

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn-Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



PROJET DE FIN DE CYCLE MASTER

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Énergétique

Thème

Etude numérique d'écoulement de fluides en rotation dans
une cuve agitée

Préparé par :

BARKAT Chaimaa et TOURAK Chaimaa

Soutenu publiquement le : 23/06/2024, devant le jury composé de :

M. AKERMI Nasereddine	MCA (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. MEKROUSSI Said	Pr (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mme. KHALDI Sabrina	MAA (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. BOUZOUINI Mohammed	MAA (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2023 - 2024

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers Dieu, qui nous a accordé la force et le courage nécessaires pour mener à bien l'élaboration de ce mémoire. C'est grâce à sa bienveillance et à ses bénédictions que nous avons pu surmonté les défis rencontrés au cours de ce travail.

Tout d'abord, Nous tiens à remercier chaleureusement mon directeur de mémoire, **M. BOUZOUNI Mohammed**, pour son soutien et sa guidance précieuse tout au long de ce travail. Sa patience, son expertise et son encadrement ont été essentiels à la réussite de ce mémoire.

Nous adressons aussi nos vifs remerciements aux membres de jury ; le président **M.AKERMI Nasreddine** et le premier examinateur **M. MAKROUSSI Saïd** et **Mme. KHALDI Sabrina** la deuxième examinatrice pour avoir acceptés d'examiner et juger ce travail.

Un remerciement spécial va à **M. MEKROUSSI Said** et notre collègue **Bridj Abdel Wahab**, Pour leur aide précieuse, leur temps et leur expertise.

Nos sincères remerciements vont aussi et surtout à nos familles et à nos amies pour leur soutien et leur encouragement.

Dédicace

À mes parents, pour leur amour et leur soutien.

À ma famille, pour leur présence et leur aide.

À mes amis, pour leur encouragement et leur soutien.

À tous ceux qui m'ont aidé et soutenu tout au long de mon parcours.

Barkat chaimaa

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Mes parents, pour leur soutien et leur encouragement constant tout au long de ma carrière d'étude. Je suis également reconnaissant envers ma famille, qui m'a toujours été présente et disponible.

Tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès.

Tourak chaimaa

Remerciements	i
Dédicace	ii
Sommaire.....	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux	vii
Nomenclature	viii
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur l’agitation mécanique

I.1. Introduction	3
I.2 Historique du mélange	3
I.3 Définition de mélange	3
I.4 Opérations de mélange	4
I.5 Mécanisme d’Agitation	4
I.5.1 Définition de l’agitation mécanique	4
I.5.2 Mécanismes d’agitation	5
I.5.2.1 Agitateurs rotatifs	5
I.5.2.2 Agitateurs statiques	6
I.5.2.3 Agitateur à cuve mobile	7
I.5.2.4 Agitateurs à jets	7
I.5.2.5 Agitateurs ultra-sons	8
I.6 Domaine d'application de l'agitation mécanique	9
I.6.1 Chimie et Laboratoire.....	9
I.6.2 Industrie pharmaceutique.....	9
I.6.3 Industrie alimentaire	9
I.6.4 Industrie cosmétique.....	9
I.6.5 Industrie de la peinture et des revêtements.....	9
I.6.6 Industrie minière et traitement des minéraux.....	9
I.6.7 Industrie pétrolière et gazière	9
I.7 Caractéristiques hydrodynamiques d'un appareil d'agitation	10
I.8 turbulence.....	10

I.9 Action de cisaillement.....	10
I.10 Types d'écoulements	10
I.10.1 Ecoulement axial	10
I.10.2 Ecoulement radial	10
I.10.3 Ecoulement tangentiel	11
I.1 Cuves mécaniquement agitées	12
I.11.1 Cuve	12
I.11.2 Chicane	13
I.12 Agitateurs mécanique	14
I.12.1 Agitateurs de fluides peu visqueux	14
I.12.1.1 Agitateurs Turbines	14
I.12.1.2 Agitateur à hélice	15
I.12.2 Agitateurs de fluides très visqueux	16
I.12.2.1 Agitateurs à écoulement tangentielle	16
I.12.2.2 Agitateurs a écoulement axial	18
I.13 Mécanisme de mélange des fluides	18
I.13.1 Mécanisme de mélange laminaire	18
I.13.2 Mécanisme de mélange Turbulence	19
I.14 Choix d'un agitateur mécanique	19
I.15 Recherche bibliographique	21

Chapitre II : Formulation mathématique et présentation des Systèmes simulés

II.1. Introduction	24
II.2 Utilité et attendus de la CFD en ingénierie	24
II.3 Démarche de la CFD	24
II.4 Méthodes de discrétisation	25
II.4.1 Méthode des différences finis	25
II.4.1.1 Avantages.....	25
II.4.1.2 Inconvénients.....	26
II.4.2 Méthode des éléments finis	26
II.4.2.1 Avantages	26
II.4.2.2 Inconvénients.....	27
II.4.3 Méthode des volumes finis	27

II.4.3.1 Avantages.....	27
II.4.3.2 Inconvénients.....	28
II.4.3.1 Principe de méthode	28
II.4.3.4 Formulation bidimensionnelle par la MVF	29
II.5 Présentation des logiciels utilisés	31
II.5.1 Design Modeler ANSYS.....	31
II.5.1.1 Géométrie du système d'agitation.....	31
II.5.2 ANSYS Mesher.....	34
II.5.2.1 Maillage.....	34
II.5.2.2 Différents types de maillage.....	35
II.5.2.3 Choix de maillage.....	35
II.5.3 Présentation du code de calcul Fluent.....	36
II.6 Etapes de simulation de l'agitateur	36
II.7 Adimensionnalisation du système	37
II.8 Equations de mouvement	38
II.9 Domaine du calcul	38
II.10 Conditions aux limites	39
II.11 Hypothèses du travail	39

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1 Introduction	41
III.2 Forme (cadre).....	41
III.2.1 Validation de résultats obtenus	41
III.2.2 Contour des vitesses.....	44
III.2.3 Composantes de la vitesse.....	48
III.2.4 Influence du nombre de Reynolds sur les profils des vitesses tangentielles et radiales.....	50
III.3 Forme (L)	53
III.3.1 Contour des vitesses.....	53
III.3.2 Composantes de la vitesse.....	57
III.3.3 L'influence du nombre de Reynolds sur les profils des vitesses tangentielles	58
III.4 Comparaison entre la forme (cadre) et la forme (L).....	60
III.4.1 Vitesse tangentielle.....	60

III.4.2 Vitesse radiale.....	61
Conclusion Générale	64
Références bibliographiques	65
Résumé	68

Chapitre I : Généralités sur l'agitation mécanique

Figure I.1 Agitateur magnétique	6
Figure I.2 Mélangeur Statique (SMX)	6
Figure I.3 Mélangeurs à cuve mobile	7
Figure I.4 Mélange par jet	8
Figure I.5 Principe d'un mélangeur par jet dans une cuve de stockage	8
Figure I.6 Appareils ultra-sons	8
Figure I.7 Installation industrielle d'un système mécaniquement agité	12
Figure I.8 Cuves agitée : a) Cuve cylindrique à fond plat, b) Cuve cylindrique à fond rond, c) Cuve sphérique	13
Figure I.9 Emplacement des chicanes dans la cuve	14
Figure I.10 Turbines	15
Figure I.11 Hélice marine	15
Figure I.12 Bipale classique	16
Figure I.13 Bipale cadre	16
Figure I.14 Divers types d'agitateur à ancre	17
Figure I.15 Agitateur à barrières	17
Figure I.16 Agitateur à écoulement axial : a) Agitateur ruban hélicoïdal, b) Agitateur double ruban n'a pas inverse, c) Agitateur à vis sans fin	18
Figure I.17 Présentation schématique des types d'écoulements : a) Axial, b) Radial, c) Tangentiel	20

Chapitre II : Formulation mathématique et présentation des Systèmes

simulés

Figure II.1 Schéma représentant volume de contrôle bidimensionnel 29

Figure II.2 Discrétisation en volumes finis du domaine d'étude dans le cas bidimensionnel 30

Figure II.3 Description bidimensionnel d'un volume fini 30

Figure II.4 Représentation schématique de la cuve agitée forme (cadre). 33

Figure II.5 Représentation schématique de la cuve agitée forme (L). 33

Figure II.6 a) Maillage structuré, b) Maillage non structuré 35

Figure II.7 Géométrie de l'agitateur bipale (forme normale et forme L). 36

Figure II.8 Maillage de l'agitateur bipale (forme normale et forme L). 37

Chapitre III : Résultats et discussions

Figure III.1 Évolution de la vitesse tangentielle sur la pale de l'agitateur et son prolongement
($\Theta = 0$)42

Figure III.2 Évolution de la vitesse tangentielle sur la médiatrice de l'agitateur
($\Theta = 90$)43

Figure III.3 Évolution de la vitesse tangentielle sur la pale de l'agitateur et son prolongement
($\Theta = 0$)43

Figure III.4 Évolution de la vitesse tangentielle sur la médiatrice de l'agitateur
($\Theta = 90$)44

Figure III.5 Contours de vitesse tangentielle pour $R_e = 0.1$, $D/T=0.5$44

Figure III.6 Contours de vitesse tangentielle pour $R_e = 1$, $D/T=0.5$45

Figure III.7 Contours de vitesse tangentielle pour $R_e = 10$, $D/T=0.5$45

Figure III.8 Contours de vitesse tangentielle pour $R_e = 40$, $D/T=0.5$	46
Figure III.9 Contours de vitesse radiale pour $R_e = 0.1$, $D/T=0.5$	46
Figure III.10 Contours de vitesse radiale pour $R_e = 1$, $D/T=0.5$	47
Figure III.11 Contours de vitesse radiale pour $R_e = 10$, $D/T=0.5$	47
Figure III.12 Contours de vitesse radiale pour $R_e = 40$, $D/T=0.5$	48
Figure III.13 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ et la vitesse radiale V_r sur la pale de l'agitateur et son prolongement ($\Theta = 0$)	49
Figure III.14 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ et la vitesse radiale V_r sur la médiatrice de l'agitateur ($\Theta = 90$)	49
Figure III .15 Influence du R_e sur l'évolution de la vitesse radiale V_r sur la pale de l'agitateur de ($\theta = 90$).....	50
Figure III.16 Influence du R_e sur l'évolution de la vitesse radiale V_r sur la médiatrice de l'agitateur ($\Theta = 90$)	51
Figure III .17 Influence du R_e sur l'évolution de la vitesse tangentielle V_θ sur la pale de l'agitateur ($\theta = 0$).....	51
Figure III .18 Influence du R_e sur l'évolution de la vitesse tangentielle V_θ sur la pale de l'agitateur ($\theta = 0$).....	52
Figure III.19 Contours de vitesse tangentielle pour $R_e = 0.1$, $D/T=0.5$	53
Figure III.20 Contours de vitesse tangentielle pour $R_e = 1$, $D/T=0.5$	53
Figure III.21 Contours de vitesse tangentielle pour $R_e = 10$, $D/T=0.5$	54
Figure III.22 Contours de vitesse tangentielle pour $R_e = 40$, $D/T=0.5$	54
Figure III.23 Contours de vitesse radiale pour $R_e = 0.1$, $D/T=0.5$	55
Figure III.24 Contours de vitesse radiale pour $R_e = 1$, $D/T=0.5$	55
Figure III.25 Contours de vitesse radiale pour $R_e = 10$, $D/T=0.5$	56
Figure III.26 Contours de vitesse radiale pour $R_e = 40$, $D/T=0.5$	56

Figure III.27 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ et la vitesse radiale V_r sur la pale de l'agitateur et son prolongement ($\Theta = 0$).....57

Figure III.28 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ et la vitesse radiale V_r sur la médiatrice de l'agitateur ($\Theta = 0$)57

Figure III .29 Influence du R_e sur l'évolution de la vitesse tangentielle V_θ sur la pale de l'agitateur ($\theta = 0$).....58

Figure III.30 Influence du R_e sur l'évolution de la vitesse tangentielle V_θ sur la médiatrice de l'agitateur ($\Theta = 90$)59

Figure III.31 Influence de la forme de la pale de l'agitateur sur la vitesse tangentielle ($\Theta = 0$)60

Figure III.32 Influence de la forme de la pale de l'agitateur sur la vitesse tangentielle ($\Theta = 90$)60

Figure III.33 Influence de la forme de la pale de l'agitateur sur la vitesse radiale ($\theta = 0$).....61

Figure III.34 Influence de la forme de la pale de l'agitateur sur la vitesse radiale ($\theta = 90$).....62

Liste des tableaux

Tableau.I.1 : Exemples des patrons d'écoulement des agitateurs : Hélice, Turbine et Ancre 11

Tableau I.2 : Domaines d'utilisation des divers types de mobiles en fonction de la viscosité du fluide.....20

Tableau II.1 : Domaine de calculs.....39

Nomenclature

<i>da</i>	Diamètre de l'arbre d'agitation	[m]
<i>e</i>	Epaisseur de la pale	[m]
<i>H</i>	Distance entre l'extrémité de l'agitateur et le fond de la cuve	[m]
<i>L</i>	Longueur de la pale forme (L)	[m]
<i>P</i>	Pression	[pa]
<i>R</i>	Cordonnée cylindrique radiale	
<i>T</i>	Temps	[s]
<i>V</i>	Vecteur vitesse	[m s ⁻¹]
<i>D</i>	Diamètre de l'agitateur	[m]
<i>H</i>	Niveau de liquide dans la cuve	[m]
<i>N</i>	Vitesse de rotation de l'agitateur	[Rad/s]
<i>Re</i>	Nombre de Reynolds	
<i>S</i>	Frontière du domaine de calcul	
<i>T</i>	Diamètre de la cuve	[m]
<i>V</i>	Volume de la cuve	[m ³]
<i>V_θ, u_θ</i>	Vitesse tangentielle	[m s ⁻¹]
<i>V_r, u_r</i>	Vitesse radiale	[m s ⁻¹]

Lettre grecques :

E	Erreur pour tester la convergence	
M	Viscosité dynamique du fluide	$[kg\ m^{-1}\ s^{-1}]$
ρ	Masse volumique du fluide	$[kg\ m^{-3}]$
Ξ	Abscisse d'un point de calcul dans le plan référence	[m]
θ	Coordonnée cylindrique tangentielle	[pa]
ω	Vitesse angulaire	[s ⁻¹]

Indices :

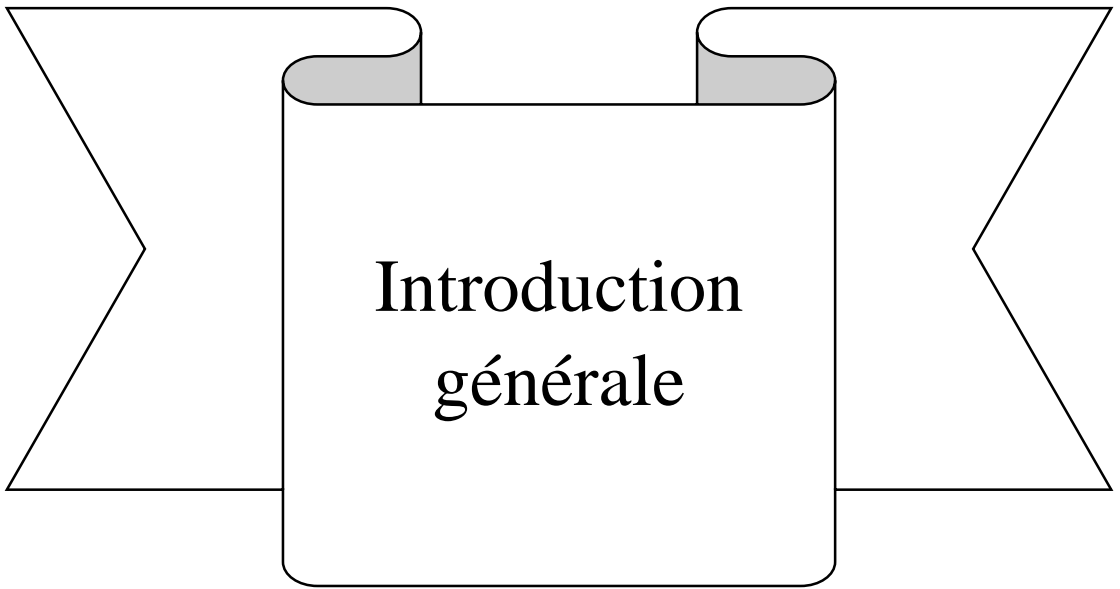
E	Point à l'est du point P
N	Point au nord du point p
P	Point au centre du volume fini
S	Point au sud du point P
W	Point au l'ouest du point P

Abréviations :

CFD	Computational Fluide Dynamics
MDF	Methode des differentes finis
MEF	Methode des Elements finis
MVF	Methode des Volumens finis

Symboles :

$=$	Tenseur
Δ	Différence
$*$	Notation des variables adimensionnelles
$[]$	Matrice
$\{ \}$	Vecteur



Introduction
générale

L'agitation mécanique est un processus qui vise à créer un mouvement dans un fluide visqueux, comme un liquide ou un gaz, pour améliorer sa circulation, son mélange, ou son échange de chaleur. Cela est essentiel dans de nombreux domaines, tels que la chimie, la biologie, l'agroalimentaire, et la mécanique, où il est utilisé pour des opérations telles que la fabrication de mélanges homogènes, la dissolution, la cristallisation, l'extraction, et la réaction chimique.

L'agitation mécanique peut être réalisée de différentes manières, notamment : Mobiles à pales, Ancres, Barrières, Turbines, Agitateurs-plans et Autres agitateurs.

Les caractéristiques des écoulements créés par ces différents types d'agitateurs dépendent de plusieurs facteurs, notamment le nombre de Reynolds, et l'influence de la vitesse et de la direction du mouvement.

Il est toutefois crucial d'être informé que la simulation numérique s'appuie sur des modèles mathématiques et des postulats, cette situation pouvant engendrer un certain degré d'incertitude dans les résultats. De ce fait, il devient impératif de vérifier la validité des simulations au moyen de données expérimentales lorsqu'elles sont disponibles, afin d'en garantir l'exactitude et la fiabilité.

Notre travail est organisé de la façon suivante :

Dans le premier chapitre, nous examinons en détail les divers types d'agitateurs mécaniques employés dans plusieurs domaines industriels tels que la chimie, la pétrochimie, l'agroalimentaire, le nucléaire et l'industrie pharmaceutique. Nous étudions les méthodes d'agitation variées, leurs principes de fonctionnement et leurs usages spécifiques.

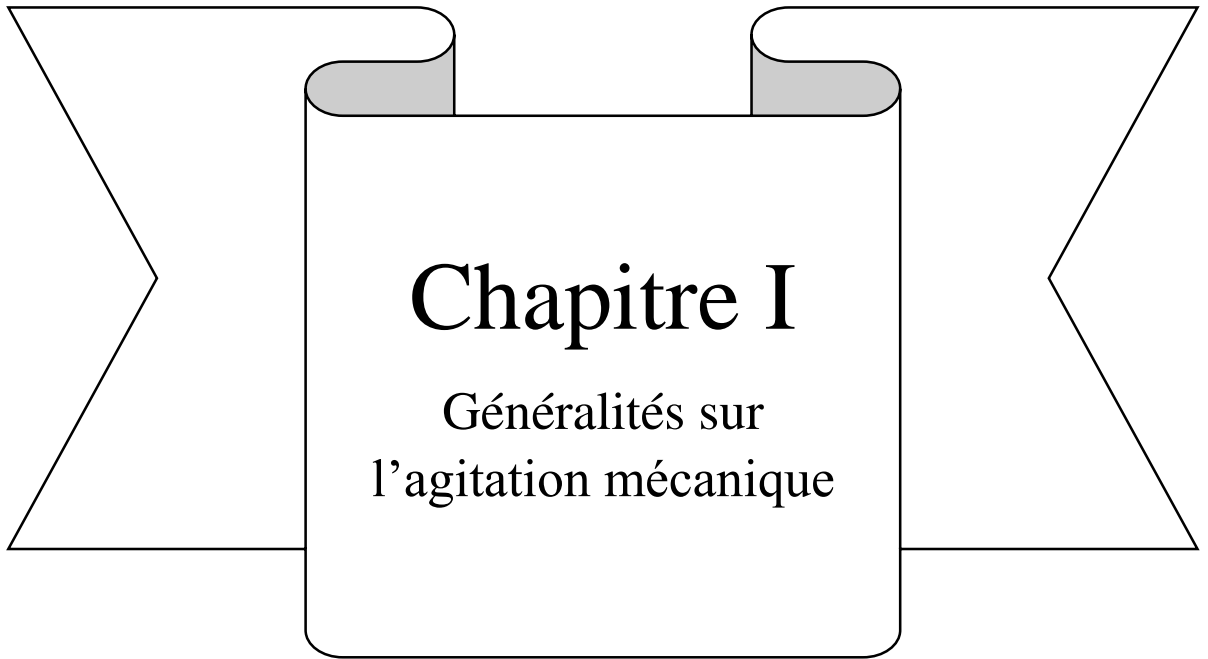
Le deuxième chapitre se concentre sur les formulations mathématiques et les méthodes numériques utilisées pour étudier l'écoulement des fluides dans une cuve agitée. Nous détaillons plus particulièrement la méthode des volumes finis, qui permet de discrétiser les équations de conservation et de résoudre numériquement le comportement des fluides newtoniens dans des conditions d'agitation mécanique. Nous abordons également d'autres méthodes numériques couramment utilisées, telles que les différences finies et les éléments finis, en soulignant leurs avantages et leurs inconvénients.

Dans le troisième chapitre, nous discutons et analysons les résultats obtenus à partir de

Nos simulations numériques. Nous les comparons également à des résultats expérimentaux et à d'autres résultats numériques disponibles dans la littérature.

Après, nous avons réalisé une nouvelle simulation géométrique pour un agitateur bipale de forme L, analysant l'évolution des vitesses tangentielle et radiale générées, ainsi que l'impact du nombre de Reynolds sur la nature des écoulements, et nous avons fait une comparaison entre les caractéristiques de la pale de forme (cadre) et de forme (L).

Le travail se termine par une conclusion générale qui synthétise les résultats obtenus



Chapitre I

Généralités sur
l'agitation mécanique

I.1 Introduction

Les techniques d'agitation, qui ont longtemps été considérées comme un art, Le processus de mélange, qui vise à homogénéiser un milieu afin de produire un produit répondant à des spécifications précises, revêt une importance cruciale dans l'industrie. Des exemples de cette opération se trouvent dans divers types de procédés. L'agitation est une étape essentielle dans la plupart des procédés, qu'ils soient chimiques, agroalimentaires, pharmaceutiques ou autres. [1]

I.2 Historique du mélange

Au 16ème siècle, les premières avancées dans le domaine du mélange industriel ont été réalisées par Georgio Agricola en France. Cependant, c'est au cours de la deuxième vague de la révolution industrielle et technologique, qui a eu lieu dans la seconde moitié du 19ème siècle, que William Froude (1868) et Osborne Reynolds (1885) ont introduit des nombres adimensionnels clés, marquant ainsi le début de la mécanique des fluides : les nombres de Froude et de Reynolds. Ces avancées ont conduit à l'utilisation d'agitateurs en forme d'hélice marine pour le mélange industriel.

75 ans plus tard, en 1950, John Henry Rushton a introduit le premier agitateur adoptant une configuration qui est aujourd'hui devenue la norme. Avant la publication du premier ouvrage dédié au mélange industriel en 1966, des chercheurs s'intéressaient déjà aux surfaces libres présentes dans les cuves de mélange, ce qui a conduit à l'émergence de publications scientifiques dès les années 1950. [2]

La décennie suivante a été marquée par une augmentation significative de la production scientifique sur le mélange, notamment avec la publication d'un livre de référence compilant les travaux de Shiji Nigata en 1975. Les années 1980 ont vu l'émergence de la simulation numérique appliquée au mélange, ce qui a contribué à l'essor de la recherche sur ce sujet. Depuis lors, le mélange est devenu un domaine majeur de la recherche académique et industrielle. Aujourd'hui, la recherche sur le mélange est présente dans de nombreuses régions du monde, notamment en Amérique du Nord et du Sud, en Europe, en Inde et en Asie de l'est. [3]

I.3 Définition de mélange

Un mélange est une combinaison de deux ou plusieurs substances physiquement mélangées ensemble sans réaction chimique entre elles. Les substances individuelles

conservent leurs propriétés distinctes et peuvent être séparées par des méthodes physiques telles que la filtration, la décantation ou la distillation.

On peut distinguer deux types de mélange : [4]

- ❖ **Mélange homogène** : un mélange est dit homogène, si ne pouvons pas distinguer ces différents constituants à l'œil nu après agitation.
- ❖ **Mélange hétérogène** : un mélange est dit hétérogène si au moins deux de ses constituants sont visibles à l'œil nu même après agitation.

