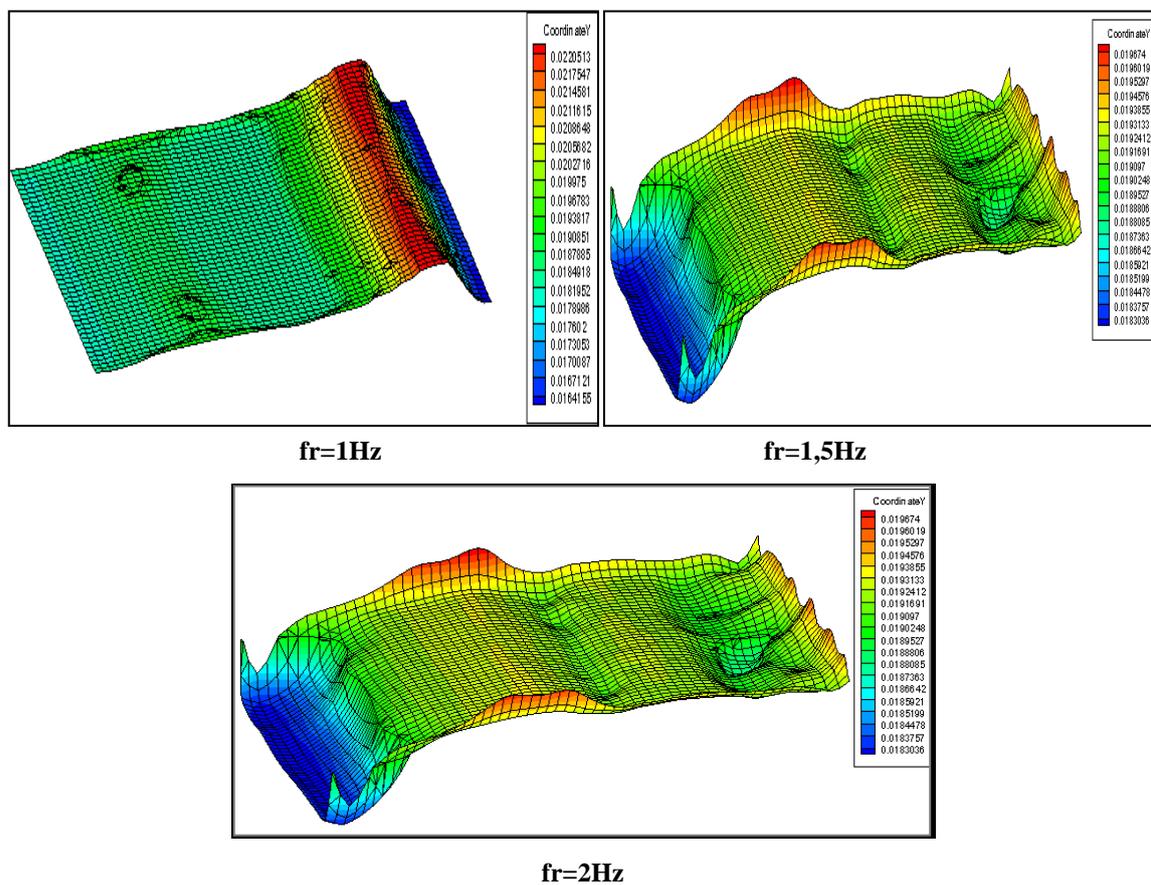


Figure (IV.7) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide Newtonien pour des fréquences $fr=1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=1\text{s}$.

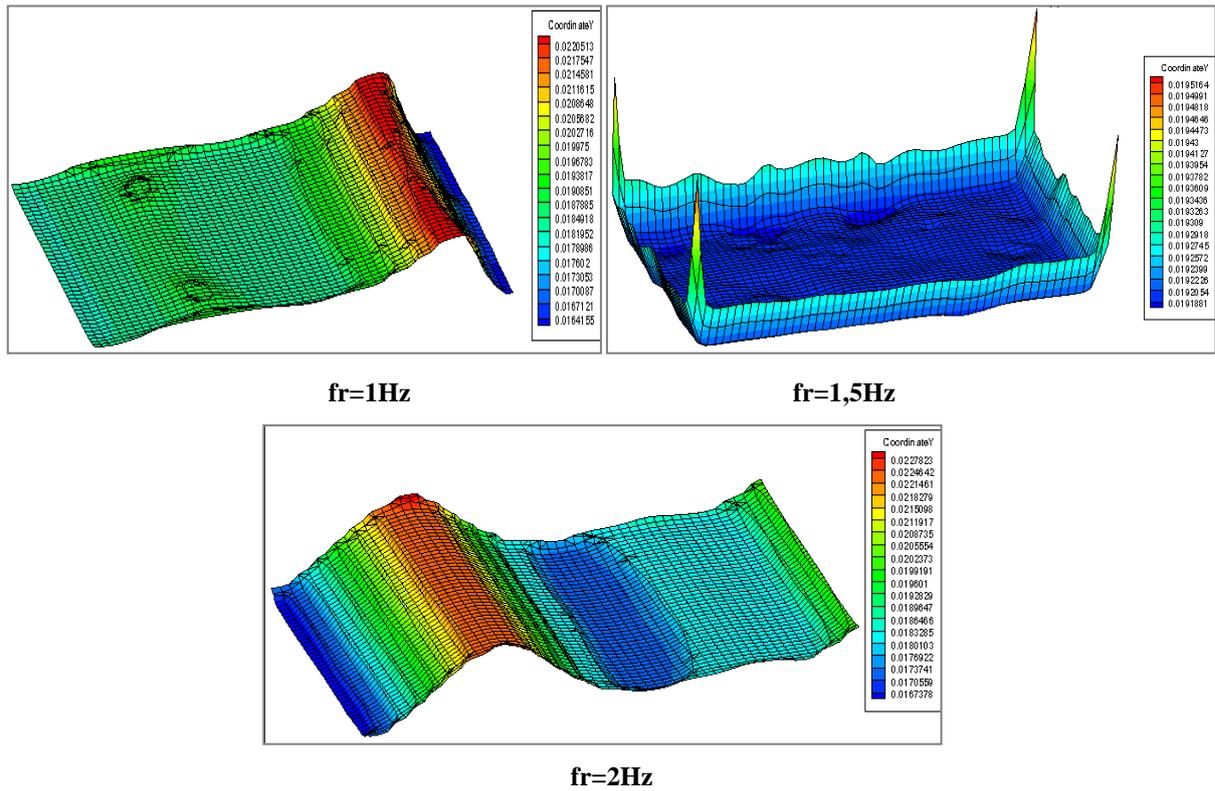


Figure (IV.8) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballotement pour le cas d'un fluide Newtonien pour des fréquences $fr=1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=2$.

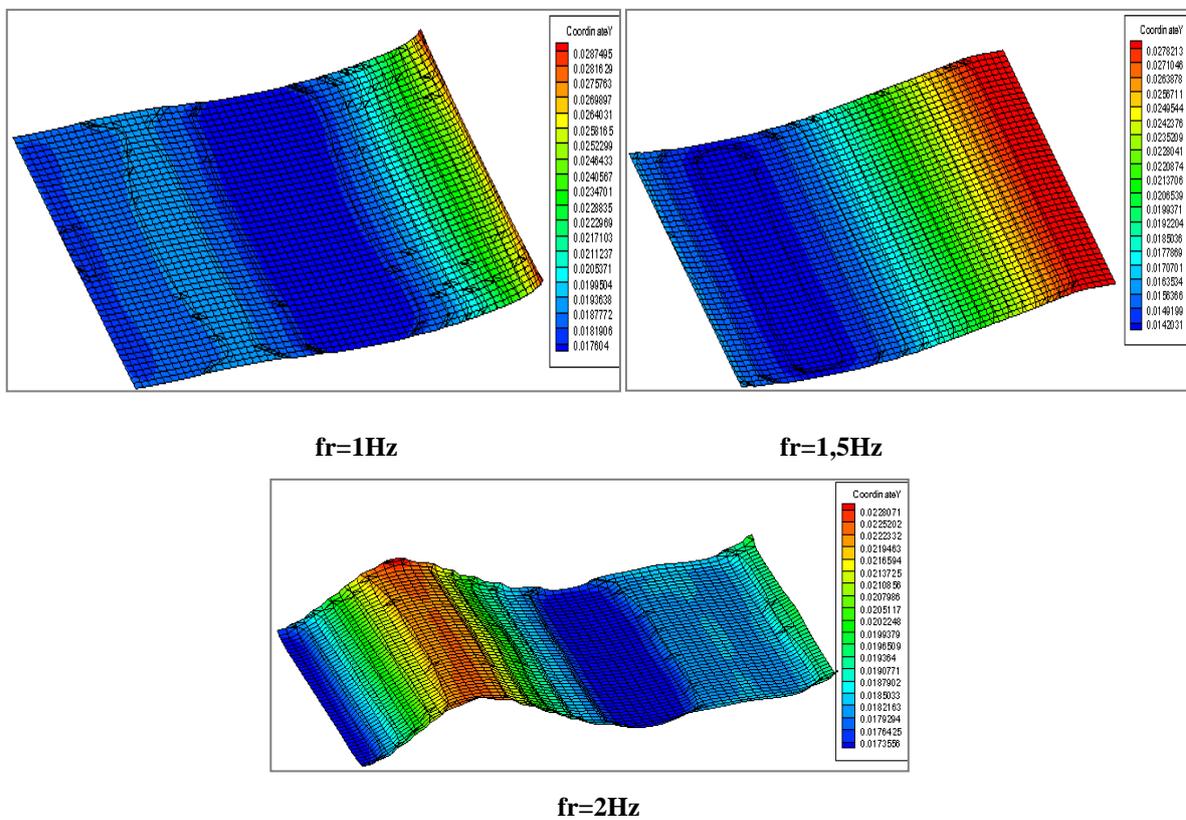


Figure (IV.9) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballotement pour le cas d'un fluide Newtonien pour des fréquences $fr=1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=3\text{s}$.

