

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 D'ETUDE MASTER**

**Domaine :** Sciences et Technologie

**Filière :** Génie Mécanique

**Parcours :** Master

**Spécialité :** Énergétique

**Thème**

**Effet de la géométrie d'un agitateur bipale sur  
l'hydrodynamique d'un écoulement**

Préparé par :

Bridj Abdelwaheb et Adda El Hacene Benali .

Soutenu publiquement le : 20 / 06 / 2023, Devant le jury composé de :

M. KHALDI Sabrina	Maître Assistante « A » (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M. MEKROUSSI Said	Professeur (Univ. Ibn Khaldoun)	Examinateur
M. BELMILOUD Mohamed Amine	Maître de Conférence "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examinateur
M. BOUZOUINI Mohammed	Maître Assistant "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant
M. ABOSHIGHIBA Hicham	Maître de Conférences "B" (Univ. Ibn Khaldoun)	Co-Encadrant

Année universitaire : 2022 - 2023



## Remerciement

Nous tenons tout d'abord à remercier **Mr BOUZOUINI Mohammed** notre encadreur, pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant la préparation de ce mémoire. Il nous a guidé et aidé dans notre travail pour trouver des solutions et ainsi continuer à avancer.

En deuxième lieu nous adressons nos remerciements à **Mr AboShighiba Hicham** pour sa contribution, et sa disponibilité le long de la réalisation de notre travail.

Nous adressons aussi nos vifs remerciements aux membres de jury ; la présidente **Mme Khaldi Sabrina** et le premier examinateur **Mr MAKROUSSI Said** pour avoir accepté d'examiner et juger ce travail. Un remerciement special va à **Mr.Belmiloud Mohamed Amine** le deuxième examinateur, qui n'a pas hésité à nous donner ses conseils depuis le début de ce projet de fin d'étude .

Nous remercions aussi tous nos aimables enseignants du département de génie mécanique pour leurs dévouements et leurs soutiens.



## Dédicace

*Je dédie ce mémoire réalisé après beaucoup d'efforts, de volonté et de patience,*

*À mon père*

*À ma mère*

*A mes frères et ma sœur.*

*Je le dédie aussi à tous mes amis*

*À toute personne ayant participé de loin ou de près et m'encourager pour la réussite de ce mémoire.*

Bridj Abdelwaheb



## Dédicace

**J**e dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents pour leur soutien et leur

Encouragement durant toute ma carrière d'étude

Toute ma grande famille,

Mes meilleurs amis,

**Adda El Hacene Benali**

# SOMMAIRE

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

## Chapitre I : Généralité sur l'agitation mécanique

I.1. Introduction .....	3
I.2 Historique du mélange .....	3
I.3 Définition de mélange .....	4
I.4 Opérations de mélange .....	4
I.5 Mécanisme d'Agitation .....	4
I.5.1 Définition de l'agitation mécanique .....	4
I.5.2 Les mécanismes d'agitation .....	5
I.5.2.1 Agitateurs rotatifs .....	5
I.5.2.2 Agitateurs statiques .....	6
I.5.2.3 Agitateurs ultra-sons .....	7
I.5.2.4 Agitateurs à jets .....	8
I.5.2.5 Agitateur à cuve mobile .....	8
I.6 Domaine d'application de l'agitation mécanique .....	9
I.7 Caractéristiques hydrodynamiques d'un appareil d'agitation .....	9
I.8 Types d'écoulements .....	9
I.8.1 L'écoulement axial .....	10
I.8.2 L'écoulement radial .....	10
I.8.3 L'écoulement tangentiel .....	10
I.9 Mécanisme de mélange des fluides .....	12

