

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



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Énergétique

Thème

Simulation numérique de l'écoulement d'un
fluide visqueux au tour d'un agitateur bipale
en cuve agitée

Préparé par :

ZERROUKI ABEDLATIF

TALEB BAHMED SALAH

Soutenu publiquement le : .. / 07 / 2021, devant le jury composé de :

Mr. MEKROUSSI Said	MCA (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
Mr. KARAS Abdelkader	Pr (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. KHALDI Sabrina	MAA (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
Mr. BOUZOUINI Mohammed	MAA (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadreur

Dédicace

À la plus belle créature que Dieu a créé sur terre.

Cette source de tendresse, de patience et de générosité.

À nos mères et nos pères

À toute nos familles

À tous mes amis et collègues

À tous les étudiants de la promotion 2020/2021

Option : mécanique énergétique

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer ...

Remerciements

Je tiens à remercier tout d'abord mon encadrant de recherches, Monsieur BOUZOUNI MOHAMED pour sa patience, et surtout pour sa confiance, ses remarques et ses conseils, sa disponibilité et sa bienveillance.

Qu'il trouve ici le témoignage de ma profonde gratitude. Je voudrais également remercier les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour toutes leurs remarques et critiques, ainsi que le personnel et les enseignants de l'université de ibn Khaldoun a contribué à ma formation.

Je tiens aussi à remercier monsieur ABEDI ainsi que tout le personnel et les enseignants du département pour leur soutien inestimable.

Merci à vous tous

Résumé

Notre étude numérique de l'écoulement d'un fluide visqueux newtonien autour d'un agitateur bipale en cuve agitée vise à voir l'influence de différents nombres de Reynolds sur les profils des vitesses et pour différentes positions angulaires θ , ce travail est fait selon des hypothèses et des conditions initiales (système étudié isotherme, viscosité du fluide constante et régime d'écoulement laminaire). L'exécution du protocole de simulation numérique consiste à la préparation du domaine de calcul, l'étude du maillage, l'établissement des conditions aux limites et en fin la résolution des équations. Les résultats obtenus sont comparés à des résultats expérimentales ainsi que d'autres numériques antérieurs. Enfin ces résultats sont présentés et liés avec des commentaires. Terminons avec une conclusion générale attaché à ce travail.

Mots clés : fluide visqueux newtonien, agitateur bipale, cuve agitée, écoulement laminaire, simulation numérique

Abstract

Our numerical study of the flow of a viscous Newtonian fluid around a two-bladed agitator in a stirred tank aims to see the influence of different Reynolds numbers on the velocity profiles and for different angular positions θ , this work is conducted according to hypotheses and initial conditions (studied isothermal system, constant viscosity of the fluid and laminar flow regime). The execution of the numerical simulation protocol consists in the preparation of the computational domain, the study of the mesh, the establishment of the boundary conditions and finally the resolution of the equations. The obtained results are compared with experimental results besides, previous numerical results. Finally these results are presented and linked with comments, concluding with a general conclusion related to this work.

Key words : Newtonian viscous fluid, two-blade stirrer, stirred tank, laminar flow, numerical simulation.

ملخص

تهدف دراستنا العددية لتدفق سائل نيوتوني لزج حول محرض ثنائي الشفرات في خزان مقلوب إلى رؤية تأثير أرقام رينولدز المختلفة على مظهر السرعة ووضعيات مختلفة للزوايا θ ، يتم إجراء هذا العمل وفقاً للفرضيات والظروف الأولية (نظام متساوي الحرارة المدروس، اللزوجة ثابتة لنظام التدفق الصفحي والسوائل). يتكون تنفيذ بروتوكول المحاكاة العددية من إعداد المجال الحسابي، ودراسة الشبكة، وإنشاء شروط عند الحدود، وأخيراً حل المعادلات. تم مقارنة النتائج المتحصل عليها بالنتائج التجريبية والنتائج العددية السابقة. وأخيراً، يتم عرض هذه النتائج وربطها بالتعليقات، وتختتم باستنتاج عام يتعلق بهذا العمل.

الكلمات المفتاحية: سائل لزج نيوتن، محرك ذو شفرتين، خزان مقلوب، تدفق رقائق، محاكاة عددية.

Sommaire

Dédicace

Remerciements

Résumé

Sommaire

Nomenclature

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

CHAPITRE 1 : Généralités sur l'agitation mécanique

1	Généralités sur l'agitation mécanique.....	2
1.1	Introduction	2
1.2	Historique du mélange.....	2
1.3	Définition du mélange	3
1.4	Opération de mélange.....	4
1.5	Mécanisme d'agitation	5
1.5.1	Agitateurs rotatifs	5
1.5.1.1	Agitateurs mécanique.....	5
1.5.1.2	Agitateurs magnétiques	5
1.5.2	Agitateurs statiques	6
1.5.3	Agitateurs ultra sons	7
1.5.4	Agitateurs à jets (mélange par recirculation)	7
1.5.5	Agitateurs à cuve mobile.....	8
1.6	Types d'agitateurs mécanique	8
1.6.1	Agitateurs de fluides peu visqueux	9
1.6.1.1	Hélices	9

1.6.1.2	Turbines	10
1.6.2	Agitateurs de fluides très visqueux	10
1.6.2.1	Agitateurs plans	10
	A. Agitateur bipale	10
	B. Agitateur à ancre	11
	C. Agitateur à barrières	12
1.6.2.2	Agitateurs hélicoïdaux	12
1.6.2.3	Malaxeurs	13
1.7	Choix d'un agitateur mécanique	14
1.8	Cuves mécaniques	15
1.9	Domaine d'application de l'agitation mécanique	17
1.10	Caractéristiques hydrodynamiques d'un appareil d'agitation	17
1.10.1	Types d'écoulement	17
	1.10.1.1 Ecoulement axial	18
	1.10.1.2 Ecoulement radial	18
	1.10.1.3 Ecoulement tangentiel	18
1.10.2	Turbulence	18
1.10.3	Action de cisaillement	18
1.11	Recherche bibliographique	19

CHAPITRE 2 : Formulation mathématiques et méthodes numérique

2.	Formulations mathématiques et méthodes numériques	20
2.1	Introduction	20
2.2	Utilité et attendus de la CFD en ingénierie.....	20
2.3	Démarche de la CFD	20
2.4	Méthodes numériques.....	21
	2.4.1 Méthodes de discrétisation	21
	2.4.1.1 Méthode des différences finis.....	21
	A. Avantages	21

B. Inconvénient	21
2.4.1.2 Méthode des éléments finis	21
A. Avantages	21
B. Inconvénient	21
2.4.1.3 Méthodes des volumes finis	22
A. Principe de méthode	22
B. Formulation Bidimensionnelle de l'équation de Poisson par la MVF	23
2.5 Maillage	25
2.5.1 Choix d'un maillage	25
2.5.2 Différents types de maillage	26
2.5.2.1 Structuré	26
A. Avantages	26
B. Inconvénient	26
2.5.2.2 Non structuré	27
A. Avantages	27
B. Inconvénient	27
2.6 Présentation de GAMBIT et de FLUENT	28
2.6.1 GAMBIT	28
2.6.2 FLUENT.....	28
2.7 Géométrie d'un agitateur bipale	31
2.8 Hypothèses du travail	31
2.9 Equations de mouvement.....	32
2.10 Adimensionnalisation du système	32
2.11 Domaine du calcul	33
2.12 Conditions aux frontières	34

CHAPITRE 3 : Résultats et discussions

3. Résultats et discussions	35
3.1 Introduction	35

3.2	Validation de résultats obtenus	35
3.3	Contours des vitesses	39
3.4	Composantes de la vitesse	41
3.5	Influence du R_e sur la vitesse tangentielle V_θ	43
3.6	Différente position angulaire des rayons	45

Conclusion Générale

Nomenclature

d_a	Diamètre de l'arbre d'agitation	[m]
e	Epaisseur de la pale	[m]
g	Gravitation	[m s ⁻²]
h	Distance entre l'extrémité de l'agitateur et le fond de la cuve	[m]
p	Pression	[pa]
r	Coordonnée cylindrique radiale	
t	Temps	[s]
v	Vecteur vitesse	[m s ⁻¹]
D	diamètre de l'agitateur	[m]
H	niveau de liquide dans la cuve	[m]
N	vitesse de rotation de l'agitateur	[s ⁻¹]
P	pression	[kg m ⁻¹ s ⁻²]
Q	débit de circulation généré par l'agitateur	[m ³ s ⁻¹]
Re	Nombre de Reynolds	
S	Frontière du domaine de calcul	
T	Diamètre de la cuve	[m]
V	Volume de la cuve	[m ³]
V_θ, u_θ	Vitesse tangentielle	[m s ⁻¹]
V_r, u_r	Vitesse tangentielle	[m s ⁻¹]

Lettre grecques :

ε	Erreur pour tester la convergence	
μ	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	
θ	Coordonnée cylindrique tangentielle	
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 :

MVF	Méthode des volumes finis
-----	---------------------------

Symboles :

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

Liste des Figures

Figure 1.1 Représentation schématique de la dispersion et la distribution lors d'un Mélange (Manas – Zloczower, 1997)	4
Figure 1.2 Champ de vitesse crée par un agitateur magnétique [Tariq Mahmud, 2009].....	6
Figure 1.3 Mélangeurs statiques.....	7
Figure 1.4 Principe d'un mélangeur par jet dans une cuve de stockage.....	7
Figure 1.5 Mélangeurs à cuve mobile.....	8
Figure 1.6 Hélice marine	9
Figure 1.7 Turbine à six pales droites	10
Figure 1.8 Bipale classique	11
Figure 1.9 Bipale cadre	11
Figure 1.10 Divers types d'agitateur à ancre	12
Figure 1.11 Agitateur à barrières	12
Figure 1.12 Ruban hélicoïdal simple	13
Figure 1.13 Double ruban hélicoïdaux	13
Figure 1.14 Le choix du type de mobile en fonction de la viscosité	14
Figure 1.15 Les écoulements générés par le système d'agitation	14
Figure 1.15 Installation industrielle d'un système mécaniquement agité	14
Figure 1.16 Nomenclature d'un système de mélange	16
Figure 1.17 Divers fonds de cuve cylindrique ($H \approx T$)	17
Figure 2.1 Schéma représentant volume de contrôle bidimensionnel	22
Figure 2.2 Discrétisation en volumes finis du domaine d'étude dans le cas bidimensionnel.....	23
Figure 2.3 Description bidimensionnel d'un volume fini.....	23
Figure 2.4 Maillage d'une section horizontale de la cuve.....	25
Figure 2.5 Maillage structuré	27
Figure 2.6 Maillage non structuré	28
Figure 2.7 Structure de base du Code Fluent.....	30
Figure 2.8 Représentation schématique de la cuve agitée.....	31
Figure 3.1 Evolution de la vitesse tangentielle V_{θ} sur la pale de l'agitateur.....	36
Figure 3.2 Evolution de la vitesse tangentielle V_{θ} sur la médiatrice de l'agitateur.....	36
Figure 3.3 Evolution de la vitesse tangentielle V_{θ} sur la pale de l'agitateur.....	37
Figure 3.4 Evolution de la vitesse tangentielle V_{θ} sur la médiatrice de l'agitateur.....	37
Figure 3.2 Evolution de la vitesse tangentielle V_{θ} sur la pale de l'agitateur.....	38
Figure 3.6 Evolution de la vitesse tangentielle V_{θ} sur la médiatrice de l'agitateur.....	38

Figure 3.7 Contour de vitesse tangential à $Re = 1$	39
Figure 3.8 Contour de vitesse radial à $Re = 1$	39
Figure 3.9 Contour de vitesse tangential à $Re = 40$	40
Figure 3.10 Contour de vitesse radial à $Re = 40$	40
Figure 3.11 Evolution de la vitesse tangentielle V_{θ} et la vitesse radiale V_r sur la pale à $Re = 1$	41
Figure 3.12 Evolution de la vitesse tangentielle V_{θ} et la vitesse radiale V_r sur la médiatrice del'agitateur à $Re = 1$	42
Figure 3.13 Evolution de la vitesse tangentielle V_{θ} et la vitesse radiale V_r sur la pale à $Re = 40$	42
Figure 3.14 Evolution de la vitesse tangentielle V_{θ} et la vitesse radiale V_r sur la médiatrice de l'agitateur à $Re = 40$	43
Figure 3.15 Influence du Re évolution de la vitesse radiale V_r sur la pale de l'agitateur.....	44
Figure 3.16 Influence du Re évolution de la vitesse radiale V_r sur la médiatrice de l'agitateur.....	44
Figure 3.17 Diffèrent position angulaire des rayons	45
Figure 3.18 Évolution de la vitesse tangentielle V_{θ} sur différents rayons.....	46

Liste des tableaux

Tableau 1.1 Quelques opérations unitaires de l'agitation mécanique.....	14
Tableau 2.1 Domaine de calcul	33
Tableau 3.1 Position angulaire des rayons R1 à R8	45

Introduction générale

L'agitation mécanique des milieux fluides favorise très souvent certaines transformations physico-chimiques, cela donne une amélioration de l'efficacité du système d'agitation utilisé.

Dans certains secteurs de l'industrie chimique et para-chimique (agroalimentaires, plastiques, pharmaceutiques et les peintures) on utilise des techniques d'agitation mécanique des fluides newtonien. Cette opération réalise des contacts intimes entre différentes phases afin d'effectuer les meilleures conditions de transfert de matière et de chaleur.

L'objectif de ce travail c'est l'étude numérique de l'agitation mécanique d'un fluide visqueux newtonien dans une cuve cylindrique sans chicane à fond plat munie d'un agitateur bipale dont la hauteur est égale à celle du liquide de la cuve.

Nous retenons une simulation numérique pour l'analyse des systèmes agités à l'aide d'un code de calcul (FLUENT 2020 R1).

Notre travail contient trois chapitres :

- Le premier chapitre présente le concept de l'agitation mécanique d'une façon générale avec ses différents types et mécanismes, aussi son domaine d'utilisation, aussi une recherche bibliographique sur les études faites dans ces systèmes.
- Le deuxième chapitre expose les formulations mathématiques et les méthodes numériques, les équations hydrodynamiques, les conditions aux frontières et les conditions initiales et enfin les conditions spécifiques du problème traité.
- Dans le dernier chapitre nous exposons nos résultats numériques obtenus après avoir simulé et les comparons aux résultats expérimentaux et numériques (validation) et les relient avec nos commentaires.

Enfin, nous terminons notre travail par une conclusion générale sur les résultats obtenus.

1 Généralités sur l'agitation mécanique

1.1 Introduction

Il est difficile d'imaginer un procédé industriel dans lequel il n'y ait au moins un système de mélange, soit la dissolution de phases miscibles ou l'agitation de différentes phases immiscibles. Ainsi, on trouve des opérations de dissolution de solides en liquides ou liquides en liquides, de formation de suspensions de solides en liquides ou de bulles de gaz en liquides. On peut citer certainement une liste non exhaustive des secteurs industriels concernés tel que : La chimie et la pétrochimie, l'industrie pharmaceutique humaine et animale, l'agroalimentaire, le cosmétique, la fabrication métallurgique, le domaine nucléaire, la production et le traitement des eaux...etc.

Les opérations de mélange sont donc trop compliquées à caractériser et à analyser d'une manière scrupuleuse. Les chercheurs ont lié cet ordre de difficulté à deux facteurs importants : l'un regroupe les phénomènes hydrodynamiques de l'écoulement (laminaire et turbulent), les caractéristiques géométriques et énergétiques, la viscosité et la température des substances ainsi que la nature rhéologique des différentes phases. L'autre facteur consiste à prendre en considération, la teneur et la nature des composants du mélange qui ont un rôle prépondérant sur les résultats obtenus en fin d'opération de mélange.