• Cas de fluide non Newtonien

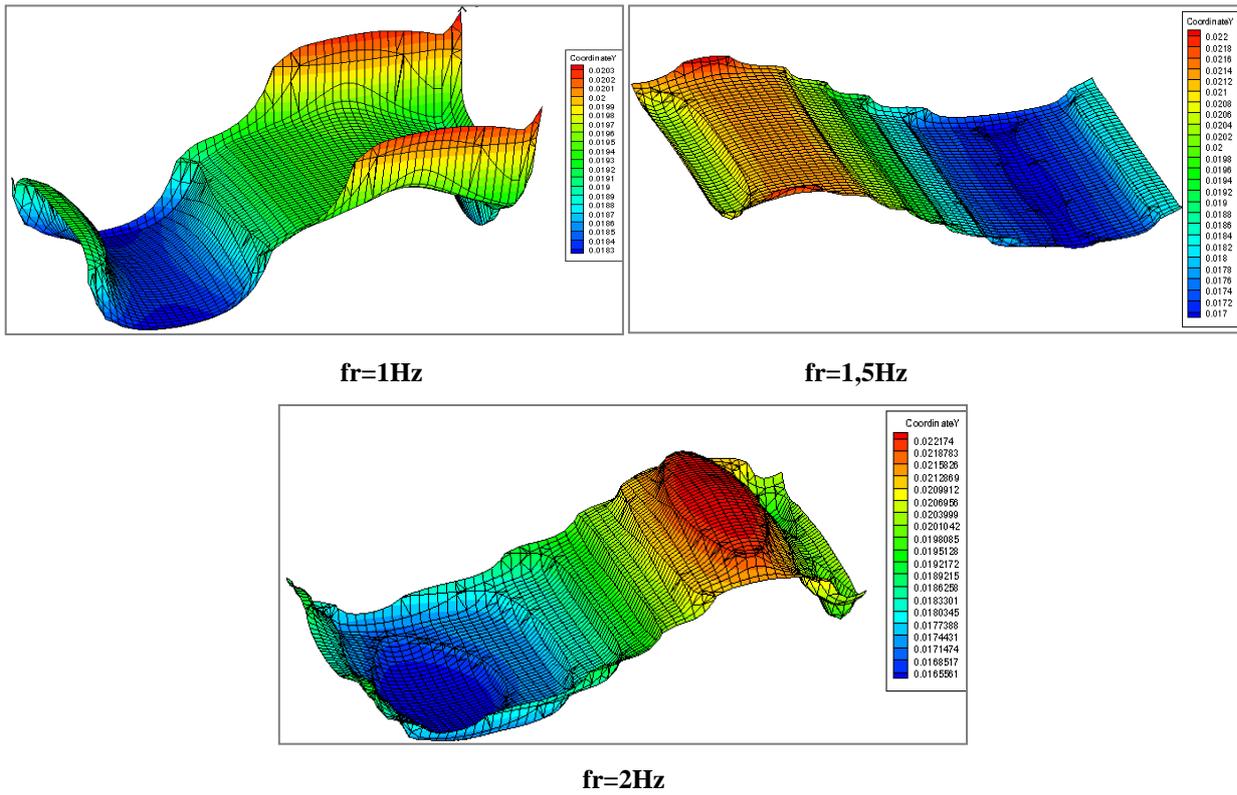


Figure (IV.10) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide non Newtonien pour des fréquences $fr=1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=1\text{s}$.

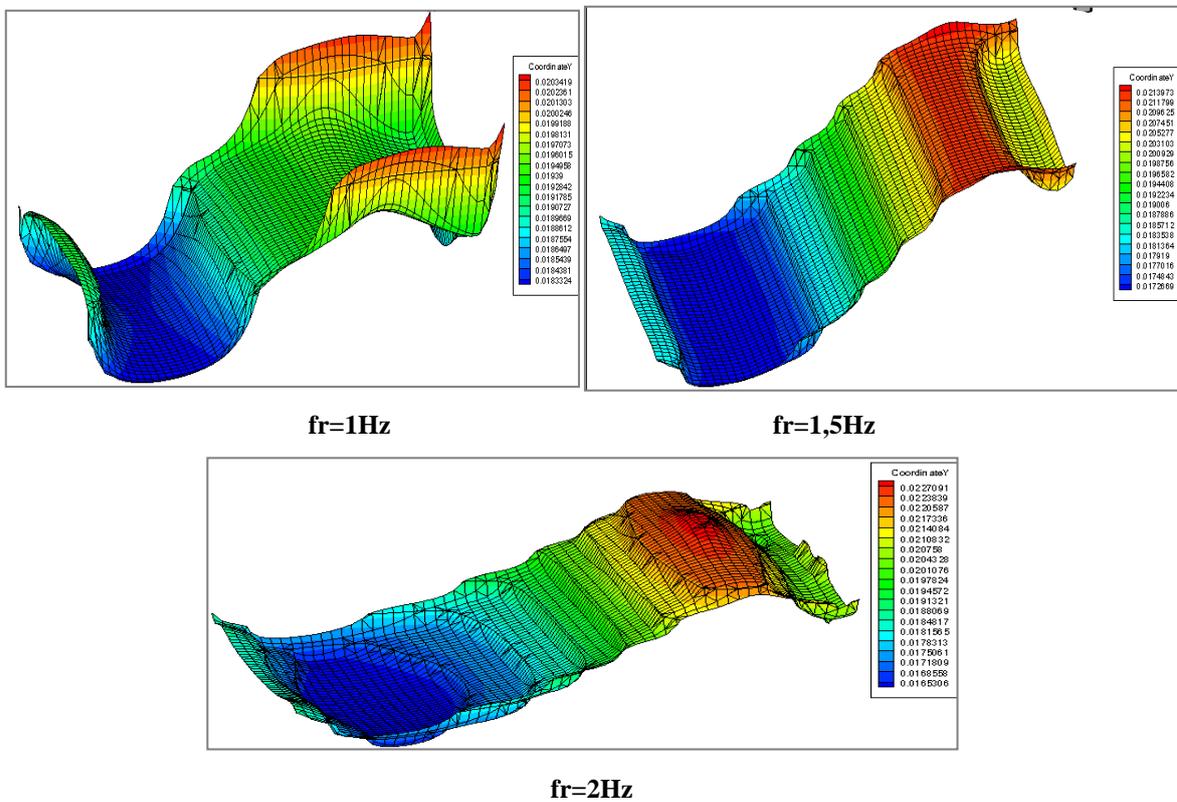


Figure (IV.11) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide non Newtonien pour des fréquences $fr=1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=2$.

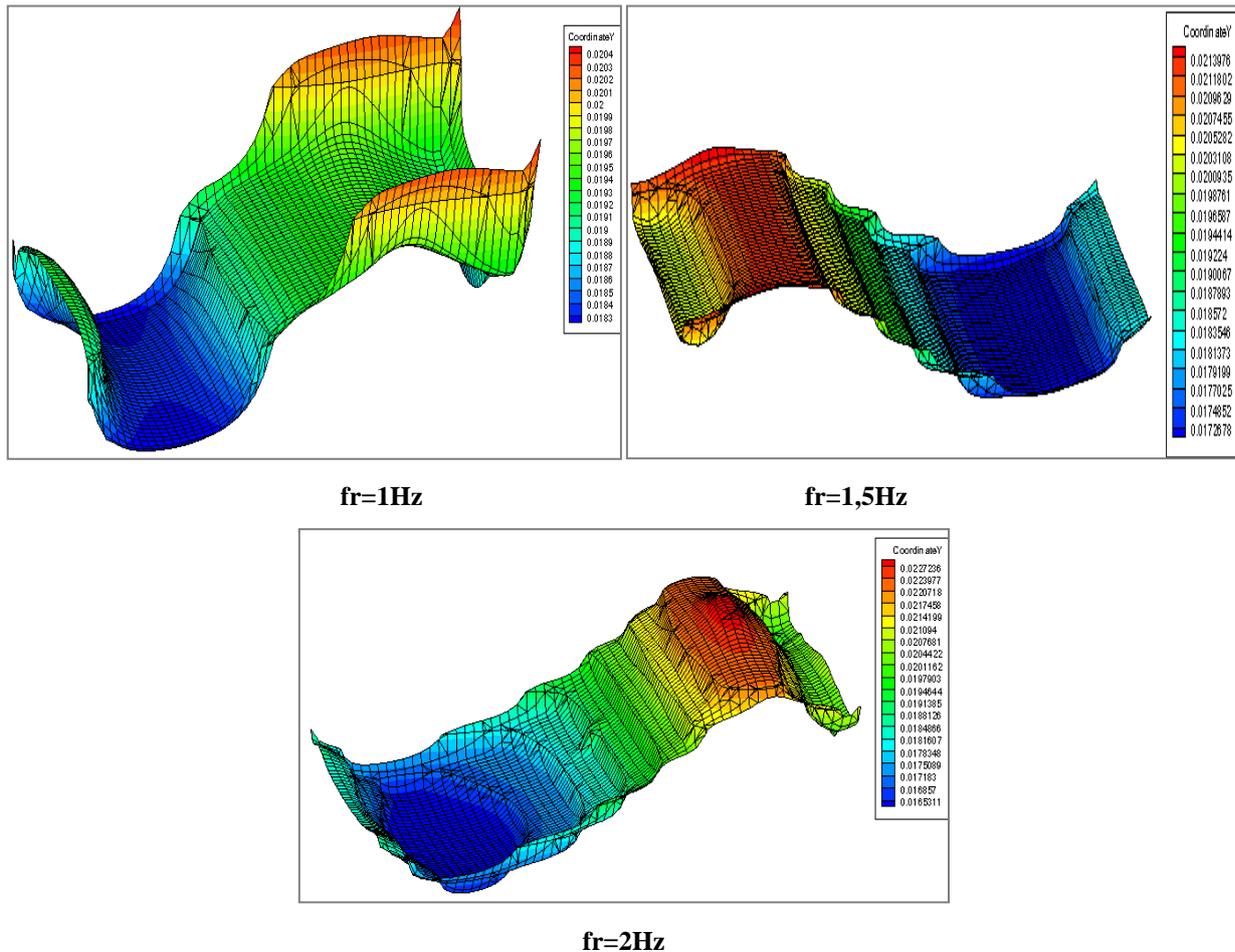


Figure (IV.12) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide non Newtonien pour des fréquences $fr=1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=3\text{s}$.

Observation

Les résultats ci-dessus montrent l'effet de l'excitation extérieure qui est la variation de la fréquence dans un réservoir rectangulaire à chaque temps précis, pour deux fluides de nature différents.

En augmentant la fréquence le phénomène de ballonnement diminue et devient linéaire, pour les deux cas de fluide (Newtonien et non Newtonien). Pour le cas de fluide newtonien, on observe des creux pour les fréquences $fr=1\text{Hz}$ et $fr=1,5\text{Hz}$, contrairement avec le cas de fluide non Newtonien le ballonnement est quasi linéaire.

L'augmentation de la fréquence amorti le ballonnement de fluide pour le cas d'un réservoir rectangulaire.

IV.4. 3.2 Cas réservoir cylindrique

- Cas de fluide Newtonien

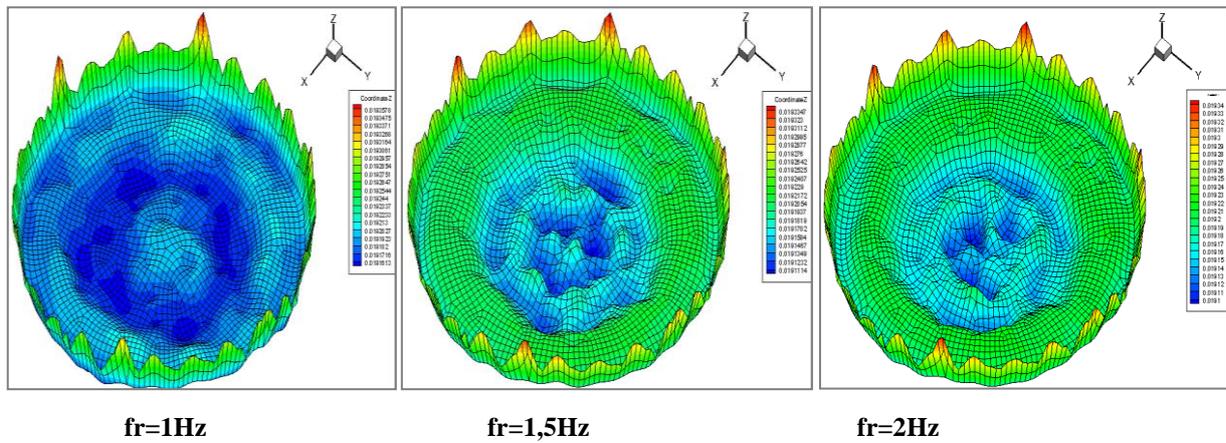


Figure (IV.13) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballottement pour le cas d'un fluide Newtonien pour des fréquences $fr=1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=1\text{s}$.