# SOMMAIRE

I.10 Cuves mécaniquement agitées .....	13
I.10.1 Chicane .....	13
I.10.2 Cuve .....	14
I.11 Agitateurs mécanique .....	15
I.11.1 Agitateurs de fluides peu visqueux .....	15
I.11.2 Agitateurs à hélice .....	15
I.11.3 Agitateurs Turbines .....	16
I.12 Agitateurs de fluides très visqueux .....	18
I.12.1 Agitateurs à écoulement axial .....	18
I.12.2 Agitateurs a écoulement tangentiel .....	18
I.12.2.1. Agitateur bipale .....	19
I.12.2.2 Agitateur ancre .....	19
I.12.2.3. Agitateurs barrières .....	20
I.13 Choix d'un agitateur mécanique .....	20
I.14 Etat de l'art.....	22

## **Chapitre II : Formulation mathématique et présentation des Systèmes simulés**

II.1. Introduction .....	27
II.1 Utilité et attendus de la CFD en ingénierie .....	27
II.2 Démarche de la CFD .....	28
II.3 Méthodes de discrétisation .....	29
II.3.1 Méthode des différences finis .....	30
II.3.2 La méthode des éléments finis .....	30
II.3.3 Méthode des volumes finis .....	30
II.3.3.1 Principe de méthode .....	30
II.4 Formulation bidimensionnelle par la MVF .....	31
II.5 Méthode de simulation de l'agitateur .....	34

# SOMMAIRE

II.6 Présentation des logiciel utilisé .....	35
II.6.1 Design Modeler .....	35
II. 6.1.1 Géométrie du système d'agitation .....	35
II.6.2 Présentation de d'ANSYS Mesher .....	37
II.6.2.1 Maillage .....	38
II.6.2.2 Déférents types de maillage.....	38
II.6.2.3 Etude de maillage .....	39
II. 7 Présentation du code de calcul Fluent .....	39
II.7.1 Les conditions aux limites .....	40
II. 8 Hypothèses du problème .....	40
II.9 Adimensionnalisation du système .....	41
II. 10 Conditions aux limites.....	41
II. 11 Conclusion .....	42

## Chapitre III : Résultat et discussion

III.1 Introduction .....	43
III.2 Validation de résultats obtenus.....	43
III.3 Composantes de la vitesse .....	45
III.4 Influence du Re sur différentes vitesse tangentielle V .....	48
III.5 Différente position angulaire des rayons .....	50
III.6 Influence de géométrie sur différentes vitesse tangentielle $V_{\theta}$ :.....	52
III.7 Contours des vitesses .....	54
III. 8 Conclusion .....	55
Conclusion Générale .....	56
Références bibliographiques.....	57
Résumé .....	60

Figure I.1 Un agitateur magnétique .....	7
Figure I.2 champ de vitesse crée par un agitateur magnétique .....	7
Figure I.3 Mélangeur statique pour fluide visqueux ou pâteux .....	8
Figure I.4. Principe du mélangeur Statique (SMX) .....	8
Figure I.5. Appareils ultra-sons .....	8
Figure I.6 Principe d'un mélangeur par jet dans une cuve de stockage .....	9
Figure I.7 Agitateur à cuve mobile en « V » ; (a) axe de rotation dans le plan des cuves ; (b) axe de rotation perpendiculaire au plan des cuves .....	10
Figure I.8 emplacement des chicanes dans la cuve .....	15
Figure I.9 Cuves agitée : a) cuve cylindrique à fond plat, b) cuve cylindrique à fond rond, c) cuve sphérique .....	15
Figure I.10 a) Les hélices : b) Hélice marine, c) écoulement généré par un hélice marine ....	17
Figure I.11 a) Turbine de Rushton, b) Ecoulement généré par une turbine de Rushton .....	18
Figure I.12 Agitateurs de type Turbine : a) turbine à 6 pales plates, b) turbine à 8 pales incurvées, c) turbine à 6 pales plates montées sur un disque, d) turbine à pales courbées montées sur un disque. ....	18
Figure I.13 a) Agitateur type ruban hélicoïdal, b) type double ruban a pas inverse, c) Agitateur à vis sans fin .....	19
Figure I.14 bipale classique .....	20
Figure I.15 Agitateurs à Ancre .....	20
Figure I.16 Agitateur barrière.....	21
Figure I.17 Présentation schématique des types d'écoulements : a) axial, b) radial, c) tangentiel tirée de la référence .....	21
Figure 1.18 rheogramme de quelques catégories de fluides .....	22
Figure II.1 Schéma représentant volume de contrôle bidimensionnel .....	28
Figure II.2 Discrétisation en volumes finis du domaine d'étude dans le cas bidimensionnel	29
Figure II.3 Description bidimensionnel d'un volume fini .....	29
Figure II.4 la géométrie de l'agitateur bipale .....	32
Figure II.5 Représentation schématique de la cuve agitée .....	33
Figure II.6 a) Maillage structuré (gauche), b) maillage non structuré (centre) .....	35
Figure II.7 Maillage d'une section horizontale de la cuve .....	36