I.4 Opérations de mélange

En excluant les mélanges gaz-gaz, solide-solide et solide-gaz (lits fluidisés), les opérations de mélange peuvent être regroupées en quatre grandes catégories d'application, chacune étant définie par ses propriétés physiques ou chimiques. Il est important de noter qu'un problème donné est rarement lié à une seule caractéristique, mais plutôt à un ensemble de caractéristiques. Ainsi, il est essentiel d'identifier clairement les étapes qui limitent le processus.

[4]

I.5 Mécanisme d'Agitation :

I.5.1 Définition de l'agitation mécanique

Les techniques d'agitation, qui ont longtemps été considérées comme un art, implique de mettre en mouvement un milieu, qu'il soit monophasique ou polyphasique, et de le mélanger. En général, l'agitation n'est pas un objectif en soi, mais plutôt un moyen de démarrer ou d'accélérer les processus de transfert (transfert de quantité de mouvement, transfert de matière, transfert de chaleur) dans de nombreuses opérations physico-chimiques. Son domaine d'application est principalement limité au mélange d'une phase liquide continue pouvant contenir une ou plusieurs autres phases dispersées (gaz, liquide ou solide).

Le mélange peut être effectué de deux manières : en faisant tourner un agitateur dans une cuve ou en utilisant des obstacles fixes dans une conduite, appelés mélangeurs statiques. Ces deux types d'agitateurs ont des applications complémentaires : les mélangeurs statiques sont efficaces pour mélanger des fluides très visqueux ou de viscosités très différentes, tandis que l'agitation en cuve est généralement préférée pour sa capacité à produire un écoulement et des contraintes uniformes à moindre coût.

Cependant, cette méthode est limitée aux applications continues. La cuve agitée mécaniquement peut être utilisée en mode batch ou continu. Dans cette étude, je me concentrerai exclusivement sur l'utilisation de la cuve agitée mécaniquement. [5]

I.5.2 Mécanisme d'Agitation

Il existe divers modes d'agitation présents dans les secteurs industriels ou de recherche, chacun étant distinct des autres. Parmi eux, on trouve :

- Les agitateurs mécaniques (rotatifs)
- Les agitateurs statiques (tube muni de chicanes)
- Les agitateurs à cuve tournante (type bétonnière)
- Les agitateurs par propulsion d'un jet de liquide grâce à une pompe
- Les agitateurs ultra-sons. [6]

I.5.2.1 Agitateurs rotatifs

Deux modes d'agitation sont communément employés : l'agitation mécanique et l'agitation magnétique :

A) Agitateurs mécaniques

Cette méthode d'agitation implique l'utilisation d'un dispositif rotatif où un bras tourne à l'intérieur de la cuve tout en pivotant sur lui-même. Le système d'agitation peut varier en forme et en taille, plongeant dans la cuve contenant les substances à mélanger. Pour optimiser le mélange, des chicanes peuvent être placées dans la cuve ou plusieurs hélices peuvent être disposées à différents niveaux. [6]

B) Agitateurs magnétiques

Il s'agit de la méthode la plus pratique et la plus simple à mettre en œuvre. Pour l'utiliser, on place un barreau magnétique avec un revêtement interne dans le mélange à agiter. Selon le type de récipient, différents types de barreaux sont disponibles : des barreaux simples pour les récipients à fond plat, en forme d'olive pour les ballons et en forme de croix pour les tubes à essai. Le barreau magnétique dans le mélange est entraîné par un aimant tournant situé sous le récipient. La plupart du temps, on utilise des agitateurs magnétiques chauffants qui permettent de combiner l'agitation et le chauffage, (**figure I.1**) comme leur nom l'indique clairement. [7]



Figure I.1 Agitateur magnétique [7]

I.5.2.2 Agitateurs statiques

Un mélangeur statique est constitué d'un ensemble d'éléments fixes disposés dans un tube, une colonne ou un réacteur. Ces éléments sont conçus pour redistribuer le fluide dans des directions transverses. Chaque motif d'élément possède une géométrie spécifique qui vise, lors d'un mélange en régime laminaire, à étirer, diviser et recombinaer les flux de matière. L'agencement successif de ces éléments permet une division de plus en plus fine. En régime turbulent, le niveau de turbulence généré est plus élevé que celui observé dans un tube vide en raison des interactions entre le fluide et les éléments. Le nombre d'éléments disposés en série dépend de l'opération de mélange et de la complexité de ladite opération, comme illustré dans (la figure I.2). [8]

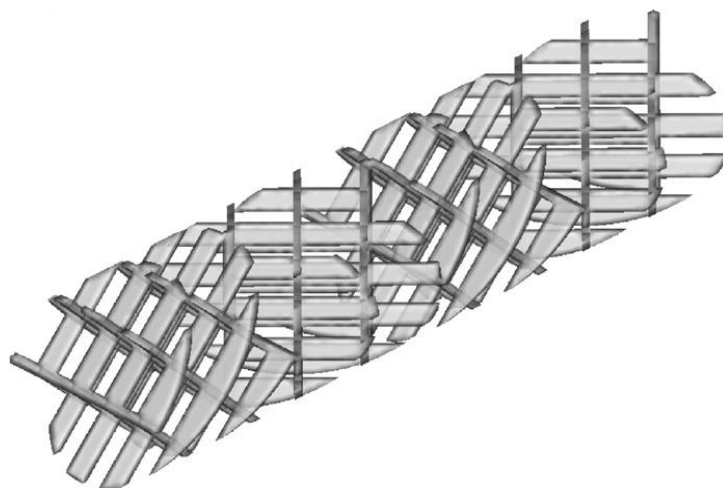


Figure I.2 Mélangeur Statique (SMX) [8]

I.5.2.3 Agitateur à cuve mobile

Les mélangeurs "par retournement" fonctionnent en faisant tourner une enceinte fermée autour d'un axe, ce qui entraîne le déplacement des particules à la surface du mélange. La taille de la cuve peut varier considérablement, allant de quelques litres pour les modèles de laboratoire à plusieurs dizaines de mètres cubes pour les plus grands. Le taux de remplissage habituel est de 50% du volume total pour permettre aux particules de se déplacer librement.

La vitesse de rotation, généralement entre 3 et 100 $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$, est ajustée en fonction de la capacité de la cuve, mais elle doit être environ la moitié de la vitesse critique du mélangeur. Ces mélangeurs sont simples car ils ne possèdent pas de pièces internes, ce qui facilite leur nettoyage. C'est pourquoi ils sont largement utilisés dans l'industrie pharmaceutique. Les types les plus courants de mélangeurs par retournement sont les mélangeurs cubiques, cylindriques en V ou en Y. [9]

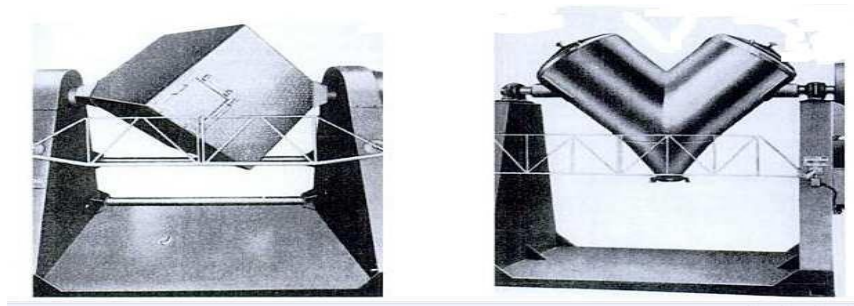


Figure I.3 Mélangeurs à cuve mobile [9]

I.5.2.4 Agitateurs à jets

Le mélange par jet (**figure I.4**) impactant est couramment utilisé dans de nombreuses applications industrielles, notamment pour le mélange de gaz ou de liquides. Cette technique permet d'améliorer le contact entre deux fluides et d'accélérer les échanges de chaleur et de matière. Dans les cuves agitées, les jets impactant permettent d'obtenir un excellent mélange microscopique, en particulier lorsque les vitesses de jet sont comprises entre 2 et 5 m/s. Toutefois, la zone d'action des jets est limitée à un faible volume. Le mélange généré par jet est de type turbulent, et le phénomène de mélange est d'autant plus favorisé que la turbulence est élevée dans les zones où les fluides se rencontrent, comme illustré dans la figure I.4. [10]

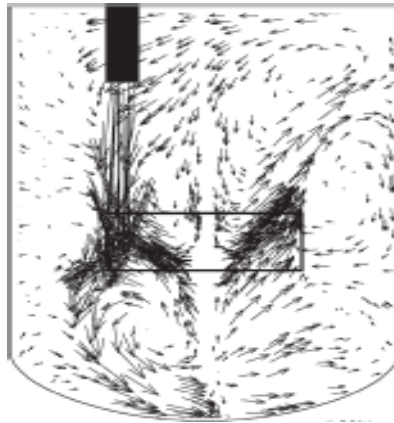


Figure I.4 Mélange par jet [10]

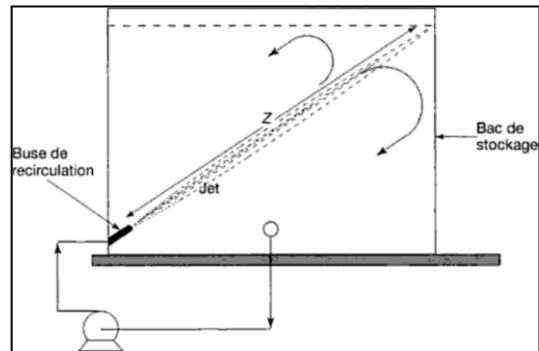


Figure I.5 Principe d'un mélangeur par jet dans une cuve de stockage. [12]

I.5.2.5 Agitateurs ultra-sons

Le filet fluide traverse une lame vibrante à des fréquences ultrasoniques. Ce type de mélangeur est largement utilisé pour accélérer les réactions chimiques, qu'elles soient homogènes (liquides ou solides) ou hétérogènes (liquide-solide). [11]



Figure I.6 Appareils ultra-sons [11]

I.6 Domaine d'application de l'agitation mécanique

L'agitation mécanique trouve de nombreuses applications dans divers domaines. Voici quelques-uns des principaux domaines d'application :

I.6.1 Chimie et Laboratoire

Utilisée pour mélanger des réactifs chimiques dans des expériences de laboratoire, la synthèse organique, la préparation d'échantillons, etc. [12]

I.6.2 Industrie pharmaceutique

Dans la fabrication de médicaments, l'agitation mécanique est utilisée pour mélanger des ingrédients actifs, des excipients et d'autres composants pour produire des formulations pharmaceutiques. [13]

I.6.3 Industrie alimentaire

Pour mélanger des ingrédients dans la production alimentaire, comme la préparation de pâtes, la fabrication de boissons, la production de sauces, etc. [14]

I.6.4 Industrie cosmétique

Dans la fabrication de produits cosmétiques tels que les crèmes, les lotions, les gels, où différents ingrédients doivent être homogénéisés. [15]

I.6.5 Industrie de la peinture et des revêtements

Pour mélanger des pigments, des liants et d'autres additifs dans la production de peintures, de vernis et de revêtements. [16]

I.6.6 Industrie minière et traitement des minéraux

Utilisée dans les processus de concentration et de séparation des minéraux, ainsi que dans les processus de lixiviation. [17]

I.6.7 Industrie pétrolière et gazière

Pour mélanger des produits pétroliers et des additifs dans le raffinage du pétrole et dans les processus de forage et de production de pétrole et de gaz. [18]

I.7 Caractéristiques hydrodynamiques d'un appareil d'agitation

Trois concepts définissent les effets d'un mobile d'agitation dans une cuve :

- La turbulence
- Le cisaillement.
- L'écoulement du fluide

Ces trois concepts fournissent une définition objective de l'action d'un agitateur mobile. [19]

I.8 turbulence

La turbulence se manifeste dans les écoulements au-delà d'un seuil spécifique du nombre de Reynolds. Elle est largement influencée par la forme de l'objet en mouvement. Ainsi, pour des nombres de Reynolds équivalents, la turbulence peut varier d'un dispositif à un autre en raison de leurs géométries distinctes. [20]

I.9 Action de cisaillement

La notion de cisaillement correspond aux forces qui émergent entre deux strates de fluide se déplaçant à des allures inégales dans un flux unidirectionnel. [20]

I.10 Types d'écoulements

Dans une cuve munie d'un agitateur rotatif, l'écoulement du produit est extrêmement complexe, puisqu'il se développe dans les trois directions de l'espace. Cependant, on peut définir trois types d'écoulements en considérant la direction du liquide dans le courant de refoulement du mobile. [20]

I.10.1 Ecoulement axial

Dans ce type d'écoulement, le liquide se déplace verticalement autour de l'axe et le long des parois de la cuve. Les hélices et les hélicoïdes agissent en tant qu'agitateurs axiaux : ils aspirent et expulsent le liquide dans la direction axiale. [20]


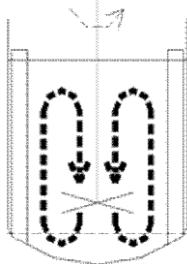

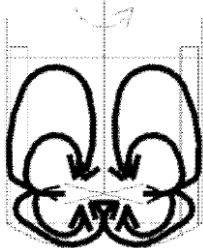

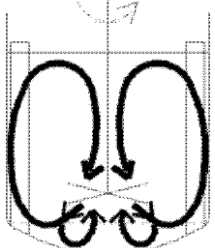


I.10.2 Ecoulement radial

Dans ce cas, le flux est généré par un mouvement horizontal vers la paroi de la cuve, imprimé au liquide par la rotation du module d'agitation. L'eau se divise alors en deux flux, l'un s'écoulant vers le fond du réservoir et l'autre remontant à la surface du liquide. [20]

I.10.3 Ecoulement tangentiel

Dans lequel le fluide se déplace essentiellement en rotation en un seul bloc autour de l'axe du dispositif de déplacement d'agitation. [20]

Tableau 1.2 Exemples des patrons d'écoulement des agitateurs : Hélice, Turbine et Ancre :

Ecoulement	Agitateur	Patron d'écoulement
Axial	 <p>Hélice</p>	
Radial	 <p>Turbine</p>	
Mixte	 <p>Turbine à pales inclinées</p>	
Tangentielle	 <p>Ancre</p>	

I.11 Cuves mécaniquement agitées

Le design de la cuve contenant le liquide à mélanger joue un rôle crucial dans le processus d'agitation. Les recherches les plus récentes recommandent la forme sphérique, en particulier pour le mélange de fluides hautement visqueux (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Cependant, dans la pratique courante, les cuves les plus courantes sont cylindriques, avec des diamètres allant de 10 cm pour les équipements de laboratoire à 10 m et plus pour les installations industrielles. [21]

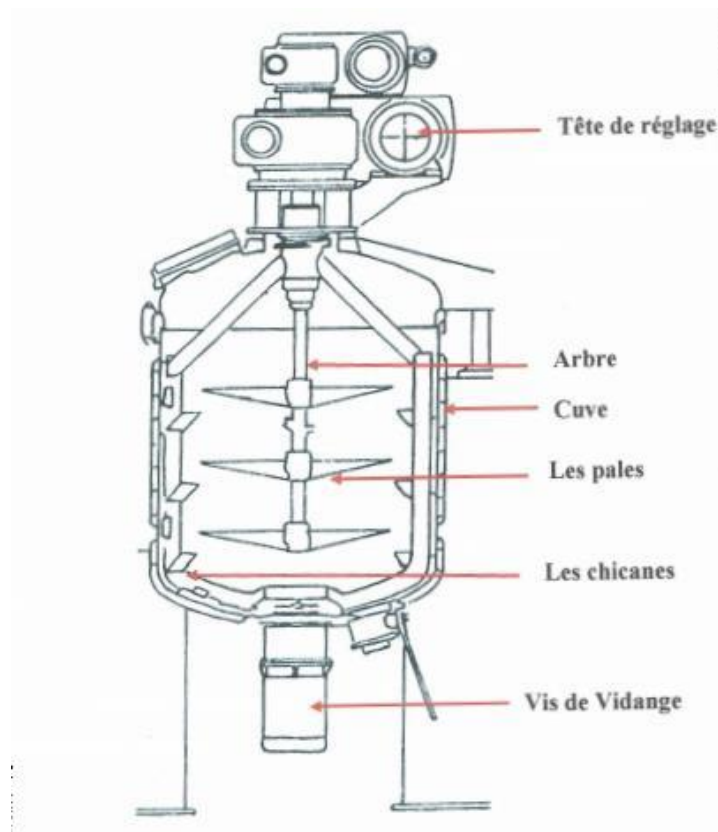


Figure I.7 Installation industrielle d'un système mécaniquement agité [21]

I.11.2 cuve

La forme de la cuve contenant le liquide à agiter est un élément crucial dans le processus d'agitation. Les recherches les plus récentes indiquent que les cuves de forme sphérique sont particulièrement efficaces pour mélanger des fluides à haute viscosité. Cependant, dans la pratique courante, les cuves les plus couramment utilisées sont de forme cylindrique, avec des diamètres variant de 10 cm pour les équipements de laboratoire à plus de 10 mètres pour les installations industrielles. Le fond de la cuve peut être plat (surtout pour les équipements de

laboratoire), bombé ou conique, par exemple pour faciliter les vidanges. Pour éviter la formation d'un mouvement de rotation du liquide, ces cuves sont souvent équipées de chicanes. [11]

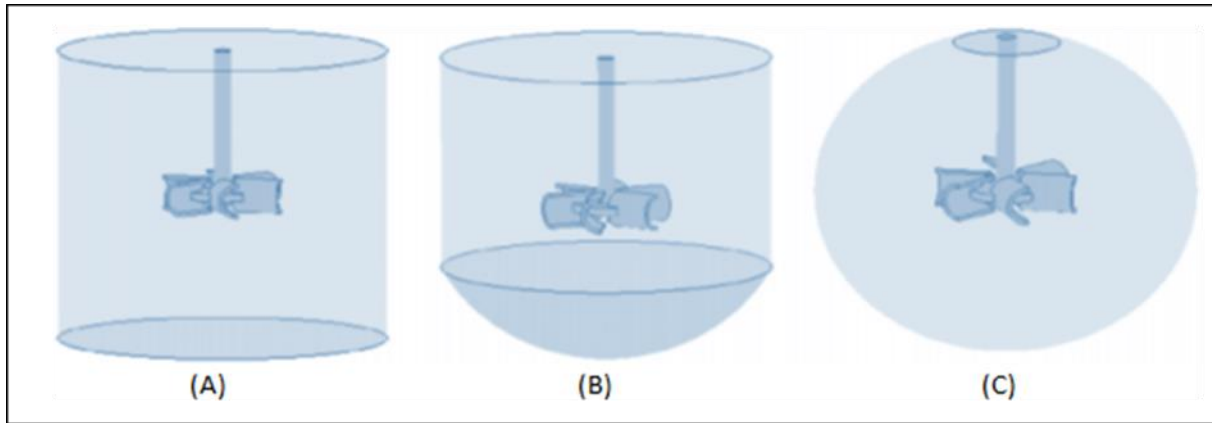


Figure I.8 Cuves agitées : a) cuve cylindrique à fond plat, b) cuve cylindrique à fond rond, c) cuve sphérique. [22]

I.11.1 Chicanes

Ces dispositifs (**figure I.9**) sont constitués de plaques planes fixées aux parois de la cuve ou séparées de celles-ci, avec une largeur comprise entre $1/10$ et $1/20$ du diamètre de la cuve, et généralement disposées en 4 ou 6 exemplaires de manière symétrique (Figure I.8). Leur objectif est d'améliorer l'efficacité du mélange et d'empêcher la formation de tourbillons, bien qu'ils entraînent une augmentation de la consommation d'énergie dans la cuve de mélange.

Plusieurs configurations de chicanes sont disponibles dans une cuve agitée, en fonction de leur application. Pour un fonctionnement optimal, il est recommandé d'utiliser autant de chicanes dans la cuve que l'agitateur a de pales (par exemple, le Maxblend (TM) utilise juste deux chicanes).

D'un autre côté, le transfert de matière est plus intense dans les cuves sans chicanes. L'analyse de leur fonctionnement peut être basée sur une étude du phénomène de tourbillon et des conditions hydrodynamiques qui se développent lors de l'agitation. [11]

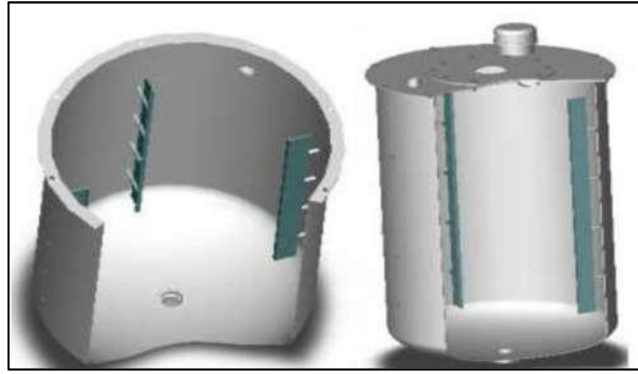


Figure I.9 Emplacement des chicanes dans la cuve. [22]

I.12 Agitateurs mécanique

De manière générale, les agitateurs sont installés sur un arbre vertical, centré ou décentré, et placés dans une cuve cylindrique verticale. Leur efficacité dépend fortement des propriétés physico-chimiques du liquide à traiter et de la tâche à accomplir. La viscosité du fluide est un critère majeur pour différencier les types d'agitateurs. Deux grandes catégories d'agitateurs sont couramment utilisées en fonction de la viscosité du fluide. [23]

I.12.1 Agitateurs de fluides peu visqueux

L'agitation de fluides peu visqueux, caractérisés par une viscosité inférieure à 10-2 Pa.s, se réalise à des nombres de Reynolds élevés. Ce passage à un régime d'écoulement turbulent accroît considérablement la complexité du processus. Les agitateurs utilisés dans ce contexte ont des dimensions réduites, représentant généralement entre 1/4 et 2/3 du diamètre de la cuve, et fonctionnent à des vitesses élevées allant de 500 à 1500 tours par minute. Deux principales catégories de mobiles sont employées pour l'agitation de milieux peu visqueux : les hélices et les turbines. Ces derniers, incluant les hélices, les turbines et les mobiles à pales inclinées, sont couramment choisis pour agiter des fluides à faible viscosité. Ils génèrent un flux perpendiculaire à l'axe de l'agitateur, induisant des effets de cisaillement significatifs. Ces mobiles sont spécifiquement conçus pour favoriser la turbulence dans le mélange. [23]

I.12.1.1 Agitateurs Turbines

Elles sont généralement composées de plusieurs pales verticales (de 4 à 20 pales) fixées sur un disque horizontal. La hauteur des pales varie entre 0,1 et 0,3 fois leur diamètre. La

configuration la plus courante comprend six pales, connue sous le nom de turbine de Rushton (**Figure I.10**). Ces éléments mobiles se distinguent par un écoulement à refoulement radial. [25]

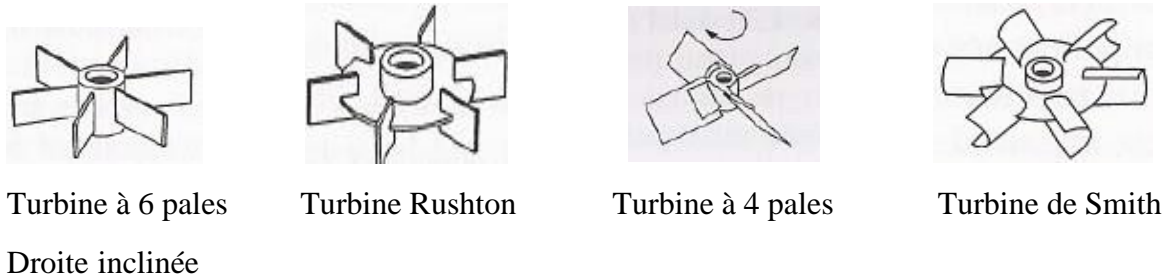


Figure I.10 Turbines [24]

I.12.1.2 Agitateur à hélice

Les hélices marines (**figure I.11**) et les hélices profilées sont deux catégories d'hélices qui génèrent un écoulement axial. Les hélices marines, qui sont les plus connues du grand public, ont un pas égal au diamètre de l'hélice. Les hélices profilées, quant à elles, regroupent les hélices à pales minces proposées par les constructeurs. Ces dernières produisent un écoulement principalement axial.

Lorsque le liquide est refoulé par l'hélice vers le fond, il remonte verticalement le long des parois de la cuve et redescend ensuite le long de l'axe de l'agitateur. Il est également possible de trouver un écoulement dans le sens inverse en modifiant le sens de rotation de l'hélice. [22]



Figure I.11 Hélice marine [24]

I.12.2 Agitateurs de fluides très visqueux

Les mobiles adaptés aux fluides très visqueux, couramment utilisés dans les industries chimiques (caoutchouc, plastiques, céramique, savon, etc.) et agroalimentaires, sont conçus pour traverser tout le volume à mélanger.