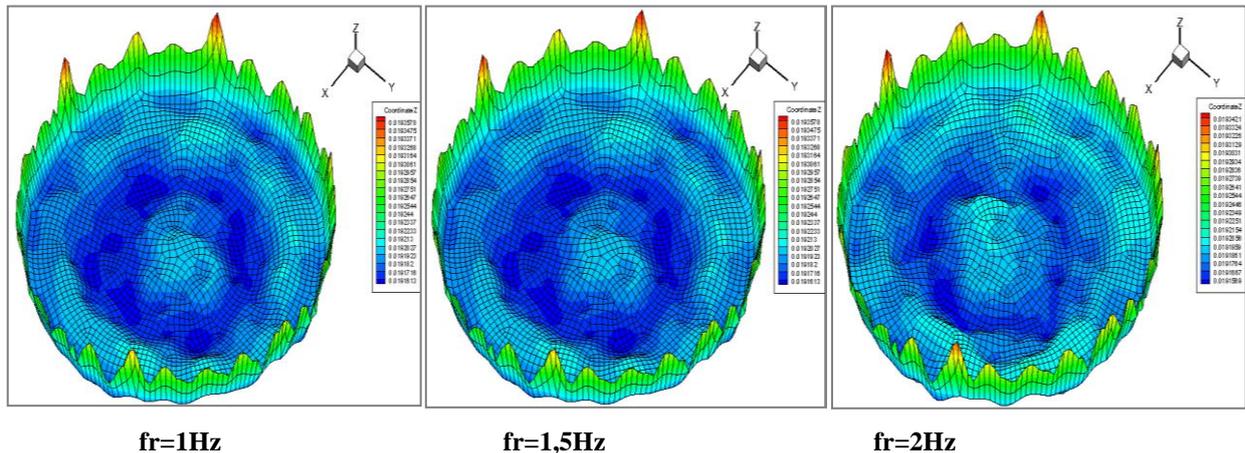


Figure (IV.14) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballottement pour le cas d'un fluide Newtonien pour des fréquences $fr=1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=2\text{s}$.

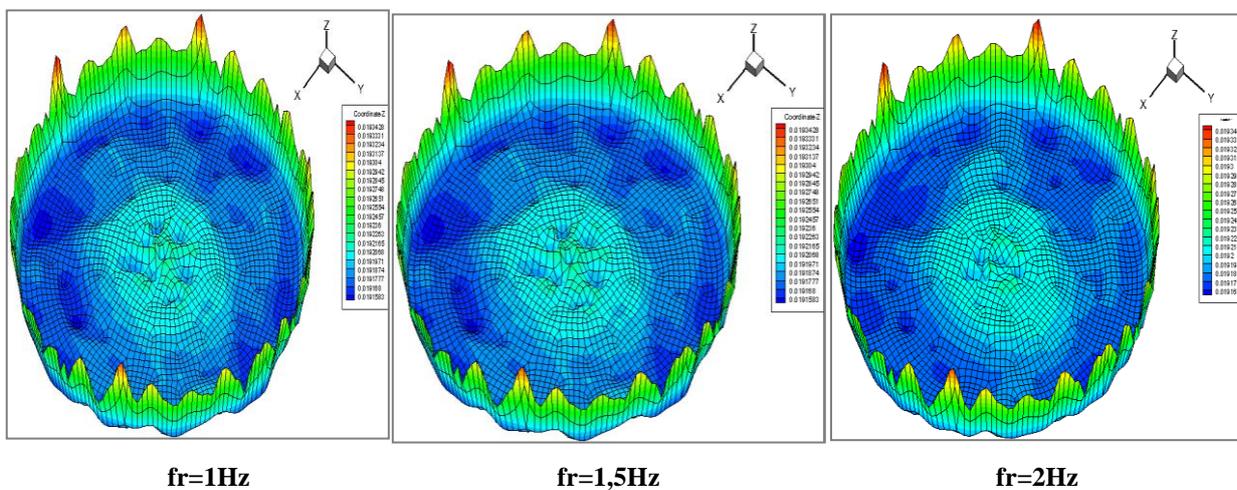


Figure (IV.15) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballottement pour le cas d'un fluide Newtonien pour des fréquences $fr=1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=3\text{s}$.

• Cas de fluide non Newtonien

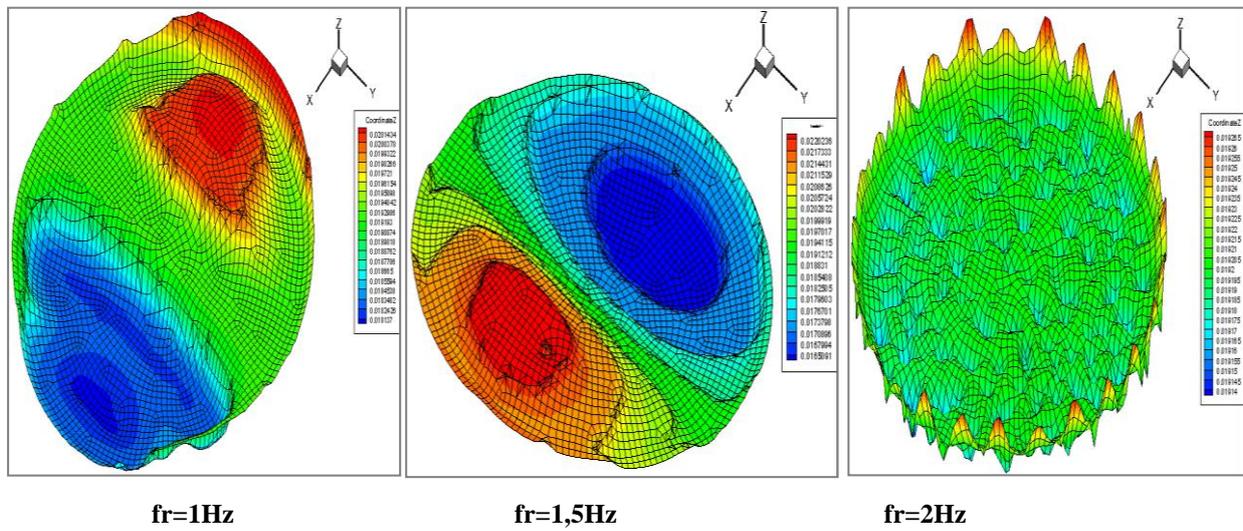


Figure (IV.16) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballotement pour le cas d'un fluide non Newtonien pour des fréquences $fr=1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=1\text{s}$.

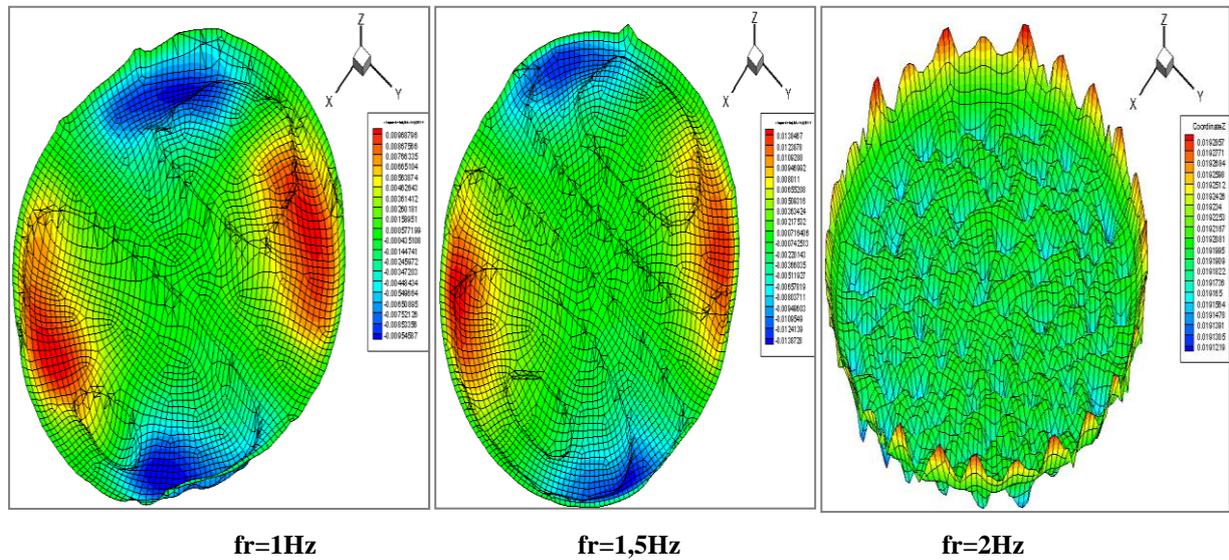


Figure (IV.17) Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballotement pour le cas d'un fluide non Newtonien pour des fréquences $fr=1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=2\text{s}$.

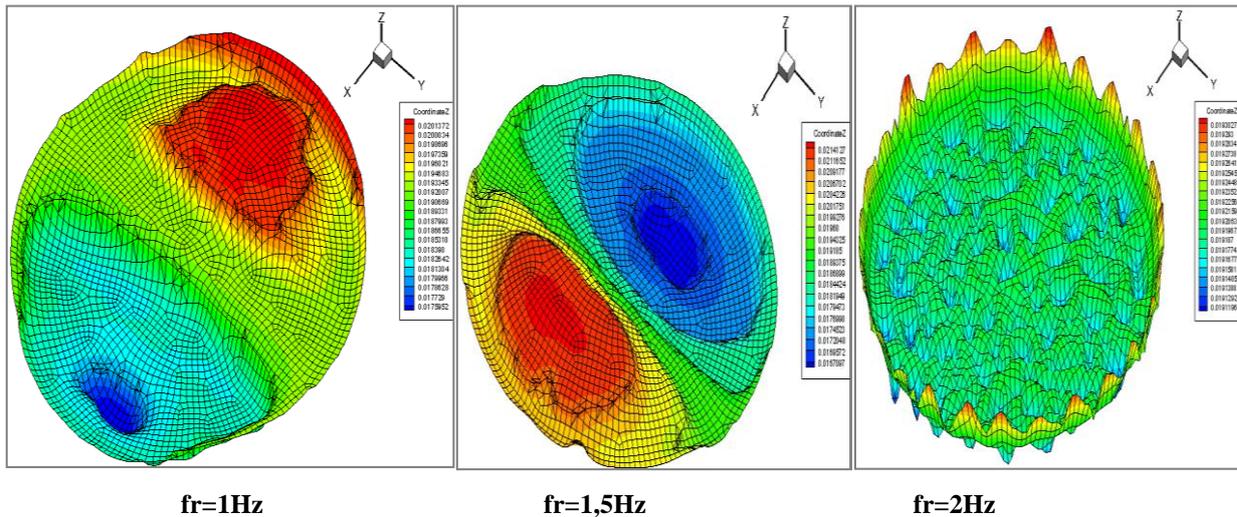


Figure (IV.18) : Les résultats obtenus sous Fluent représentent l'effet de l'excitation sur le ballonnement pour le cas d'un fluide non Newtonien pour des fréquences $fr=1\text{Hz}$, $1,5\text{Hz}$, 2Hz à $t=3\text{s}$.