Figure II.8 Structure de base du code "FLUENT" .....	36
Figure III.1 Évolution de la vitesse tangentielle sur la pale de l'agitateur et son prolongement (Re=1, $\Theta=0$ ) .....	44
Figure III.2 Évolution de la vitesse tangentielle sur la médiatrice de l'agitateur (Re=1, $\Theta=90$ ).....	44
Figure III.3 Evolution de la vitesse tangentielle $V_{\theta}$ et la vitesse radiale $V_r$ sur la médiatrice de l'agitateur à Re = 0.1 D/T= 0.66. 41	
Figure III.4 Evolution de la vitesse tangentielle $V_{\theta}$ et la vitesse radiale $V_r$ sur la médiatrice de l'agitateur à Re = 1 D/T= 0.66. ....	45
Figure III.5 Evolution de la vitesse tangentielle $V_{\theta}$ et la vitesse radiale $V_r$ sur la médiatrice de l'agitateur à Re = 10 D/T= 0.66. ....	45
Figure III.6 Evolution de la vitesse tangentielle $V_{\theta}$ et la vitesse radiale $V_r$ sur la pale à Re = 0.1 D/T=0.66 .....	46
Figure III.7 Evolution de la vitesse tangentielle $V_{\theta}$ et la vitesse radiale $V_r$ sur la pale à Re =1 D/T=0.66 .....	46
Figure III.8 Evolution de la vitesse tangentielle $V_{\theta}$ et la vitesse radiale $V_r$ sur la pale à Re=10 D/T=0.66 .....	47
Figure III.9 Influence du nombre de Reynolds évolution de la vitesse tangentielle sur la pale de l'agitateur. D/T=0.66.....	48
Figure III.10 Influence du nombre de Reynolds évolution de la vitesse tangentielle sur la médiatrice de l'agitateur. D/T=0.66.....	48
Figure III.11 Représentation des rayons R1 à R8 .....	49
Figure III.12 Évolution de la vitesse tangentielle $V_q$ sur différents rayons.....	50
Figure III.13 Vitesse tangentielle pour différentes rapport géométrique D/T, Re=1 et $\Theta=90^\circ$ . .....	50
Figure III.14 Vitesse tangentielle pour différentes rapport géométrique D/T, Re=1 et $\Theta=0^\circ$ ..	52
Figure III.15 Contour de vitesse radiale et vitesse tangentielle à Re = 1, D/T=0.5 .....	52
Figure III.16 Contour de vitesse radiale et vitesse tangentielle à Re = 1, D/T=0.35 .....	53
Figure III.17 Contour de vitesse radiale et vitesse tangentielle à Re = 1, D/T=0.66 .....	53
Figure III.18 Contour de vitesse radiale et vitesse tangentielle à Re = 1, D/T=0.5 .....	53
Figure III.19 Contour de vitesse tangentielle, D/T=0.66 .....	53
Figure III.20 Contour de vitesse radiale, D/T=0.66. ....	53

## 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.....	21
Tableau II.1 : Dimensions de toutes les géométries réalisées.....	32
Tableau III.2 : Position angulaire des rayons R1 à R8.....	46