A noter dans ce contexte que l'ordre de difficulté devient assez important quand il s'agit de l'agitation de fluides ou de substances concentrées là où les comportements non Newtoniens (viscoélastique et viscoplastique) font leur apparition. Autrement, l'état de l'art des opérations de mélange n'a pas cessé et ne cessera jamais de donner de nouvelles inventions. En 1989 et lors d'une enquête réalisée aux USA, 5% des pertes de production industrielle sont dues aux problèmes de mélange. (Tetterton et col, 1991) ont montré statistiquement que des pertes d'environ 1 -60 million d'US\$ sont enregistrées suite à des échecs opérationnels des opérations d'homogénéisation et de dispersion. Cependant, il faut remarquer que la plupart des études n'abordent pas le problème de façon systémique ; il y a plutôt des approches partielles. D'une part, on trouve des travaux dont l'approche est exclusivement hydrodynamique, alors que d'une autre part, plusieurs travaux orientés presque exclusivement vers le comportement physico-chimique et qui négligent les aspects hydrodynamiques.[1]

1.2 Historique du mélange :

Le mélange industriel aurait été rapporté pour la première fois au 16^{ème} siècle avec les travaux de Georgius Agricola (Agricola, 1556). Avec le développement de la deuxième vague de la révolution industrielle et technologique dans la deuxième moitié du 19^{ème} siècle, William Froude

(1868) et Osborne Reynolds (1885) proposent des nombres adimensionnels qui marquent le début de la mécanique des fluides : les nombres de Froude et de Reynolds. Suite à ces développements, des agitateurs sous forme d'hélice marine commencent à être utilisés dans le mélange.

Soixante-quinze ans plus tard, John Henry Rushton propose le premier agitateur ayant une géométrie devenue standard de nos jours. (Rushton, Costich, & Everett, 1950). Dans les années 1950, avant même l'apparition du premier livre dédié au mélange industriel (Uhl & Gray, 1966), des scientifiques se posaient déjà des questions sur les surfaces libres dans des cuves de mélange car des publications scientifiques apparaissent (Nagata & Yamamoto, 1966; Nagata, Yamamoto, & Hashimoto, 1959; Nagata, Yoshioka, & Yokoyama, 1955; Jan Gerrit van de Vusse, 1953).

La décennie suivante fut celle qui a marqué le plus l'histoire de la surface libre avec de nombreuses publications (Brennan & Lehrer, 1976; Le Lan & Angelino, 1972; Rieger, Ditzl, & Novák, 1979; Zlokarnik, 1971) et avec l'édition du livre de mélange compilant tous les travaux de Shinji Nagata (Nagata, 1975).

Les années 1980 marquent le début de la simulation numérique appliquée au mélange. Depuis, le mélange a pris une place importante dans la recherche académique et industrielle. Actuellement, la recherche sur le mélange est présente en Amérique du Nord/Sud, en Europe, en Inde et dans l'Asie de l'est (Heniche & Tanguy, 2008).[2]

1.3 Définition de mélange :

Le mélange se définit comme étant la réduction d'un manque d'homogénéité dans un volume d'étude. Cette inhomogénéité peut être reliée à une concentration, à une phase ou même à une température. Mélanger consiste donc à réduire les différences des propriétés dans un volume (Paul, Atiemo-Obeng, & Kresta, 2004). Mais, un mélange parfait n'existe pas car, le degré d'homogénéisation dans un volume est relatif à l'échelle et au point de vue de l'étude. Notons ici que le mélange s'effectue à trois échelles différentes (Paul et al., 2004):

- Macromixing: le mélange est effectué à la plus haute échelle de mouvement du fluide dans la cuve et est caractérisé par le temps de mélange global;
- Mésomixing: le mélange s'effectue à une échelle plus petite que le mouvement général précédent, c'est-à-dire à des tailles inférieures au diamètre de la cuve. Le mélange à cette échelle se rencontre principalement aux points d'alimentation des réacteurs par exemple;
- Micromixing: le mélange s'effectue des plus petites échelles du mouvement du fluide, (échelle de Kolmogorov) jusqu'à la diffusion moléculaire (échelle de Batchelor). Le mélange à l'échelle micro est la principale limitation des réactions chimiques.

Par exemple, une émulsion est considérée mélangée à l'échelle méso/macrosopique tandis qu'un mélange dans un réacteur chimique est considéré mélangé à l'échelle microscopique (à cause que la réaction se déroule au niveau moléculaire). Un milieu homogène correspond donc à un milieu dont les particules sont à la fois bien dispersées et bien distribuées (Manas - Zloczower, 2009). La Figure (1.1) illustre les différents cas possibles.

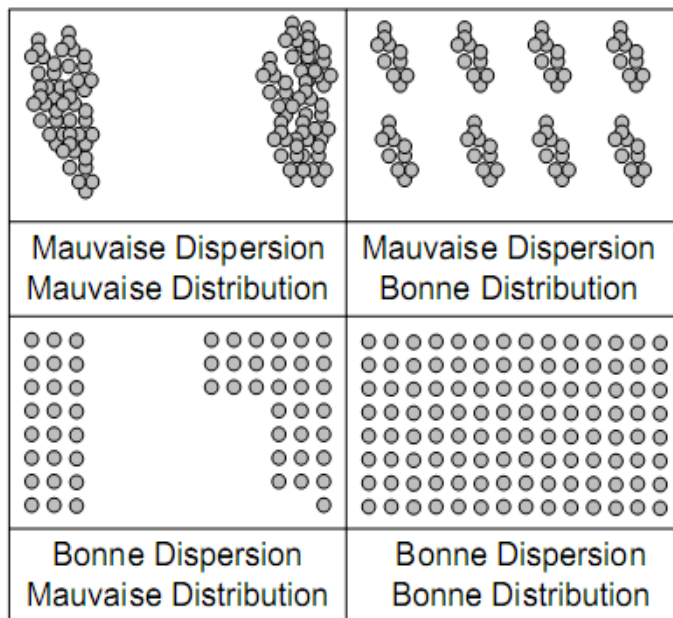


Figure 1.1 Représentation schématique de la dispersion et la distribution lors d'un Mélange (Manas – Zloczower, 1997) [2]

L'étude du mélange est essentielle pour réguler un procédé. Le mélange permet souvent de contrôler l'efficacité des réacteurs chimiques (Cabaret & Fradette, 2011). C'est-à-dire qu'il permet de contrôler le transfert de masse, la réaction et ultérieurement les propriétés des produits désirés afin d'affecter le rendement, la qualité et les coûts de production des produits désirés. Il est donc important de mentionner quelques systèmes de mélange et comment ces derniers sont caractérisés.[2]

1.4 Opérations de mélange :

En mettant à part les mélanges gaz-gaz, solide-solide et solide-gaz (lits fluidisés), on peut regrouper les opérations de mélange en quatre grandes classes d'application. Chacune peut se caractériser par son aspect physique ou chimique. Il est bien évident qu'un problème donné se rapportera rarement à une caractéristique unique, mais plutôt à un ensemble de caractéristiques et il conviendra donc d'identifier clairement les étapes limitantes du procédé. [3]

1.5 Mécanisme d'agitation

L'étude du mélange est essentielle pour réguler un procédé. Le mélange permet souvent de contrôler l'efficacité des réacteurs chimiques. C'est-à-dire qu'il permet de contrôler le transfert de masse, la réaction et ultérieurement les propriétés des produits désirés afin d'affecter le rendement, la qualité et les coûts de production des produits désirés. Il est donc important de mentionner quelques systèmes de mélange et comment ces derniers sont caractérisés avant de discuter des surfaces libres et de la formation des vortex. **Paul Alexandre., 2012.**

Plusieurs modes d'agitation, peuvent être rencontrés dans les domaines industriels ou de recherche. Ils sont très différents les uns par rapport aux autres, est parmi eux :

- 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. [1]

1.5.1 Agitateurs rotatifs

Il existe deux types d'agitateurs rotatifs :

1.5.1.1 Agitateurs mécaniques

Cette technique d'agitation est faite par un dispositif rotatif (le bras tourne à l'intérieur de la cuve et sur lui-même), le système d'agitation est de forme et de taille variables. Ils plongent au sein de la cuve qui contient les substances à mélanger. Pour améliorer l'efficacité du mélange, des chicanes peuvent être mises dans la cuve ou plusieurs hélices à différents niveaux, dans notre travail on est intéressé par ce type d'agitateur. [1]

1.5.1.2 Agitateurs magnétiques

L'agitation magnétique est de loin la plus pratique et la plus simple à mettre en œuvre. On place un barreau magnétique recouvert d'un revêtement inerte (le plus souvent TEFLON, quelque fois du verre) dans le mélange à agiter, suivant les récipients, il existe différentes formes de barreau : 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 présent dans le milieu est entraîné par un aimant tournant situé sous le récipient. [1]



Figure 1.2 Champ de vitesse créé par un agitateur magnétique [Tariq Mahmud, 2009] [1]

1.5.2 Agitateurs statiques

Il existe environ 35 modèles de mélangeurs statiques disponibles actuellement sur le marché (Mustakis et al., 1986), et une centaine de brevets ont été déposés (Cybulski et Werner, 1986). Les paramètres opératoires sur lesquels on peut jouer sont : le débit du liquide et du gaz, l'augmentation du nombre d'éléments fixe et par conséquent la longueur du mélangeur, la forme. Ceci améliore la dispersion du gaz, mais au prix d'une augmentation des pertes de charge. Les mélangeurs statiques sont des obstacles fixes, plus ou moins hélicoïdaux, placés dans une conduite pour y mélanger les flux transversalement de manière systématique, en écoulement axial co-courant de type piston. Ils ne comportent pas de pièce mobile, mais la perte de charge qu'ils provoquent apporte l'énergie nécessaire au mélange. Des formes très variées sont proposées, plus ou moins ouvertes et complexes (fig.I.2), plusieurs éléments sont souvent placés en série dans la conduite pour atteindre le degré de mélange souhaité. Ces mélangeurs sont bien adaptés à de nombreux problèmes [E. Saadjian et al., 2012]. [1]

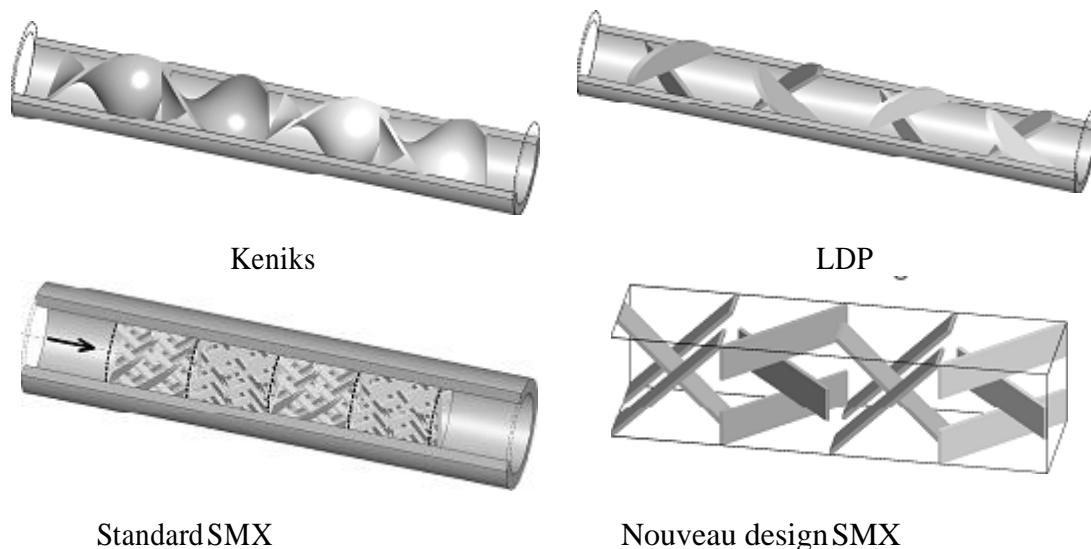


Figure 1.3 Mélangeurs statiques [1]

1.5.3 Agitateurs ultra sons

Le filet fluide passe sur une lame qui vibre à des fréquences ultrasoniques. L'utilisation de ce type de mélangeur est répandue pour accélérer des réactions chimiques homogènes (liquides ou solides) ou hétérogènes (liquide-solide). [1]

1.5.4 Agitateurs à jets (mélange par recirculation)

Si la qualité du mélange n'est pas suffisante, on peut avoir recours au mélange par recirculation pour améliorer l'homogénéité. Des produits étant coulés dans un bac après mélange en ligne, la méthode consiste à recirculer pendant un certains temps les produits sur eux-mêmes. Une pompe les aspire à la base du réservoir et les refoule également a la base dans une tubulure simple ou munie d'un convergent intérieur qui projette le liquide à la façon d'un jet et provoque ainsi des courants favorables au mélange [Greenville et al,1996]. [1]

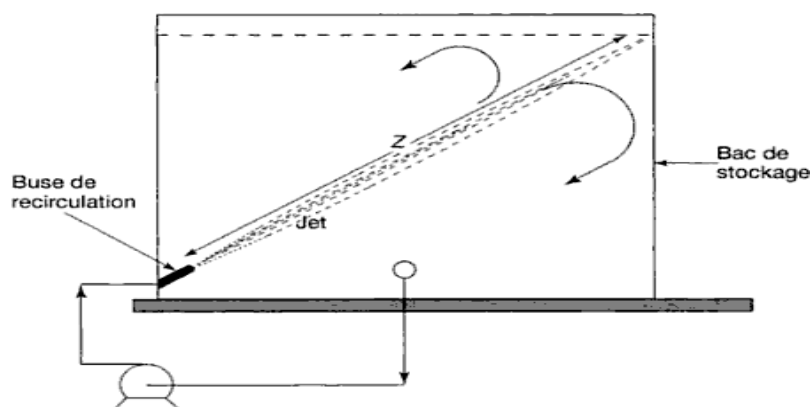


Figure 1.4 Principe d'un mélangeur par jet dans une cuve de stockage. [1]

1.5.5 Agitateurs à cuve mobile

Ces appareils sont des récipients clos qui tournent sur eux-mêmes et contiennent les produits à mélanger. Leurs formes très variables : cylindriques (peu efficace), cubique (très réponde), mélangeur a double cuve de forme de V (**fig.1.5**)

Certains appareils pilotes ou de laboratoire permettent des mélanges plus rapides, grâce a un mouvement turbulent des récipients, le mélangeur a cuve mobile ne peuvent être remplis qu'à 50% de leur volume total. Ils sont efficaces mais la durée de mélange doit être bien établie et respectée, sinon il y a un risque de démélange ou de mauvaise homogénéité. [1]



Figure 1.5 Mélangeurs à cuve mobile [1]

1.6 Types d'agitateurs mécanique

Généralement montés sur un arbre vertical centré ou décentré et placés dans une cuve cylindrique verticale, leur domaine d'intervention est largement tributaire des propriétés physicochimiques du milieu à traiter et de la tâche à effectuer. Ainsi, l'un des critères principaux de discrimination entre tous les agitateurs est la viscosité du fluide.

On distingue usuellement deux grandes catégories d'agitateurs, selon la viscosité du fluide considéré : les agitateurs de fluide peu visqueux et les agitateurs de fluides très visqueux.[4]

1.6.1 Agitateurs de fluides peu visqueux

L'agitation de fluides peu visqueux dont la viscosité est inférieure à 10^{-2} Pa.s s'effectue à nombre de Reynolds élevé. Les agitateurs ont des diamètres faibles (allant du $\frac{1}{4}$ à la $\frac{2}{3}$ du diamètre de la cuve) et sont actionnés avec des vitesses de rotation élevées (500 à 1500 tr/mn).

Parmi les mobiles utilisés pour l'agitation de milieux peu visqueux on trouve deux grandes familles de mobiles : les hélices et les turbines. [4]

1.6.1.1 Hélices

Le type le plus commun des hélices est le type marin (Fig. 2.2), souvent avec trois pales. Avec les hélices, l'agitation des fluides se fait par un écoulement axial qui crée un mouvement des fluides dans une direction axiale (vers le haut ou vers le bas) par rapport à l'axe de rotation de l'hélice. Elles peuvent être utilisées pour mélanger des liquides aux viscosités allant jusqu'à 2 Pa.s (Sterbacek et Tausk, 1965).

Les hélices radiales ou les turbines axiales ont un écoulement composé axial-radial. Ils se composent de 4 à 16 pales ou de lames profilés montés sur un axe sous un angle de 10 à 25° avec la perpendiculaire de cet axe. A la différence des hélices ordinaires, les lames finissent dans les faces plates, qui sont la cause du flux radial. Ce sont les mélangeurs à grande vitesse et conviennent aux opérations de suspension, homogénéisation, mélange liquide-liquide miscible, et transfert thermique avec des viscosités importantes de 20 Pa.s (Sterbacek et Tausk, 1965). [4]



Figure 1.6 Hélice marine[4]

1.6.1.2 Turbines

Elles sont constituées généralement de plusieurs pales verticales (de 4 à 20 pales) fixées sur un disque horizontal. La hauteur des pales est comprise entre 0.1 et 0.3 fois leur diamètre. La plus classique entre elles comprend six pales, appelée turbine de Rushton.