Observation

Les résultats ci-dessus montrent l'effet de l'excitation extérieure qui est la variation de la fréquence dans un réservoir cylindrique à chaque temps précis, pour deux fluides de nature différents.

Pour le cas de fluide Newtonien, en augmentant la fréquence de l'excitation extérieure conduit à une augmentation des modes de ballonnement.

Pour le cas de fluide non Newtonien, pour les fréquences $fr=1\text{Hz}$ et $fr=1,5\text{Hz}$ le ballonnement est linéaire, et le mode est antisymétrique.

La variation de la fréquence a un impacte très important sur le ballonnement du réservoir cylindrique.

IV.4. 4 Effet la nature du fluide

IV.4.4.1 Réservoir rectangulaire

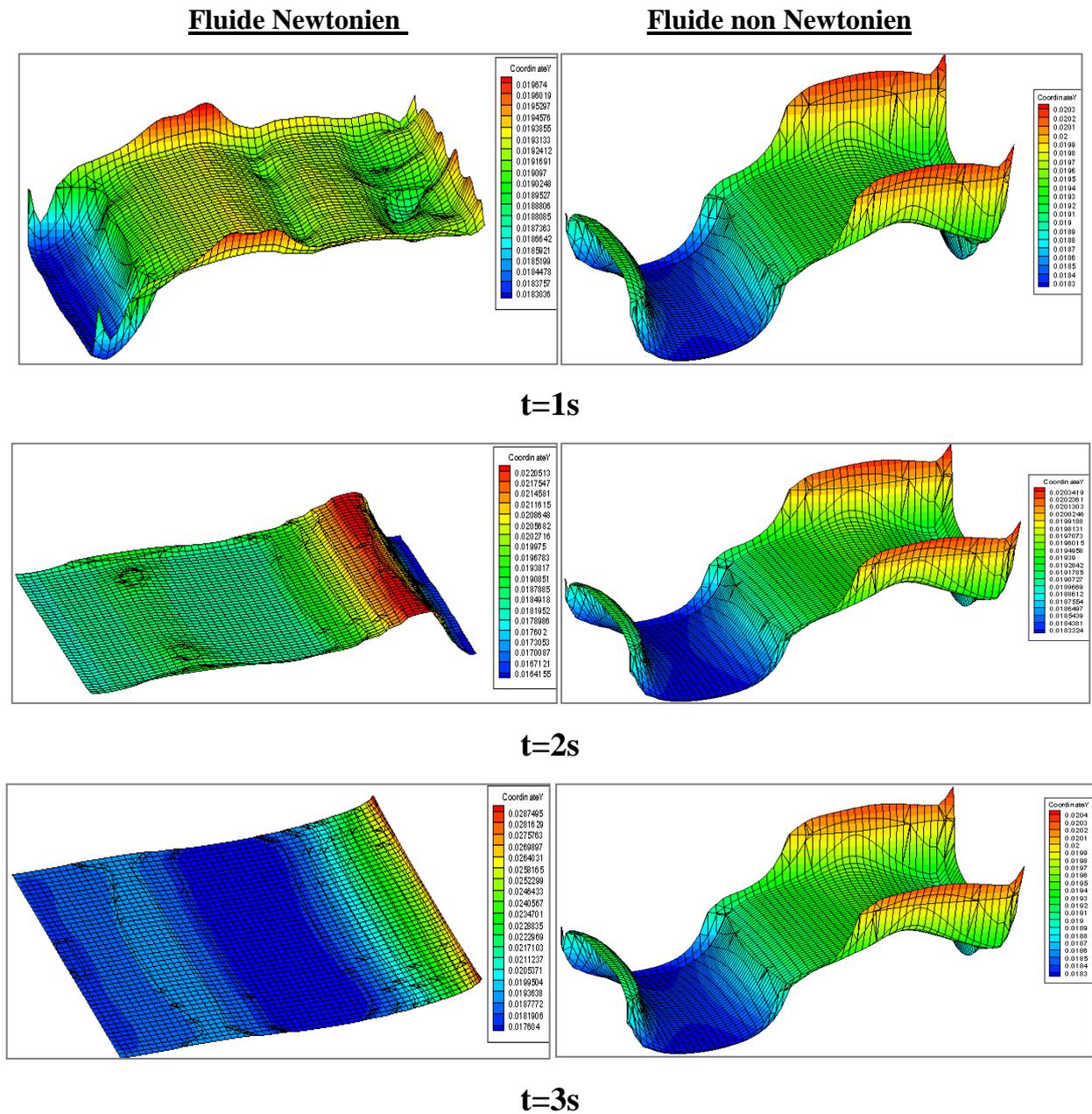


Figure (IV.19) : Les résultats obtenus sous Fluent pour le cas du réservoir rectangulaire, comparaison entre un fluide Newtonien et non Newtonien pour une fréquence $fr=1Hz$, a des temps différents $t=1s$, $t=2s$ et $t=3s$.

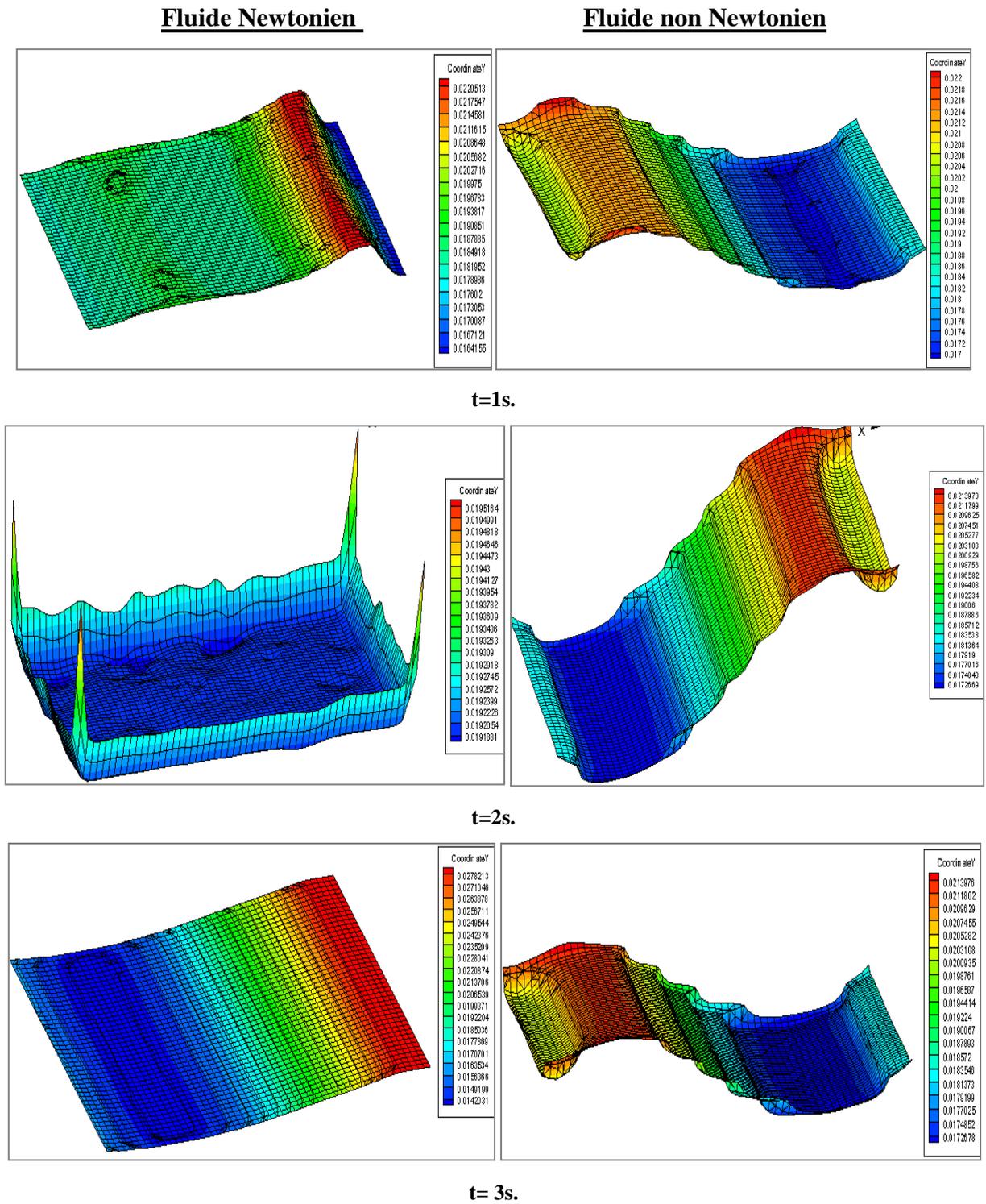


Figure (IV.20) : Les résultats obtenus sous Fluent pour le cas du réservoir rectangulaire, comparaison entre un fluide Newtonien et non Newtonien pour une fréquence $f_r = 1,5\text{Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$.