## Nomenclature

<i>da</i>	Diamètre de l'arbre d'agitation	[m]
E	Epaisseur de la pale	[m]
H	Distance entre l'extrémité de l'agitateur et le fond de la cuve	[m]
R	Coordonnée cylindrique radiale	[m]
V	Vecteur vitesse	[m s <sup>-1</sup> ]
D	diamètre de l'agitateur	[m]
H	niveau de liquide dans la cuve	[m]
N	vitesse de rotation de l'agitateur	
<i>Re</i>	Nombre de Reynolds	
T	Diamètre de la cuve	[m]
V	Volume de la cuve	[m <sup>3</sup> ]
<i>V<sub>θ</sub></i>	Vitesse tangentielle	[m s <sup>-1</sup> ]
<i>V<sub>r</sub></i>	Vitesse radiale	[m s <sup>-1</sup> ]

### Lettre grecques :

E	Erreur pour tester la convergence	
M	Viscosité dynamique du fluide	[kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Masse volumique du fluide	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\Xi$	Abscisse d'un point de calcul dans le plan référence	[m]
$\theta$	Coordonnée cylindrique tangentielle	[pa]
$\omega$	Vitesse angulaire	[ms <sup>-1</sup> ]

## Nomenclature

### Indices :

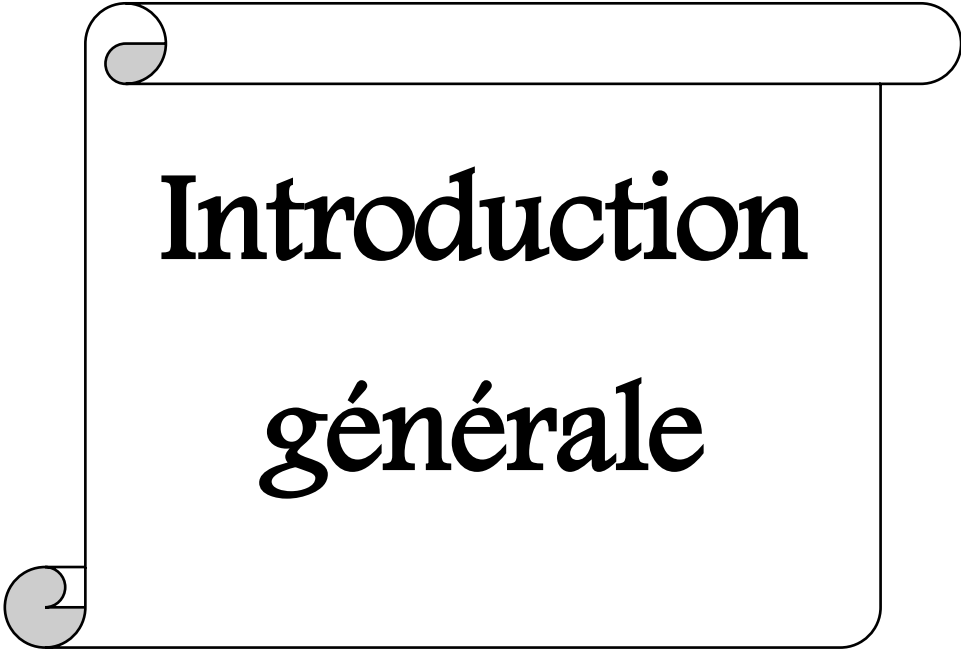
E	Point à l'est du point P
N	Point au nord du point p
P	Point au centre du volume fini
S	Point au sud du point P
W	Point au l'ouest du point P

### Abbréviation :

CFD	Computational Fluid Dynamics
MDF	Méthode des différences finis
MEF	Méthode des éléments finis
MVF	Méthode des volumes finis

### Symboles :

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

A decorative scroll frame with a black outline and rounded corners. The top and bottom edges are slightly curved, and the left and right sides have small, shaded, semi-circular elements that look like the edges of a scroll. The text is centered within this frame.