Ces mobiles sont caractérisés par un écoulement à refoulement radial. [4]



Figure 1.7 Turbine à six pales droites[4]

1.6.2 Agitateurs de fluides très visqueux

Les mobiles pour des fluides très visqueux dits de proximité sont trouvés particulièrement dans les industries chimiques (caoutchouc, plastiques, céramique, savon etc.) et dans les industries de produit alimentaire. Ils sont généralement conçus de sorte que l'agitateur traverse le volume entier 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. [4]

1.6.2.1 Agitateurs plans

A. Agitateur bipale

Le bipale est la forme la plus simple. Le rapport du diamètre de l'agitateur sur le diamètre de la cuve (d/D) est compris entre 0.3 et 0.9. Le rapport de la hauteur de l'agitateur sur le diamètre de la cuve (H/D) varie de 1/12 jusqu'à 1/3 pour un bipale classique. Lorsque le rapport (H/D) devient grand (voisin de 1), l'agitateur est du type cadre (ou feuille).

Il est généralement utilisé pour des agitations douces avec une vitesse des pales qui ne dépasse pas 3 m/s. [4]

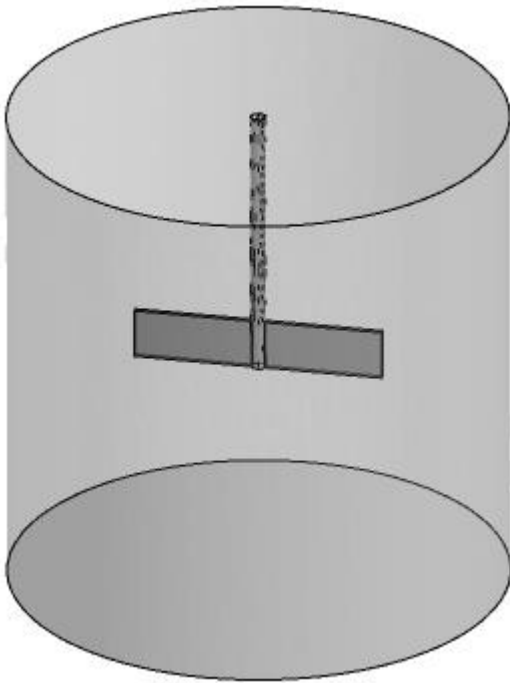


Figure 1.8 Bipale classique[4]

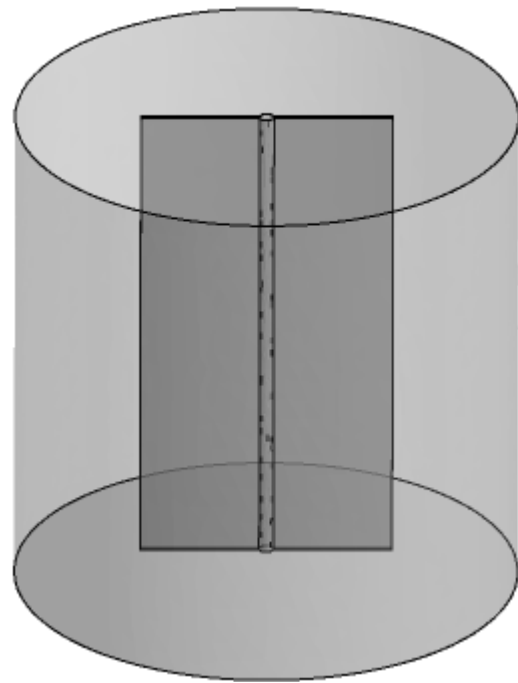


Figure 1.5 Bipale cadre[4]

B. Agitateur à ancre

Les agitateurs à ancre sont utilisés particulièrement pour l'écoulement fortement visqueux de 10 à 100 Pa.s, dans des réactions de polymère et quelques processus dans les industries alimentaires (Pedrosa et Nunhez, 2000).

La majorité de ces mélangeurs ont des bras horizontaux qui suivent la forme de la cuve et des pales verticales fixées aux extrémités des bras pour favoriser le mouvement vertical du mélange. Ils ont un diamètre de l'ordre de 0.95 à 0.98 du celui de la cuve. La largeur du bras peut varier de 0.05 à 0.10 du diamètre de l'ancre. Les vitesses périphériques sont généralement assez faibles (1 à 3 m.s⁻¹). On trouve d'autres types d'ancre appelés le cadre qui peu être utilisé pour des travaux d'homogénéisation sur une large gamme de viscosité. [4]

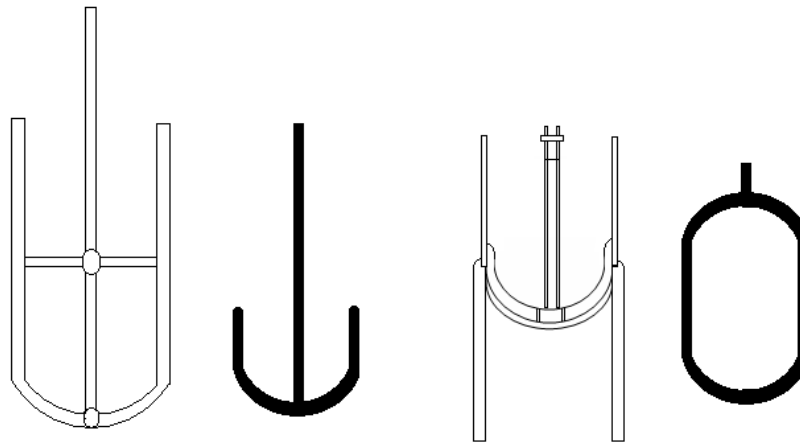


Figure 1.10 Divers types d'agitateur à ancre [4]

C. Agitateur à barrières

Sont constitués d'un ensemble de barres horizontales et verticales. Les vitesses de rotation sont généralement faibles pour réduire la consommation d'énergie. Ils sont souvent utilisés pour l'agitation de grandes cuves pour des opérations de traitement des eaux. [4]

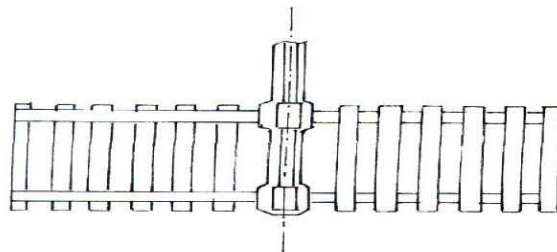


Figure 1.11 Agitateur à barrières [4]

1.6.2.2 Agitateurs hélicoïdaux

Les mélangeurs hélicoïdaux tels que les rubans hélicoïdaux et les vis hélicoïdales sont bien adaptés pour les fluides élastiques et les viscosités élevées des matériaux, puisqu'ils produisent simultanément des mouvements axiaux et tangentiels en même temps.

Dans le cas de vis sans fin l'écoulement axial créé au centre de la cuve est canalisé vers le bas par des chicanes ou un tube de circulation qui enveloppe la vis. Par contre, les agitateurs à rubans hélicoïdaux raclent quasiment la paroi, permettant ainsi la circulation axiale du fluide le long de la paroi, ce qui s'avère intéressant lorsqu'il y a échange thermique avec la paroi. Le plus souvent dans le cas de fluides très visqueux difficile à mélanger, on associe les deux mobiles pour

assurer une meilleure circulation et éliminer les zones mortes. Dans ce cas particulier, ils sont choisis à pas inversé. [4]

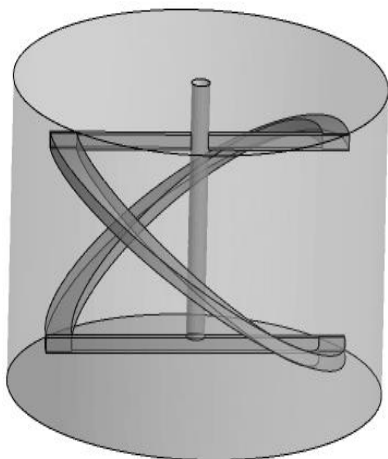


Figure 1.12 Ruban hélicoïdal simple [4]

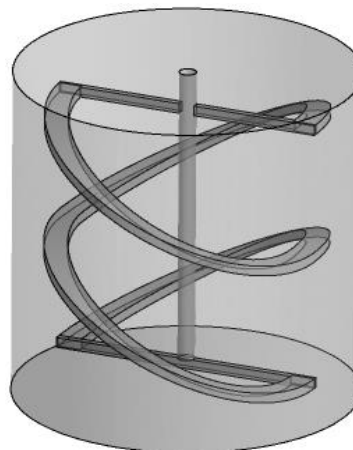


Figure 1.13 Double ruban hélicoïdaux [4]

1.6.2.3 Malaxeurs

Des unités de malaxeurs, des pales-z et des pales sigma sont généralement employés pour mélanger les liquides, les pâtes, les caoutchoucs, et les pâtes de grande viscosité etc., qui ne peuvent pas être manipulés par des agitateurs ancrés ou des rubans hélicoïdaux. Ces malaxeurs ont généralement la forme de réservoirs montés horizontalement. La distance entre les pales et la cuve est pleine afin de produire des efforts de cisaillement élevés. Les pales occupent le volume entier de la cuve. [4]

Bien des modifications sont possibles dans la conception de tels mobiles : la dimension et le nombre de pales, leur inclinaison par exemple pour une turbine ; le profil et le pas des pales pour les hélices. [4]

Pour les fluides fortement visqueux, les rubans hélicoïdaux, les vis hélicoïdales et les ancrés fournissent une alternative aux turbines standards qui sont généralement utilisées pour de fluides de basse viscosité (Bakker et Cartes, 1995 ; Dickey, 2000). Noter que les deux types de mobiles peuvent être combinés. Par exemple, l'exécution de mélange par un mobile composé de turbine, de disque et de ruban hélicoïdal a été étudié par (Tanguy et Thibaut, 2002) et s'est avéré pour surpasser le ruban hélicoïdal standard quand la rhéologie évolue pendant le processus de mélange. [4]

Tableau 1.1 quelques opérations unitaires ou l'agitation mécanique [4]

Milieux à traiter	Opérations hydrodynamiques	Quelques applications Physicochimiques
Liquides miscible	-Homogénéisation -Circulation	- Homogénéisation en Concentration de milieux Réactionnels homogènes. -Chauffage –refroidissement. -réactions en phase Hétérogène. -extraction liquide –liquide
Liquides Immiscible	-Dispersion -Emulsion	-Cristallisation -Dissolution -Floculation
Liquides-solide	-Mise en suspension -Dispersion	-Absorption -Transfert thermique -Aération
Liquides-gaz	-Dispersion	Moussage

1.7 Choix d'un agitateur mécanique

Le choix du mobile d'agitation est souvent fait sur la base de la viscosité du milieu (**Fig. 1.14**) et suivant le sens de mouvement qu'ils communiquent au fluide. On distingue les mobiles à écoulements radiaux, à écoulement axiaux, à écoulement mixte et les mobiles adaptés à l'agitation de fluides hautement visqueux.

Ils sont dits axiaux lorsque, à son origine, le mouvement se fait suivant l'axe de l'agitateur et radiaux si le mouvement est perpendiculaire à cet axe comme montre (**Figure 1.15**). Certains appareils combinent ces deux possibilités en provoquant un flux mixte.[5]

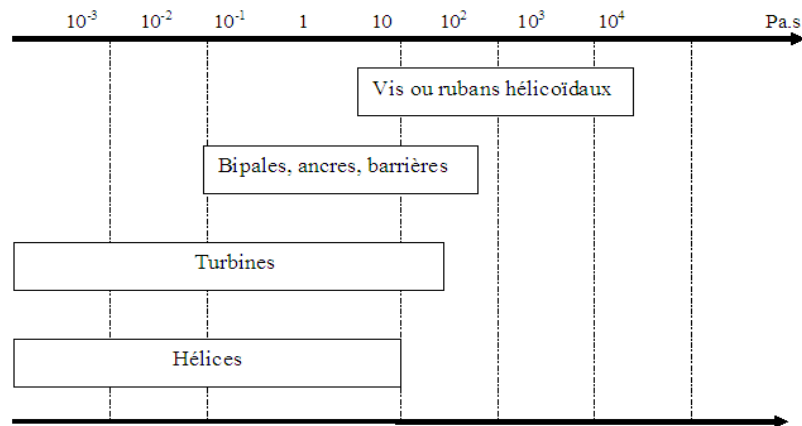


Figure 1.14 Le choix du type de mobile en fonction de la viscosité [5]

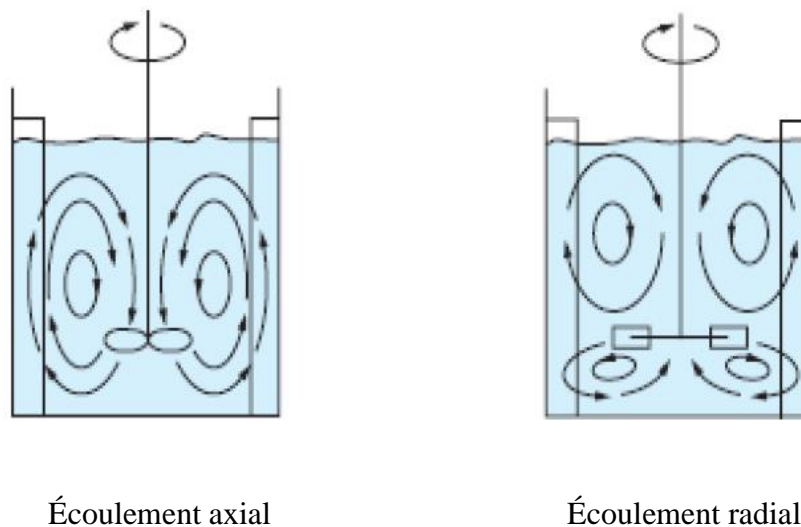


Figure 1.15 Les écoulements générés par le système d'agitation [5]

1.8 Cuves mécaniques

La géométrie de la cuve contenant le liquide à agiter joue un rôle important dans le mécanisme d'agitation. Les études les plus récentes préconisent la forme sphérique surtout en ce qui concerne le mélange des fluides possédant une grande viscosité, mais il s'avère que les cuves les plus répandues dans la pratique courante sont cylindriques, leurs diamètres peuvent aller de 10 cm pour des dispositifs de laboratoire à 10 m et plus pour des installations industrielles (figure 1.16). [6]

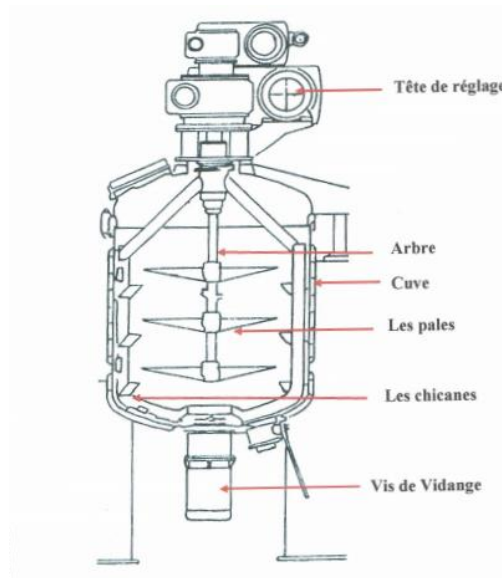


Figure 1.15 Installation industrielle d'un système mécaniquement agité [6]

Le fond de la cuve est plat (c'est surtout le cas des installations de laboratoire), bombé ou conique pour faciliter la vidange.

Afin d'éviter la création d'un mouvement rotatif du liquide, ces cuves sont souvent munies de chicanes, plaques planes collées à la paroi ou séparées de celle-ci.

Dans la Figure (1.16). Le diamètre de l'agitateur et celui de la cuve sont désignés respectivement par les lettres D et T . La hauteur du fluide au repos est souvent représentée par la lettre H et la hauteur de l'agitateur par rapport au fond de la cuve est représentée par la lettre H_Q . En plus, le terme W correspond à la largeur des chicanes. La lettre C représente l'espace entre la chicane et la paroi de la cuve, N désigne la vitesse de rotation de l'agitateur.