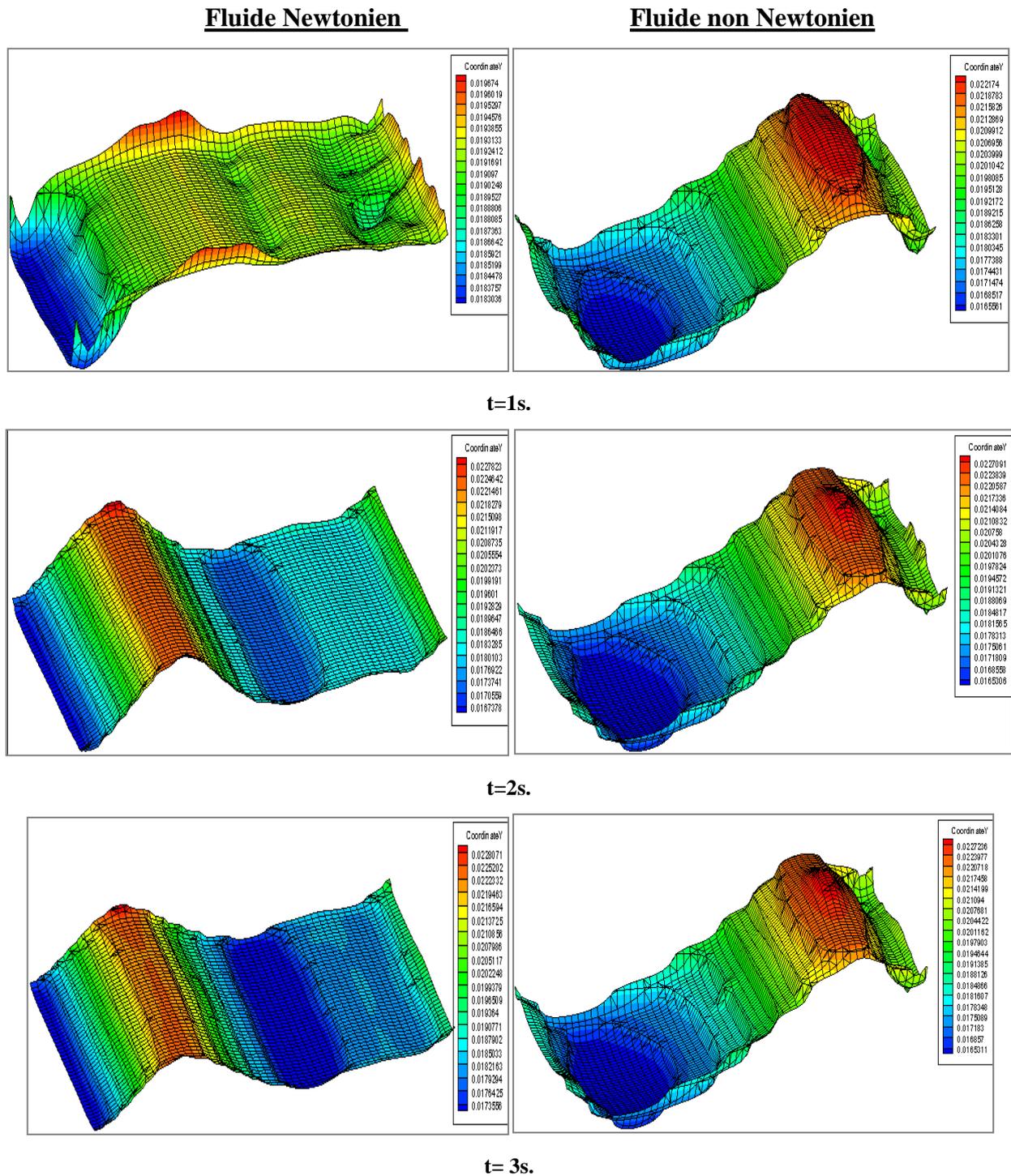


Figure (IV.21) : Les résultats obtenus sous Fluent pour le cas du réservoir rectangulaire, comparaison entre un fluide Newtonien et non Newtonien pour une fréquence $f_r = 2\text{Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$.

Observation

Une comparaison entre le ballottement de fluide Newtonien et non Newtonien dans un réservoir rectangulaire.

Pour le cas de fluide non Newtonien le ballottement est amorti, et une adhésion de fluide sur les parois à $f_r=1\text{Hz}$, en augmentant la fréquence pour $f_r=1,5\text{Hz}$ on voit que le fluide est en ballottement ceci est déduit en analysant la **Figure (IV.20)**.

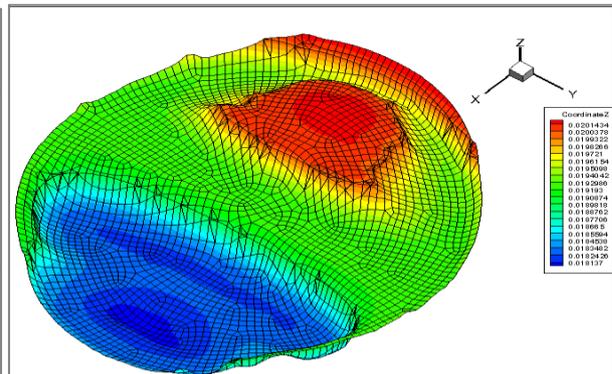
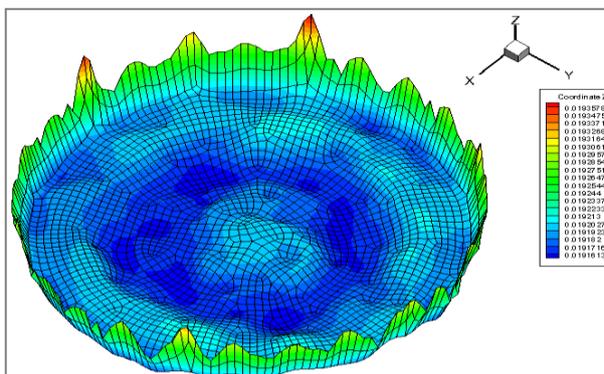
Pour le cas Newtonien, le ballottement est quasi linéaire, apparition de quelques creux, et une collision de fluide sur les parois et les angles du réservoir.

Le ballottement peut être amorti par la viscosité de fluide, pour ce cas étudié la viscosité varie en augmentant l'excitation du réservoir.

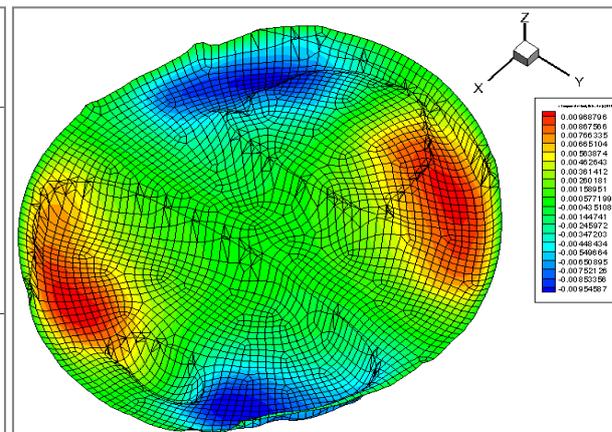
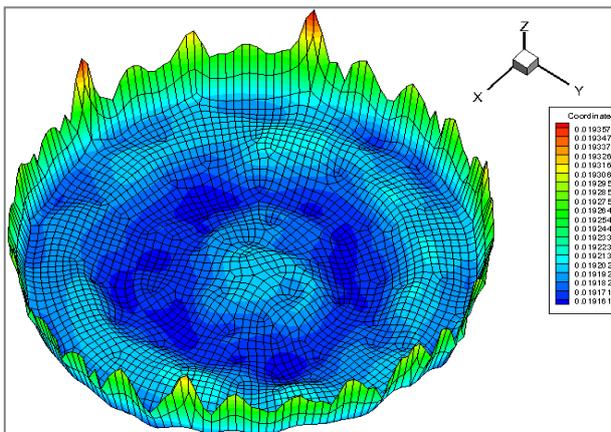
IV.4.4.1 Réservoir cylindrique

Fluide Newtonien

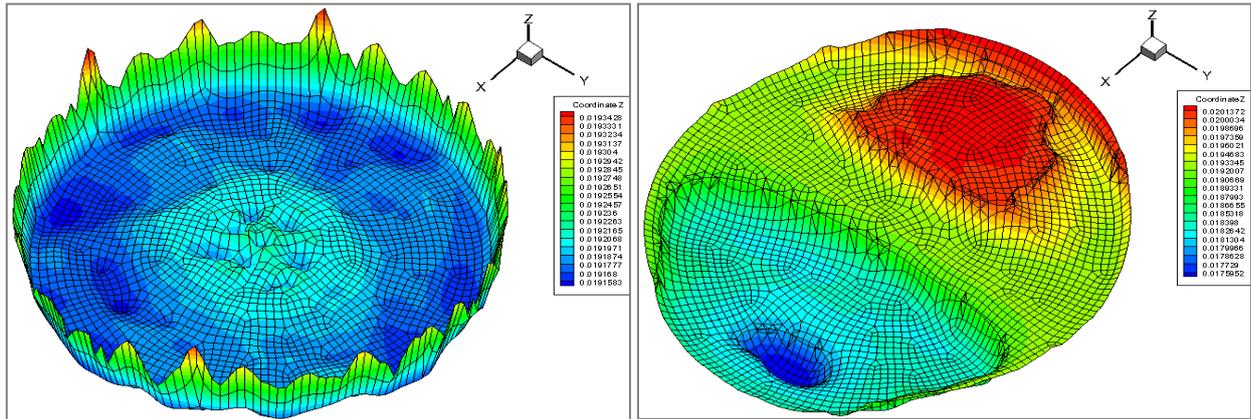
Fluide non Newtonien



$t=1s.$



$t=2s.$

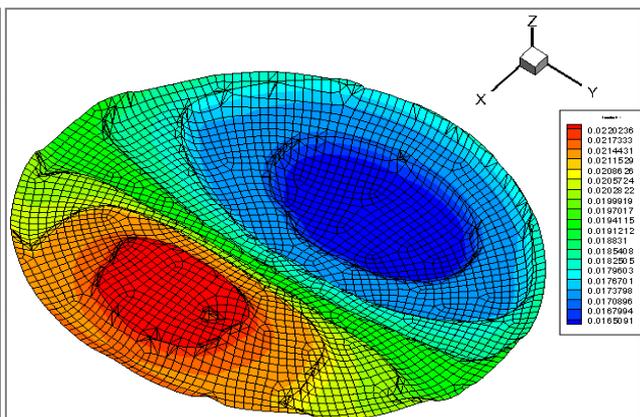
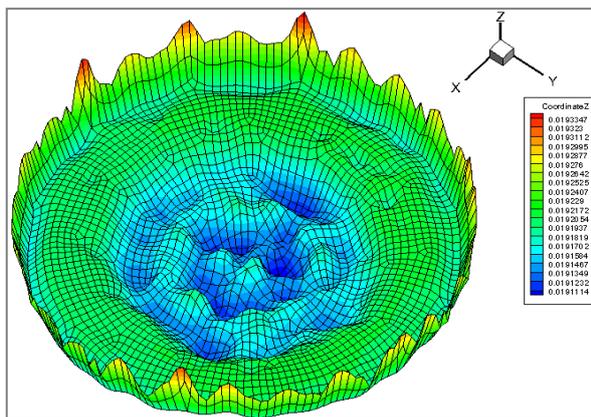


t=3s.

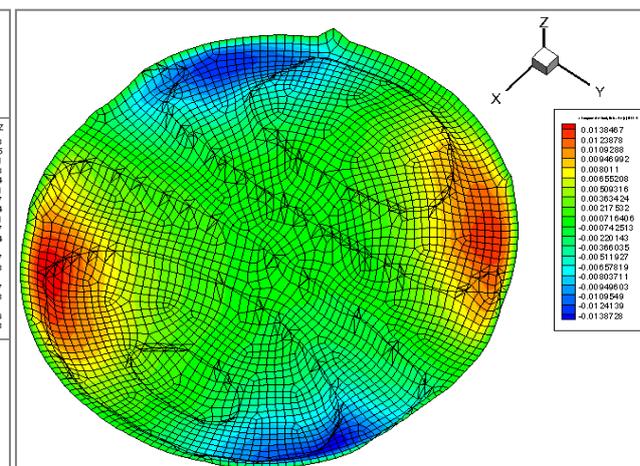
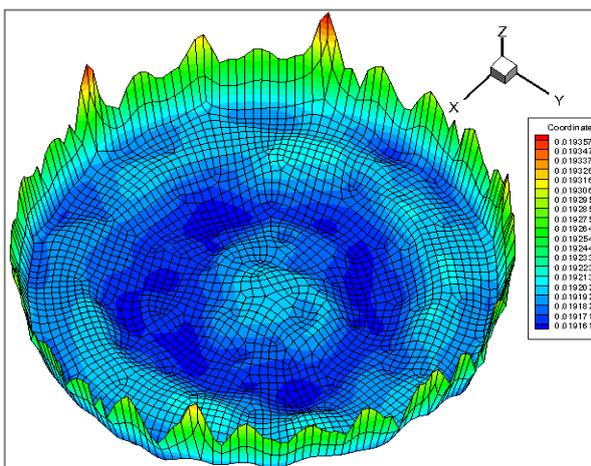
Figure (IV.22) : Les résultats obtenus sous Fluent pour le cas du réservoir cylindrique, comparaison entre un fluide Newtonien et non Newtonien pour une fréquence $f=1\text{Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$.