On distingue deux grandes familles :

- ❖ Les agitateurs plans où l'écoulement engendré est tangentiel tels que : le bipale, ancre et barrière.
- ❖ Les agitateurs hélicoïdaux où l'écoulement engendré est axial tels que : les vis hélicoïdales et les rubans hélicoïdaux. [24]

I.12.2.1 Agitateurs à écoulement tangentiel

A) Agitateur bipale

Le bipale, la configuration la plus simple, a un rapport de diamètre de l'agitateur sur le diamètre de la cuve (d/D) compris entre 0,3 et 0,9. Pour un bipale classique, le rapport de la hauteur de l'agitateur sur le diamètre de la cuve (H/D) varie de $1/12$ à $1/3$. Lorsque ce rapport (H/D) devient proche de 1, l'agitateur prend la forme d'un cadre (ou feuille). Cette conception est généralement utilisée pour des agitations douces, avec une vitesse des pales ne dépassant pas 3 m/s. [24]

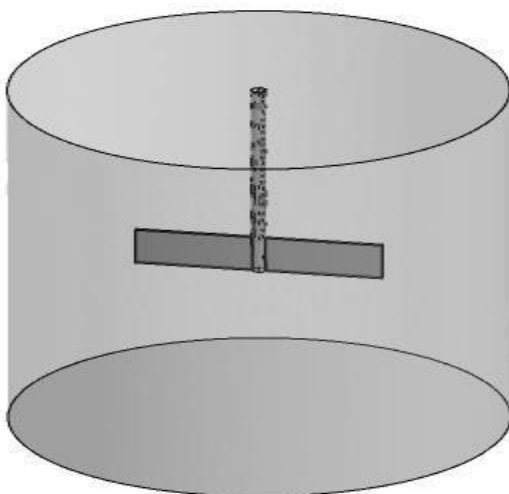


Figure I.12 Bipale classique [24]

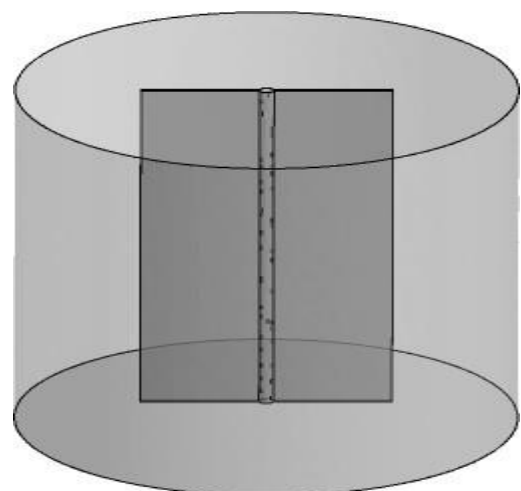


Figure I.13 Bipale cadre [24]

B) Agitateur ancre

Les mélangeurs à ancre sont spécialement conçus pour manipuler des fluides très visqueux, avec une viscosité allant de 10 à 100 Pa.s, principalement dans les processus de polymérisation et certains procédés industriels alimentaires (Pedrosa et Nunhez, 2000).

Ces agitateurs sont généralement équipés de bras horizontaux qui épousent la forme de la cuve, avec des pales verticales fixées aux extrémités des bras pour faciliter le mouvement vertical du mélange. Leur diamètre est généralement compris entre 0,95 et 0,98 de celui de la cuve. La largeur des bras peut varier de 0,05 à 0,10 fois le diamètre de l'ancre. Les vitesses périphériques sont habituellement assez faibles, allant de 1 à 3 m/s. Il existe d'autres types d'ancres, comme le cadre, qui peuvent être utilisés pour l'homogénéisation sur une large gamme de viscosités. [24]

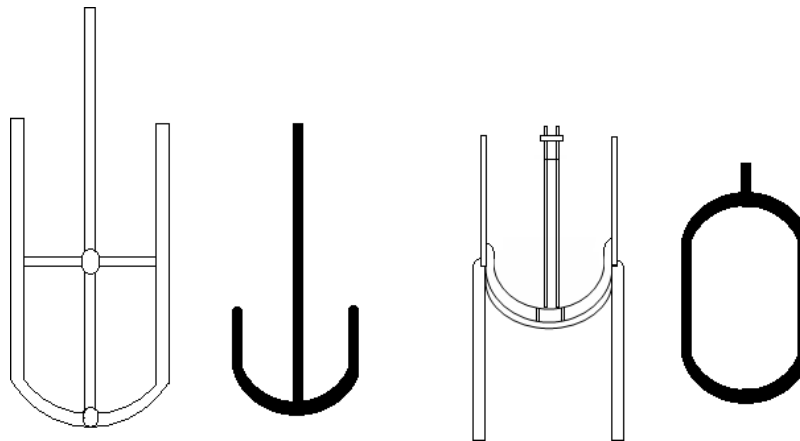


Figure I.14 Divers types d'agitateur à ancre [24]

C) Agitateurs barrières

Les agitateurs sont composés d'un ensemble de barres horizontales et verticales. Ils tournent généralement à des vitesses faibles pour réduire la consommation d'énergie. Ils sont couramment utilisés pour mélanger de grands réservoirs pour des opérations de traitement des eaux. [24]

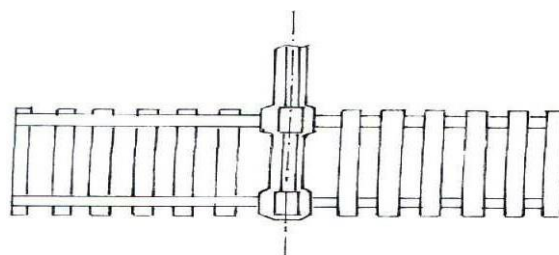


Figure I.15 Agitateur à barrières [24]

I.12.2.2 Agitateurs à écoulement axial

Dans cette catégorie, nous trouvons les rubans hélicoïdaux et les agitateurs à vis sans fin. Ces systèmes d'agitation sont principalement utilisés pour le mélange et l'homogénéisation de milieux très visqueux. Dans le cas des agitateurs à vis sans fin, l'écoulement axial créé au centre du récipient est guidé vers le bas par des chicanes ou un tube de circulation qui entoure la vis. En revanche, les agitateurs à rubans hélicoïdaux raclent presque la paroi, ce qui permet la circulation axiale du fluide le long de la paroi, ce qui est intéressant lorsqu'il y a un échange thermique avec la paroi. Le plus souvent, dans le cas de fluides très visqueux difficiles à mélanger, on associe les deux mobiles pour assurer une meilleure circulation et éliminer les zones mortes. [25]

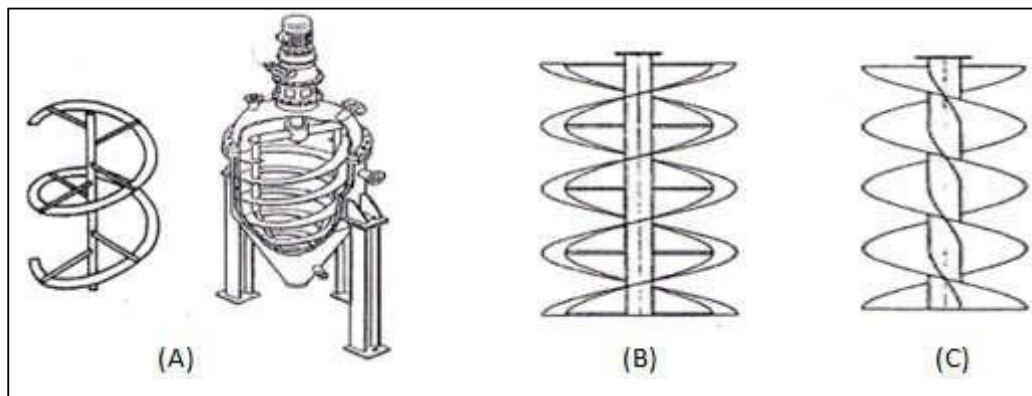


Figure I.16 Agitateur à écoulement axial :a) Agitateur type ruban hélicoïdal, b) Agitateur double ruban à pas inverse, c) Agitateur à vis sans fin. [25]

I.13 Mécanisme de mélange des fluides

I.13.1 Mécanisme de mélange laminaire

Sous l'influence des agitateurs en mouvement, le fluide subit un étirement qui le transforme en éléments lamellaires. Ces lamelles se trouvent à s'étendre, réduisant la distance entre elles et augmentant les surfaces de contact. De plus, elles subissent des phases de découpe et de recombinaison successives. Ce processus se répète jusqu'à ce que les lamelles atteignent une épaisseur caractéristique suffisamment fine pour garantir un mélange réussi à l'échelle macroscopique.

L'étirement est généralement induit par les gradients de vitesse dans le système, tandis que les phases de découpe et de recombinaison sont causées par des fluctuations ou des

perturbations dans l'écoulement du fluide. Par exemple, dans une cuve agitée, les pales de l'agitateur provoquent ces phases de manière périodique. Dans le processus de mélange, l'objectif est d'obtenir des lamelles très fines tout en assurant une répartition homogène de leur épaisseur dans l'espace. [10]

I.13.2 Mécanisme de mélange Turbulence

Dans les cuves de mélange contenant des hélices rotatives, l'écoulement de fluides à faible viscosité (inférieure à 10 mPa.s) est généralement turbulent. Dans ce régime turbulent, impulser en rotation confère suffisamment d'inertie au fluide pour le faire circuler facilement dans tout le récipient. Cette circulation turbulente entraîne une diffusion tourbillonnaire intense, principalement dans la région de la roue, qui accélère considérablement le mélange par rapport à un écoulement laminaire. Bien que la diffusion moléculaire soit nécessaire pour atteindre l'homogénéisation à l'échelle moléculaire, elle est beaucoup plus rapide dans ces fluides à faible viscosité que dans les fluides à haute viscosité. Par conséquent, le processus global de mélange jusqu'au niveau moléculaire est nettement plus rapide dans un écoulement turbulent que dans un écoulement laminaire. [20]

I.14 Choix d'un agitateur mécanique

Le choix d'un agitateur mobile dépend principalement de la viscosité du milieu (Figure I.17) à agiter et du type de mouvement qu'il imprime au fluide. Les agitateurs peuvent être classés en quatre catégories principales : à écoulement radial, à écoulement axial, à écoulement mixte et ceux adaptés à l'agitation de fluides très visqueux.

Les agitateurs à écoulement axial produisent un mouvement qui suit l'axe de l'agitateur, tandis que les agitateurs à écoulement radial provoquent un mouvement perpendiculaire à cet axe. Certains agitateurs sont conçus pour combiner ces deux types de mouvements, produisant ainsi un écoulement mixte. [1]

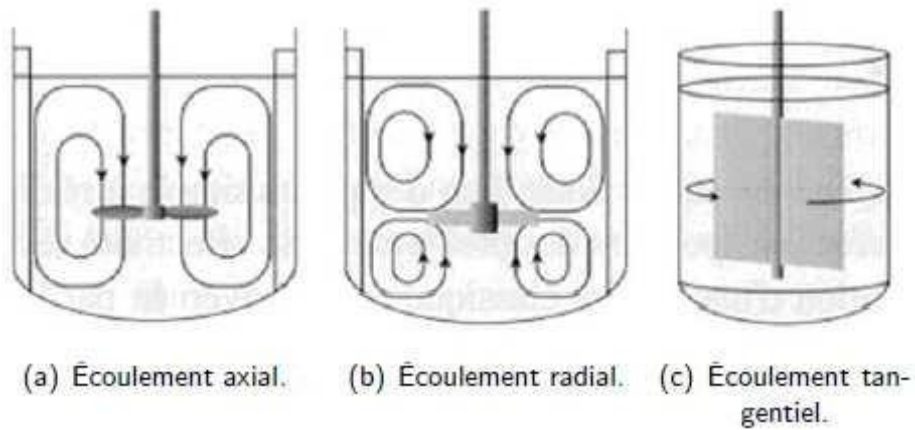
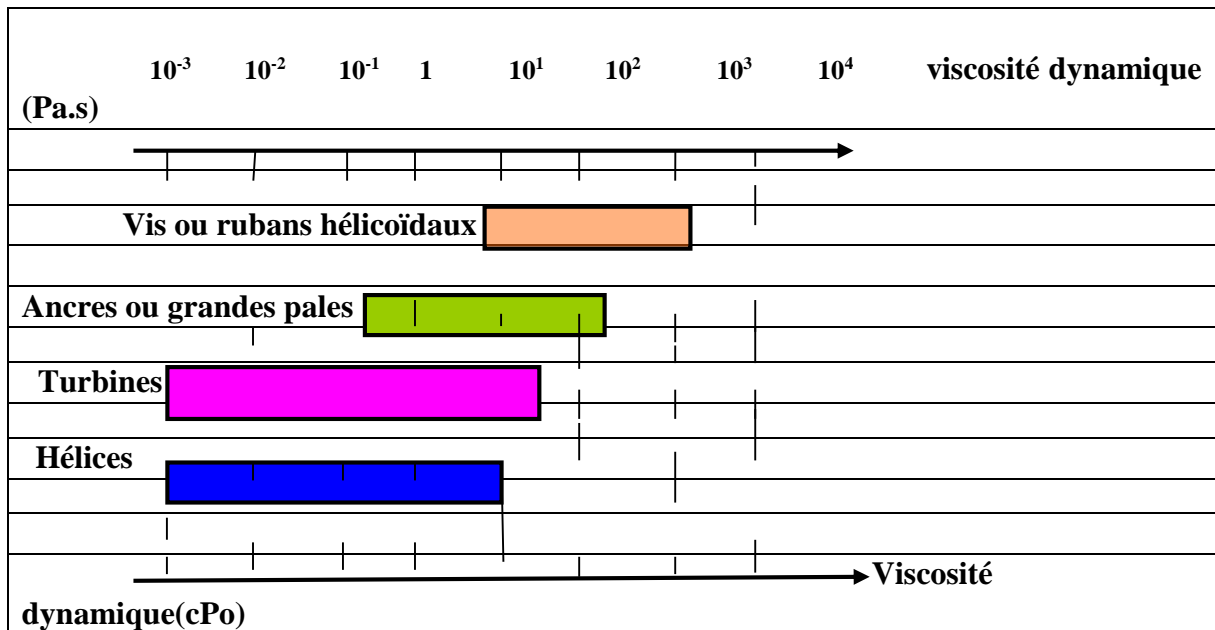


Figure I.17 Présentation schématique des types d'écoulements : a) Axial, b) Radial, c) Tangentiel. [1]

Tableau I.2 Domaine d'utilisation des divers types de mobiles en fonction de la viscosité du fluide.



I.15 Recherche bibliographique

Des chercheurs ont développé et appliqué diverses méthodologies expérimentales et numériques afin de mieux comprendre les écoulements générés dans ces systèmes.

Le travail de **YOUCEFI ABDELKADER**, se concentre sur l'analyse de l'agitation mécanique d'un fluide viscoélastique dans une cuve cylindrique à fond plat, induite par un mobile bipale de large diamètre. L'expérimentation est utilisée pour explorer l'agitation des fluides visqueux, qu'ils soient newtoniens ou non-newtoniens. Dans cette étude, les propriétés viscoélastiques des solutions de polyacrylamide ont été évaluées à l'aide d'un rhéomètre cône-plan sous contrainte contrôlée, utilisant des techniques de fluage et d'oscillation. Les résultats de cette étude rhéologique ont révélé un comportement viscoélastique conforme au modèle à deux éléments de Kelvin-Voigt généralisé. La puissance totale est évaluée en utilisant un couple mètre, tandis que le produit du nombre de Reynolds par le nombre de puissance et la constante propre à l'appareil, déterminée par Metzner et Otto, est calculé. Le temps de mélange est déterminé de manière globale à l'aide de la méthode de coloration-décoloration. En outre, l'anémométrie à film chaud est employée pour la première fois dans ce type de fluide, avec un étalonnage spécifique, permettant ainsi de mesurer les vitesses d'écoulement dans les plans de la pale et dans le plan médian. Les profils de vitesse correspondants sont analysés pour déterminer, à travers ces éléments cinématiques, l'impact du champ local sur la puissance totale et sur le processus de mélange.[11]

BOUZOUNI MOHAMMED, se concentre sur l'étude de l'agitation mécanique d'un fluide visqueux newtonien dans une cuve cylindrique à fond plat non chicanée, équipée d'un agitateur bipale. Pour mieux comprendre et prédire la puissance consommée lors de cette agitation, une simulation numérique à deux dimensions d'un écoulement laminaire en régime permanent a été réalisée. Cette simulation repose sur la résolution des équations de mouvement et de continuité exprimées en variables primitives (u , v , p) à l'aide de la méthode des éléments finis. Les résultats obtenus ont été comparés à la fois avec des données expérimentales et des simulations numériques provenant de la littérature. Cette comparaison a révélé un accord très satisfaisant, notamment en ce qui concerne les vitesses locales et la puissance consommée. Cette concordance entre les résultats numériques et expérimentaux renforce la validité de l'approche de simulation utilisée et fournit une base solide pour prédire et comprendre l'agitation des fluides visqueux newtoniens dans des conditions similaires. Cette étude revêt une

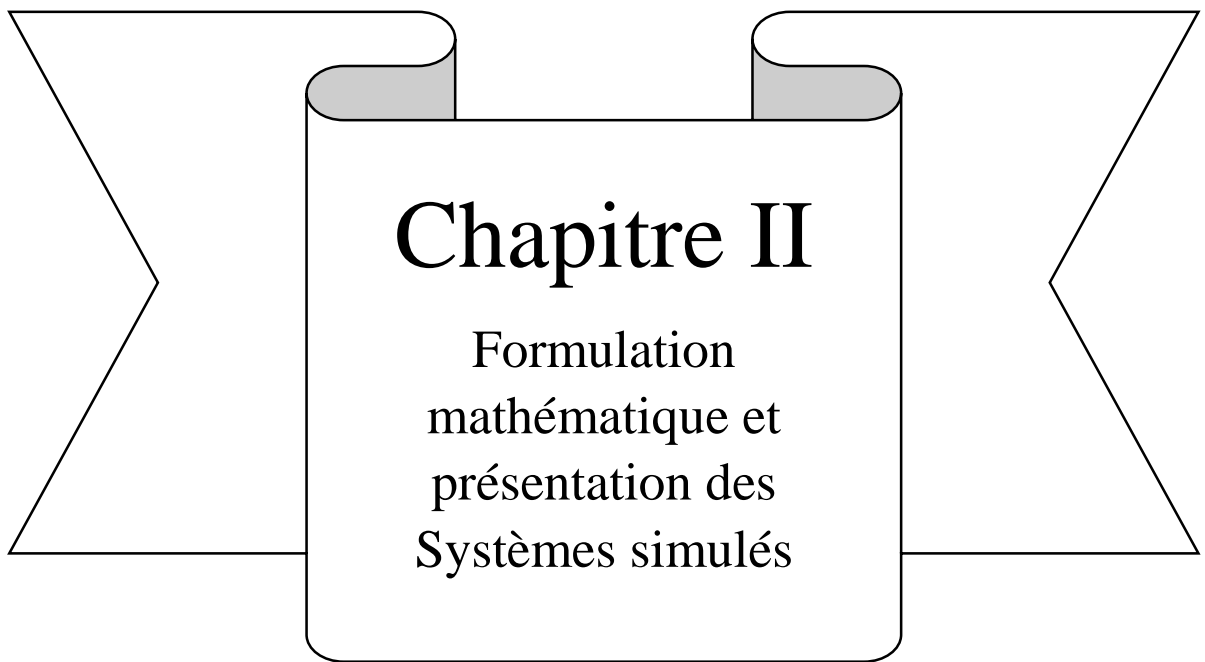
importance particulière pour des secteurs industriels tels que l'agroalimentaire, les industries des plastiques et des peintures, où la maîtrise de l'agitation des fluides est essentielle pour le traitement des matières premières et la fabrication de produits finis de haute qualité. En ayant une meilleure compréhension de la puissance requise pour l'agitation, les entreprises peuvent optimiser leurs processus, réduire les coûts énergétiques et améliorer la qualité de leurs produits.[21]

Le travail de **Ameur H., Bouzit M., Helmaoui M.**, semble être une étude approfondie sur l'agitation des fluides non newtoniens à l'aide de turbines Scaba. Ils utilisent un logiciel de dynamique des fluides computationnelle (CFD) pour modéliser l'hydrodynamique en trois dimensions. Ils ont choisi un fluide à écoulement cisailant avec contrainte seuil comme modèle. Leurs objectifs incluent l'analyse des motifs d'écoulement dans la région balayée par la turbine, ainsi que l'exploration de l'impact de la vitesse de l'agitateur, de la position de la turbine et de la taille de la pale sur l'écoulement du fluide et la consommation d'énergie.

Les résultats de cette étude montrent une bonne concordance avec les données expérimentales disponibles, ce qui renforce la validité de leur modèle CFD. Ils ont identifié que l'augmentation de la taille de la pale favorise l'agitation efficace du fluide, mais entraîne également une augmentation de la consommation d'énergie. De plus, ils ont souligné l'importance de la distance entre la turbine et les parois de la cuve, notant qu'une distance courte limite l'écoulement autour de l'agitateur, ce qui augmente la consommation d'énergie. Ils ont conclu que le milieu précis de la cuve est la position la plus appropriée pour ce type de turbine. Cette recherche offre des informations précieuses pour la conception et l'optimisation des processus impliquant des fluides non newtoniens agités par des turbines Scaba.[5]

KAMLA YUCEF, a travaillé sur la Simulation de l'écoulement des fluides non newtoniens dans une cuve agitée et l'influence des chicanes sur la formation des vortex. Cette thèse vise à effectuer une analyse numérique de l'écoulement engendré par une turbine de Rushton dans une cuve cylindrique équipée de chicanes de différentes formes et hauteurs. L'objectif est de développer un modèle géométrique fiable pour prédire le mélange obtenu et la consommation d'énergie. Les résultats obtenus mettent en évidence l'impact de la géométrie des dispositifs d'agitation sur la structure de l'écoulement, la taille des zones de recirculation du fluide (vortex) et l'énergie dissipée par l'agitateur. L'utilisation du logiciel de simulation ANSYS CFX 12 a permis une visualisation claire et précise des résultats. Ces résultats sont en

excellent accord avec ceux de la littérature, ce qui confère une crédibilité significative à cette étude.[7]



Chapitre II

Formulation
mathématique et
présentation des
Systèmes simulés

II.1 Introduction

La compréhension et l'optimisation des systèmes d'agitation bipale dans les cuves agitées sont d'une importance capitale dans de nombreux domaines industriels. Traditionnellement, cette analyse était effectuée expérimentalement, ce qui s'avère être à la fois chronophage et coûteux. Cependant, l'avènement de la simulation numérique, en particulier la simulation par dynamique des fluides (CFD), offre une alternative efficace et économique pour visualiser et analyser les différents paramètres et phénomènes liés à l'agitation bipale.[26]

Ce chapitre met en lumière les avantages de la simulation numérique par rapport aux méthodes traditionnelles, et présente les aspects clés de la formulation et de la présentation des systèmes simulés pour l'agitation bipale, offrant ainsi un aperçu précieux pour la conception et l'analyse de tels systèmes.

II.2 Utilité et attendus de la CFD en ingénierie

La CFD, ou dynamique des fluides numériques, est une méthode de simulation informatique utilisée pour analyser le comportement des fluides. Elle peut être appliquée en ingénierie pour l'agitation bipale d'une cuve agitée afin de modéliser et d'étudier les schémas d'écoulement, la distribution de la vitesse, les contraintes fluidiques et d'autres paramètres pertinents. Cette approche fournit aux ingénieurs des informations détaillées sur le comportement des fluides, ce qui les aide à prendre des décisions éclairées pour optimiser la conception des systèmes.

En outre, la CFD offre l'avantage de réduire les coûts et les délais associés aux méthodes Expérimentales traditionnelles, tout en permettant d'explorer efficacement plusieurs scénarios.

Ainsi, l'utilisation de la CFD en ingénierie pour l'agitation bipale d'une cuve agitée vise Améliorer la compréhension, l'efficacité et la rentabilité des processus d'agitation.

II.3 Démarche de la CFD

La démarche de la dynamique des fluides computationnelle (CFD) implique plusieurs étapes. Voici une démarche générale pour mener une simulation CFD dans ce contexte :

- Collecte de données : Rassemblez les informations sur la géométrie de la cuve, les propriétés du fluide, les caractéristiques de l'agitateur et les conditions de fonctionnement.

- Modélisation : Utilisez un logiciel de CFD pour créer un modèle de la cuve et de l'agitateur, en définissant les conditions aux limites et les propriétés du fluide.
- Discrétisation : Divisez le domaine en éléments plus petits (maillage) pour résoudre les équations de la dynamique des fluides.
- Résolution : Appliquez les équations fondamentales de la dynamique des fluides pour résoudre le comportement du fluide dans la cuve agitée en rotation.
- Analyse des résultats : Interprétez les résultats de la simulation pour comprendre le champ de vitesse, les contraintes mécaniques, les phénomènes de mélange, etc.
- Validation : Comparez les résultats de la simulation avec des données expérimentales ou des résultats analytiques si possible, pour valider le modèle.