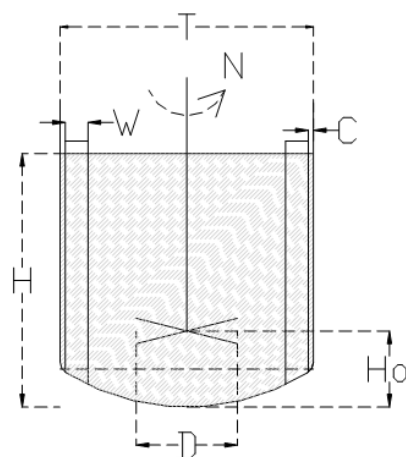


Figure 1.16 Nomenclature d'un système de mélange[6]

Il existe plusieurs géométries possibles pour les cuves de mélange : la géométrie cylindrique à proportions égales ($H \approx T$), celle en forme de cigare ($H > T$), celle en forme de pastille ($H < T$) et les géométries cubiques / parallélépipédiques. La plus commune dans l'industrie est la cuve cylindrique à proportions égales. Toutefois, il existe plusieurs types de fonds de cuve pour cette géométrie (Figure 1.6). Afin d'éviter la création des zones mortes, le fond le plus utilisé est le deuxième : le fond semi-elliptique. [6]



Figure 1.17 Divers fonds de cuve cylindrique ($H \approx T$) [6]

1.9 Domaine d'application de l'agitation mécanique

Les problèmes d'agitation se posent pour tout contact entre deux des trois phases, liquide, solide ou gaz d'une façon générale l'agitation mécanique n'est pas utilisée quand la phase principale est un gaz. Par contre, elle est employée couramment dans tous les autres cas. [7]

On peut nommer plusieurs types d'industrie qui utilisent l'agitation mécanique par exemple la chimie et la pétrochimie, la fabrication métallurgique, l'industrie pharmaceutique, le domaine nucléaire, l'agroalimentaire, les peintures ou les plastiques...

1.10 Caractéristiques hydrodynamiques d'un appareil d'agitation

D'une façon plus précise, l'action de l'agitateur peut être caractérisée par trois facteurs :

- L'écoulement induit (débit et direction),
- La turbulence,
- Le cisaillement, Ces trois notions permettent de définir objectivement l'action d'un mobile d'agitation. [8]

1.10.1 Types d'écoulement

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'écoulement en considérant la direction du liquide dans le courant de refoulement du mobile. [7]

1.10.1.1 Ecoulement axial

Dans ce type d'écoulement, le liquide circule verticalement autour de l'axe et le long des parois de la cuve les hélices et les hélicoïdes sont des agitateurs du type axial : ils aspirent et refoulent axialement. [7]

1.10.1.2 Ecoulement radial

Pour ce genre d'écoulement, le mobile confère au liquide un mouvement fortement radial vers la paroi. Les agitateurs du type radial, qui sont le plus souvent appelés « turbines » ont une aspiration axiale et un refoulement radial. [7]

1.10.1.3 Ecoulement tangentiel

Dans ce cas le liquide a un mouvement de rotation dont l'axe est confondu avec celui de l'agitateur. Le liquide a tendance à tourner d'un seul bloc autour de cet axe et il se développe à la surface un vortex, si la viscosité du liquide n'est pas très grande.

Tous les agitateurs rotatifs ont tendance à créer un mouvement tangentiel, mais certains agitateurs ne génèrent que ce type de mouvement. Ce sont les agitateurs de grand diamètre relatif tel que les agitateurs à pales, les ancrés, les agitateurs à barrière.

Ces trois types d'écoulement permettent de classer simplement les divers agitateurs, mais il ne faut pas perdre de vue que dans une cuve agitée, les trois écoulements coexistent de façon complexe. [7]

1.10.2 Turbulence

La turbulence est un phénomène hydrodynamique qui apparaît dans tout écoulement à partir de certaine valeur du nombre de Reynolds. Elle est principalement fonction de la géométrie du mobile d'agitation ; en particulier à nombre de Reynolds équivalent, la turbulence d'un écoulement diffère d'un appareil à l'autre. [8]

1.10.3 Action de cisaillement

La notion de cisaillement indique les efforts qui se développent entre deux filets fluides de vitesses différentes dans un écoulement unidirectionnel. [8]

1.11 Recherche bibliographie

Des méthodologies expérimentales et numériques ont été développées ou appliquées pour appréhender les écoulements générés dans ces systèmes

NAGATA (1975)

Etude expérimentale dans l'écoulement généré par des mobiles à pales, l'écoulement généré par ce type d'agitateur est généralement tangentiel.

BERTRAND J. (1983)

La publication faite par Bertrand donne des résultats sur l'agitation du fluide pseudo élastique par l'agitateur bipale.

KUBCEWICZ C. (1992)

A présenté une simulation numérique à trois dimensions de l'écoulement d'un fluide incompressible autour d'un agitateur à pales et une turbine à pales planes fonctionnant dans un régime de mélange laminaire dans une cuve agitée dont l'objectif est d'obtenir les trois composantes de vitesse.

YOUFLA (1993)

A fait une étude expérimentale de l'écoulement d'un fluide viscoélastique autour d'un agitateur bipale en cuve agitée elle permet l'obtention des vitesses d'écoulement dans les plans de la pale et dans le plan médian ces vitesses sont analysées à travers des éléments cinématiques et l'impact du champ locale sur la puissance globale et sur le mélange.

BOUZOUINI .M (2004)

Etude numérique de l'écoulement d'un fluides visqueux newtoniens dans une cuve agitée par un agitateur à pale à l'aide des méthodes des élément finis.

BOUZIT.M (2007)

Après avoir étudié l'agitation mécanique d'un fluide newtonien dans une cuve agitée par une bipale sur la base d'une résolution des équations de quantité de mouvement et de continuité par les méthodes des volumes finis. Ceci pour déterminer l'ensemble des caractéristiques hydrodynamiques et l'étude de l'influence de paramètre géométrique.

REBIALM (2013)

Etude numérique des caractéristiques hydrodynamique d'un agitateur à pales cylindriques , par la méthode des volumes finis.

KAMLA.Y (2016)

Simulation numérique de l'écoulement des fluides non newtoniens dans une cuve agitée, influence des chicanes sur la formation de vortex, par la méthode des volumes finis.

2. Formulations mathématiques et méthodes numériques

2.1 Introduction

Depuis longtemps pour pratiquer généralement afin d'évaluer les systèmes d'agitation se fait avec l'expérimentation ce procédé est coûteux économiquement et temporellement ce qui n'est pas facile à réaliser. La pratique de la simulation numérique (CFD) nous permet de voir différents paramètres qui contribuent à différents phénomènes pour temps réduit est économique.

2.2 Utilité et attendus de la CFD en ingénierie

La CFD (Computational Fluid Dynamics) est simplement le calcul numérique appliqué à la mécanique de fluides. Cela consiste à résoudre dans une géométrie donnée les équations fondamentales de la mécanique des fluides, que l'on peut éventuellement coupler aux équations de transfert thermique ou de réaction chimique. Historiquement, la CFD a commencé à se développer en génie mécanique, pour étudier les écoulements autour d'un objet afin de mieux le profiler (ailes d'avions, automobiles). Dans le domaine du génie chimique, les problèmes sont, en général, beaucoup plus complexes de par, en particulier, le caractère multiphasique des écoulements, les réactions chimiques et le comportement rhéologique des fluides.

Le résultat d'une opération unitaire est souvent sous-tendu par la qualité des écoulements qui sont produits dans l'appareil, car l'intensité des transferts en dépend fortement (mise en contact d'espèces, de fluides, de phases, d'internes, de parois). La connaissance des écoulements dans une installation, et des grandeurs locales ou globales que l'on peut en déduire (champs de concentration, de dissipation énergétique, de température, puissance dissipée, perte de charge, distribution de temps de séjour, etc.), aide alors l'ingénieur de procédé à mieux définir la géométrie de son équipement et à régler avec pertinence ses paramètres opératoires. [9]

2.3 Démarche de la CFD

En ce qui concerne la simulation de l'agitation mécanique, la démarche de la CFD consiste, une fois la géométrie du système d'agitation admise occupant un domaine spatial, à décrire l'hydrodynamique de l'écoulement par des équations aux dérivées partielles (Equations de Navier Stokes). Le mélange est une activité locale est décrite par des termes sources, en fonction des données locales à partir des coefficients de son équation. La situation est exprimée par un ensemble d'équations du profil suivant :

- Equations hydrodynamiques avec sources.
- Conditions aux frontières et conditions initiales
- Conditions spécifiques du problème traité [2]

2.4 Méthodes numériques

La simulation numérique et les méthodes numérique des écoulements sont un moyen très exact dont le but de converger aux paramètres d'écoulement à l'échelle locale.

Ces méthodes ont été créés à cause des difficultés et l'impuissance des méthodes anciennes.

2.4.1 Méthodes de discrétisation

La discrétisation des équations de la mécanique des fluides, se base sur l'approximation, à chaque nœud de la grille, aux drivées dans le temps et dans l'espace des variables de l'écoulement, a une fonction algébrique des variables dans le nœud considère et les nœuds au voisinage.

La discrétisation se faite par une des trois méthodes suivantes :

- Méthode des différences finis.
- Méthode des éléments finis.
- Méthode des volumes finis. [4]

2.4.1.1 Méthode des différences finis

La méthode consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage. [11]

A. Avantages

Grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul.

B. Inconvénients

Limitation à des géométries simples, difficultés de prise en compte des conditions aux limites de type Neumann. [11]

2.4.1.2 Méthode des éléments finis

La méthode consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension nie, un problème écrit sous forme variationnelle (comme minimisation de l'énergie en général) dans un espace de dimension infinie. La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre ni de paramètres comme, par exemple, ses valeurs en certains points ou nœuds du maillage. [11]

A. Avantages

Traitement possible de géométries complexes, nombreux résultats théoriques sur la convergence. [11]

B. Inconvénient

Complexité de mise en œuvre et grand coût en temps de calcul et mémoire [11]

2.4.1.3 Méthode des volumes finis

A. Principe de méthode

Dans la simulation par la méthode des volumes finis, le domaine de calcul est divisé en un nombre de sous-domaines élémentaires, appelés volumes de contrôle. La méthode des volumes finis consiste à intégrer les équations aux dérivées partielles, sur chaque volume de contrôle. Chacun de ces derniers (volumes de contrôle) contenant un nœud dit : "nœud principal". Un exemple de volume de contrôle est montré dans la figure ci-dessous. Pour un nœud principal (P'), les points E et W (E: Est, W: West) sont des voisins dans la direction ξ , tandis que N et S (N: Nord, S: Sud) sont ceux dans la direction η . Le volume de contrôle entourant (P') est montré par les lignes discontinues. Les faces du volume de contrôle sont localisées aux points (e) et (w) dans la direction ξ , (n) et (s) dans la direction η . [4]

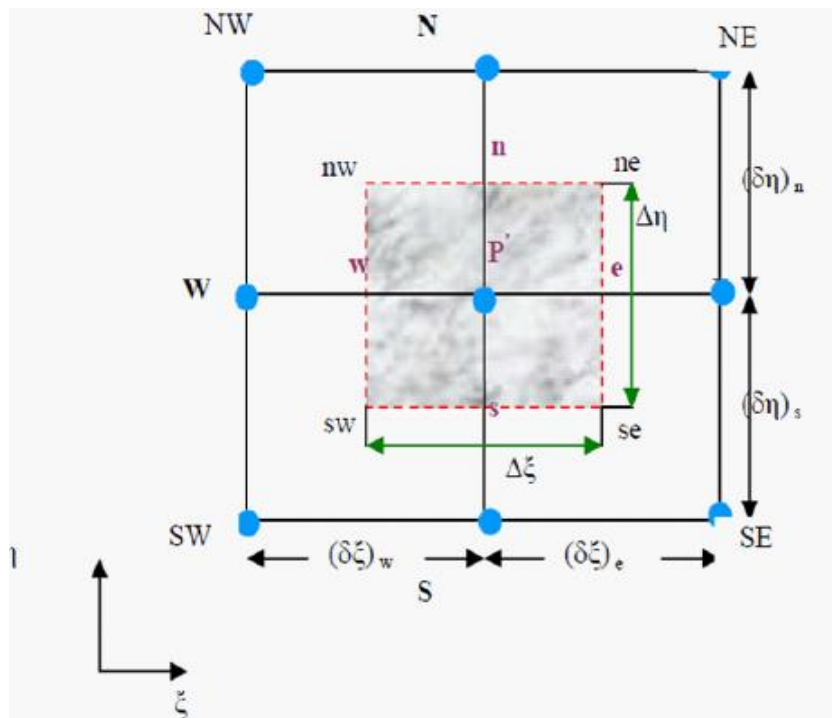


Figure 2.1 Schéma représentant volume de contrôle bidimensionnel. [4]

B. Formulation Bidimensionnelle de l'équation de Poisson par la MVF

La formulation monodimensionnelle ci-dessus de la méthode des volumes finis peut être étendue au cas bidimensionnel. La formulation bidimensionnelle consiste à subdiviser le domaine d'étude (Ω) en un nombre d'éléments finis. Chaque élément contient quatre nœuds. Un volume $.ni$ entoure chaque nœud (Figure 2.3) [4]

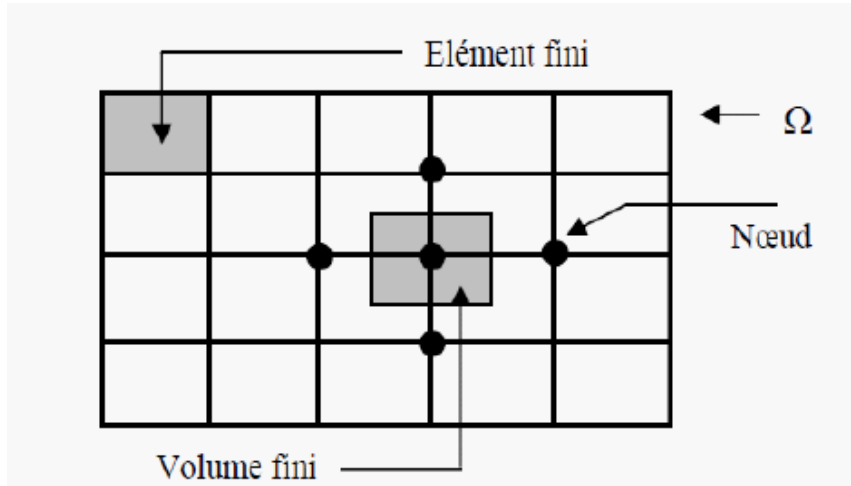


Figure 2.2 Discretisation en volumes finis du domaine d'étude dans le cas bidimensionnel. [4]

Le nœud principal "P" est entouré par quatre nœuds voisins celui du Nord "N" celui du Sud "S" (dans la direction y) et celui de l'Ouest "W" celui de l'Est "E" (dans la direction x). Les points (e : Est, w : West, n : Nord, s : Sud). [4]

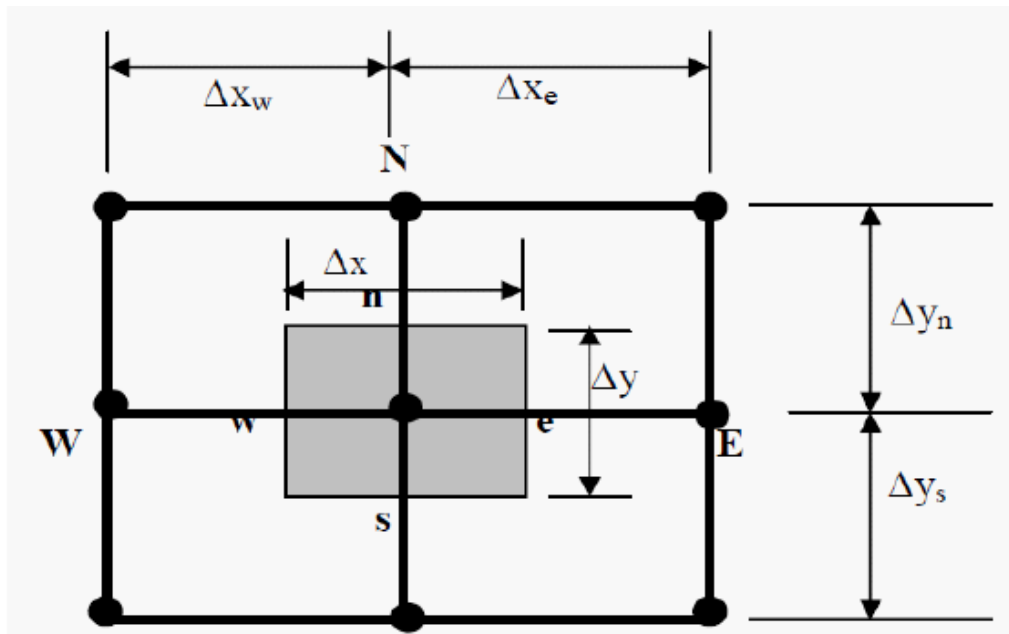


Figure 2.3 Description bidimensionnel d'un volume fini. [4]