Fluide Newtonien

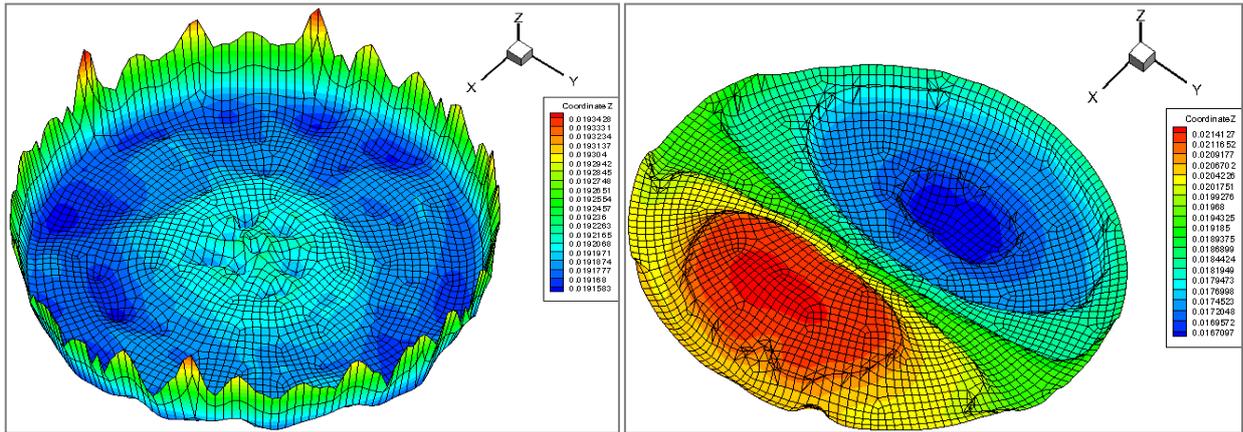
Fluide non Newtonien



t=1s.



t=2s.

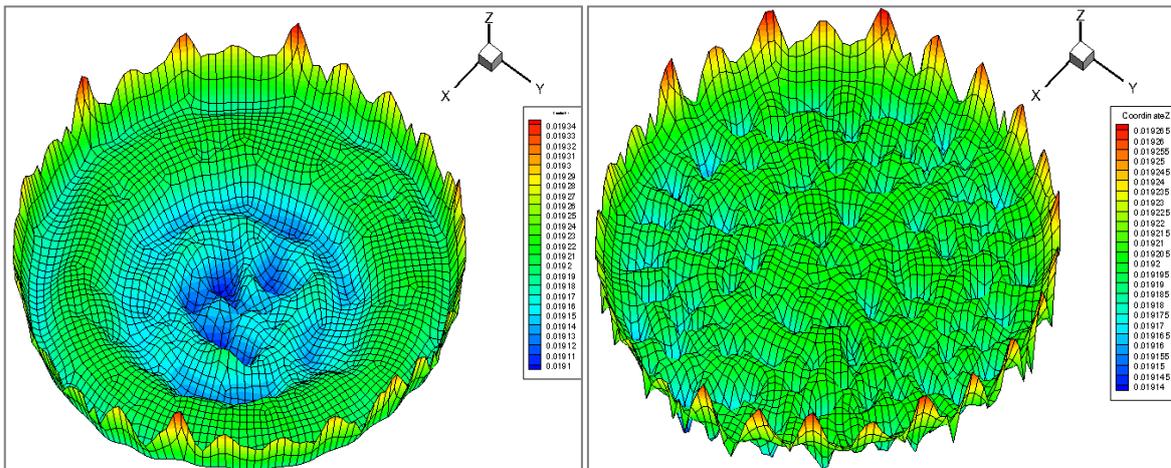


t=3s.

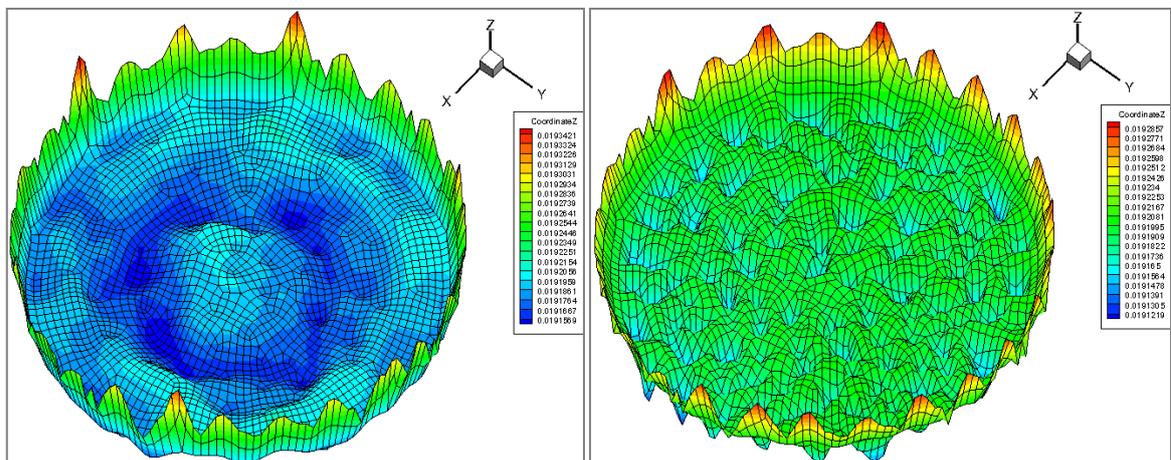
Figure (IV.23) : Les résultats obtenus sous Fluent pour le cas du réservoir cylindrique, comparaison entre un fluide Newtonien et non Newtonien pour une fréquence $f_r=1,5\text{Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$.

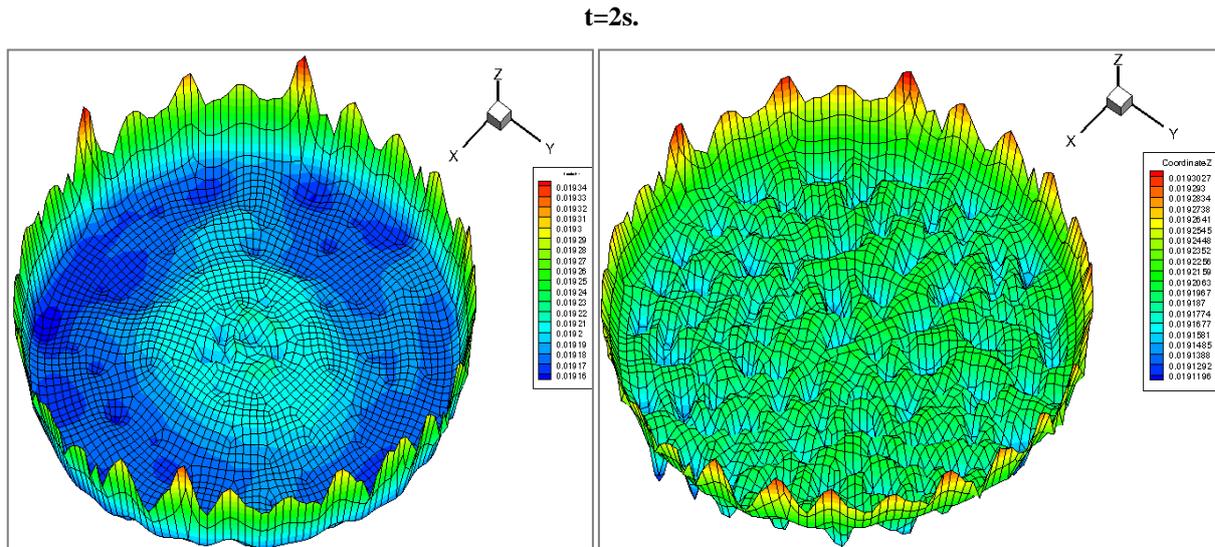
Fluide Newtonien

Fluide non Newtonien



t=1s.





$t=3s.$

Figure (IV.24) : Les résultats obtenus sous Fluent pour le cas du réservoir cylindrique, comparaison entre un fluide Newtonien et non Newtonien pour une fréquence $f_r = 2\text{Hz}$, a des temps différents $t=1s$, $t=2s$ et $t=3s$.

Observation

Une comparaison entre le ballonnement de fluide Newtonien et non Newtonien dans un réservoir rectangulaire.

Pour le cas Newtonien en augmentant la fréquence les modes de ballonnement diminuent, dans le cas non Newtonien pour les fréquences $f_r=1\text{Hz}$ et $f_r=1,5\text{Hz}$ le ballonnement est linéaire et antisymétrique, en augmentant la fréquence à $f_r=2\text{Hz}$ le ballonnement devient non linéaire et une apparition des plusieurs modes.

La nature fluide est très importante pour le mouvement de fluide, le ballonnement de fluide Newtonien a une faible viscosité, par contre le fluide non Newtonien est sa viscosité diminue en augmentant le taux de cisaillement (pour ce cas la fréquence exercée).

IV.5 Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux pour un fluide Newtonien

Pour cette partie, moi et mes collègues avons mit en évidence ce phénomène de ballonnement dans un réservoir et le comparer à une simulation numérique sous fluent. Pour cela on a conçu un bac d'essai, cette expérience a été faite afin d'étudier la surface libre d'un fluide Newtonien dans un réservoir rectangulaire, la hauteur initiale de l'eau a été fixé a $h = 0,02\text{ m}$, pour les fréquences 1Hz ; $1,5\text{Hz}$; 2Hz .