II.4 Méthodes de discrétisation

Les méthodes numériques couramment utilisées en simulation numérique en mécanique des fluides (CFD) comprennent :

- La méthode des différences finies.
- La méthode des éléments finis.
- La méthode des volumes finis.

II.4.1 Méthode des différences finies

La méthode des différences finies est une technique courante en analyse numérique pour trouver des solutions approximatives aux équations aux dérivées partielles. Elle repose sur la discrétisation des opérateurs de dérivation par différences et sur la convergence du schéma numérique obtenu. Cette méthode est largement utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de sa convergence. Elle repose sur des approximations des dérivées d'une fonction en un point en utilisant des différences finies, ce qui permet de transformer l'équation aux dérivées partielles en un système d'équations algébriques. Ensuite, la résolution de ce système permet d'obtenir une solution numérique approchée. La méthode des différences finies est utilisée dans de nombreux domaines, tels que la mécanique des fluides, la thermodynamique, ou encore la finance.

II.4.1.1 Avantages

- Simplicité de mise en œuvre : La MDF est connue pour sa simplicité de mise en œuvre, ce qui en fait une méthode attrayante pour de nombreux problèmes.

- Efficacité : Elle est efficace pour la résolution d'équations aux dérivées partielles, en particulier dans des cas simples et pour des problèmes avec des géométries régulières.

II.4.1.2 Inconvénients

- Adaptabilité à la géométrie complexe : La MDF peut être moins adaptée à la modélisation de géométries complexes par rapport à d'autres méthodes comme la méthode des éléments finis.
- Stabilité numérique : La stabilité numérique de la MDF peut être un défi pour certains types de problèmes, nécessitant une attention particulière lors de la modélisation.
- Convergence du schéma numérique : La preuve de la convergence du schéma numérique est un point délicat de la MDF, nécessitant l'usage d'outils analytiques.
- Elle rencontre des difficultés pour prendre en compte les conditions aux limites de type Neumann, qui spécifie les flux plutôt que les valeurs des variables aux limites.[27]

II.4.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) est une technique utilisée en analyse numérique pour résoudre de manière discrète et approchée des problèmes gouvernés par des équations aux dérivées partielles. Elle permet de calculer une solution numérique pour des systèmes physiques continus, tels que le comportement dynamique de structures, la déformation de matériaux, ou le mouvement de fluides, en découpant le domaine spatial en petits éléments ou mailles. Cette méthode a été développée pour la résistance des matériaux et est largement utilisée en ingénierie. Elle repose sur des principes mathématiques et des formulations variationnelles, et son utilisation nécessite une compréhension approfondie de ses fondements.

II.4.2.1 Avantages

- Adaptabilité à la géométrie complexe : La MEF est bien adaptée à la modélisation de géométries complexes et irrégulières, ce qui en fait un choix attrayant pour une large gamme d'applications.
- Précision : Elle peut fournir des solutions précises lorsqu'elle est correctement mise en œuvre, en particulier pour des problèmes avec des conditions aux limites complexes ou des matériaux hétérogènes.

- Large applicabilité : La MEF est largement utilisée dans divers domaines de l'ingénierie, tels que l'analyse structurale, la mécanique des fluides, l'électromagnétisme, etc.

II.4.2.2 Inconvénients

- Coût computationnel : Pour certains problèmes, la MEF peut nécessiter des ressources computationnelles importantes en raison de la taille du maillage et de la complexité de la géométrie.
- Stabilité numérique : La stabilité numérique de la MEF peut être affectée par certains types de problèmes, nécessitant une attention particulière lors de la modélisation.
- Prétraitement requis : La préparation du maillage et la définition des conditions aux limites peuvent être plus complexes par rapport à d'autres méthodes numériques.
- Des problèmes de grande envergure ou en haute dimension peuvent entraîner une dépense importante en matière de temps de calcul et de mémoire, rendant la tâche plus coûteuse.[27]

II.4.3 Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une technique utilisée en analyse numérique pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Contrairement à la méthode des différences finies, qui repose sur des approximations des dérivées, la méthode des volumes finis exploite des approximations d'intégrales. Elle est basée sur l'intégration de l'équation aux dérivées partielles sur des volumes de contrôle, qui sont des petits volumes disjoints constituant le domaine d'étude. Cette méthode a été initialement développée pour des lois de conservation, et elle permet de résoudre de manière approchée les équations aux dérivées partielles. Elle est utilisée pour des applications telles que la résolution d'équations de transport et de lois de conservation. La méthode des volumes finis fournit une méthode d'approximation numérique pour calculer de manière approchée les solutions de certains systèmes.

II.4.3.1 Avantages

- Conservatifs : La MVF est parfaitement adaptée pour résoudre des lois de conservation, car elle garantit la conservation locale de la quantité conservée.
- Stabilité numérique : La MVF est généralement plus stable que la méthode des différences finies (MDF) pour les problèmes non linéaires ou hyperboliques.

- Approximation locale : La MVF utilise des approximations locales des intégrales, ce qui peut conduire à des méthodes précises au premier ou au second ordre.
- Facilité de parallélisations : La MVF peut être facilement parallélisée, ce qui est utile pour les calculs sur des grands maillages.

II.4.3.2 Inconvénients

- Maillage : La MVF nécessite un maillage régulier et fin, ce qui peut rendre la méthode moins efficace pour les problèmes complexes ou les problèmes à fronts.
- Reconstruction : La MVF nécessite une méthode de reconstruction pour interpoler les valeurs des cellules voisines, ce qui peut rendre la méthode plus complexe et moins locale.
- Coût de calcul : La MVF peut nécessiter plus de calculs et de ressources que la MDF pour des problèmes complexes, en particulier pour les problèmes à fronts ou les problèmes non linéaires.
- Limite d'ordre : La MVF peut avoir une limite d'ordre inférieure à la méthode des éléments finis (MEF), ce qui peut rendre la méthode moins précise pour les problèmes à haute résolution.
- Pour les problèmes qui concernent de vastes étendues, cette méthode peut exiger des moyens informatiques conséquents, compte tenu de la nécessité de résoudre chaque volume de contrôle de manière isolée.[27]

Il est important de noter que la méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis sont souvent comparées, et qu'il existe des méthodes hybrides qui combinent les avantages de ces deux méthodes.

II.4.3.3 Principe de la méthode

Dans la méthode de volume finis, la majorité des propriétés du fluide sont considérées comme constantes sur le volume de contrôle. Toutefois, pour mieux tenir compte des discontinuités des propriétés du fluide ou des termes source, ainsi que des conditions aux limites, il est préférable de placer les faces des volumes de contrôle à ces endroits. Une fois que ces positions ont été déterminées, les nœuds sont placés au centre des volumes de contrôle. Par exemple, le volume de contrôle présenté dans Figure ci-dessous autour du point P est en communication avec ses quatre volumes voisins par l'intermédiaire de ses quatre faces, désignées par les points cardinaux (E : Est, W : West, N : Nord, S : Sud) . Pour une utilisation

optimale, un maillage non uniforme peut être appliqué afin de disposer de plus de points là où la variable ϕ varie rapidement et moins de points là où elle varie peu, tout en conservant le même nombre de points.

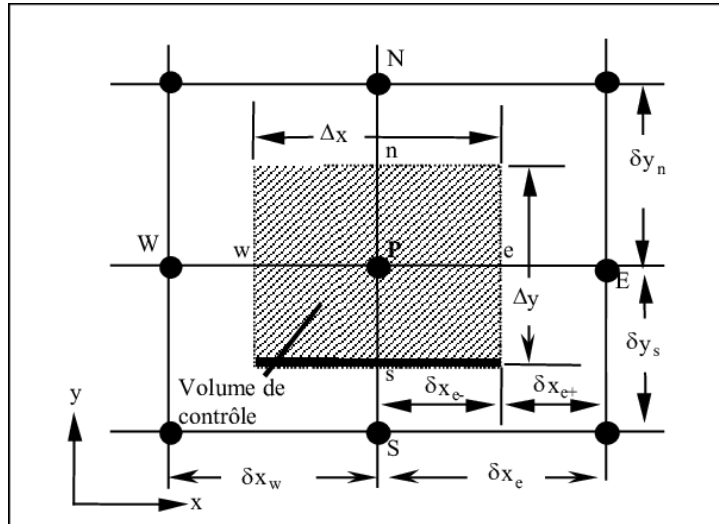


Figure II.1 Schéma représentant volume de contrôle bidimensionnel.

II.4.3.4 Formulation bidimensionnelle par la MVF

La formulation bidimensionnelle de l'équation de Poisson par la méthode des volumes finis consiste à subdiviser le domaine d'étude en un nombre d'éléments finis, chaque élément contenant quatre nœuds (Figure II.2). L'équation de Poisson dans le cas bidimensionnel est projetée sur une fonction de projection égale à l'unité, puis intégrée sur le volume fini correspondant à chaque nœud. Par exemple, l'intégration de l'équation de Poisson sur le volume fini limité par les faces (e, w, s, n) donne une formulation bidimensionnelle de l'équation de Poisson par la méthode des volumes finis.

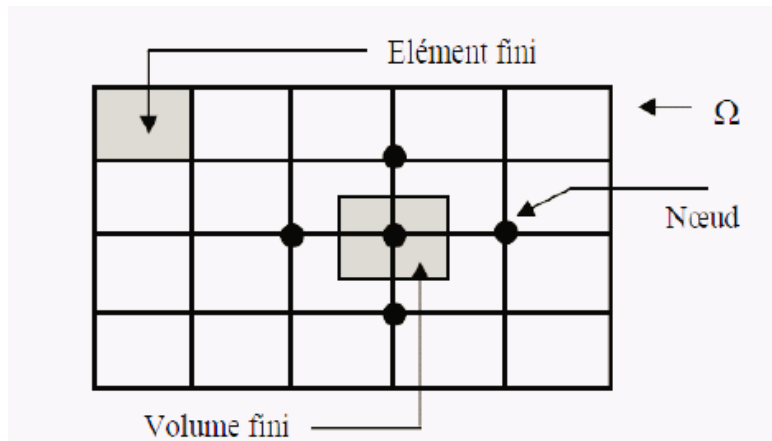


Figure II.2 Discrétisation en volumes finis du domaine d'étude dans le cas bidimensionnel.

Dans cette situation, le nœud central est désigné par la lettre "P" et est entouré de quatre nœuds adjacents : "N" au nord, "S" au sud, "W" à l'ouest et "E" à l'est. Les points "e" et "w" se trouvent dans la direction de l'axe x, tandis que les points "n" et "s" se situent dans la direction de l'axe y.

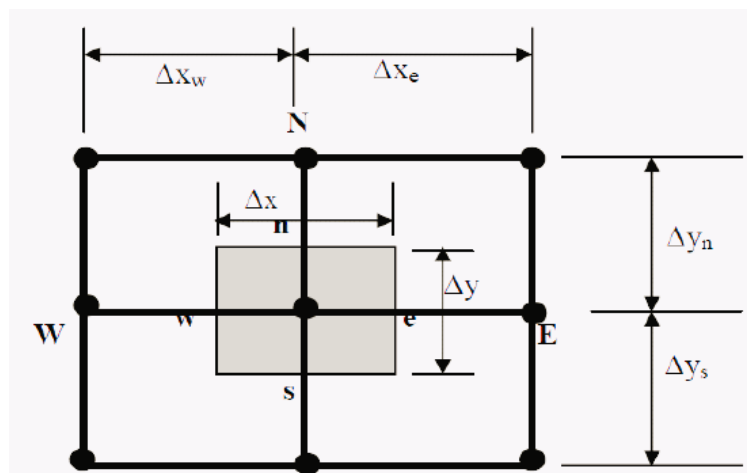


Figure II.3 Description bidimensionnel d'un volume fini.

Pour illustrer, prenons l'équation de Poisson dans le contexte bidimensionnel comme un exemple simple.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = -\rho \tag{II.1}$$

En projetant l'équation sur une fonction de projection avec une valeur unitaire et en l'intégrant sur le volume fini correspondant au nœud P, on obtient le résultat suivant :

$$\int_{w_s}^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy + \int_{w_s}^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy = \int_{w_s}^e \int_s^n -\rho dx dy \quad (\text{II.2})$$

En intégrant la partie gauche de l'équation (II.2) sur le volume fini délimité par les points cardinaux (est, ouest, sud, nord), on obtient le résultat suivant :

$$\int_{w_s}^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy + \int_{w_s}^e \int_s^n \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy = \left[\left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] \Delta y + \left[\left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] \Delta x \quad (\text{II.3})$$

On opte pour le profil linéaire en tant qu'interpolation pour exprimer la fluctuation du potentiel ϕ entre les nœuds voisins. En conséquence, les valeurs nodales sont les seules à impact sur les résultats obtenus.

$$\begin{aligned} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e &= \varepsilon_e \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x_e} \right) \\ \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w &= \varepsilon_w \left(\frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x_w} \right) \\ \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n &= \varepsilon_n \left(\frac{\phi_N - \phi_P}{\Delta y_n} \right) \\ \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s &= \varepsilon_s \left(\frac{\phi_P - \phi_S}{\Delta y_s} \right) \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

En intégrant la partie droite de l'équation (II.2), on obtient le résultat suivant :

$$\int_{w_s}^e \int_s^n \rho dx dy = \rho_p \Delta x \Delta y \quad (\text{II.5})$$

Il est possible d'exprimer l'équation algébrique finale de cette manière :

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + a_S \phi_S + a_N \phi_N + S \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$\begin{aligned} a_E &= \varepsilon_e \frac{\Delta y}{\Delta x_e} \\ a_W &= \varepsilon_w \frac{\Delta y}{\Delta x_w} \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

$$a_n = \varepsilon_n \frac{\Delta x}{\Delta y_n}$$

$$a_s = \varepsilon_s \frac{\Delta x}{\Delta y_s}$$

$$\begin{aligned} a_p &= a_E + a_W + a_N + a_S \\ S &= \rho_p \Delta x \Delta y \end{aligned} \quad (\text{II.8})$$

L'obtention d'un résultat nous permet d'obtenir une équation algébrique reliant l'inconnue du nœud principal "P" à celle des nœuds adjacents "W", "E", "S" et "N"

II.5 Présentation des logiciels utilisés

II.5.1 Design Modeler ANSYS

Ansys Design Modeler est un module de manipulation et de construction de géométrie orienté éléments finis. Il fait partie de la suite logicielle Ansys, qui offre des solutions de simulation pour une variété de domaines d'ingénierie. Voici quelques points clés concernant Ansys Design Modeler :

- Création de modèles 3D à partir de zéro ou importation de modèles CAO existants dans de nombreux formats standards.
- Outils avancés de conception et de modélisation tels que le paramétrage, les opérations booléennes, le maillage, etc.
- Préparation des modèles géométriques pour les analyses par éléments finis (FEA) et les simulations multi physiques.
- Optimisation de la géométrie en fonction des objectifs de conception et des contraintes.
- Intégration transparente avec les autres outils de la suite ANSYS pour une workflow de simulation fluide, solide, électromagnétique, etc.

II.5.1.1 Géométrie du système d'agitation

Pour notre étude, nous sommes limités à l'analyse d'un fluide visqueux newtonien agité par un agitateur bipale de grande surface et de géométrie simple. Nous avons utilisé une cuve cylindrique à fond plat sans chicane, équipée d'un agitateur à deux pales planes dont la hauteur est égale à celle du liquide dans la cuve, comme illustré dans la figure II.4, figure II.5 ci-dessous. Cette configuration a été choisie pour son adéquation à l'agitation de fluides visqueux et son impact sur la structure de l'écoulement, les zones de recirculation du fluide et l'énergie dissipée Par l'agitateur.

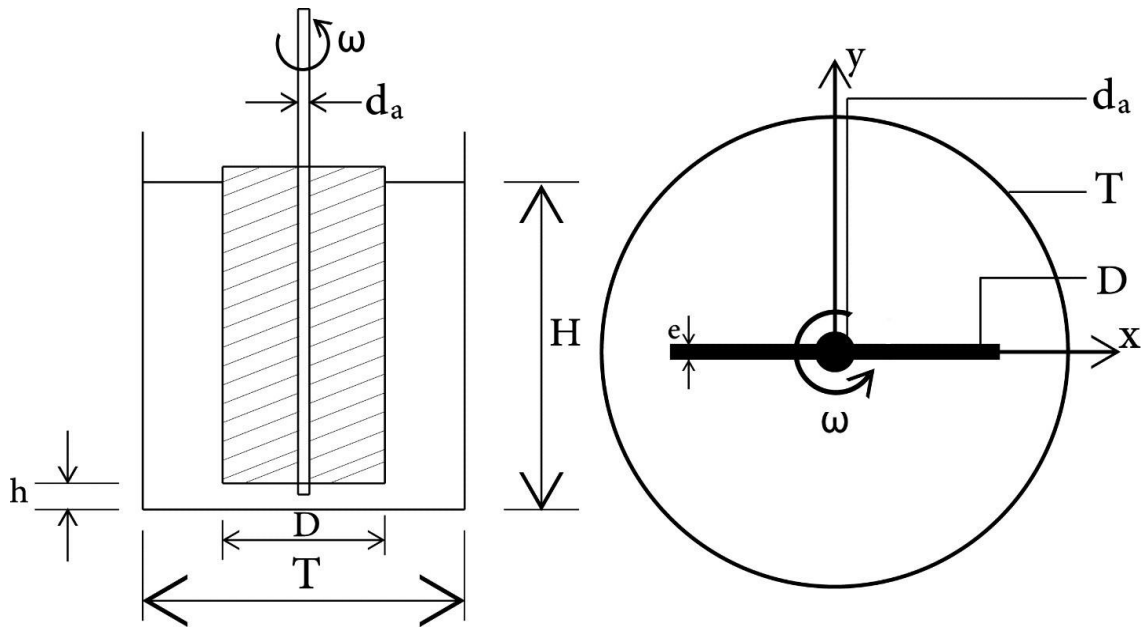


Figure II.4 Représentation schématique de la cuve agitée forme (cadre).

Nous avons adopté une géométrie qui implique l'utilisation d'un nombre de pales égal à deux, conformément aux dimensions spécifiées :

- $D/T = 0.5$
- $d_a/T = 0.07$
- $e/T = 0.01$

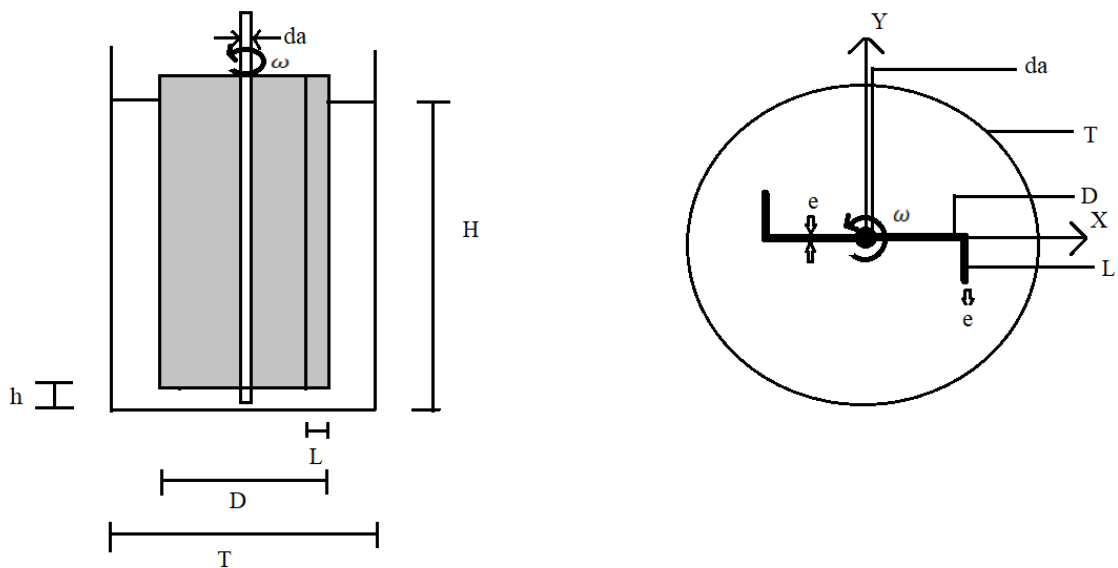


Figure II.5 Représentation schématique de la cuve agitée forme (L).

Dans notre étude, nous avons adopté une nouvelle géométrie de pale de forme (L) qui utilise deux pales, conformément aux spécifications de taille données.

- $D/T = 0.5$
- $d_a/T = 0.07$
- $e/T=0.01$
- $L/T=0.25$

II.5.2 ANSYS Mesher

Ansyes Mesher est un logiciel de maillage intelligent, automatisé et performant fourni par Ansys. Il permet de générer le maillage le plus approprié pour les solutions de simulation dans l'environnement Ansys.

Les principales caractéristiques d'Ansys Mesher sont :

- Il offre des méthodes de maillage couvrant un large spectre, des éléments d'ordre élevé aux éléments linéaires, des tétraèdres et polyèdres rapides aux hexaèdres et mosaïques de haute qualité.
- Il produit des maillages simples et automatisés, mais aussi très élaborés selon les besoins de la simulation.
- Il est conçu pour être un outil de maillage général et performant, s'intégrant parfaitement dans l'environnement de simulation Ansys.

En final, Ansys Mesher est un logiciel de maillage avancé et flexible, permettant de générer des maillages adaptés aux différents types d'analyses par éléments finis dans l'écosystème Ansys.

II.5.2.1 Maillage

Le maillage numérique est la discrétisation spatiale d'un milieu continu ou la modélisation géométrique d'un domaine par des éléments finis proportionnés, permettant ainsi de représenter des subdivisions de surface à l'aide d'un ensemble d'éléments géométriques. Ce processus est crucial en simulation numérique, notamment en CFD (Computational Fluid Dynamics), pour analyser et résoudre des problèmes complexes en sciences de l'ingénieur.

II.5.2.2 Différents types de maillage

Les différents types de maillage numérique sont le maillage structuré, le maillage non structuré.

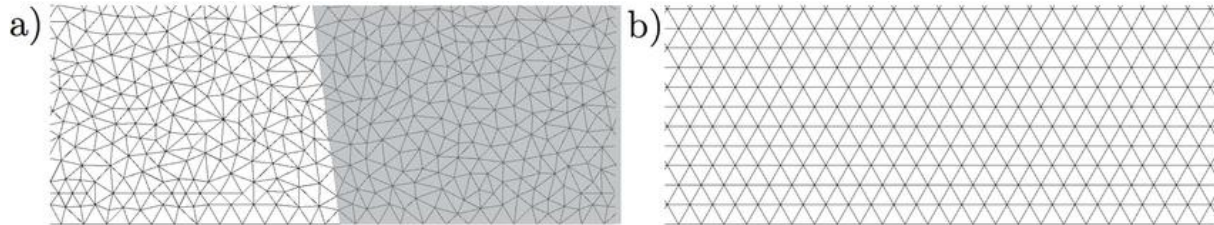


Figure II.6 Maillage non structuré

Maillage structuré

Voici un aperçu des caractéristiques de chacun :

a) Maillage non structuré

- Avantages : adapté aux formes complexes, automatisation élevée, bien adapté aux géométries complexes.

- Inconvénients : plus gourmand en nombre de mailles que le maillage structuré, peut engendrer des erreurs numériques.

b) Maillage structuré

- Avantages : contrôle de qualité élevé, utilisable par des codes de calcul rapides, modifications aisées, automatisation partielle de la création de la topologie.

- Inconvénients : mise en œuvre difficile pour les formes complexes, expertise humaine requise pour la création de la topologie.

II.5.2.3 Choix de maillage

Le maillage utilisé pour modéliser la cuve et l'agitateur est un maillage non structuré composé principalement d'éléments tétraédriques. Ce type de maillage offre une grande flexibilité pour s'adapter à des géométries complexes tout en permettant de contrôler la qualité des éléments. Le maillage a été généré à l'aide du logiciel ANSYS Mesher.

II.5.3 Présentation du code de calcul Fluent

Le code de calcul Fluent est un logiciel de modélisation numérique qui utilise la méthode de simulation numérique des fluides (CFD) pour résoudre les équations de Navier-Stokes pour la dynamique des fluides, la chaleur et le transfert de masse. Il est utilisé pour simuler et analyser les écoulements de fluides et les processus de transfert de chaleur dans diverses applications de l'industrie. Il est reconnu pour sa précision, sa flexibilité et sa capacité exceptionnelle à résoudre des problèmes complexes.