L'équation de Poisson dans le cas bidimensionnel est :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = -\rho \tag{2.1}$$

Cette équation est projetée sur une fonction de projection égale à l'unité. Elle est ensuite intégrée sur le volume fini correspondant au nœud P, on obtient :

$$\int\int_{w\ s}^e\ \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon\ \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)dx dy + \int\int_{w\ s}^e\ \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon\ \frac{\partial\phi}{\partial y}\right)dx dy = \int\int_{w\ s}^e\ -\rho dx dy \quad (2.2)$$

L'intégration de la partie gauche de l'égalité (3-11) sur le volume fini limité par (e, w, s, n) est :

$$\int\int_{w\ s}^e\ \frac{\partial}{\partial x}\left(\varepsilon\ \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)dx dy + \int\int_{w\ s}^e\ \frac{\partial}{\partial y}\left(\varepsilon\ \frac{\partial\phi}{\partial y}\right)dx dy = \left[\left(\varepsilon\ \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_e - \left(\varepsilon\ \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_w\right]\Delta y + \left[\left(\varepsilon\ \frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_n - \left(\varepsilon\ \frac{\partial\phi}{\partial y}\right)_s\right]\Delta x \quad (2.3)$$

Un profil linéaire a été choisi pour exprimer la variation de potentiel ϕ entre les nœuds voisins. Le résultat obtenu est constitué uniquement par les valeurs nodales.

$$\left(\varepsilon\ \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_e = \varepsilon_e\ \left(\frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x_e}\right)$$

$$\left(\varepsilon\ \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_w = \varepsilon_w\ \left(\frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x_w}\right)$$

$$\left(\varepsilon\ \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_n = \varepsilon_n\ \left(\frac{\phi_N - \phi_P}{\Delta y_n}\right)$$

$$\left(\varepsilon\ \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_s = \varepsilon_s\ \left(\frac{\phi_P - \phi_S}{\Delta y_s}\right)$$

L'intégral de la partie droite de l'égalité (2.4) donne :

$$\int\int_{w\ s}^e\ \rho dx dy = \rho_P\ \Delta x\ \Delta y \quad (2.4)$$

Ainsi l'équation algébrique finale s'écrit sous la forme :

$$a_P\phi_P = a_E\phi_E + a_W\phi_W + a_S\phi_S + a_N\phi_N + S \quad (2.5)$$

Avec :

$$a_E = \varepsilon_e\ \frac{\Delta y}{\Delta x_e}$$

$$a_W = \varepsilon_w\ \frac{\Delta y}{\Delta x_w}$$

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

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

$$a_P = a_E + a_W + a_N + a_S$$

$$S = \rho_P \Delta x \Delta y$$

Le résultat obtenu représente une équation algébrique reliant l'inconnue au nœud principal "P" aux inconnues aux nœuds voisins "W", "E", "S" et "N". [4]

2.5 Maillage

Un maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu, ou aussi, une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés finis et bien définis. L'objet d'un maillage est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques. [12]

2.5.1 Choix d'un maillage

Le maillage choisi pour notre géométrie est un maillage de forme non structuré (tétraèdre / hybride), le raffinement est fait aux parois de l'agitateur pour but de détermination des gradients de vitesse. Le maillage a été réalisé avec le pré processeur gambit, le traitement de notre travail est fait à l'aide de la méthode des volumes finis.

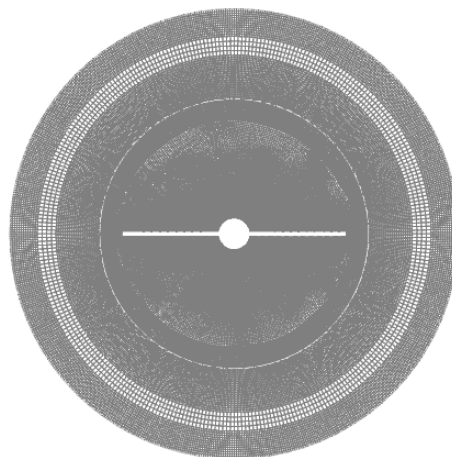


Figure 2.4 Maillage d'une section horizontale de la cuve

2.5.2 Différents types de maillage

La connectivité d'un élément (au sens de nœud, arête, cellule ...) est la liste de ses voisins.

2.5.2.1 Structuré

Est un maillage à connectivité fixe. Le maillage est alors défini par sa seule liste de nœuds.

[13]

A. Avantage

- Leur description est légère, avec un petit nombre de paramètres, il est possible de définir un maillage en entier. Dans l'exemple de la jonction en croix, seuls 3 paramètres rentrent en jeu pour le raffinement de tout le maillage.
- Leur modification est très aisée, d'une part par le peu de paramètres à modifier, et d'autre part par la possibilité d'utiliser des algorithmes de projection. Par exemple AIRBUS peut réutiliser un maillage d'A320 sur tous les autres avions de sa gamme bi-réacteurs grâce à la grande similitude dans leur forme géométrique. Cette opération peut être partiellement automatisée, ce qui procure un gros gain de temps.
- L'opérateur a le contrôle total de la qualité du maillage, contrairement aux maillages non structurés plus dépendants de l'algorithme de maillage. Il est donc plus facile de faire varier la densité du nombre de mailles selon les phénomènes physiques observés.
- Les calculs sont généralement plus rapides dans un maillage structuré que dans un maillage non structuré. [14]

B. Inconvénient

- L'expertise humaine est nécessaire. Un maillage structuré doit répondre à un cahier des charges précis. L'exemple de la jonction en T montre qu'il n'est pas facile d'obtenir un résultat satisfaisant.
- Sa mise en œuvre est difficile. [14]

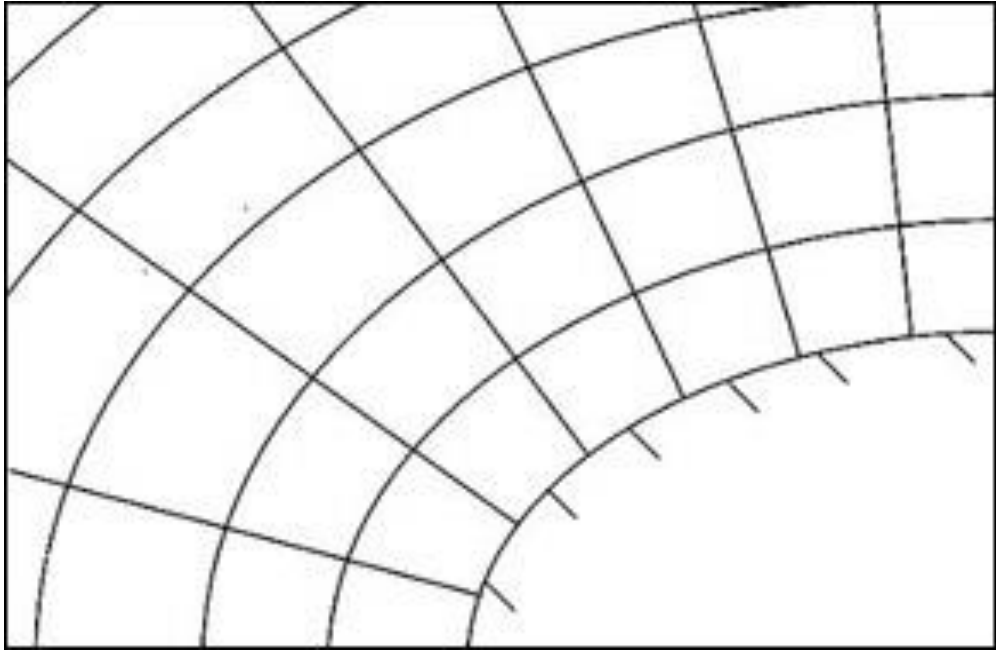


Figure 2.5 Maillage structuré [16]

2.5.2.2 Non structuré

Les maillages non structurés sont sous la forme d'une liste d'éléments interconnectés. Les formes sont souvent des triangles ou des quadrilatères en deux dimensions, et des tétraèdres, des cubes ou des hexaèdres en trois dimensions. La connectivité d'un élément est la liste de ses voisins.[15]

A. Avantage

- Leur génération est plus automatique.
- Ils sont adaptés aux formes complexes sans que l'opérateur n'aie à trop intervenir.
- Ils nécessitent moins de points par rapport aux maillages structurés [14]

B. Inconvénient

- Ils augmentent les erreurs, au moins localement.
- Le temps de calcul est en général plus long et il est plus difficile de stocker les données de calcul.
- Il est difficile de contrôler localement la densité des mailles [14].

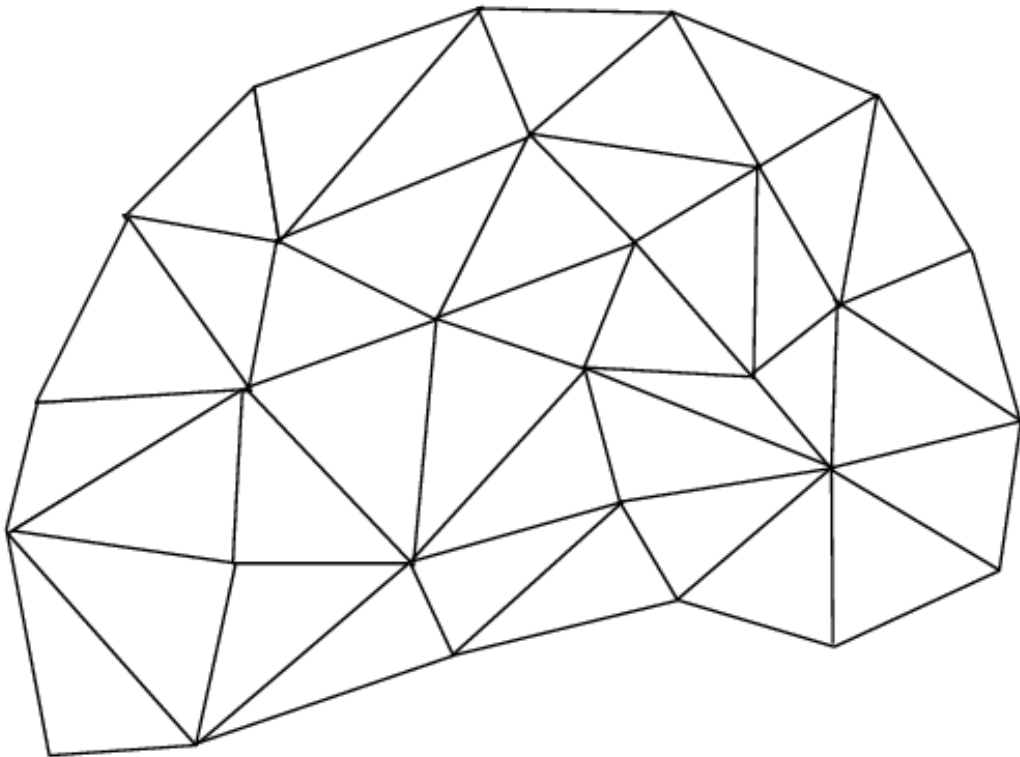


Figure 2.6 Maillage non structuré [16]

2.6 Présentation de GAMBIT et de FLUENT

La résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT nécessite la présentation de logiciel GAMBIT.

2.6.1 GAMBIT

GAMBIT est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage. Gambit est un logiciel qui permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage. Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, spatiale, ...etc.) en raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

2.6.2 FLUENT

Fluent est un programme informatique conçu pour la simulation des écoulements de fluide et du transfert de chaleur dans des géométries complexes.

Il présente une grande flexibilité des résultats et une adaptation avec n'importe quel type de maillage. Il permet le raffinement du maillage en fonction des conditions aux limites, des dimensions et même des résultats déjà obtenue. Cela est très utile dans la région à gradients importants (couches limites, couches à cisaillement libre).

Fluent écrit en langage C, il emploie toute la flexibilité et la puissance qu'offre ce langage. Il utilise l'architecture serveur client nécessaire au calcul parallèle sur plusieurs machines.

Fluent dispose d'un outil de graphisme pour l'affichage des résultats et leur exploitation. On peut aussi exporter les résultats vers un autre logiciel de graphisme, et l'option UDF permet de résoudre des équations additionnelles ou des termes sources additionnelles définies par l'utilisateur. [10]

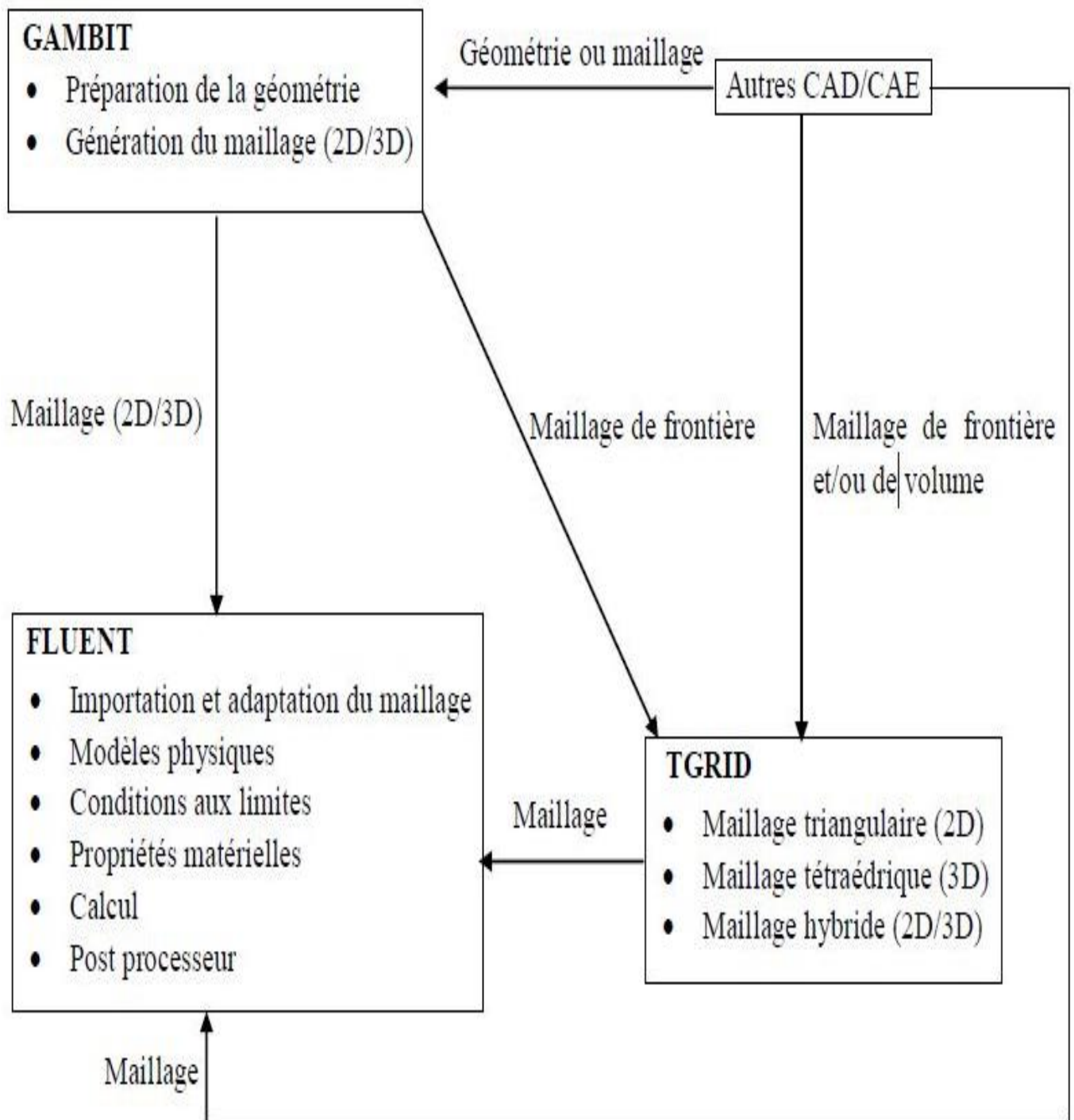


Figure 2.7 Structure de base du Code Fluent. [10]

2.7 Géométrie d'un agitateur bipale

Pour notre travail qui a pour limite une étude d'un fluide visqueux newtonien agité par un agitateur bipale de grande surface et de géométrie simple. Pour cela on utilise une cuve cylindrique à fond plat sans chicane dotée d'un agitateur à deux pales planes dont la hauteur est égale à celle du liquide dans la cuve, comme montre la **figure (2.8)** dessous.