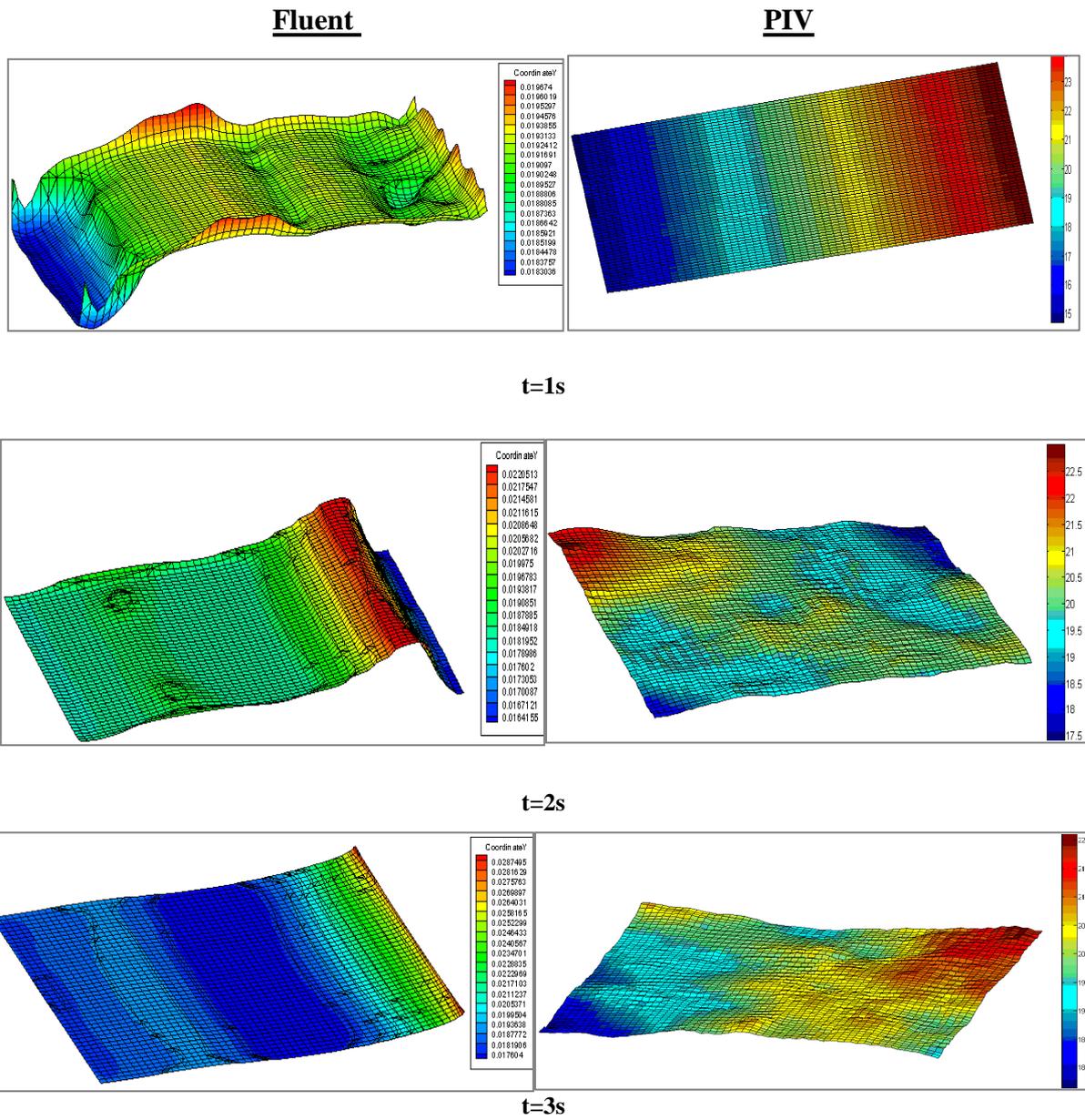
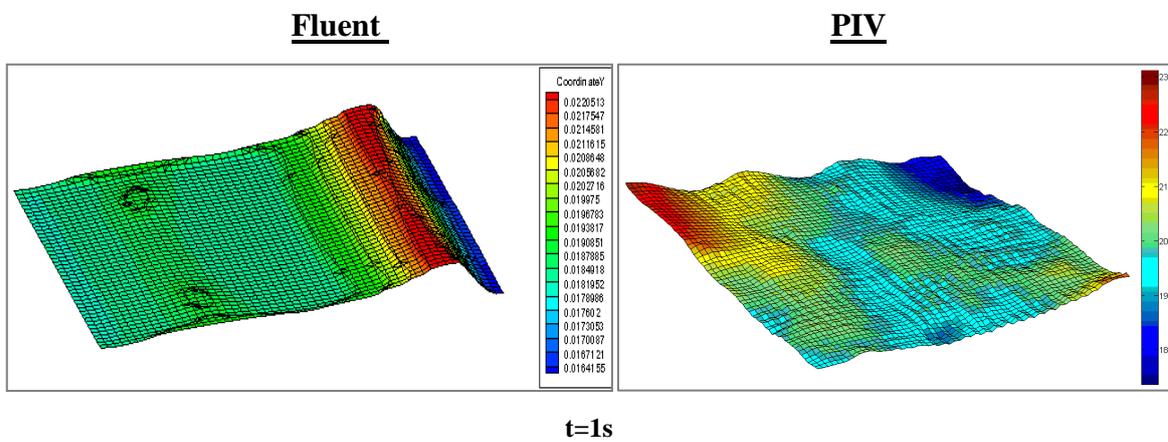
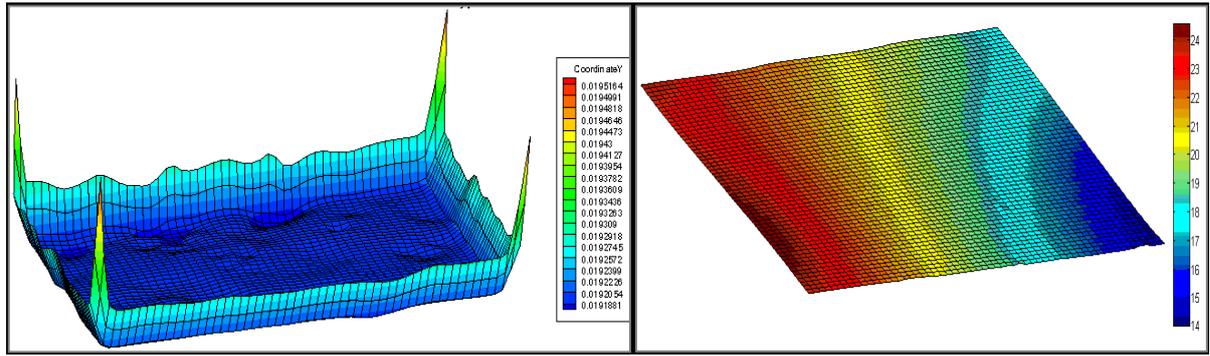
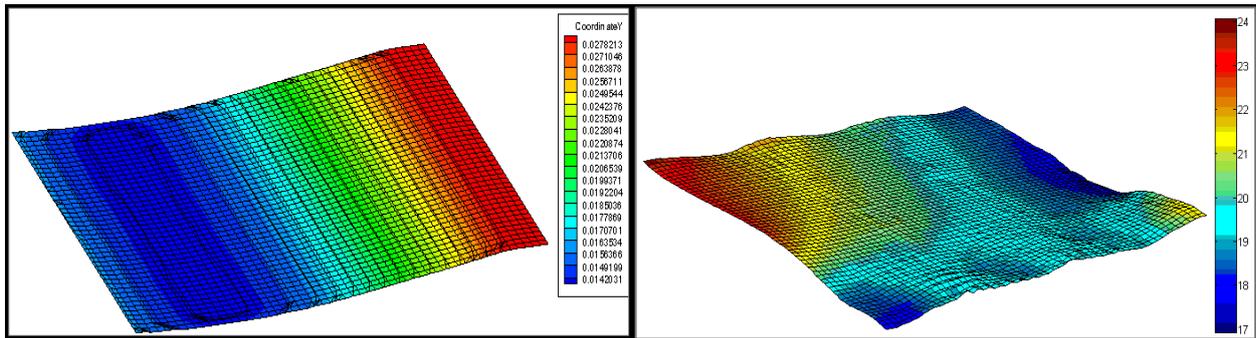


Figure (IV.25) : comparaison entre les résultats obtenus sous **Fluente** et les résultats obtenus avec la **PIV**, a une fréquence $f_r=1\text{Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$.





t=2s

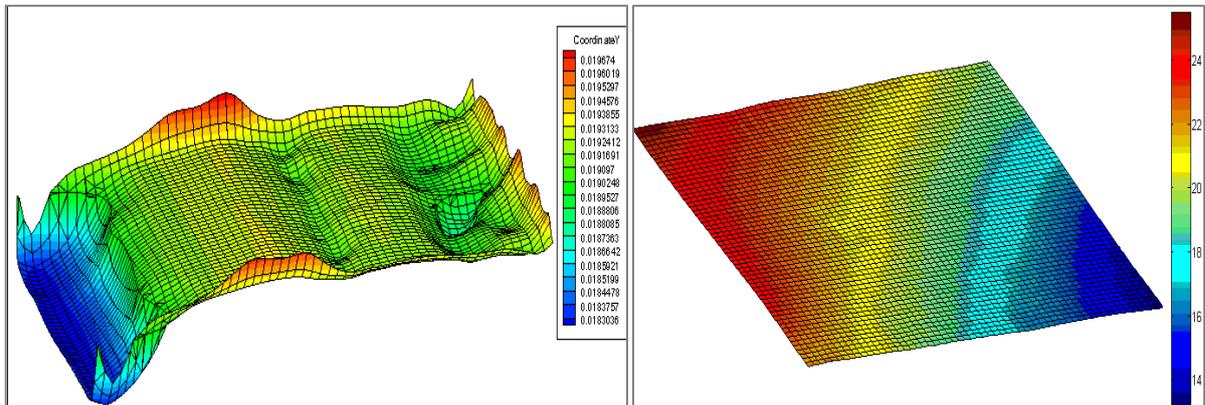


t=3s

Figure (IV.26) : comparaison entre les résultats obtenus sous Fluent et les résultats obtenus avec la PIV, a une fréquence $f_r= 1.5\text{Hz}$, a des temps différents $t=1\text{s}$, $t=2\text{s}$ et $t=3\text{s}$.