Fluent est composé de trois éléments clés :

- Le préprocesseur : il permet de construire la géométrie du domaine de calcul, de générer le maillage et de définir les conditions aux limites.
- Le solveur : il résout les équations de Navier-Stokes et les équations de transport associées par la méthode des volumes finis. Fluent propose différents modèles physiques (turbulence, transfert thermique, réactions chimiques, écoulements multiphasiques, etc.) et schémas numériques.
- Le post-processeur : il permet de visualiser et d'analyser les résultats de simulation sous forme de champs scalaires, vectoriels, de lignes de courant, d'iso-surfaces, etc.

II.6 Etapes de simulation de l'agitateur

- La modélisation géométrique avec Design Modeler implique de créer un projet, importer ou concevoir la géométrie de l'agitateur bipale avec précision, simplifier la géométrie en 2D, et apporter les ajustements nécessaires.

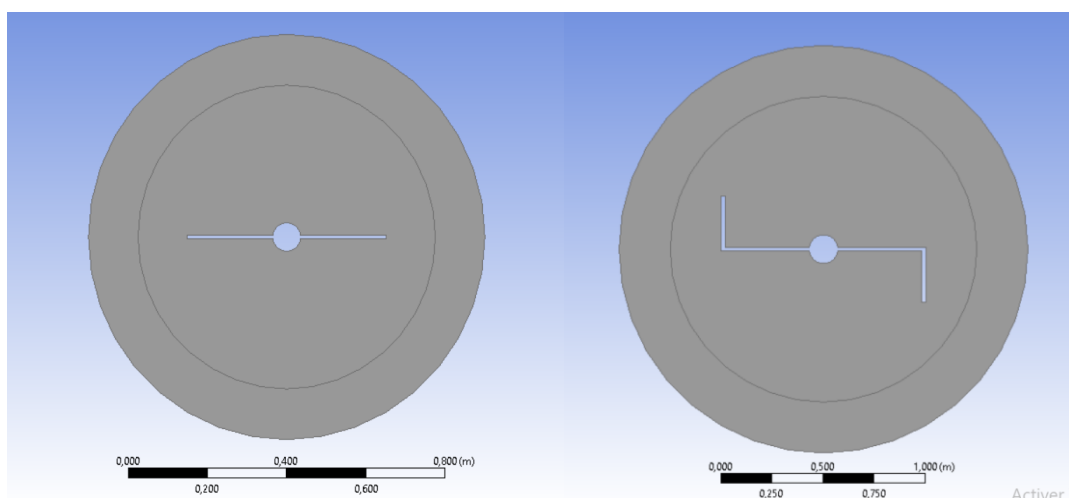


Figure II.7 Géométrie de l'agitateur bipale (forme cadre et forme (L)).

- La préparation du maillage avec ANSYS Mesher consiste à transférer le modèle géométrique, définir les paramètres de maillage, générer un maillage 2D de qualité.

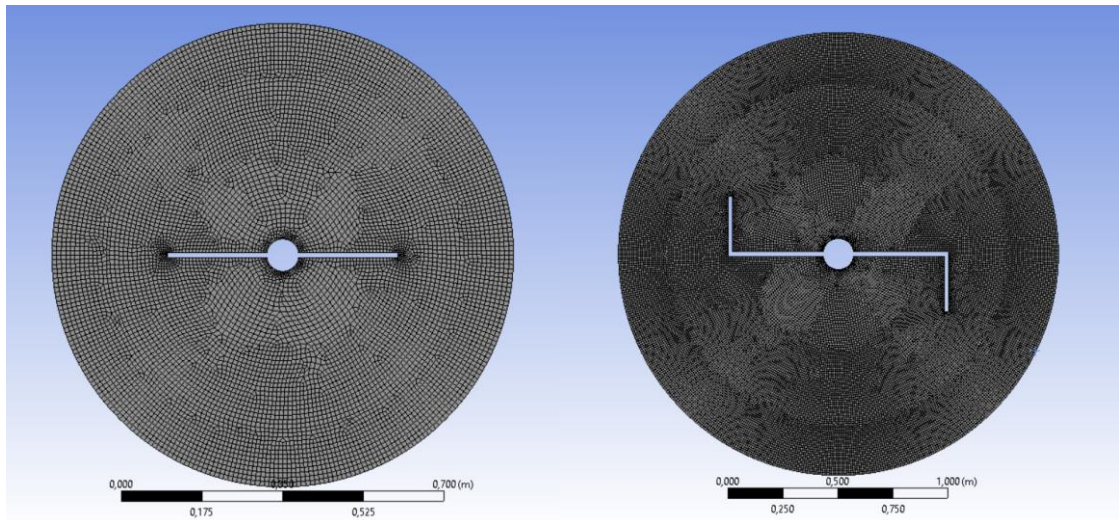


Figure II.8 Maillage de l'agitateur bipale (forme cadre et forme (L)).

- La configuration de la simulation avec ANSYS Fluent 21 R2 implique le transfert du maillage, la définition des propriétés du fluide, des conditions initiales, et des paramètres numériques.
- La résolution de la simulation comprend le lancement du calcul, la surveillance de la convergence, et des étapes de post-convergence si nécessaire.
- Enfin, l'analyse des résultats se fait en étudiant les champs de vitesse, de pression, en extrayant des données pertinentes pour comprendre l'effet de la géométrie de l'agitateur sur l'écoulement et obtenir des informations quantitatives sur les performances.

II.7 Adimensionnalisation du système

Les équations sont adimensionnelles avec :

- Le rayon de la cuve $T/2$ comme longueur caractéristique.
- πNT comme vitesse caractéristique de l'écoulement.
- $\rho(\pi NT)^2$ Pression caractéristique.

$$P^* = \frac{P}{\rho(\pi NT)^2} \quad (\text{II.9})$$

$$\bar{v} = \frac{\bar{V}}{\pi NT} \quad (\text{II.10})$$

$$\bar{r} = \frac{2r}{T} \quad (\text{II.11})$$

$$R_e = \frac{\rho ND^2}{\mu} \quad (\text{II.12})$$

II.8 Equations de mouvement

En considérant les hypothèses précédentes et en se référant aux équations de continuité et de mouvement, on peut écrire :

$$\text{div}(V) = 0 \quad (\text{II.13})$$

$$\rho(V \cdot \nabla)V + \nabla P = \rho \Delta V \quad (\text{II.14})$$

Le problème étudié est déjà connu comme bidimensionnel, ce qui signifie que seules les composantes relatives à la coordonnée r et θ seront prises en compte.

En termes de vecteurs scalaires, les équations (II.13) et (II.14) se simplifient-en :

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (\text{II.15})$$

$$\rho \left[u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} \right] + \frac{\partial p}{\partial r} = \eta \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_r) \right) + \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) \right] \quad (\text{II.16})$$

$$\rho \left[u_\theta \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_r u_\theta}{r} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} = \eta \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (ru_\theta) \right) + \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) \right] \quad (\text{II.17})$$

II.9 Domaine des calculs

La détermination des paramètres clés se fait principalement au niveau des parois de l'agitateur bipale, en particulier en ce qui concerne la position radiale et tangentielle, comme illustré ci-dessous.

Tableau II.1 Domaine des calculs

EMPLACEMENT	Position radial	Position tangentielle
Arbre d'agitation	$r = \frac{d_a}{2}$	$0 \leq \theta \leq \pi$
Agitateur	$\frac{d_a}{2} < r \leq \frac{D}{2}$	$\theta = 0$ $\theta = \pi$
Prolongement de l'agitateur	$\frac{D}{2} < r \leq \frac{T}{2}$	$\theta = 0$
Paroi de la cuve	$r = \frac{T}{2}$	$0 < \theta < \pi$

II.10 Conditions aux limites

Les limites sont formées par l'axe, les pales et la cuve. Les conditions suivantes sont imposées sur toutes les parois :

- ✓ La vitesse radiale du vecteur V_r est nulle le long de toutes les parois.
- ✓ La vitesse tangentielle du vecteur V_θ est nulle sur la paroi extérieure (la cuve).
- ✓ La vitesse tangentielle du vecteur V_θ est égale à $r \cdot \omega$ sur les parois mobiles (l'arbre d'agitation, l'agitateur).

II.11 Hypothèses du travail

Dans le cadre de notre étude, nous avons examiné toutes les hypothèses énumérées ci-dessous :

- On suppose que le fluide est un fluide visqueux de type newtonien et incompressible. Sa viscosité apparente, notée μ_a , est constante et équivalente à la viscosité μ .
- Nous nous concentrons uniquement sur l'analyse hydrodynamique de la cuve agitée et faisons l'hypothèse que le système est isotherme.
- Cet état est permanent : le mélangeur produit un bon débit car la composante de vitesse ne change pas avec le temps. La solution recherchée est une solution en régime permanent car l'établissement du régime permanent se produit après une courte période de temps.

- Le bas de l'agitateur est très proche du fond de la cuve, ce qui rend la hauteur h insignifiante par rapport aux autres dimensions. De plus, le liquide a une hauteur H suffisamment grande pour que les effets de bord causés par le fond de la cuve et la surface libre soient négligeables, ce qui signifie que l'écoulement est principalement bidimensionnel.
- Pour maintenir le régime de flux laminaire, le nombre de Reynolds (R_e) doit être inférieur à 50, comme indiqué par les recherches de Bertrand (1983) et Youcefi A (1993).



Chapitre III

Résultats et discussions

III.1 Introduction

Ce chapitre expose les résultats obtenus à partir d'un agitateur bipale. Illustre les dimensions caractéristiques de ce dispositif en mouvement. La configuration ce système consiste en une cuve cylindrique équipée de deux pales verticales planes. Ces pales ont une hauteur similaire à celle du liquide dans la cuve et sont montées sur un arbre central tubulaire de rapport de dimension $d/T = 0.07$ (voir : figureII.4, figureII.5).

Le code de calcul utilisé dans notre étude, ANSYS Fluent 21 R1, permet d'obtenir des résultats précis et exacts. Nous allons présenter ci-dessous les résultats les plus significatifs qui nous semblent dominants. La majorité des résultats détaillés de l'hydrodynamique correspondent à des résultats attendus, montrant une bonne validation de notre modèle numérique.

Notre étude vise à examiner l'impact de la forme de l'agitateur bipale sur la nature des écoulements.

Premièrement, nous avons d'abord réalisé la géométrie de l'agitateur bipale dans sa forme cadre. Ensuite, nous avons étudié l'impact du nombre de Reynolds sur la nature des écoulements dans une plage allant de 0.1 à 40. A fin d'étude, nous avons comparé nos résultats numériques avec des résultats expérimentaux (YOUCEFI. A 1993) et numériques (BOUZOUINI.M 2004) pour vérifier la précision et la fiabilité de nos résultats.

Deuxièmement, nous avons conçu et réalisé une nouvelle géométrie pour un agitateur bipale de forme (L). Dans cette étude, nous avons étudié l'évolution de la vitesse tangentielle et radiale générées par cet agitateur et l'influence de nombre de Reynold sur la nature des écoulements dans une plage allant de 0.1 à 40. En outre, nous avons effectué une comparaison entre les performances de l'agitateur bipale de forme normale et de forme L, afin de mettre en évidence les différences dans leur comportement hydrodynamique.

III.2 Forme (cadre)

III.2.1 Validation de résultats obtenus

Pour confirmer la précision et la fiabilité des résultats numériques, il est essentiel de les comparer avec des résultats expérimentaux et des résultats numériques provenant d'autres études sur le même sujet. Cette méthode de validation permet de vérifier la pertinence des résultats numériques et leur adéquation avec la réalité physique du problème étudié.

Les figures III.1 et III.2 présentent la variation de la vitesse tangentielle en fonction de la position radiale r , d'une part sur la pale et son prolongement ($\Theta = 0^\circ$) et d'autre part sur la

médiatrice ($\Theta = 90^\circ$) de l'agitateur. Ces graphiques permettent de comparer directement nos résultats numériques avec les données expérimentales de YUCEFI (1993), BOUZOUINI (2004). Les résultats concernent la répartition des vitesses tangentielles sur la pale et son prolongement. Nous pouvons constater une bonne concordance entre nos résultats numériques et les résultats expérimentaux, ce qui confirme la précision de notre modèle numérique.

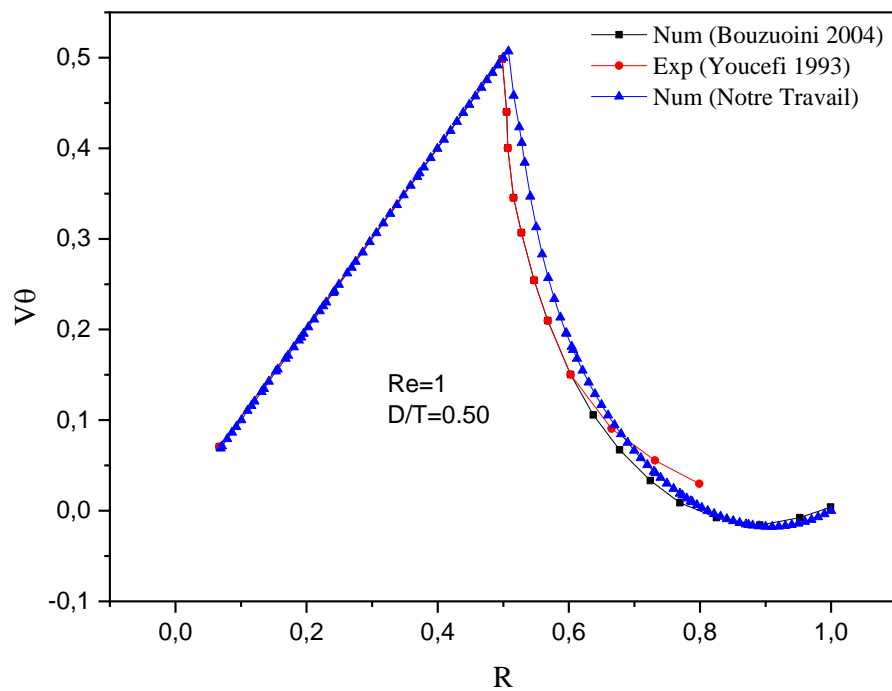


Figure III.1 Évolution de la vitesse tangentielle sur la pale de l'agitateur et son prolongement ($\Theta=0$)

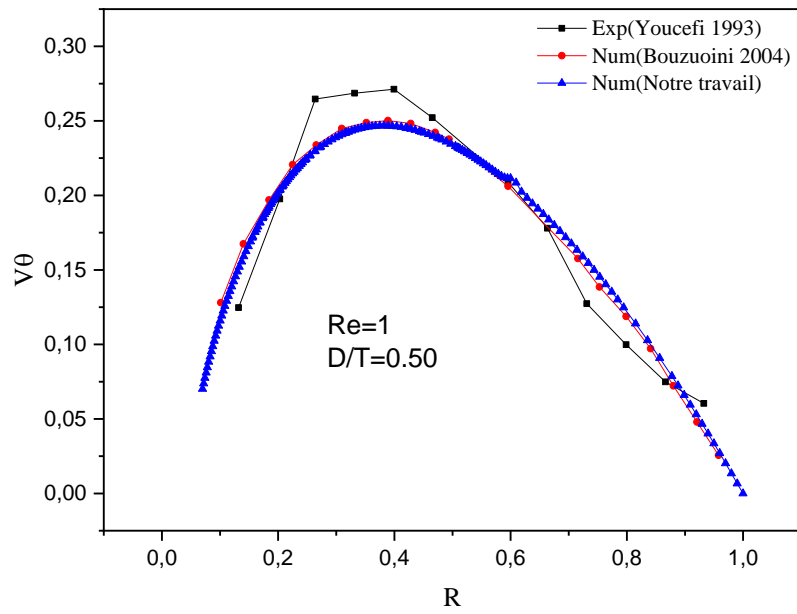


Figure III.2 Évolution de la vitesse tangentielle sur la médiatrice de l'agitateur ($\Theta = 90$)

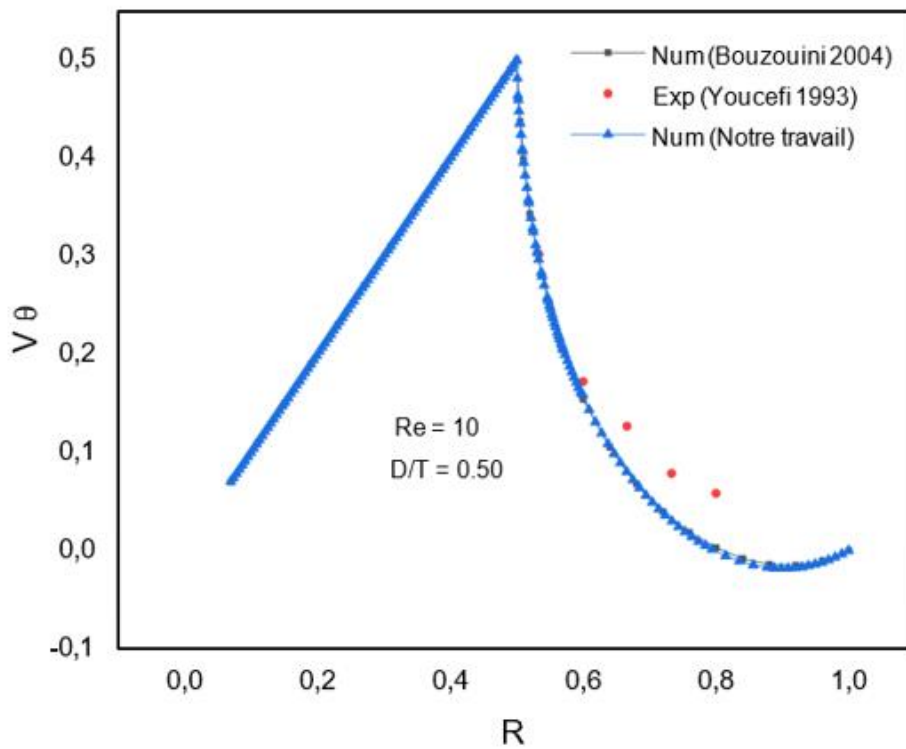


Figure III.3 Évolution de la vitesse tangentielle sur la pale de l'agitateur et son prolongement ($\Theta = 0$)

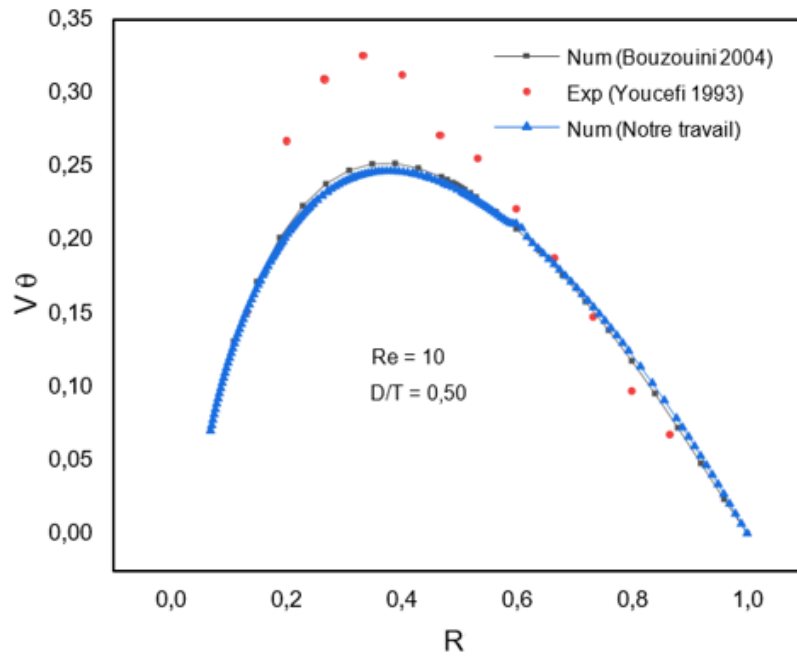


Figure III.4 Évolution de la vitesse tangentielle sur la médiatrice de l’agitateur ($\theta = 90$)

III.2.2 Contour des vitesses

Les figures III.5 à III.12 montrent les contours de vitesse tangentielle et radiale sur la pale et son prolongement pour un agitateur bipale mettant en évidence l’importance de ces vitesses aux bords des pales. La fonction de vitesse tangentielle décroît sur la paroi de la cuve jusqu’à ce qu’elle s’annule, mais elle présente des variations importantes au bout des pales.