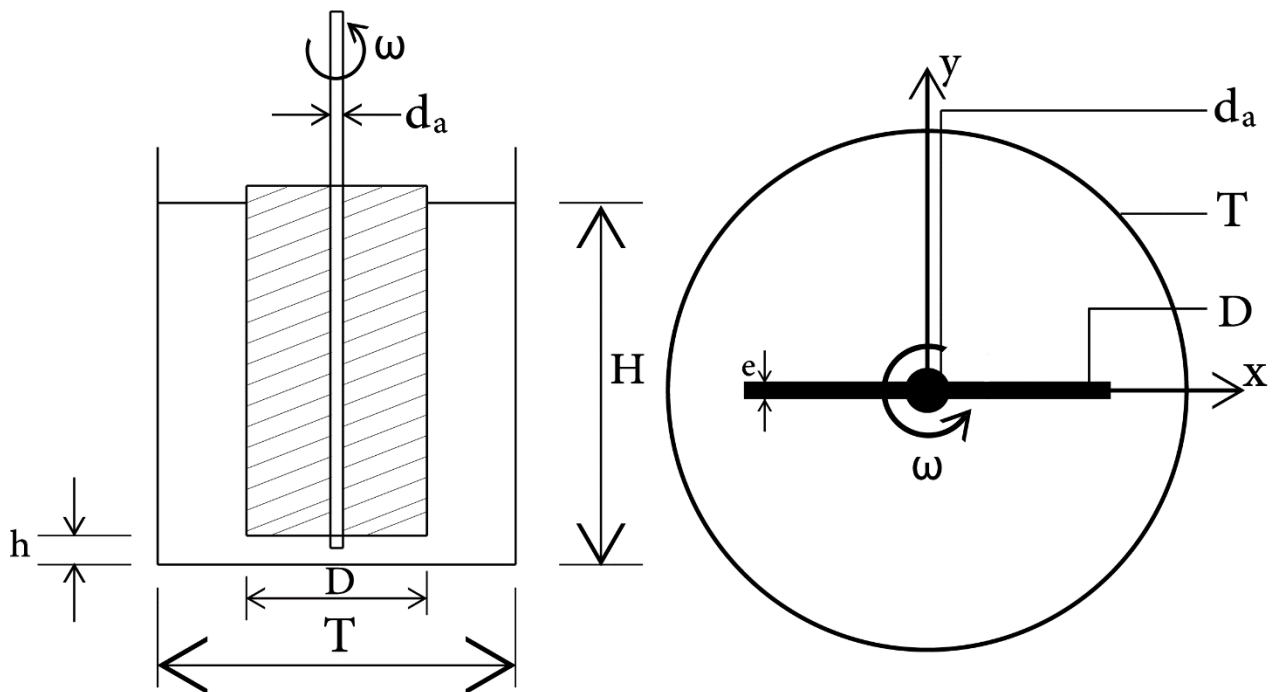


Figure 2.8 Représentation schématique de la cuve agitée.

La géométrie de notre étude consiste un nombre de pale égale à deux selon les dimensions suivantes :

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

2.8 Hypothèses du travail

Nous avons pris en considération toutes les hypothèses suivantes dans notre étude :

- Nombre de Reynolds (R_e) est inférieur à 50 pour que le régime d'écoulement demeure Laminaire, comme le confirme les travaux de Bertrand (1983) et Youcefi A (1993) .

- Le fluide est supposé visqueux newtonien et incompressible, sa viscosité apparente μ_a est constante et égale à μ .
- La hauteur h entre le fond de la cuve et le bas de l'agitateur est faible par rapport aux autres dimensions. De plus, la hauteur du liquide H est supposée être suffisamment grande pour les effets d'extrémité dus au fond de la cuve et à la surface libre soient négligeables, c'est à dire que la majeure partie de l'écoulement soit bidimensionnelle.
- Notre travail se limite à une étude hydrodynamique de la cuve agitée, on suppose donc que le système est isotherme.
- Le régime est permanent : L'agitateur génère un écoulement bien établi car les composantes de la vitesse ne varient pas au cours du temps. La solution recherchée est celle du régime permanent, car l'établissement du régime stationnaire se déroule au bout d'un court temps

2.9 Equations de mouvement

On prend en considération les hypothèses précédentes des équations de continuité et de mouvement s'écrivent :

$$\operatorname{div}(V) = 0 \quad (2.6)$$

$$\rho(V \cdot \nabla)V + \nabla P = \rho \Delta V \quad (2.7)$$

Le problème est déjà supposé bidimensionnel donc seules les composantes suivant r et θ seront présent en considération.

En termes scalaires, les équations (2.1) et (2.2) deviennent :

$$\frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} = 0 \quad (2.8)$$

$$\rho \left[u_r \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_r}{\partial \theta} - \frac{u_\theta^2}{r} \right] + \frac{\partial p}{\partial r} = \eta \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_r) \right) + \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_r}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) \right] \quad (2.9)$$

$$\rho \left[u_\theta \frac{\partial u_\theta}{\partial r} + \frac{u_\theta}{r} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} - \frac{u_r u_\theta}{r} \right] + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} = \eta \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r u_\theta) \right) + \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial u_\theta}{\partial \theta} \right) \right] \quad (2.10)$$

2.10 Adimensionnalisation du système

Les équations sont adimensionnelles avec :

- Le rayon de la cuve $T/2$ comme longueur caractéristique.

- πNT Vitesse caractéristique de l'écoulement.
- $\rho(\pi NT)^2$ Pression caractéristique.

Posons :

$$P^* = \frac{P}{\rho(\pi NT)^2} \tag{2.11}$$

$$\bar{v}^* = \frac{\bar{v}}{\pi NT} \tag{2.12}$$

$$\bar{r}^* = \frac{2\bar{r}}{T} \tag{2.13}$$

$$R_e = \frac{\rho ND^2}{\mu} \tag{2.14}$$

2.11 Domaine du calcul

La détermination des différents paramètres se fait au niveau des parois (la position radiale et tangentielle) comme il est montré au-dessous.

Tableau 2.1 Domaine de calcul

EMPLACEMENT	Position radiale	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	$r = \frac{T}{2}$	$0 < \theta < \pi$

2.12 Conditions aux frontières

Les frontières sont constituées par l'axe, les pales et la cuve. Sur toutes les parois les conditions suivantes sont appliquées :

- La composante radiale du vecteur vitesse V_r est nulle sur toutes les parois
- La composante tangentielle du vecteur vitesse V_θ est nulle sur toutes les parois sauf sur la paroi extérieure (diamètre de la cuve) où elle prend la valeur -1 puisque le repère de travail est le repère tournant lié à l'agitateur.

3. Résultats et Discussion

3.1 Introduction

Ce chapitre contient les résultats numériques de notre étude à propos de l'agitateur mécanique bipale comme représenté Figure 2.8, la géométrie consiste à deux pales planes verticales fixées sur un arbre central rotatif de dimension $d_a/T = 0.07$ dont la hauteur est égale à celle du liquide dans la cuve.

Le code de calcul utilisé dans notre travail (ANSYS Fluent 20 R1) sert à obtenir des résultats exacts et précis. Nous exposons dans la suite ceux qui nous semblent les plus dominants. La majorité des résultats détaillés de l'hydrodynamique correspondant à un rapport de diamètre $\frac{D}{T} = 0.5$.

Notre travail à l'objectif d'étudier l'influence de nombre de Reynolds sur la nature des écoulements, l'intervalle de variation de ce paramètre est de 0.1 à 40, à la fin nous avons comparé nos résultats obtenus avec les résultats expérimentaux (YOUCEFI 1993) et numérique (BOUZOUINI 2004).

3.2 Validation de résultats obtenus

Nos résultats obtenus ont la même forme d'allure avec les résultats expérimental de (YOUCEFI 1993) et numérique (BOUZOUINI 2004) comme montrent les figures (3.1 à 3.6).

La vitesse tangentielle augmente jusqu'à sa valeur maximale 0.5 puis elle diminue jusqu'à 0 avec l'accroissement de r .

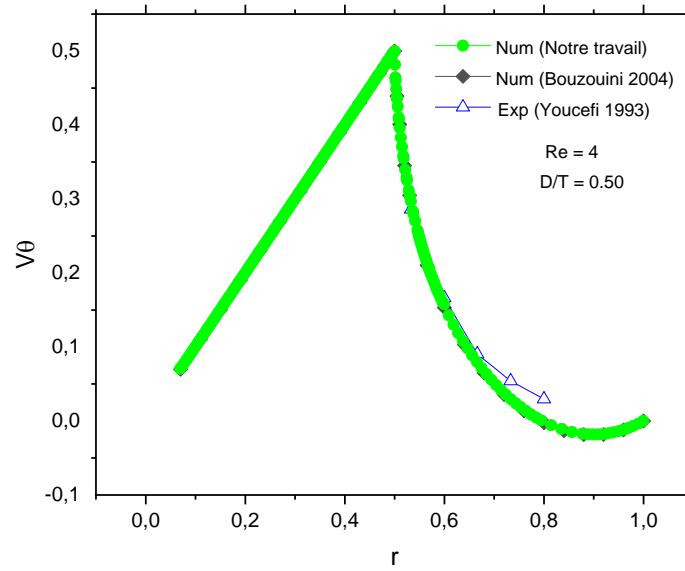


Figure 3.1 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ sur la pale de l'agitateur.

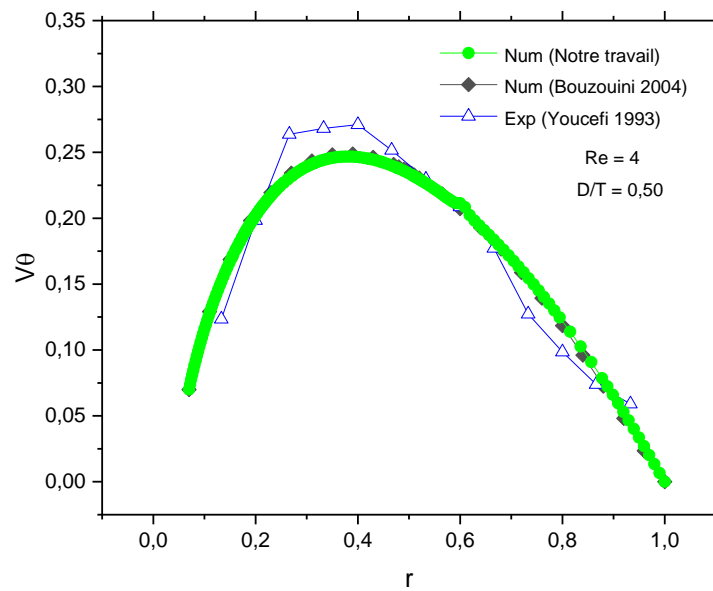


Figure 3.2 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ sur la médiatrice de l'agitateur.

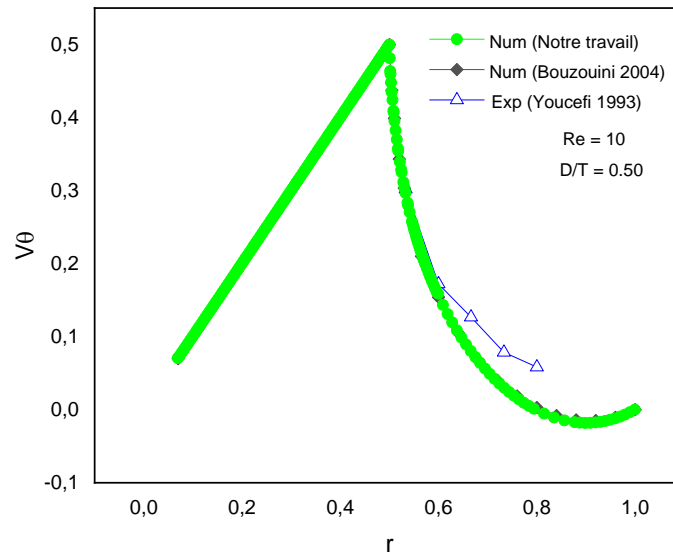


Figure 3.3 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ sur la pale de l'agitateur.

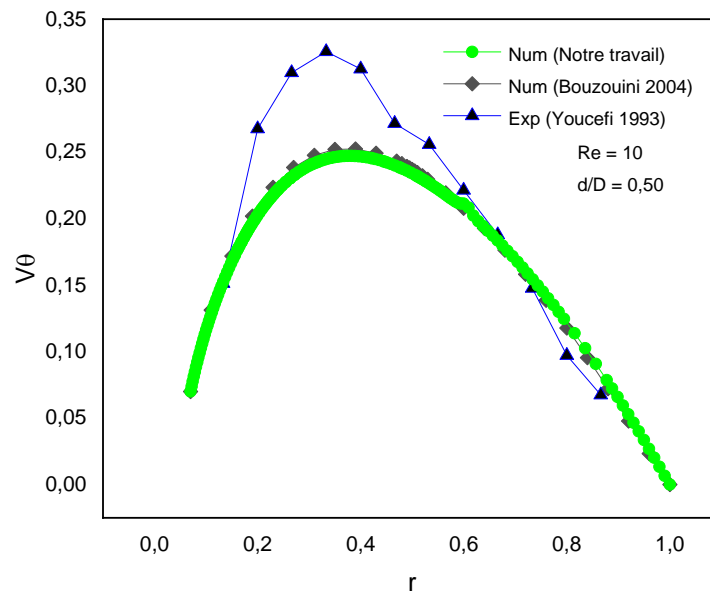


Figure 3.4 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ sur la médiatrice de l'agitateur.

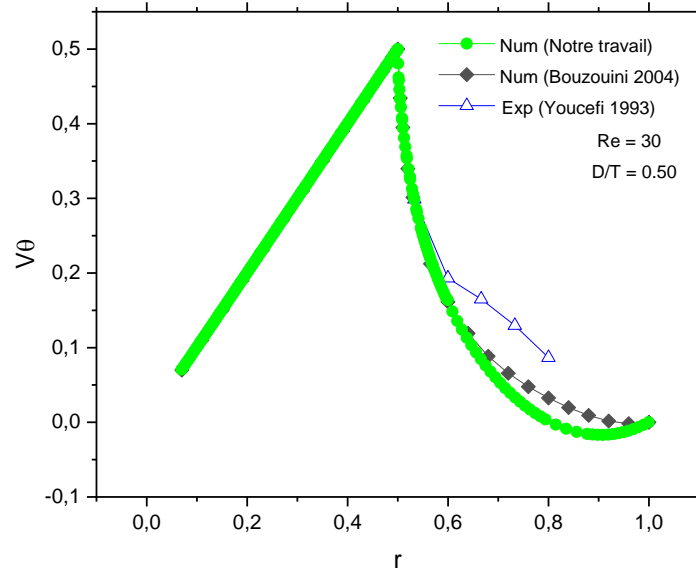


Figure 3.1 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ sur la pale de l'agitateur.

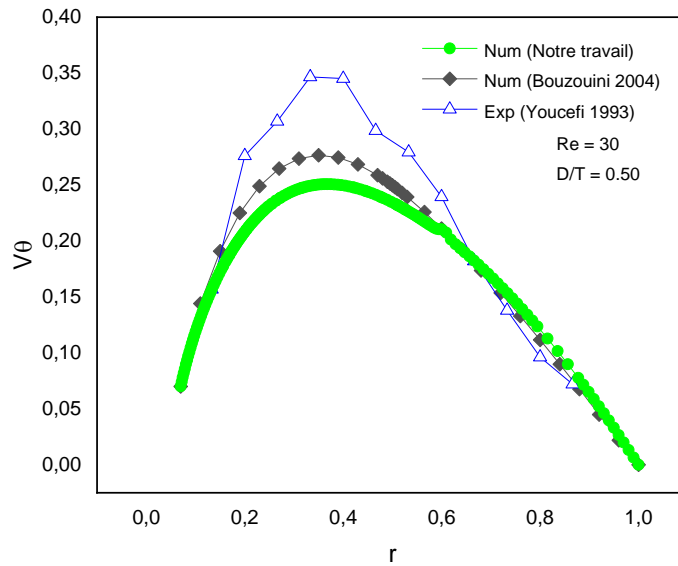


Figure 3.6 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ sur la médiatrice de l'agitateur.