Fluent

PIV



t=1s

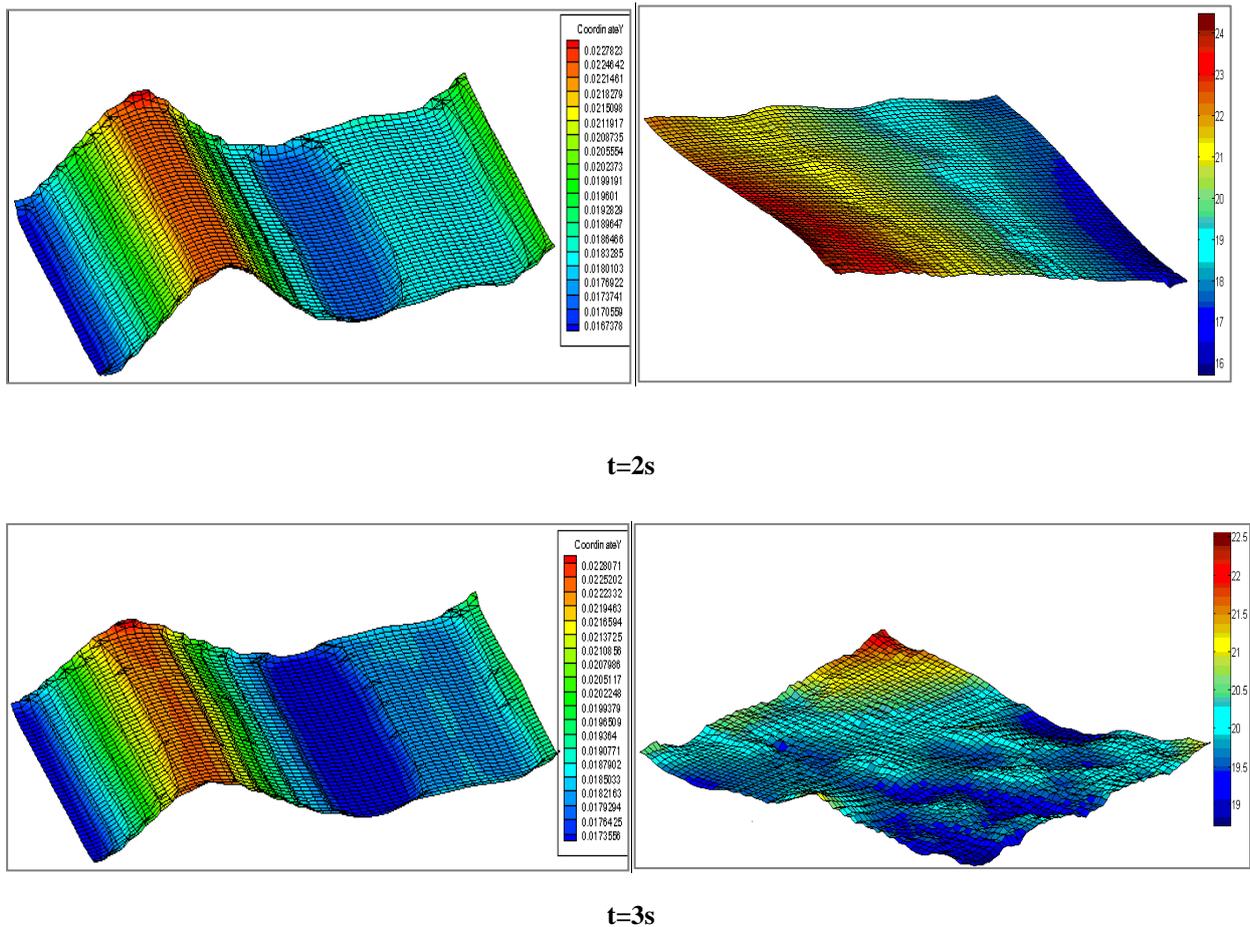


Figure (IV.27) : comparaison entre les résultats obtenus sous Fluent et les résultats obtenus avec la PIV, a une fréquence $f_r = 3$ Hz, a des temps différents $t=1s$, $t=2s$ et $t=3s$.

Observation

Les deux images obtenues ne sont pas très comparables, dans les deux résultats le ballotement est linéaire, il existe un décalage entre la simulation numérique et l'expérience dans le sens du mouvement de fluide. Il se peut y avoir une faute de précision lors de l'expérience, car la direction de mouvement du réservoir à un impacte sur le mouvement de fluide à l'intérieur du réservoir.

IV.6 Conclusion

Lors de cette étude, il a été mis en évidence la capacité du logiciel Fluent à modéliser le ballonnement dans deux géométries différentes (rectangulaire et cylindrique), et en utilisant deux fluides de différentes nature, la hauteur de fluide à l'intérieur du réservoir a été fixée à une hauteur initiale.

Le ballonnement peut être affecté par :

- La forme de la géométrie du réservoir.
- La nature de fluide à l'intérieur du réservoir qui peut amortir le mouvement du liquide.
- La variation de la fréquence exercée a un impact important sur le ballonnement.

En fin de ce chapitre une comparaison avec la présence de deux méthodes distinctes (simulation numérique et la PIV), a été faite afin de suivre le ballonnement du fluide.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le ballonnement de fluide dans des réservoirs semi rempli, a été étudié lors de ce mémoire. L'objectif est d'étudier le ballonnement dans deux géométries différentes, et deux fluides de natures différents aussi.

Le ballonnement utilise les équations de la mécanique des fluides, écrites pour les problèmes liés à la surface libre, pour un régime instationnaire, la hauteur de fluide a été fixée pour des fréquences 1Hz ; 1,5Hz ; et 2Hz. La simulation numérique s'est déroulée sous le logiciel Fluent, en utilisant la méthode VOF, pour deux géométries (rectangulaire et cylindrique), à une hauteur initiale de fluide fixée, et pour deux types de fluides, le premier est un fluide Newtonien (l'eau), et le deuxième est un fluide non Newtonien (Polyox) modélisé par la loi de comportement de Herschell-Bulkley.

Les résultats obtenus ont été traités et comparés entre eux, il a été observé que la géométrie du réservoir a un impact sur le mouvement de fluide et la déformation de la surface libre, et que le ballonnement dans le cas du réservoir cylindrique est le plus favorisé, les fréquences de l'excitation extérieure jouent un rôle important dans le ballonnement. On a constaté que pour des fréquences faibles, donc des taux de cisaillements faibles aussi, le ballonnement du fluide non Newtonien est moins prononcé que dans les cas de fréquences élevées. Ceci peut s'expliquer par le fait que la viscosité du fluide non Newtonien diminue en augmentant le taux de cisaillement (fréquence d'excitation), par conséquent le ballonnement est amplifié (moins d'amortissement).

De plus, une étude expérimentale faite à l'aide de la PIV, où les résultats obtenus sont comparés avec ceux obtenus sous Fluent. Pour cela un banc d'essai a été conçu dans le but de suivre le mouvement de la surface libre à l'intérieur d'un réservoir, il a été montré qu'il existe un décalage entre les résultats de la modélisation numérique et ceux de la PIV, ce décalage est peut être du au manque de précision lors de l'expérience.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

[1] Marc Rabaud, Frédéric Moisy & Joran Rolland ; Mesure de la déformation d'une surface libre par analyse du déplacement apparent d'un motif aléatoire de points, Lab FAST, Univ Paris-Sud Univ Pierre et Marie Curie, Bât 502, Campus Universitaire, Orsay, F-91405, France(Grenoble, 27-31 août 2007).

[2] Frédéric Moisy, Marc Rabaud, Kévin Salsac; A synthetic Schlieren method for the measurement of the topography of a liquid interface, *Exp Fluids* (2009) 46:1021–1036, DOI 10.1007/s00348-008-0608-z.

[3] M Rabaud ET F Moisy, OPTICAL MEASUREMENT OF SHIP WAVES BY DIGITAL IMAGE CORRELATION, Laboratoire FAST (Fluides, Automatique et Systèmes Thermiques), Univ. Paris-Sud, Univ. Pierre et Marie Curie, CNRS. Bât. 502, F-91405 Orsay, France.

[4] 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).

[5] 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.

[6] B. MEZIANI, O. OURRAD, 21eme Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, 26 au 30 aout 2013.

[7] Jae Hwan Jung, Hyun Sik Yoon et Chang Yeol Lee, Effect of natural frequency modes on sloshing phenomenon in a rectangular tank, *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.* (2015) 7:580~594.

[8] Y. Zhang, Z G Qu, W Q Tao, T J Lu, Numerical Study of Liquid Sloshing on Anti-sloshing Device Using Open Cell Metal Foams in Oil Tank; The 6th International Symposium on Multiphase flow, Heat transfer and Energy Conversion, 2010 American Institute of Physique.

[9] Vincenzo Armenia et Michele La Rocca, ON THE ANALYSIS OF SLOSHING OF WATER IN RECTANGULAR CONTAINERS: NUMERICAL STUDY AND EXPERIMENTAL VALIDATION, *Oreon Engng.* Vol. 23, No. 8, pp. 705-739. 1996

Copyright 1996 Elsevier Science Ltd Printed in Great Britain.

[10] Abdallah B ouabidi, Zie d Driss, Mohame d Salah Abid, National Engineering School of Sfax (ENIS), Laboratory of Electro-Mechanic Systems (LASEM), *International Journal of Mechanics and Applications* 2013, 3(5): 105-116.

[11] Liming Dai, Xiaojie Wang, Effects of viscosity and varying gravity on liquid sloshing in a carrier subjected to external excitations, *Int. J. Dynam. Control* (2014) 2:521–532. DOI 10.1007/s40435-014-0072-y

[12] Dongya Zhao, Zhiqiang Hu, Gang Chen, Serena Lim, Shuqi Wang, Nonlinear sloshing in rectangular tanks under forced excitation, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* xxx (2017) 1e21.

[13] Vaibhav Singala, Jash Bajajb, Nimish Awalgaoankara, Sarthak Tibdewalc, CFD Analysis of a Kerosene Fuel Tank to Reduce Liquid Sloshing, 2014 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND

[14] Haitao Zhang et Beibei Sun, Numerical Simulation of Sloshing in 2D Rectangular Tanks Based on the Prediction of Free Surface, *Hindawi Publishing Corporation Mathematical Problems in Engineering* Volume 2014, Article ID 395107, 12 pages.

[15] X Zhang, N M Sudharsan, R Ajaykumar, and K Kumar, Simulation of free-surface flow in a tank using the Navier–Stokes model and unstructured finite volume method, *Proc. IMechE Vol. 219 Part C: J. Mechanical Engineering Science*, 2005.

[16] Benchaabane A., (2006). "Etude du comportement rhéologique de mélanges argiles - polymères. Effets de l'ajout de polymères", thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg.

[17] Barnes H.A, Hutton J.F, et Walters K, (1989). "An introduction to rheology".Elsevier Science Publishers, Amesterdam.

[18] Thèse Dimitri Bonnet. Vélométrie par images de particules (PIV) pour le diagnostic d'écoulements dans la boucle d'air automobile. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Université de Franche-Comté, 2012. Français. <tel-00978193>

[19] ABRAMSON, H. (1966). The dynamic behavior of liquids in moving containers, with applications to space vehicle technology. Washington, Scientific and Technical Information Division, National Aeronautics and Space Administration.

Résumé

Ce travail a pour objectif l'étude du phénomène de ballottement d'un fluide dans un réservoir partiellement rempli sous l'effet d'une excitation harmonique extérieure, dans la direction horizontale. Cette étude se fait par la réalisation expérimentale d'un banc d'essai qui permet de visualiser la déformation de la surface libre et d'étudier le phénomène de ballottement par la PIV (Particule Image Velocimetry). Une autre étude de modélisation numérique sous Fluent, basée la méthode de VOF, pour deux géométries en 3D distinctes du réservoir (rectangulaire et cylindrique) et deux fluides de nature différents (Newtonien et non Newtonien de type Herschel-Bulkley), a été effectuée.

Mots-clés : VOF, Fluent, Ballottement, réservoir, Newtonien, Non-Newtonien, Herschel-Bulkley, Banc d'essai, Excitation harmonique, PIV.

Abstract

This work aims to study the sloshing phenomenon of a fluid in a partially filled tank under the effect of an external harmonic excitation, in the horizontal direction. This study is carried out by the experimental realization of a test bench which makes it possible to visualize the deformation of the free surface and to study the phenomenon of sloshing by the PIV (Particul Image Velocimetry). Another Fluent numerical modeling study, based on the VOF method, for two distinct 3D geometries of the reservoir (rectangular and cylindrical) and two different fluids of a different nature (Newtonian and non-Newtonian Herschel-Bulkley type), was realized

Keywords: VOF, FLUENT, sloshing, tank, Newtonian, Non-Newtonian, Herschel-Bulkley, Bench test, Harmonic excitation, PIV.