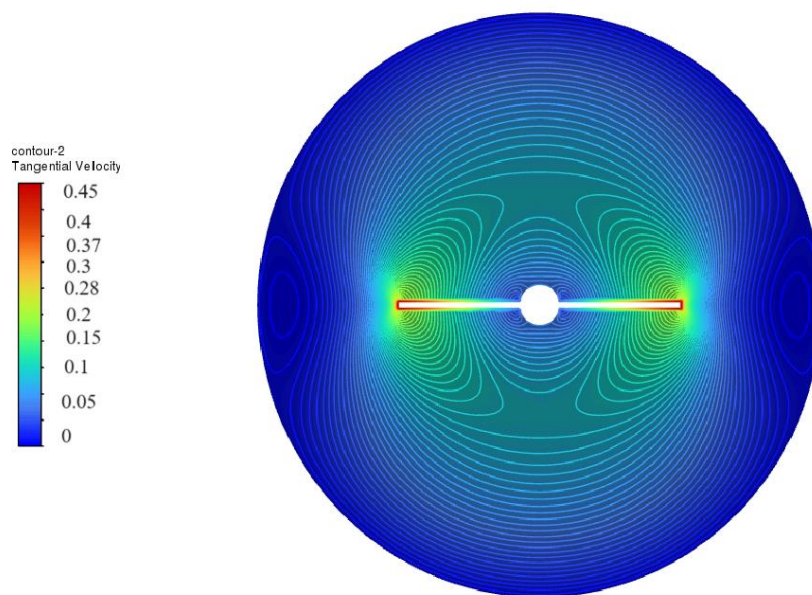


Figure III.5 Contour de vitesse tangentielle pour $Re = 0.1$, $D/T=0.5$

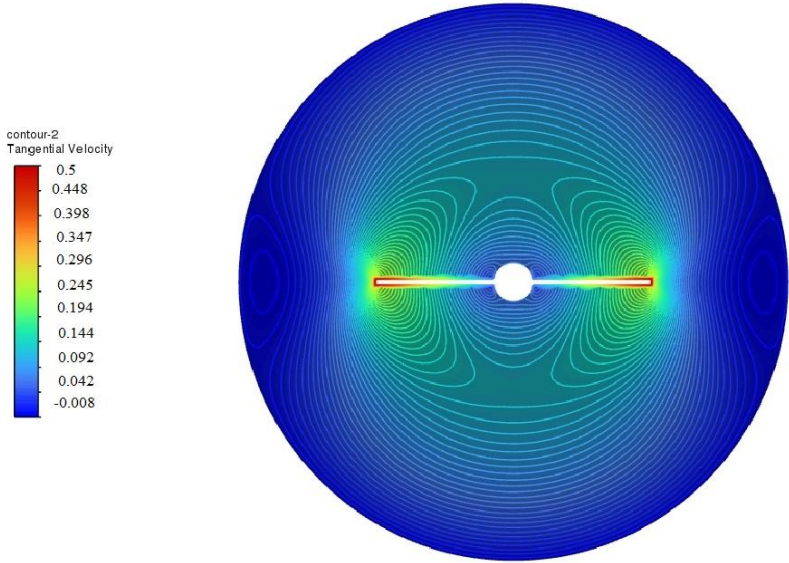


Figure III.6 Contour de vitesse tangentielle pour $R_e = 1, D/T=0.5$

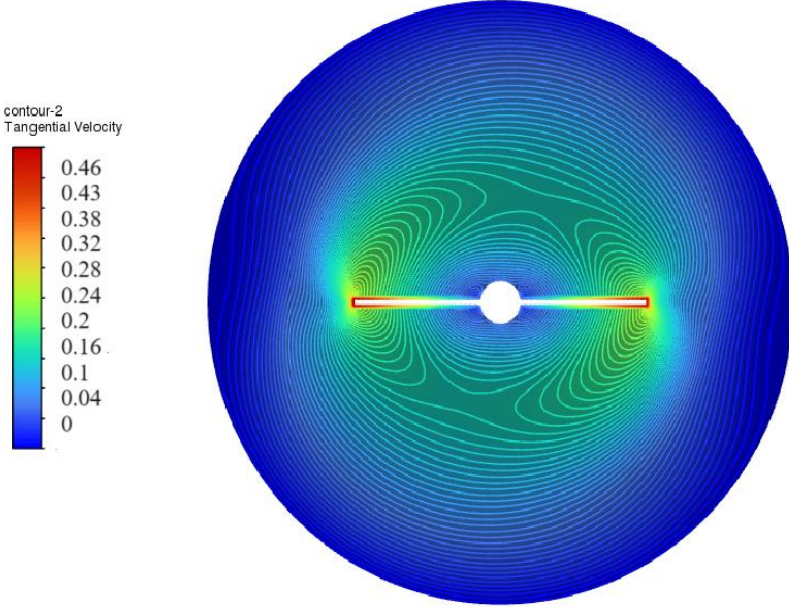


Figure III.7 Contour de vitesse tangentielle pour $R_e = 10, D/T=0.5$

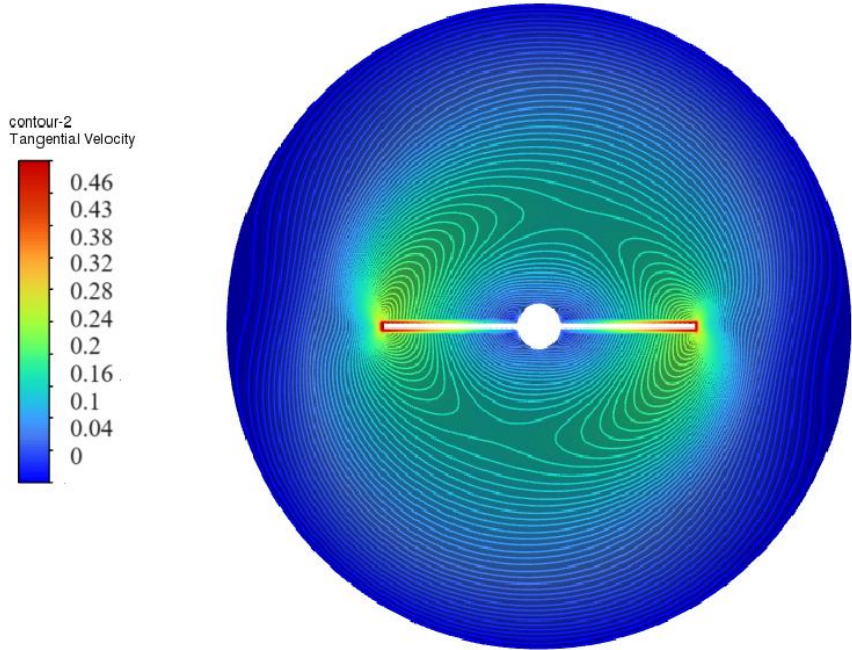


Figure III.8 Contour de vitesse tangentielle pour $R_e = 40$, $D/T=0.5$

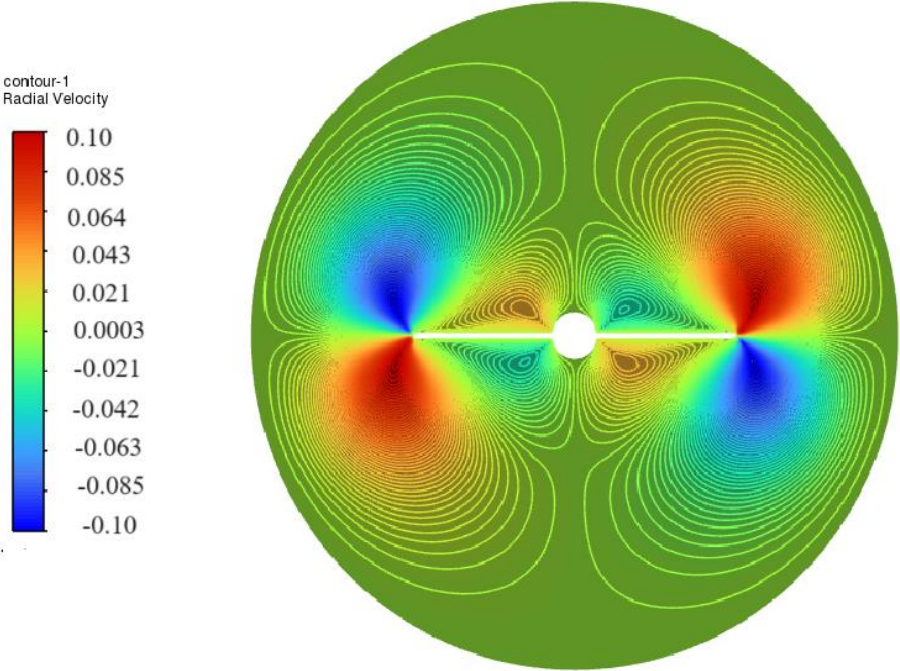


Figure III.9 Contour de vitesse radiale pour $R_e = 0.1$, $D/T=0.5$

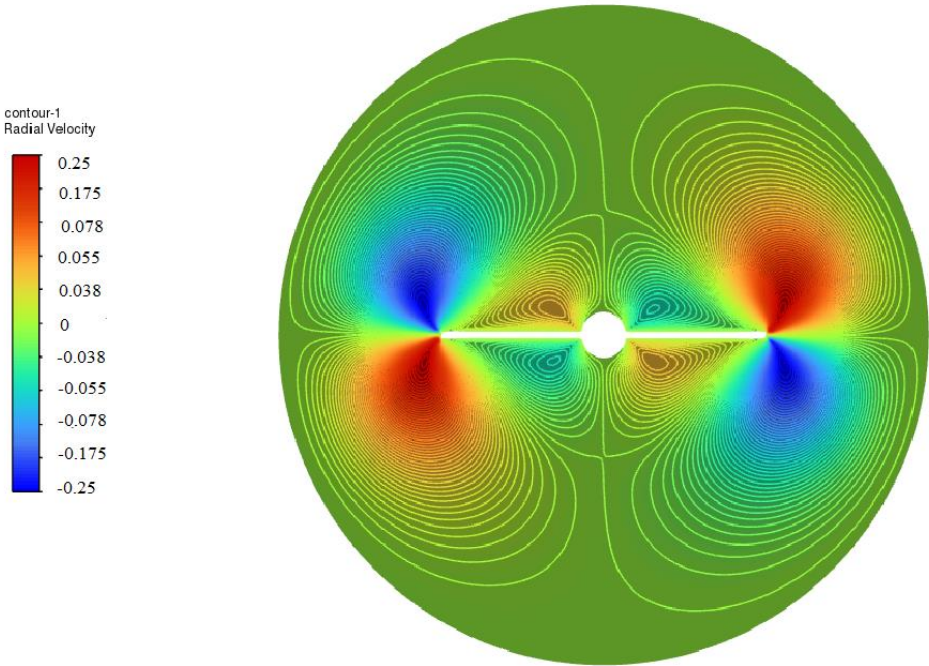


Figure III.10 Contour de vitesse radiale pour $R_e = 1$, $D/T=0.5$

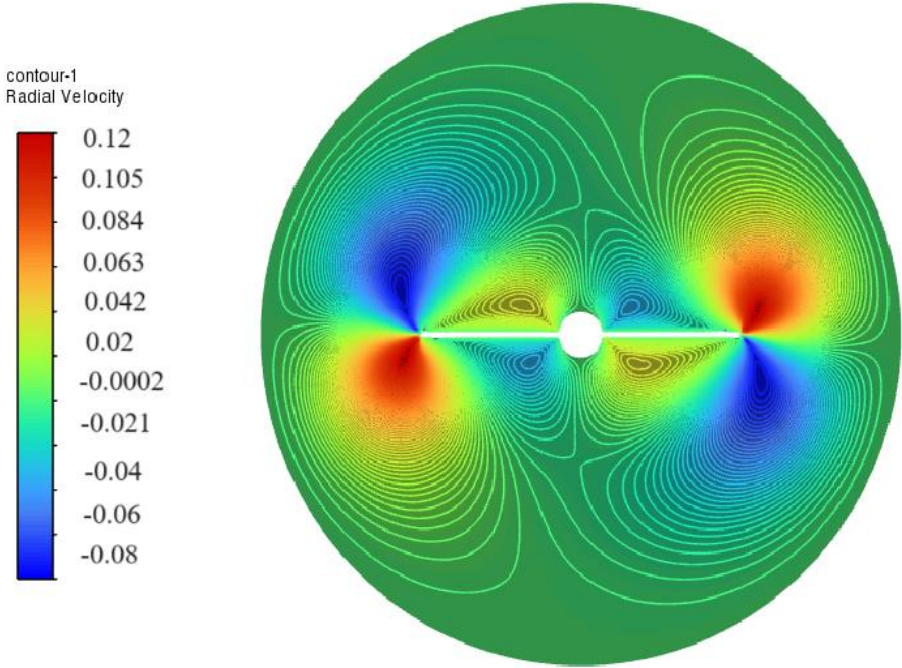


Figure III.11 Contour de vitesse radiale pour $R_e = 10$, $D/T=0.5$

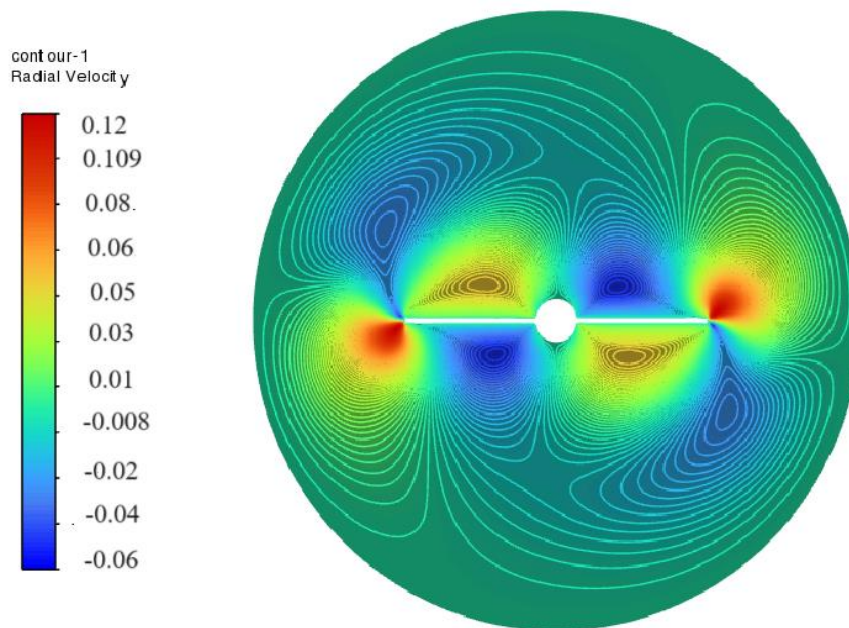


Figure III.12 Contour de vitesse radiale pour $Re = 40$, $D/T=0.5$

III.2.3 Composantes de vitesse

Les figures III.13 et III.14 présentent l'évolution de la vitesse tangentielle et de la vitesse radiale sur la pale et la médiatrice de l'agitateur, en fonction de la position radiale r .

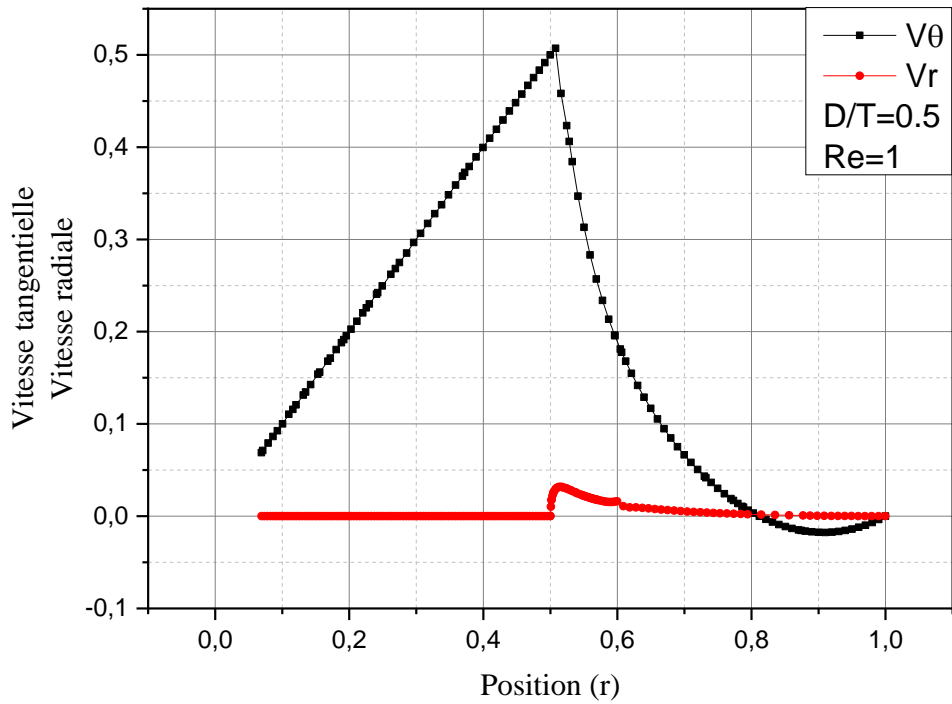


Figure III.13 Evolution de la vitesse tangentielle $V\theta$ et la vitesse radiale Vr sur la pale de l'agitateur et son prolongement ($\Theta = 0$)

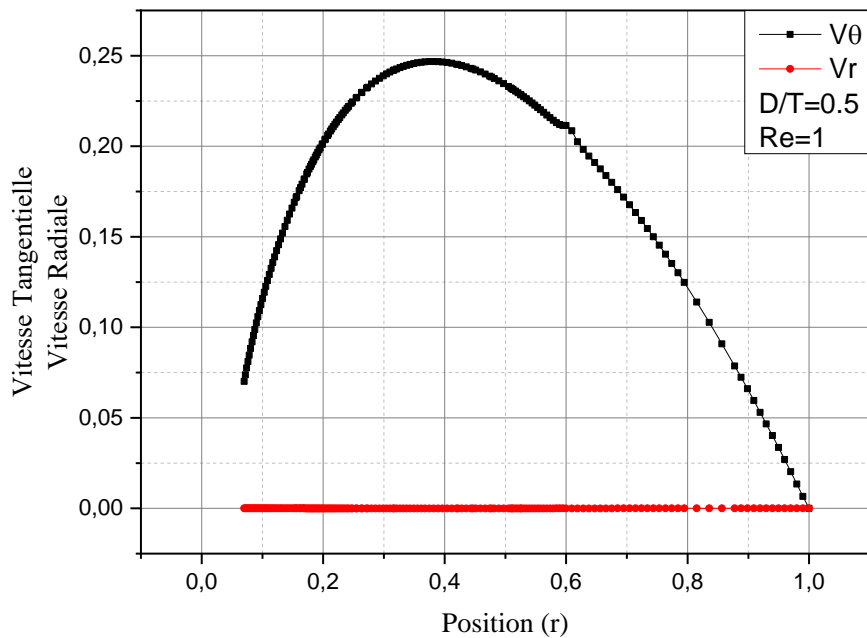


Figure III.14 Evolution de la vitesse tangentielle $V\theta$ et la vitesse radiale Vr sur la médiatrice de l'agitateur ($\Theta = 90$)

III.2.4 Influence du nombre de Reynolds sur les profils des vitesses tangentielles et radiales

Nous avons fait varier le nombre de Reynolds des écoulements dans une plage allant de 0.1 à 40. Les résultats montrent que la vitesse radiale V_r est presque nulle en tout point de la cuve, quelle que soit la valeur du nombre de Reynolds.

En effet, pour tous les cas étudiés, la vitesse radiale reste confinée entre 0.032 et 0.5 m/s. Les figures III.15 et III.16 représentent plus précisément l'évolution de la vitesse radiale sur la pale et la médiatrice. Ces résultats mettent en évidence que l'écoulement généré par l'agitateur bipale est principalement tangential, avec des vitesses radiales négligeables.

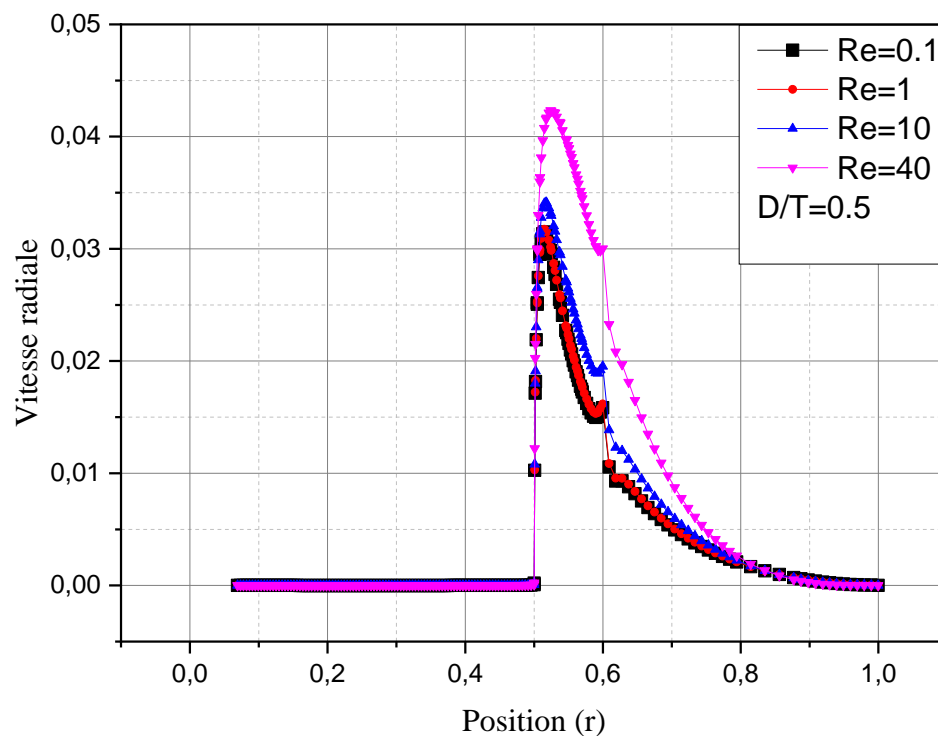


Figure III .15 Influence du R_e sur l'évolution de la vitesse radiale V_r sur la pale de l'agitateur de ($\theta = 0$)

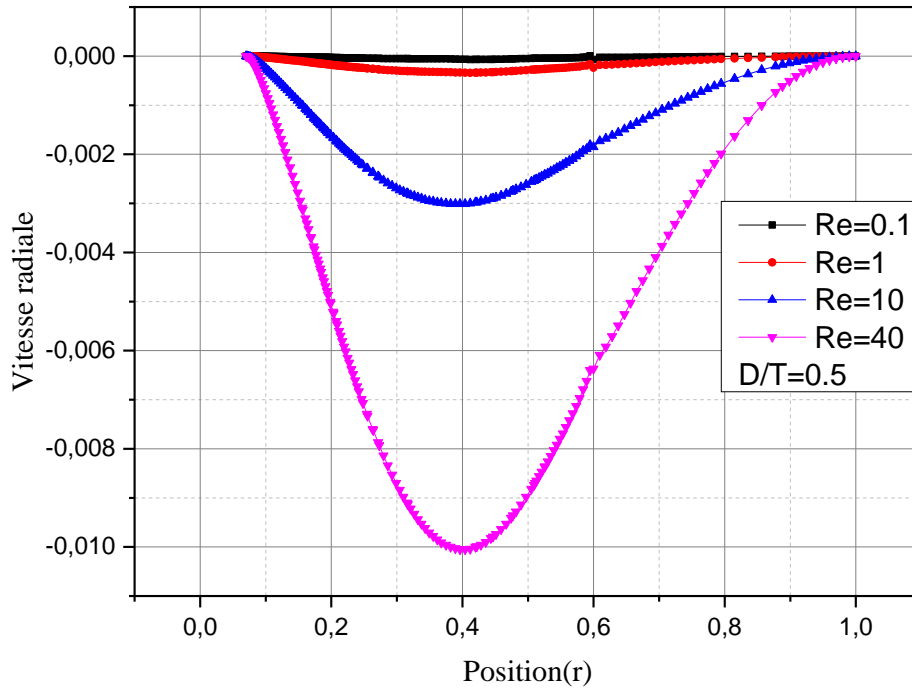


Figure III.16 Influence du Re sur l'évolution de la vitesse radiale V_r sur la médiatrice de l'agitateur ($\Theta = 90$)

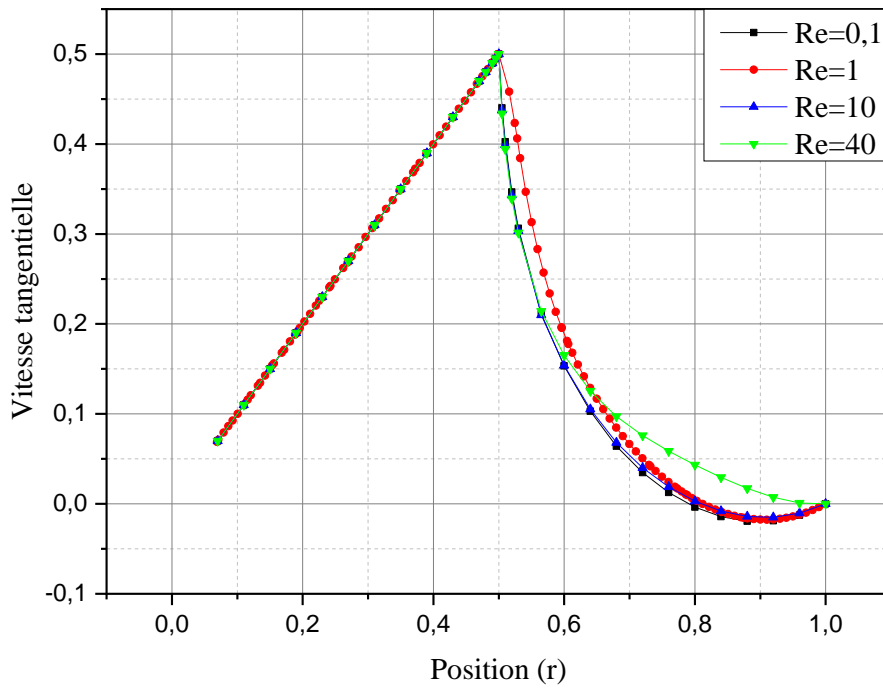


Figure III .17 Influence du Re sur l'évolution de la vitesse tangentielle V_θ sur la pale de l'agitateur ($\theta = 0$)

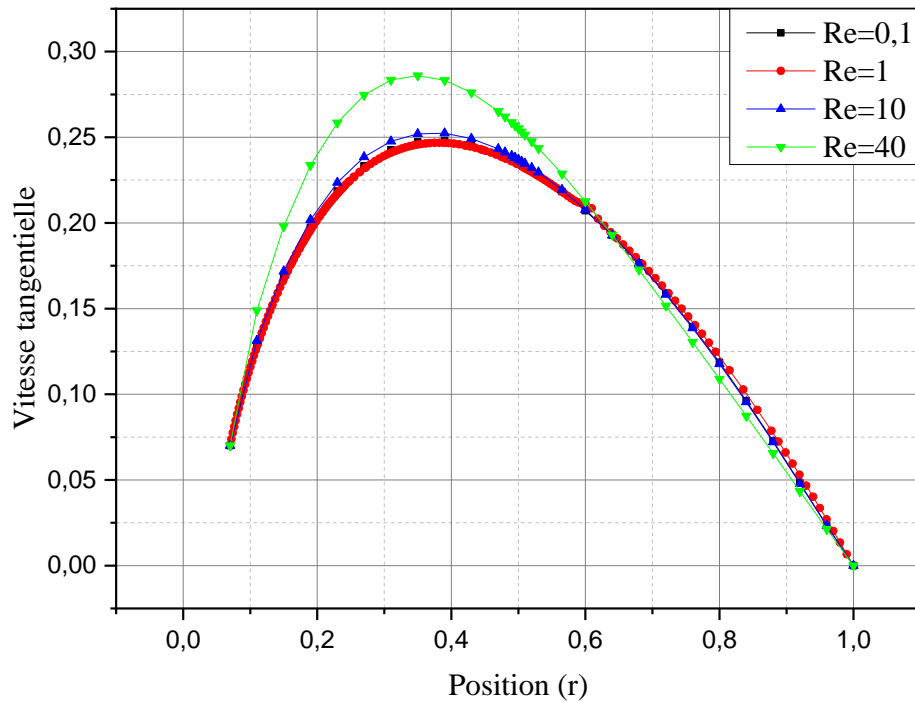


Figure III.18 Influence du Re sur l'évolution de la vitesse tangentielle V_{θ} sur la médiatrice de l'agitateur ($\Theta = 90$)

Dans la figure III.17, La vitesse tangentielle est linéaire jusqu'à son extrémité, où le maximum de la vitesse ($V_{\theta}=0.5$). Après cette extrémité, la vitesse décroît. On remarque que Plus Re est élevé, plus la décroissance de la vitesse est lente. Il est également remarquable que des vitesses négatives sont observées entre $r=0.8$ et $r=1$, ce qui indique la présence d'un tourbillon près de la paroi.

Les vitesses tangentielles près de l'axe de la médiatrice augmentent plus rapidement que la vitesse de la pale pour atteindre un maximum entre 0,23 et 0,25 à une distance de r voisine de 0,35. Au-delà de ce maximum, la vitesse décroît lorsque l'on se déplace vers la paroi de la cuve, mais cette décroissance est moins rapide que celle de la partie montante de la courbe (figure III.18).