3.3 Contours des vitesses

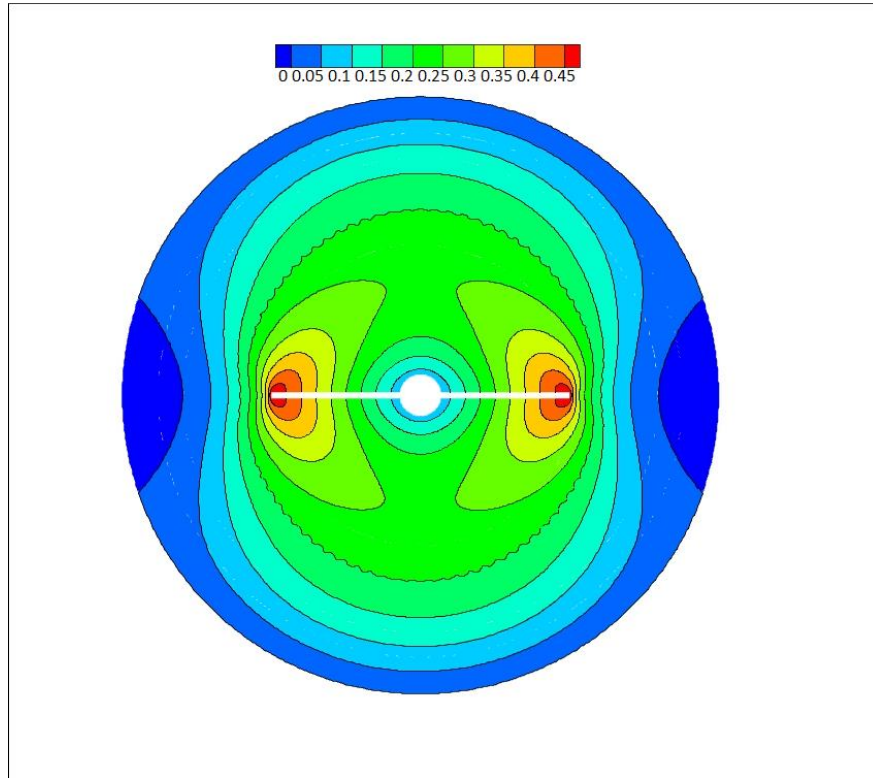


Figure 3.7 Contour de vitesse tangentielle à $Re = 1$

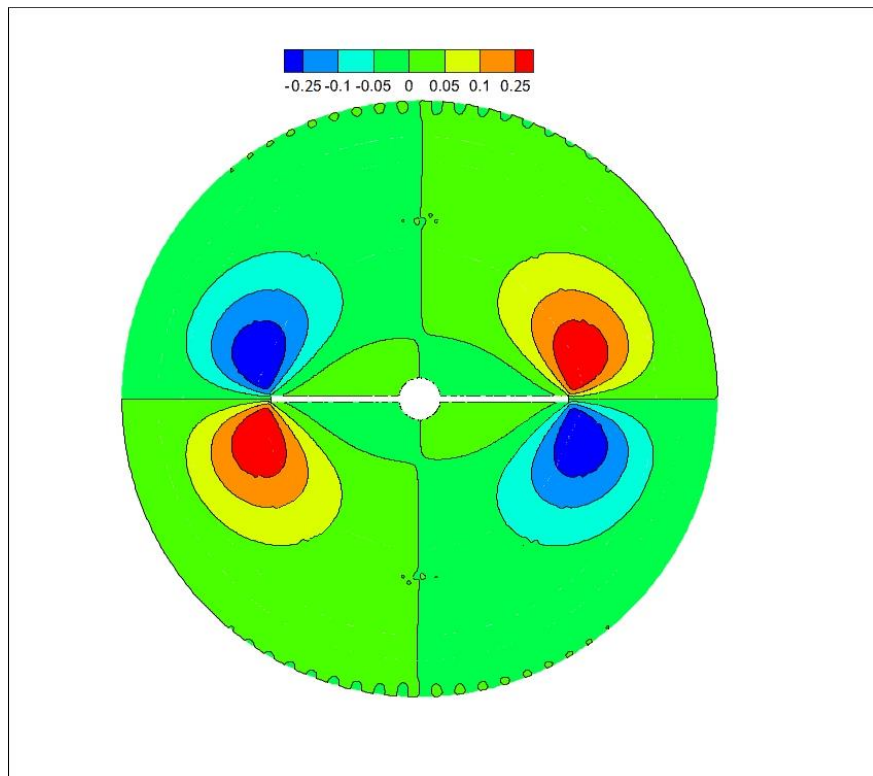


Figure 3.8 Contour de vitesse radial à $Re = 1$

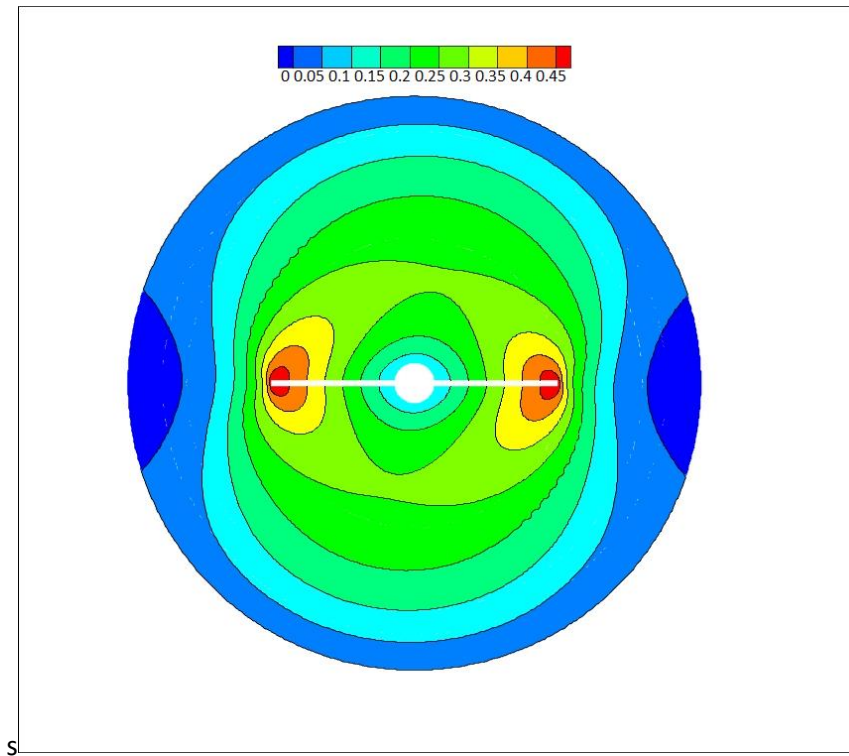


Figure 3.9 Contour de vitesse tangentielle à $Re = 40$

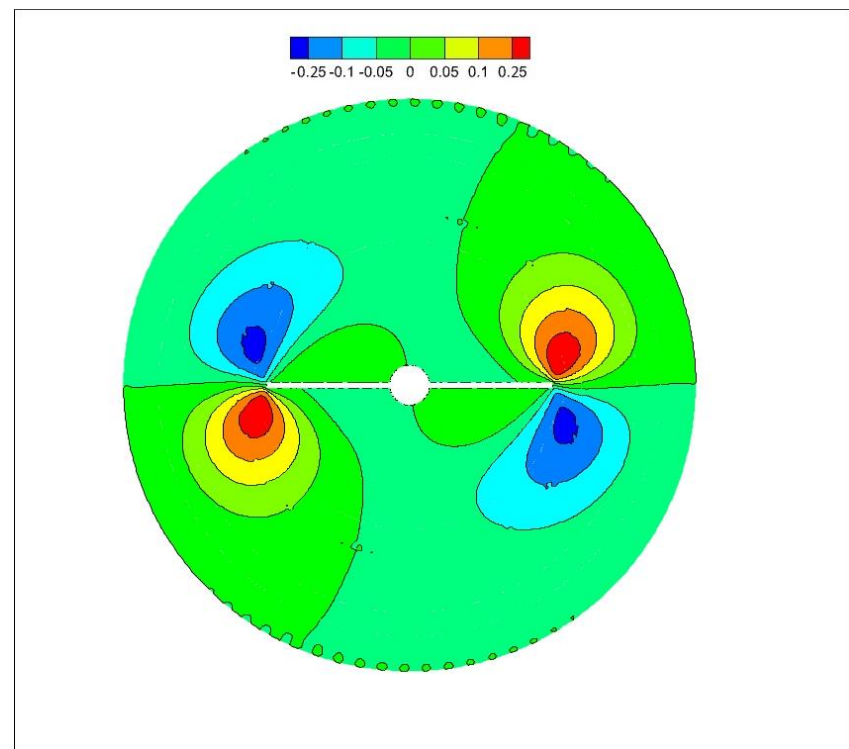


Figure 3.10 Contour de vitesse radiale à $Re = 40$

3.4 Composantes de la vitesse

Les figures 3.11 à 3.14 montrent la variation de la vitesse tangentielle la vitesse radiale sur la pale et la médiatrice en fonction de la position radiale. Nous avons varié le nombre de Reynold des écoulements, on a établi que la vitesse radiale V_r est presque nulle dans tous les points de la cuve.

Quel que soit la valeur de nombre de Reynold (0.1 à 40) la vitesse radiale est confiné entre 0.032 à 0.5 les deux figures 3.11 et 3.13 représenté l'évolution de la vitesse radiale sur la pale et la médiatrice c'est-à-dire l'écoulement sur le bipale généralement un écoulement tangential.

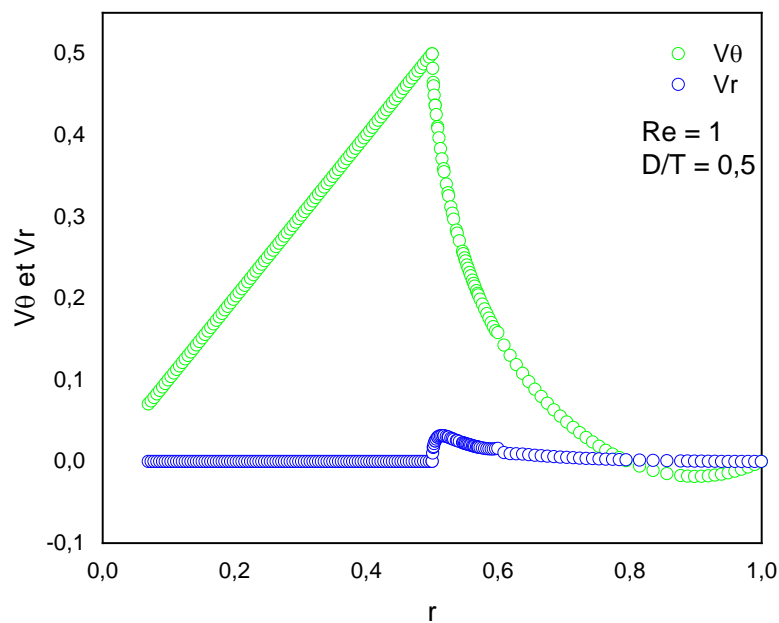


Figure 3.11 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ et la vitesse radiale V_r sur la pale à $Re = 1$.

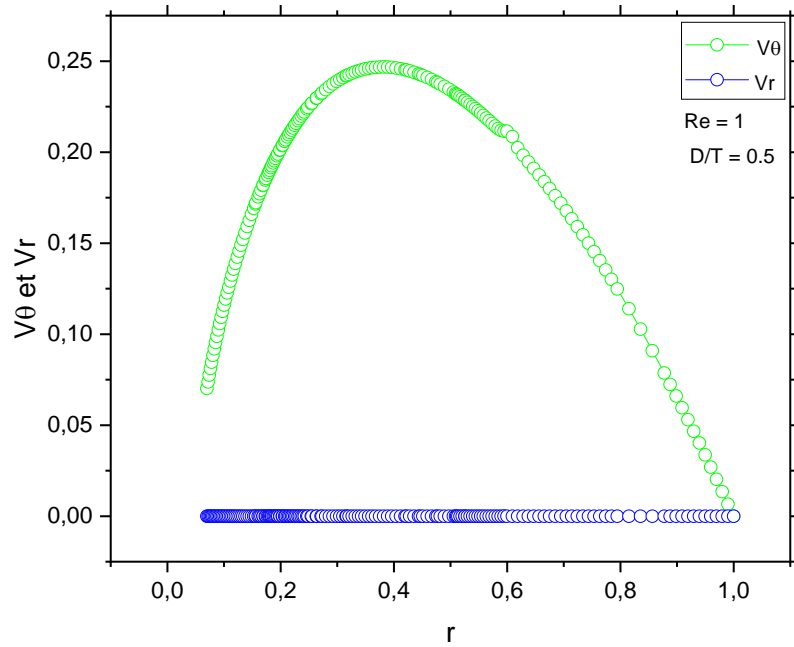


Figure 3.12 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ et la vitesse radiale V_r sur la médiatrice de l'agitateur à $Re = 1$.

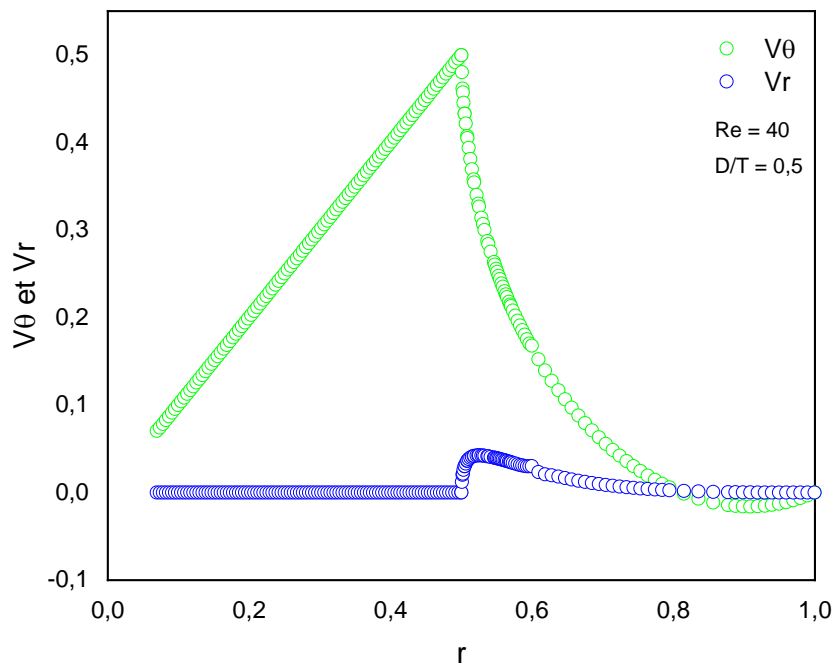


Figure 3.13 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ et la vitesse radiale V_r sur la pale à $Re = 40$.

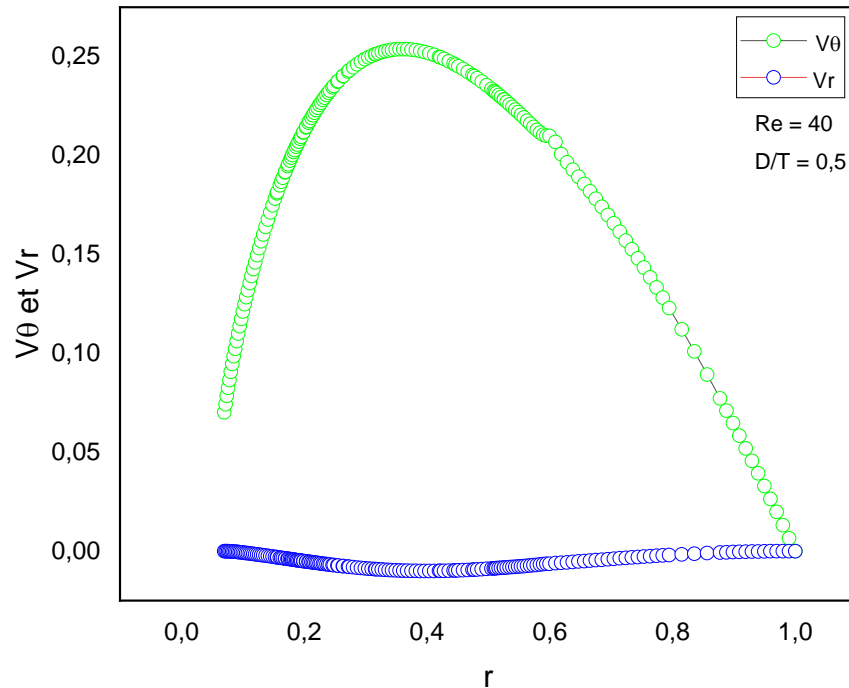


Figure 3.14 Evolution de la vitesse tangentielle V_θ et la vitesse radiale V_r sur la médiatrice de l'agitateur à $Re = 40$.