III.3 Forme (L)

III.3.1 Contour des vitesses

Les figures III.19 à III.26 représentent les contours de vitesse tangentielle et radiale sur la pale et son prolongement pour un agitateur bipale mettant en évidence l'importance de ces vitesses aux bords des pales.

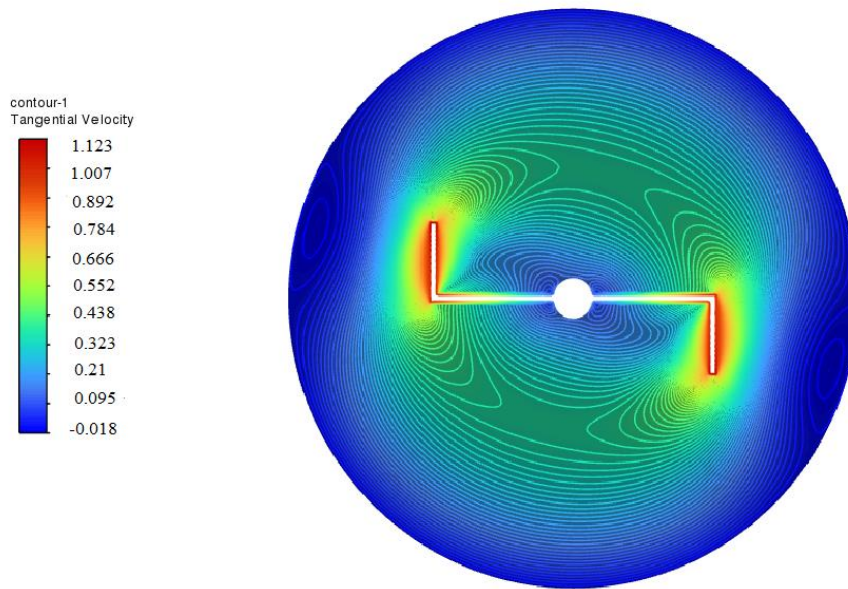


Figure III.19 Contour de vitesse tangentielle pour $Re = 0.1$, $D/T=0.5$

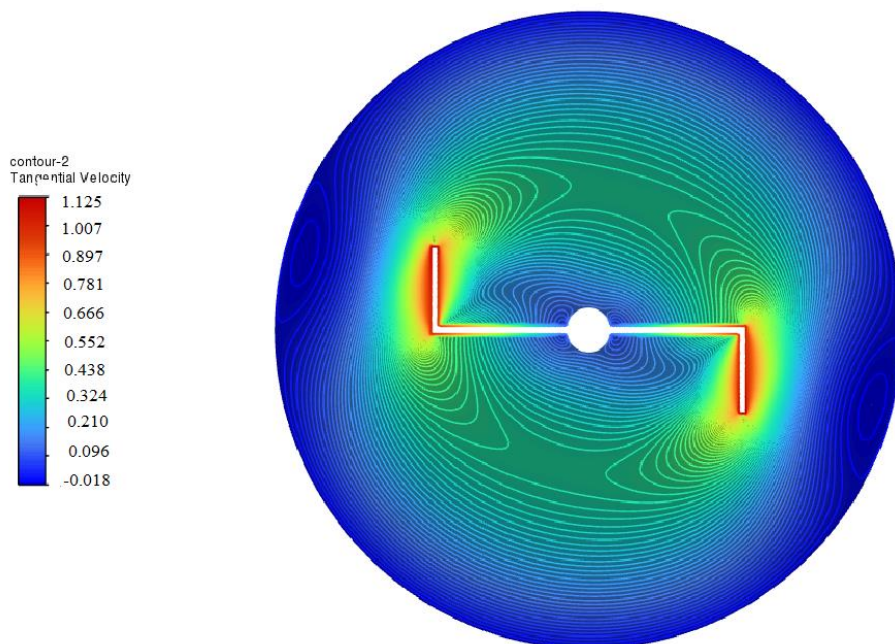


Figure III.20 Contour de vitesse tangentielle pour $Re = 1$, $D/T=0.5$

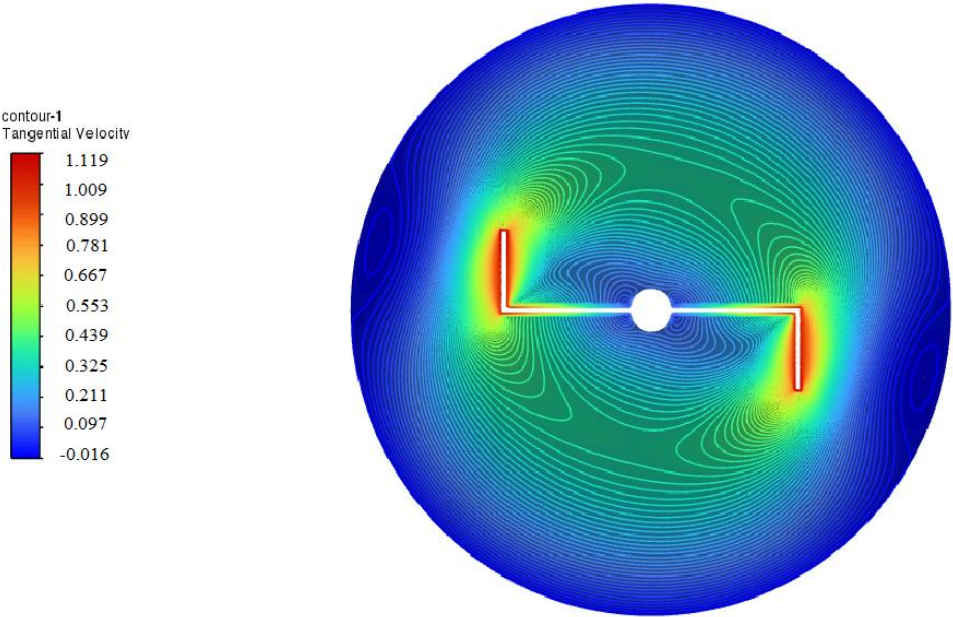


Figure III.21 Contour de vitesse tangentielle pour $R_e = 10$, $D/T=0.5$

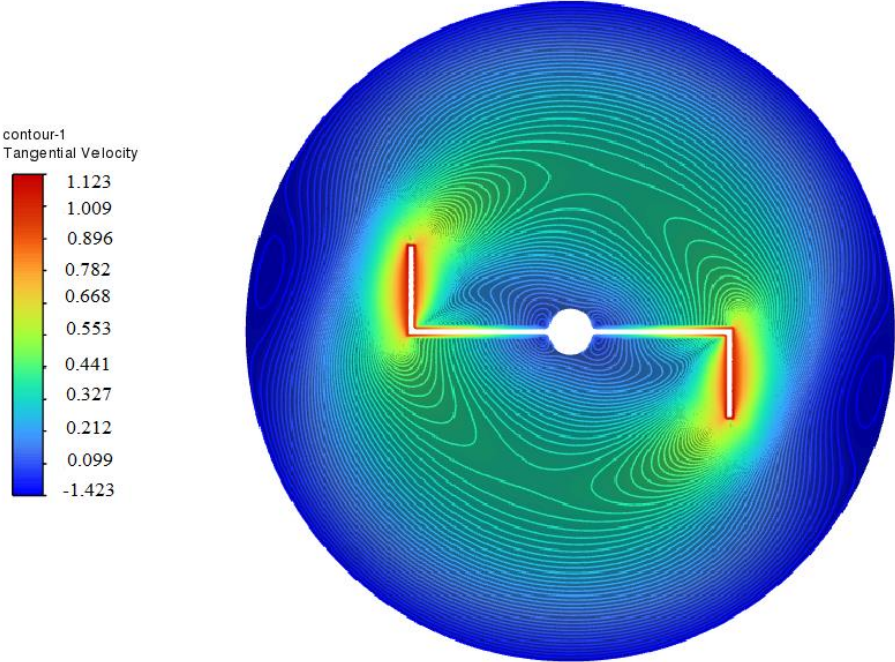


Figure III.22 Contour de vitesse tangentielle pour $R_e = 40$, $D/T=0.5$

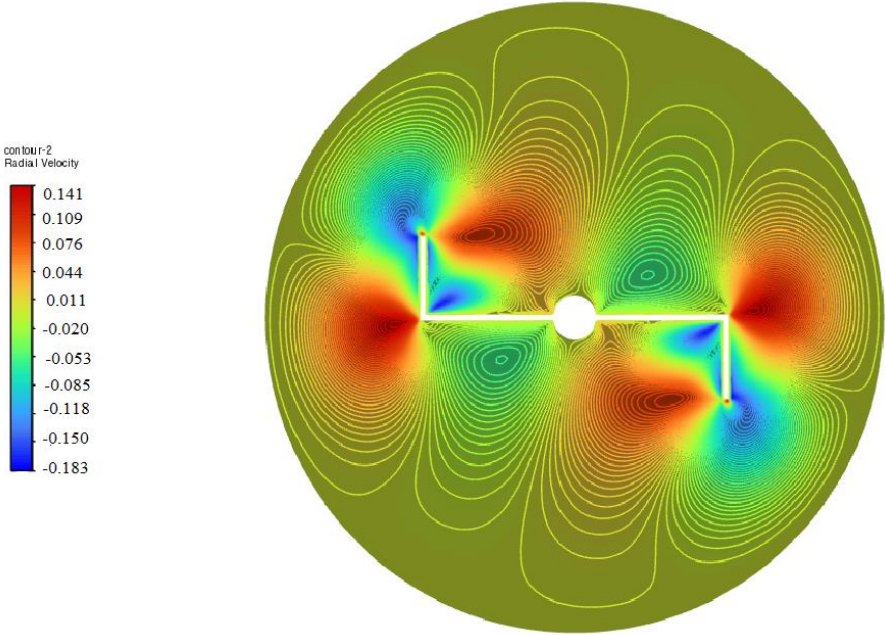


Figure III.23 Contour de vitesse radiale pour $R_e = 0.1$, $D/T=0.5$

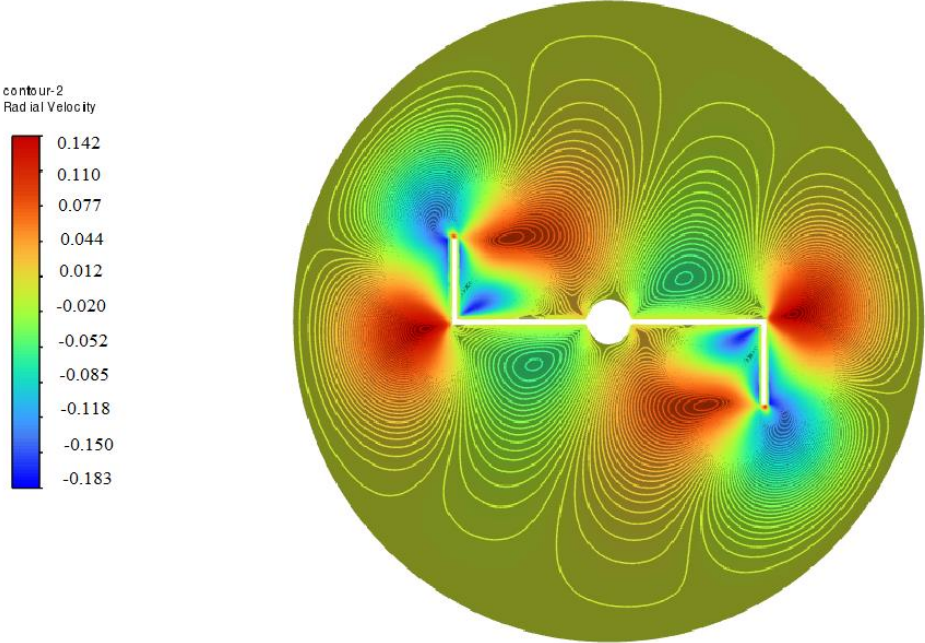


Figure III.24 Contour de vitesse radiale pour $R_e = 1$, $D/T=0.5$

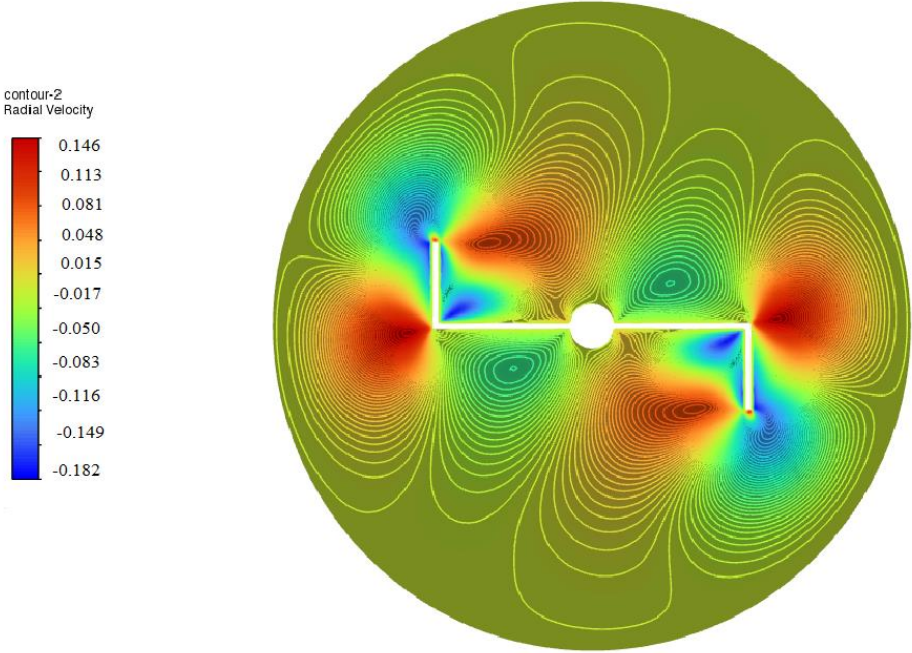


Figure III.25 Contour de vitesse radiale pour $R_e = 10$, $D/T=0.5$

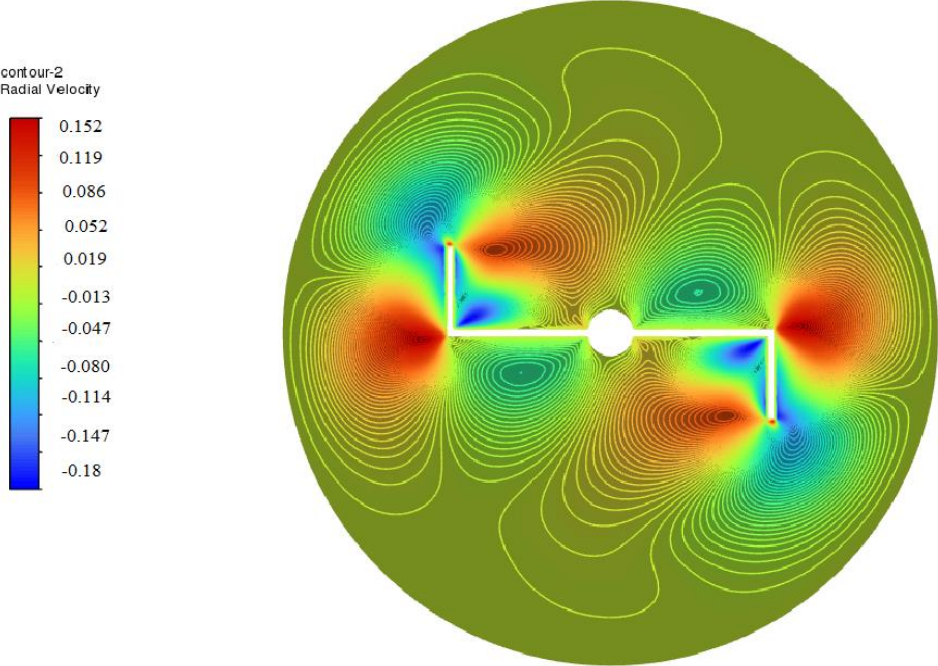


Figure III.26 Contour de vitesse radiale pour $R_e = 40$, $D/T=0.5$

III.3.2 Composantes de vitesse

Les figures III.27 et III.28 présentent l'évolution de la vitesse tangentielle et de la vitesse radiale sur la pale et la médiatrice de l'agitateur, en fonction de la position radiale r .

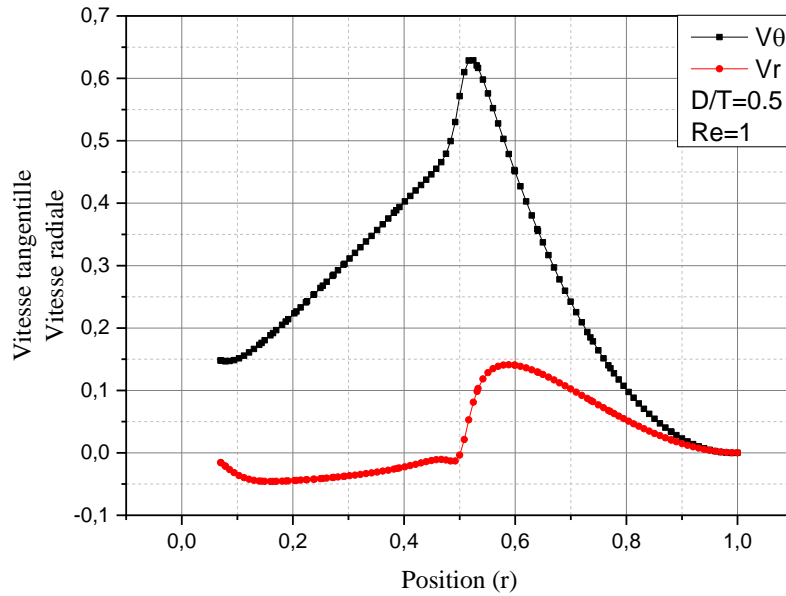


Figure III.27 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ et la vitesse radiale V_r sur la pale de l'agitateur et son prolongement ($\Theta = 0$)

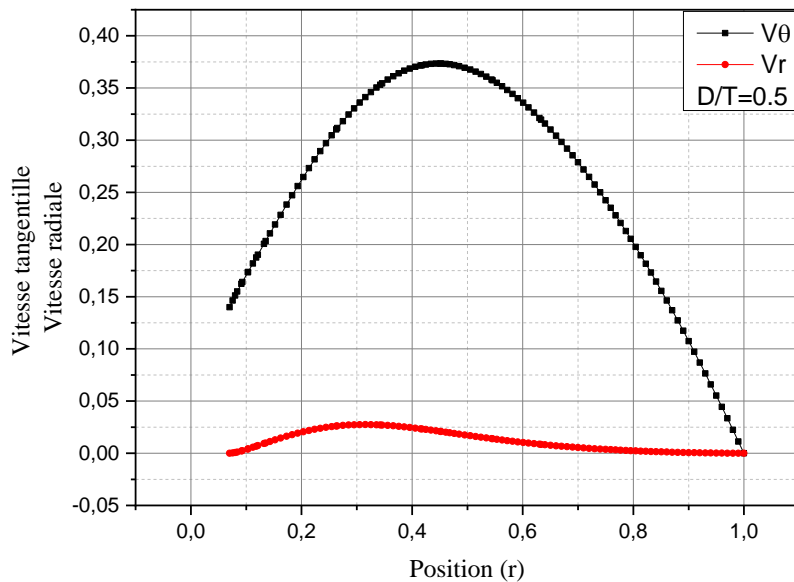


Figure III.28 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ et la vitesse radiale V_r sur la médiatrice de l'agitateur ($\Theta = 0$)

Ces résultats montrent clairement que l'écoulement généré par l'agitateur bipale est principalement tangential, avec des vitesses radiales quasi nulles.

Dans La figure III.27, La vitesse tangentielle est linéaire et égale à la vitesse de la pale jusqu'à $V_\theta = 0.48$, puis elle augmente jusqu'à la vitesse maximale 0.63 et elle diminue vers $r=1$.

La vitesse tangentielle dans La figure III.28 commence à 0.14, puis augmente pour atteindre un maximum entre 0.35 et 0.37 à r voisin de 0.45, avant de redescendre jusqu'à zéro à $r = 1$. Cette distribution indique que l'agitateur de forme L induit une vitesse tangentielle maximale à une position intermédiaire avant de diminuer vers les bords.

La vitesse tangentielle est nettement plus élevée et présente une variation beaucoup plus prononcée par rapport à la vitesse radiale. La vitesse radiale reste faible et ne contribue pas significativement au mouvement global du fluide comparé à la vitesse tangentielle.

Ces graphes indiquent que l'agitateur de forme (L) est très efficace pour générer une vitesse tangentielle élevée, ce qui est bénéfique pour des applications nécessitant un mélange ou une agitation circulaire importante.

III.3.3 Influence du nombre de Reynolds sur les profils des vitesses tangentielles

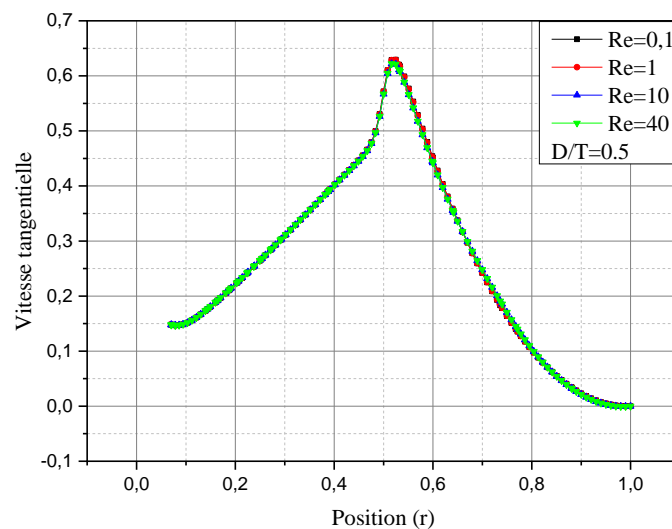


Figure III .29 Influence du Re sur l'évolution de la vitesse tangentielle V_θ sur la pale de l'agitateur ($\theta = 0$)

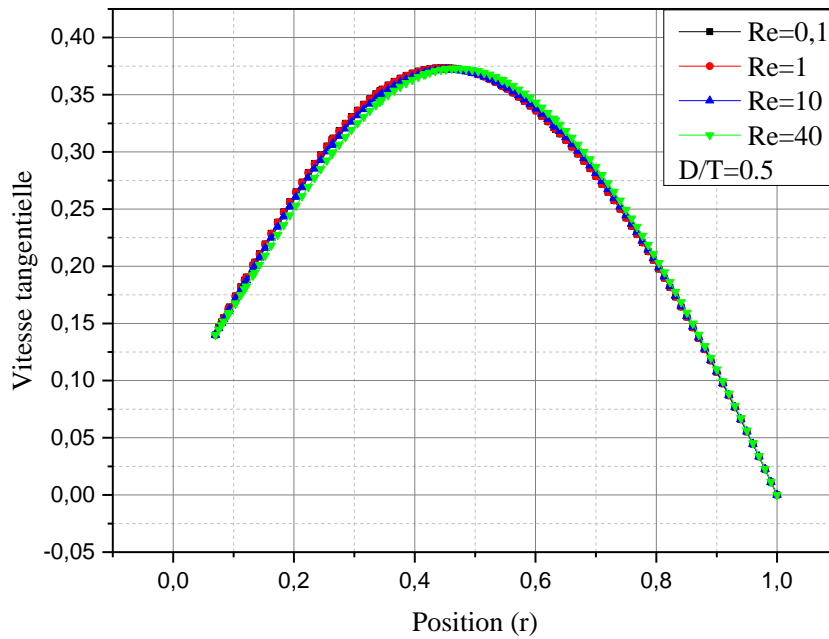


Figure III.30 Influence du Re sur l'évolution de la vitesse tangentielle V_{θ} sur la médiatrice de l'agitateur ($\Theta = 90$)

Pour tous les cas, la vitesse tangentielle commence à $r=0.07$, augmente jusqu'à atteindre un maximum, puis redescend à $r=1$.

Sur la pale de l'agitateur le nombre de Reynolds a un effet modéré sur la distribution de la vitesse tangentielle, avec des valeurs plus élevées de Re produisant une légère augmentation de la vitesse maximale (figure III.29).

Sur la médiatrice de l'agitateur Nous remarquons que de $r=0.07$ à $r=0.5$ lorsque vous augmentez le nombre de Reynold, la vitesse diminue et l'inverse de cela jusqu'à $r=1$ (figure III.30).

III.4 Comparaison entre la forme (cadre) et la forme (L)

III.4.1 vitesse tangentielle

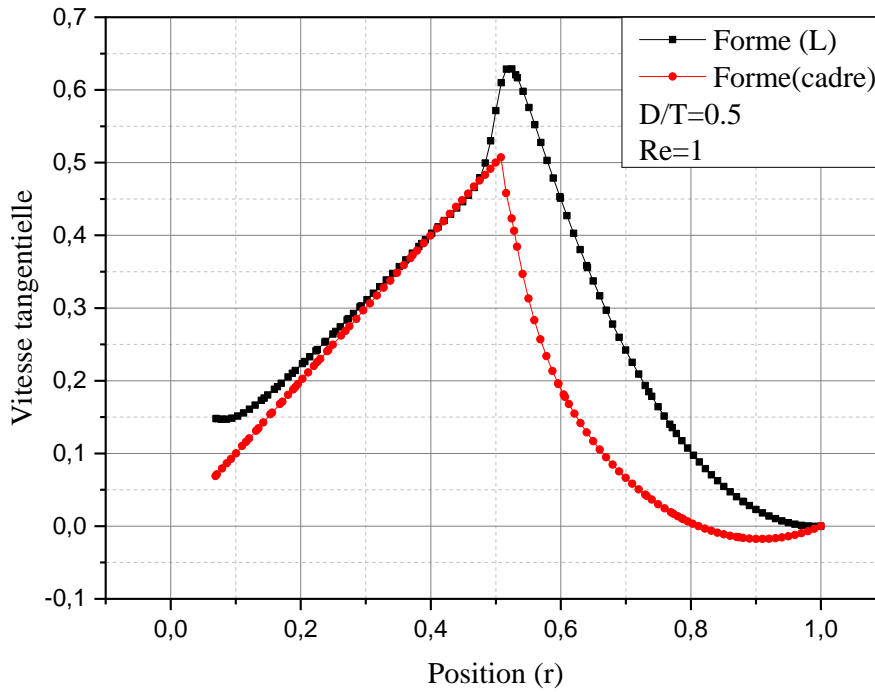


Figure III.31 Influence de la forme de la pale de l'agitateur sur la vitesse tangentielle ($\Theta = 0$)

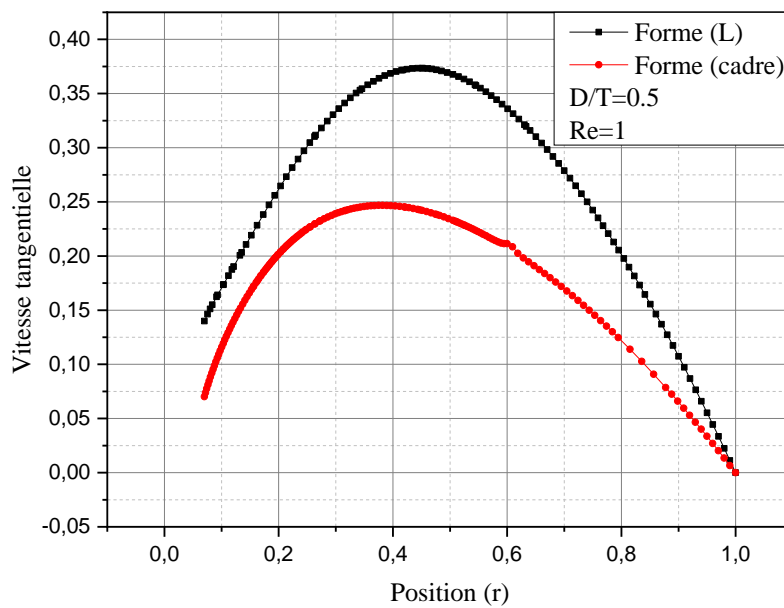


Figure III.32 Influence de la forme de la pale de l'agitateur sur la vitesse tangentielle ($\Theta = 90$)

Les courbes de vitesse tangentielle pour les deux formes de pales montrent une augmentation avec la position radiale (r) jusqu'à un certain point, suivie d'une diminution. La vitesse tangentielle maximale pour la Forme (L) est plus élevée et se produit à une position radiale plus grande que pour la Forme (cadre).

Cette comparaison peut être utile pour comprendre l'efficacité des différentes formes de pales d'agitateur dans les applications de mélange. La Forme (L) semble fournir une vitesse tangentielle plus élevée sur une gamme plus large de positions radiales, ce qui pourrait suggérer une performance de mélange plus efficace comparée à la Forme (cadre).

En résumé, la forme de la pale de l'agitateur a une influence significative sur la distribution de la vitesse tangentielle dans le fluide. La forme en L génère des vitesses tangentielles plus élevées et une variation plus abrupte de la vitesse, tandis que la forme en cadre produit des vitesses plus modérées et une transition plus douce. Le choix entre ces deux formes dépendra des exigences spécifiques de l'application, comme la nécessité de mélanger intensément (forme en L) ou de maintenir une distribution plus uniforme de la vitesse (forme cadre).

III.4.2 vitesse radiale

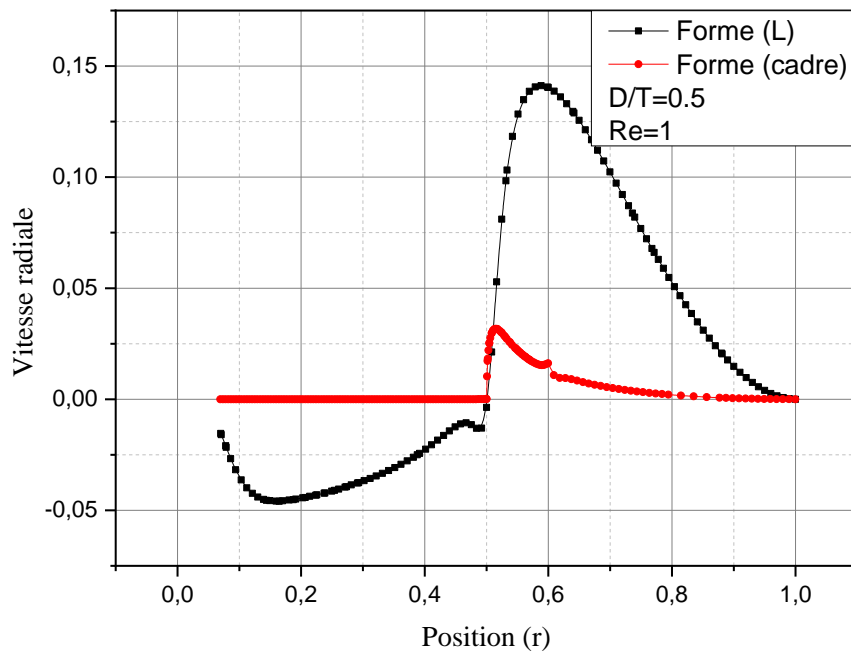


Figure III.33 Influence de la forme de la pale de l'agitateur sur la vitesse radiale ($\theta = 0$)

Pour la Forme (L), la vitesse radiale commence par être légèrement négative, puis augmente pour atteindre un pic positif autour de $r = 0,5$ avant de diminuer progressivement. En revanche, la vitesse radiale pour la "Forme (cadre)" reste presque constante et nulle jusqu'à environ $r = 0,5$, puis légèrement augmente avant de redescendre.

La Forme (L) montre un comportement plus dynamique avec des variations significatives dans la vitesse radiale, tandis que la Forme (cadre) montre un comportement plus stable avec des variations minimales.

Ces informations peuvent être utiles pour comprendre comment la forme des pales affecte la distribution de la vitesse radiale dans un mélange. La Forme (L) semble induire des changements plus importants dans la vitesse radiale, ce qui pourrait suggérer un mélange plus turbulent comparé à la Forme (cadre). La Forme (cadre), avec sa vitesse radiale plus stable, pourrait être préférée pour des applications nécessitant un mélange plus doux.

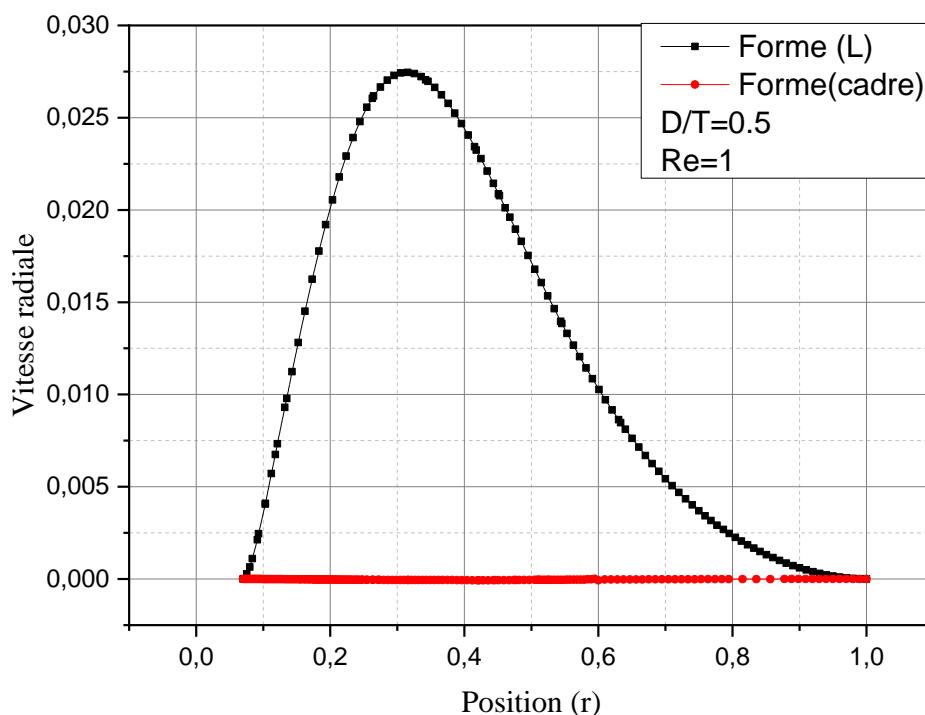
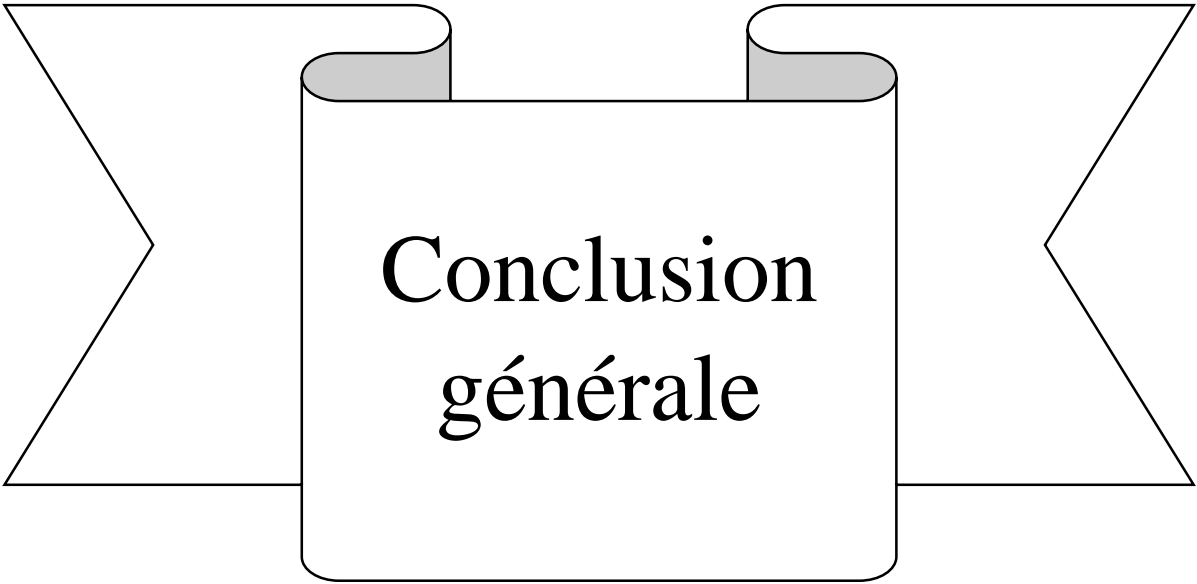


Figure III.34 Influence de la forme de la pale de l'agitateur sur la vitesse radiale ($\theta = 90$)

La courbe de la forme (L) montre que la vitesse radiale atteint un pic significatif de 0,027 environ à environ $r = 0,3$, puis redescend presque symétriquement vers zéro à $r = 1,0$. En revanche, la courbe de forme (cadre) montre une vitesse radiale quasi nulle pour la forme (cadre), indiquant une influence radiale très faible.

La forme (L) génère une vitesse radiale notable, ce qui peut être utile pour les applications nécessitant un mouvement radial pour un mélange ou une distribution spécifique. La forme (cadre), avec une vitesse radiale négligeable, peut être préférée pour des processus nécessitant principalement une agitation tangentielle sans mouvement radial.



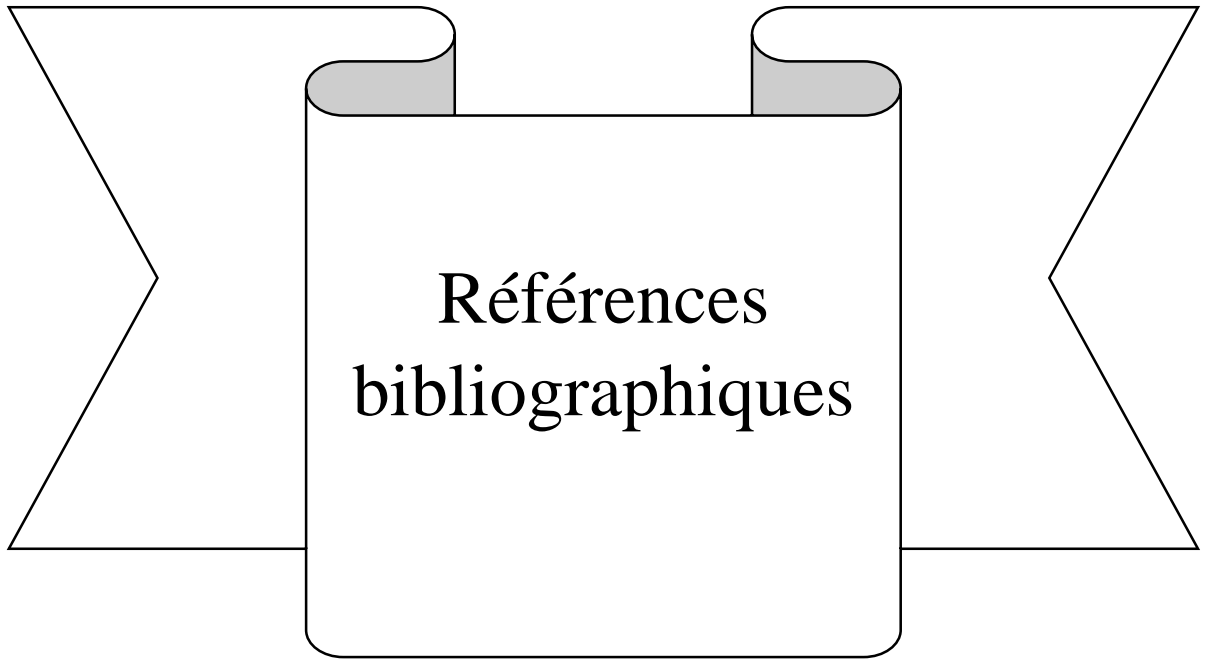
**Conclusion
générale**

L'étude numérique de l'écoulement de fluide en rotation dans une cuve agitée (forme cadre et forme L) permet de mieux comprendre les phénomènes de mélange et de transport de matière dans des systèmes industriels et environnementaux. Les simulations numériques offrent une méthode efficace pour prédire et optimiser le comportement des fluides, contribuant ainsi à améliorer la conception et les performances des cuves agitées. Cette approche permet également d'explorer une gamme plus large de conditions opérationnelles et de géométries de cuves, offrant ainsi des perspectives précieuses pour l'industrie et la recherche en ingénierie des procédés.

D'abord, nous avons confirmé la validité de nos résultats numériques en les comparant avec ceux obtenus expérimentalement (A. Youcefi 1993) et numériquement (M. Bouzouini 2004) dans la littérature, dans des conditions identiques.

La simulation montre que l'écoulement induit par l'agitateur bipale est principalement tangentiel, car les composantes radiales de la vitesse sont nettement moins importantes ou en peut dire qu'il est négligeable par rapport aux composantes tangentielles. La variation du nombre de Reynolds a peu d'effet discernable sur la vitesse tangentielle.

Pour suivre ce travail et explorer des perspectives, il est essentiel de franchir le pas vers des dispositifs expérimentaux pour concevoir des géométries qui captiveront l'attention des industriels. Ensuite, il est important de proposer une géométrie optimale, avec des courbures éventuelles, capable de produire un mouvement de fluide très efficace tout en réduisant la consommation de puissance.



Références
bibliographiques

- [1] **CHERKI IBRAHIM**, Simulation des fluides non Newtoniens dans une cuve agitée par une turbine à pales radiales et inclinées. Mémoire de master en génie mécanique rhéologie des fluides complexes. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2014.
- [2] **SHINJI NAGATA ET KAZUO YAMAMOTO**, Criteria for the Scaling Up of Mixing Vessels. Department of Chemical Engineering, Yokohama University, 1966.
- [3] **DEVALS C., HENICHE M., TAKENAKA K., TANGUY P. A.**, CFD analysis of several design parameters affecting the performance of the maxbland impeller. Computers and chemical engineering, 2008.
- [4] **MICHEL ROUSTAN et JEAN-CLAUDE PHARAMOND, ALAIN LINE**, Opérations unitaires agitation et mélange www.techniques-ingenieur.fr Réf. Internet : 42486 | 2nde édition
- [5] **HOUARI AMEUR, MOHAMED BOUZIT and MUSTAPHA HELMAOUI**, Numerical study of fluid Flow and Power consumption in a stirred Vessel with a scaba 6srgt impeller. Faculty of Génie Mechanical, USTO-MB, Oran, 2011.
- [6] **PAUL ALEXANDE MOSSER**, Comparaison de méthodes de détection du vortex dans des cuves agitées. Mémoire de maîtrise en génie chimique. Ecole polytechnique de Montréal, 2012.
- [7] **KAMLA YUCEF**, Simulation de l'écoulement des fluides non newtoniens dans une cuve agitée, influence des chicanes sur la formation de vortex. Thèse de Doctorat en génie mécanique énergétique. Université Mohamed Boudiaf d'Oran, 2016.
- [8] **HAMID LAKHDARI**, Hydrodynamique d'écoulement dans une cuve mécaniquement agitée. Thèse de doctorat en systèmes énergétiques avancés. Université M'Hamed BOUGARA, 2009.
- [9] **N. HARNBY, M.F. EDWARDS & A.W. NIENOW, COORD**, Mixing in the process industries. Butte Worth/Heinemann, 2nd Édition, 1985.
- [10] **REBIAI MOUSSA**, Prédiction numérique des caractéristiques hydrodynamique d'un agitateur à pales cylindriques. Mémoire de magister en génie mécanique conversion de l'énergie. Université Mohamed Boudiaf d'Oran, 2014.
- [11] **ABDELKADER YUCEFI**, Etude Expérimentale de l'Écoulement d'un Fluide Viscoélastique autour d'un agitateur Bipale en cuve agitée. Thèse de Doctorat. INP de Toulouse France, 1993.
- [12] **D. L. Pavia, G. M. Lamp man, G. S. Kris, J. R. Vyvyan**, "Introduction to Spectroscopy", Cengage Learning, 2014.
- [13] **J. Thomas**, "Pharmaceutical Calculations", Lippincott Williams & Wilkins, 2011.

- [14] **Y. H. Hui (Ed.)**, «Handbook of Food Science, Technology, and Engineering», CRC Press, 2005.
- [15] **R. Baran & H. I. Maibach**, "Textbook of Cosmetic Dermatology", CRC Press, 2005.
- [16] **S. T. Hall**, "Principles of Surface Coating Technology", Springer, 1999.
- [17] **W. G. Davenport, M. King, M. Schlesinger, A. K. Biswas**, "Extractive Metallurgy of Copper", Pergamon, 2011.
- [18] **R. F. Hicks**, "Oilwell Drilling Engineering: Principles and Practice", Springer, 1986.
- [19] **Le Long André**, Etude des cuves agitées hydrodynamique et transfert à la paroi. Thèse de Doctorat. France 1975.
- [20] **ELMIR MOHAMMED**, Etude de l'influence du comportement rhéologique sur l'agitation d'un fluide pseudo plastique par un agitateur bipale. Mémoire de magister Physique énergétique. Centre universitaire de Béchar, 2000.
- [21] **BOUZOUINI MOHAMMED**, Agitation mécanique des fluides visqueux newtoniens dans une cuve agitée par un agitateur à pale (approche numérique). Mémoire de magister en génie mécanique énergétique. Université Mohamed Boudiaf d'Oran, 2004.
- [22] **BRIDJ ABDEL WAHEB ET ADDA EL HACANE BENALI**, Effet de la géométrie d'un agitateur bipale sur l'hydrodynamique d'un écoulement. Mémoire de master en génie mécanique énergétique. Université Iben Khaldoun de Tiaret, 2023.
- [23] **ERROUANE SORAYA**, Simulation numérique d'écoulement de fluide newtonien dans une cuve agitée par une turbine Rushton. Mémoire de master en génie mécanique énergétique, Université Mohamed Boudiaf d'Oran, 2019.
- [24] **AMEUR HOUARI**, Simulation des fluides visqueux dans une cuve agitée par des mobiles à pales, à disques hélicoïdaux et max Blend. Thèse de Doctorat en génie mécanique. Université Mohamed Boudiaf d'Oran, 2011.
- [25] **D'ANNE-ARCHARD, M MAROUCHE, HC BOISSON**, Hydrodynamics and Metzner–Otto correlation in stirred vessels for yield stress fluids. Chemical Engineering Journal, 2006.
- [26] **M. GREGORY BEAUME**, Modélisation et simulation numérique directe de l'écoulement d'un fluide complexe docteur de l'école Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2008.
- [27] **D'HAMONVILLE THIERRY TARDIF et ILINCA ADRIAN**, Modélisation de l'écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne. Rapport interne Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne LREE-05 –2008.

Résumé

L'agitation mécanique est couramment utilisée dans divers milieux industriels tels que la chimie, la pétrochimie, l'industrie agroalimentaire, la pharmacie, et d'autres encore. Ce travail est consacré à l'étude numérique de l'hydrodynamique d'écoulement dans une cuve mécaniquement agitée, ou la simulation a été réalisée à l'aide du logiciel (ANSYS Fluent). Cette étude a examiné en détail les impacts du nombre de Reynolds sur le champ de vitesse. Après avoir exploré la littérature sur les divers aspects du comportement hydrodynamique des cuves agitées, nous avons adopté une formulation mathématique basée sur les hypothèses suivantes : le système étudié est isotherme, la viscosité du fluide est constante, et l'écoulement est en régime laminaire. Les résultats obtenus sont comparés à certains résultats expérimentaux et numériques ainsi qu'à d'autres travaux de simulation antérieurs. Ces résultats sont commentés et présentés en détail. Des conclusions et des perspectives complètent l'ouvrage.

Mots-clés : Mélange mécanique, écoulement laminaire, fluide visqueux newtonien, simulation numérique.

ملخص

يستخدم التحريك الميكانيكي بشكل شائع في مختلف المجالات الصناعية مثل الكيمياء، والبتر وكيمياء، وصناعة الأغذية، والصيدلة، وغيرها. هذا العمل مخصص للدراسة الرقمية الهيدروديناميكية للتدفق في خزان يتم تحريكه ميكانيكياً، حيث قمنا في هذه الدراسة بفحص تأثير عدد رينولدز على حقل السرعة. بعد اجراء بحث مرجعي حول التدفق الهيدروديناميكي في الخزانات المحركة، ثم تم تحقيق بروتوكول عددي لدراسة المحاكات وفقاً للافتراضات التالية درجة الحرارة واللزوجة ثابتتان والجريان صفائحي تمت مقارنة النتائج المحصل عليها ببعض النتائج التجريبية والرقمية بالإضافة إلى أعمال محاكاة سابقة أخرى. تم التعليق على هذه النتائج وعرضها بالتفصيل. استكملت الدراسة بخلاصات وآفاق مستقبلية.

. الكلمات المفتاحية: الخلط الميكانيكي، تدفق صفحي، العدد رينولدز، محاكاة عددية

Abstract

Mechanical agitation is commonly used in various industrial environments such as chemicals, petrochemicals, the food industry, pharmaceuticals, and others. This work is devoted to the numerical study of the hydrodynamics of flow in a mechanically stirred tank, where the simulation was carried out using software (ANSYS Fluent). This study examined in detail the impacts of Reynolds number on the velocity field. After exploring the literature on the various

aspects of the hydrodynamic behavior of stirred tanks, we adopted a mathematical formulation based on the following hypotheses: the system studied is isothermal, the viscosity of the fluid is constant, and the flow is in laminar regime. The results obtained are compared to some experimental and numerical results as well as other previous simulation works. These results are commented on and presented in detail. Conclusions and perspectives complete the work.

Keywords: Mechanical mixing, laminar flow, Newtonian viscous fluid, numerical simulation.