3.5 Influence du Re sur la vitesse tangentielle V_θ

Les deux figures (3.15 et 3.16) au-dessous montre l'influence du nombre de Reynolds sur la vitesse tangentielle V_θ de l'écoulement au niveau de la pale près de la paroi en observe des vitesses négatives confinées entre $r = 0.8$ et $r = 1$ ça signifie l'existence d'un tourbillon à la proximité de la paroi. Pour toutes les valeurs de nombre du Reynolds en bout de pale $r = 0.5$ la vitesse est égale à celle de l'agitateur $V_\theta = 0.5$, elle décroît de façon uniforme jusqu'à 0 sur la paroi, cette décroissance devient moins importante au fur et à mesure que Re augmente.

La croissance des vitesses tangentielle près de l'axe au niveau de la médiatrice est plus vite que celles au niveau de la pale pour atteindre sa valeur maximale

Cette valeur maximale de vitesse décroît envers la paroi de la cuve, l'inclinaison de cette décroissance est faible que celle de la partie croissante de la courbe

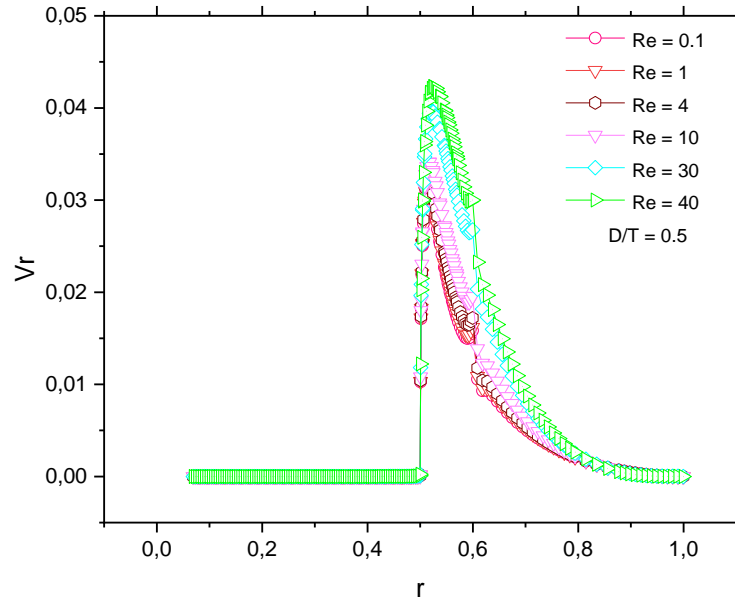


Figure 3.15 Influence du R_e évolution de la vitesse radiale V_r sur la pale de l'agitateur.

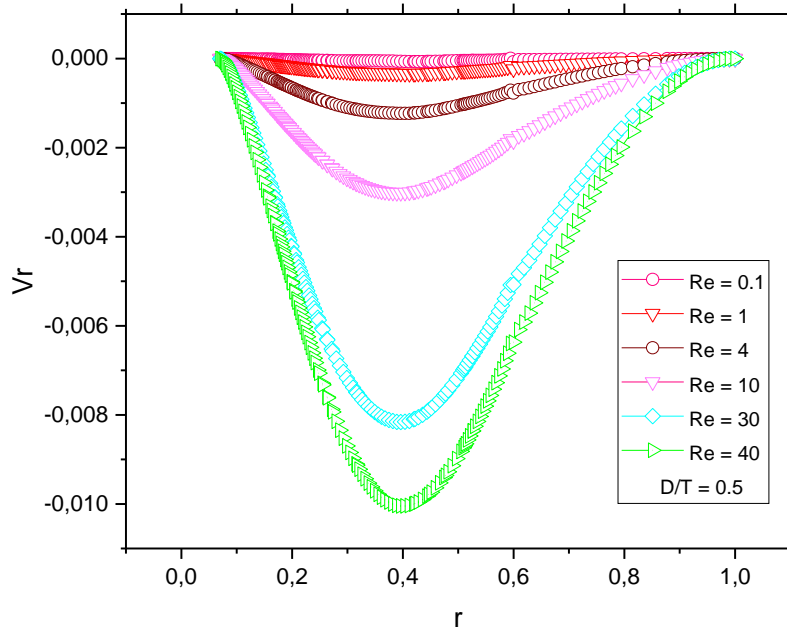


Figure 3.16 Influence du R_e évolution de la vitesse radiale V_r sur la médiatrice de l'agitateur.

3.6 Différente position angulaire des rayons

Après avoir déterminé les vitesses tangentielles dans les deux quarts dans notre géométrie (premier quart de $\theta = 0$ à $\theta = 90^\circ$; deuxième quart de $\theta = 90^\circ$ à $\theta = 180^\circ$) les vitesses sont égales, ça signifie qu'il suffit de les déterminer dans le premier quart et les déduire par symétrie dans les autres quarts voir (figure 3.18).

Tableau 3.1 : Position angulaire des rayons R1 à R8

/	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
θ	0	15	30	45	135	150	165	180

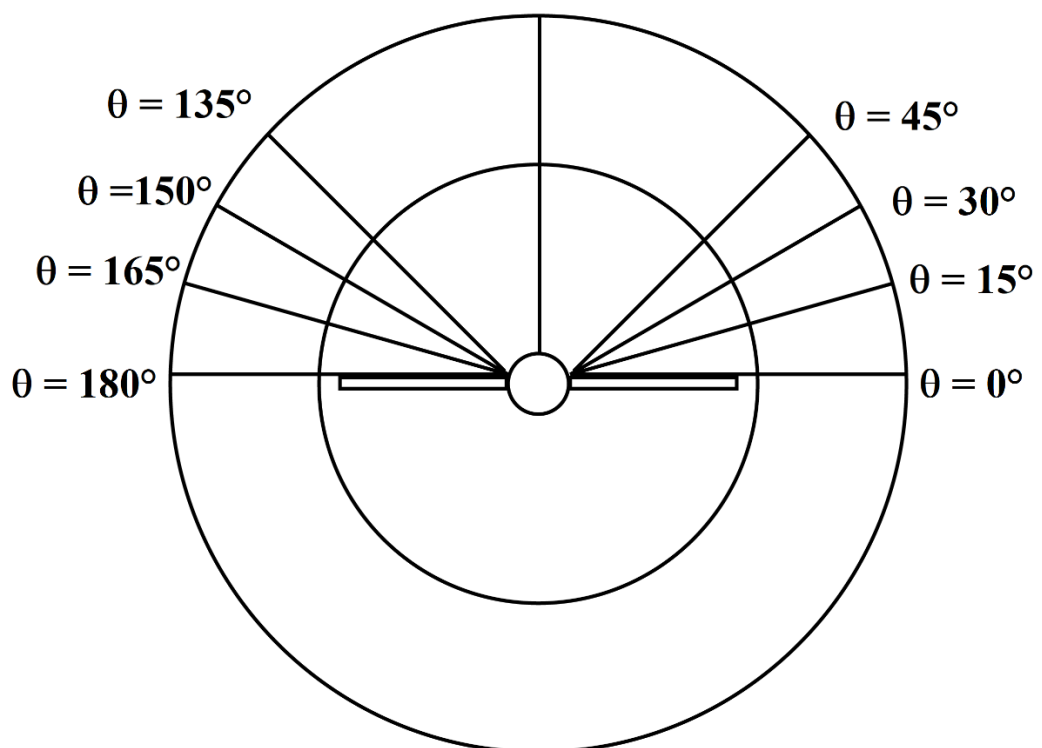


Figure 3.17 Représentation des rayons R1 à R8

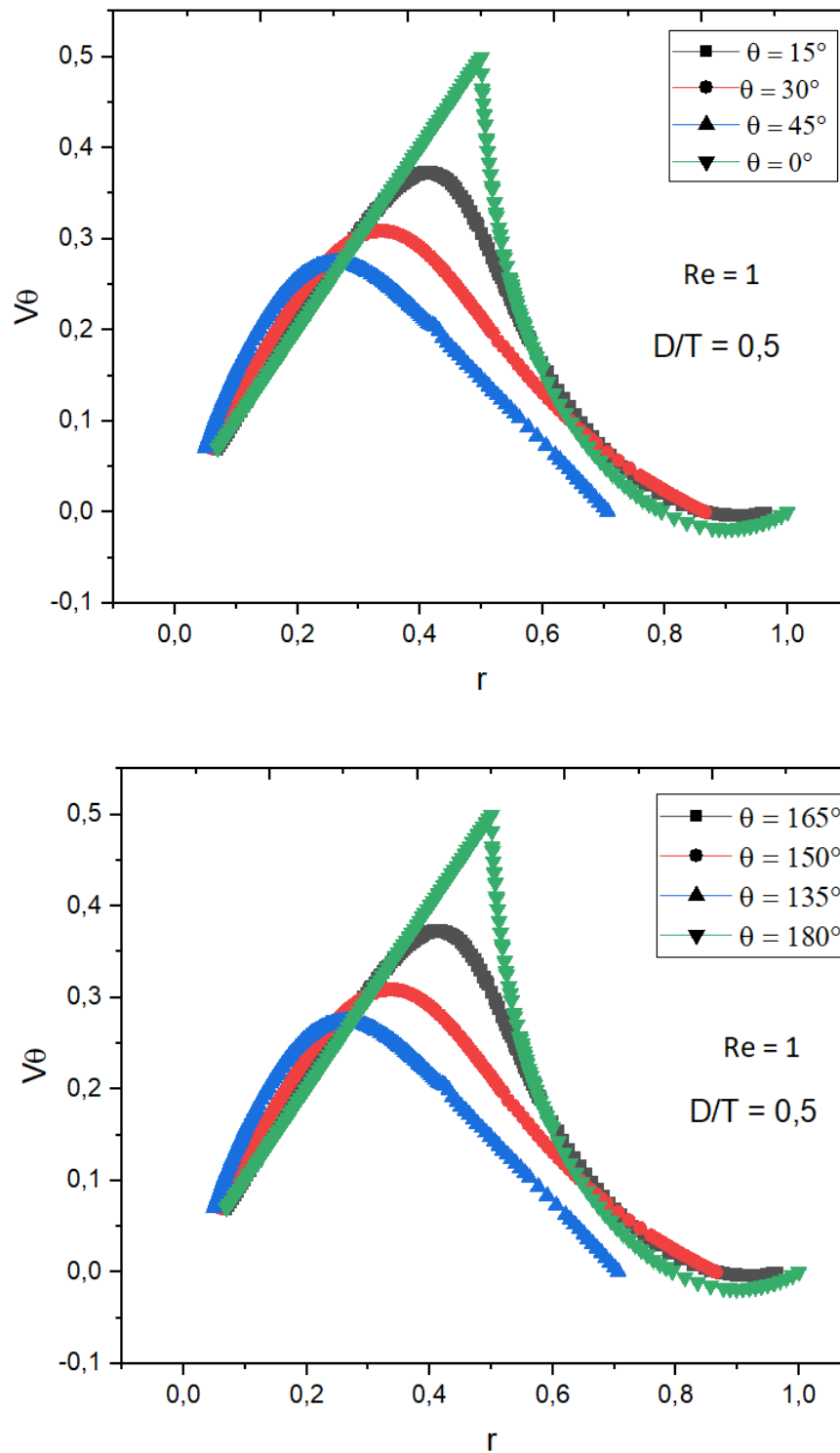


Figure 3.18 Évolution de la vitesse tangentielle V_θ sur différents rayons

Conclusion générale

L'objectif de notre travail est d'analyser l'influence de nombre de Reynolds sur le comportement hydrodynamique d'une opération d'agitation mécanique en cuve agitée d'un fluide visqueux newtonien dans un régime laminaire, nous avons utilisé le code de calcul (ANSYS Fluent 20 R1) pour la résolution des équations gouvernant l'écoulement par la méthode des volumes finis.

Tout d'abord, nous voulons faire valider les résultats numériques que nous avons obtenus avec les résultats expérimentaux de (YOUCEFLA 1993) et aussi avec les résultats numériques de (BOUZOUINI.M 2004) qui ont déjà fait la même étude.

Après avoir simulé, il semble que les écoulements générés par le bipale sont des écoulements plans, cela confirme l'hypothèse généralement admise de la bidimensionnalité de ces écoulements. L'écoulement dominant est tangentiel car les composantes de la vitesse radiale sont négligeables par rapport les composantes de la vitesse tangentielle, la variation de nombre de Reynolds influe d'une manière imperceptible sur la vitesse tangentielle.

Les valeurs de la vitesse tangentielle au niveau de la pale sont croissantes en partant de l'axe de l'agitateur vers l'extrémité de la pale, sur le bout de la pale la vitesse prend une valeur maximale, puis elle diminue jusqu'à ce qu'elle devienne nulle dans l'espace confiné entre la fin de la pale et la paroi de la cuve. Après avoir déterminer les vitesses tangentielles dans les deux quarts dans notre géométrie où ils sont égaux, il suffit de faire l'étude dans un seul quart et déduire les résultats symétriquement dans les autres positions angulaires θ .

[1] Kamla Youcef.

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.

[2] Rebiai Moussa.

Prédiction numérique des caractéristiques hydrodynamique d'un agitateur à pales cylindriques. Thèse de Magister en génie mécanique conversion de l'énergie. Université Mohamed Boudiaf d'Oran 2013.

[3] Michel ROUSTAN et Jean-Claude PHARAMOND, Alain LINE.

Opérations unitaires agitation et mélange www.techniques-ingenieur.fr Réf. Internet : 42486 | 2nde édition

[4] Ameer houari.

Simulation des fluides visqueux dans une cuve agitée par des mobiles à pales, à disques hélicoïdaux et maxblend. Thèse de Doctorat en génie mécanique. Université Mohamed Boudiaf d'Oran, 2011.

[5] CHERKI Ibrahim.

Simulation des fluides non Newtoniens dans une cuve agitée par une turbine à pales radiales et inclinées. Thèse de Magister en génie mécanique rhéologie des fluides complexes. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2014.

[6] Bouzouini Mohammed.

Agitation mécanique des fluides visqueux newtoniens dans une cuve agitée par un agitateur à pale (approche numérique), en génie mécanique énergétique. Université Mohamed Boudiaf d'Oran 2004.

[7] Elmir Mohammed.

Etude de l'influence du comportement rhéologique sur l'agitation d'un fluide pseudo plastique par un agitateur bipale. Thèse de magister Physique énergétique. Centre universitaire de Béchar, 2000.

[8] Le Long André.

Etude des cuves agitées hydrodynamique et transfert à la paroi. Thèse de Doctorat. France 1975.

[9] David Frederick FLETCHER et Catherine XUEREB

Transfert de matière en génie des procédés www.techniques-ingenieur.fr Réf. Internet : 42326

[10] Mohamed CHAOUR

Interaction des structures tourbillonnaires avec la couche limite dans une cavité différentiellement chauffée. Thèse de magister mécanique énergétique. Université Mentouri Constantine 2010.

[11] Eric Goncalvès

Résolution numérique, discrétisation des edp et edo institut national polytechnique de Grenoble 2005

[12] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Maillage>

[13] <http://hmf.enseiht.fr/travaux/projnum/content/g17-2012/avantages-des-differents-types-de-maillages>

[14] **Annabelle collin et Cécile dobrzynski**

Maillage pour les calculs scientifique. Bordeaux INP enseirb matmeca

[15] https://www.memoireonline.com/05/12/5815/m_Calcul-des-performances-aerodynamiques-de-la-configuration-aile-fuselage-Ara-M100-par-maillage-hybr19.html#:~:text=Les%20maillages%20non%20structur%C3%A9s%20sont,la%20liste%20de%20ses%20voisins