**Introduction**  
**générale**

# Introduction générale

L'agitation mécanique joue un rôle essentiel dans de nombreux secteurs industriels tels que la chimie, la pétrochimie, l'industrie agroalimentaire, l'industrie nucléaire et l'industrie pharmaceutique. Son objectif principal est d'homogénéiser les fluides en mélangeant les différents composants.

L'agitation mécanique permet également d'accélérer les réactions chimiques en favorisant la collision et la dispersion des réactifs. En créant un environnement homogène, elle facilite le contact entre les différentes phases présentes dans le système (liquide-liquide, liquide-solide, gaz-liquide, etc.), ce qui est souvent nécessaire pour obtenir les conditions de transfert de chaleur et de matière optimales.

L'étude de la simulation numérique de l'écoulement newtonien d'un fluide dans une cuve agitée mécaniquement est un sujet pertinent pour comprendre les structures d'écoulement qui se forment lors du processus d'agitation. Cette approche permet d'analyser et de prédire le comportement du fluide dans des conditions spécifiques, en utilisant des modèles mathématiques et des simulations informatiques.

Dans ce cas précis, l'agitation est assurée par un rotor bipale de différents diamètres et de hauteur égale à celle du liquide contenu dans la cuve. Les simulations numériques peuvent être réalisées en utilisant des méthodes de résolution des équations de Navier-Stokes, qui décrivent le mouvement des fluides newtoniens. Ces équations prennent en compte les propriétés du fluide, les conditions aux limites, les caractéristiques géométriques de la cuve et du rotor, ainsi que les conditions d'agitation.

Les logiciels commerciaux tels que Fluent offrent des possibilités de simulation numérique capables de prédire les caractéristiques de l'écoulement dans une cuve agitée. Ces logiciels sont basés sur la résolution des équations de conservation, telles que les équations de Navier-Stokes, en utilisant la méthode des volumes finis. Ils sont capables de traiter les fluides newtoniens ou non newtoniens, ainsi que différents régimes d'écoulement.

La simulation numérique présente plusieurs avantages par rapport à l'approche expérimentale. Elle permet d'obtenir des résultats rapidement, d'économiser des ressources en termes de temps et de coûts associés aux expérimentations, et offre une grande flexibilité pour

explorer différentes conditions et paramètres. De plus, la simulation numérique permet d'obtenir des informations détaillées sur le champ de vitesse, les profils de cisaillement, les distributions de concentration, etc., qui peuvent être difficilement mesurables avec précision expérimentalement.

Cependant, il est important de noter que la simulation numérique repose sur des modèles mathématiques et des hypothèses, ce qui introduit une certaine incertitude dans les résultats. Il est donc nécessaire de valider les simulations avec des données expérimentales lorsque cela est possible, afin de garantir leur précision et leur fiabilité.

Ce travail est divisé en trois chapitres distincts :

Nous avons divisé notre étude en trois chapitres distincts :

Le premier chapitre est consacré à une présentation détaillée des différents types d'agitateurs mécaniques utilisés dans plusieurs secteurs industriels tels que la chimie, la pétrochimie, l'agroalimentaire, le nucléaire et l'industrie pharmaceutique. Nous explorons les différentes méthodes d'agitation, leurs principes de fonctionnement et leurs applications.

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 limitations.

Dans le troisième chapitre, nous discutons et analysons les résultats obtenus à partir de nos simulations numériques. Nous les comparons également à des données expérimentales et à d'autres résultats numériques disponibles dans la littérature. Cette comparaison nous permet d'évaluer la validité et la précision de nos simulations, ainsi que de mettre en évidence les caractéristiques et les tendances observées dans les écoulements confinés de fluides lors du processus d'agitation mécanique.

Enfin, le travail se conclut par une synthèse générale qui récapitule les résultats obtenus. Nous mettons en évidence les principales conclusions de notre étude, les limitations éventuelles, et nous discutons les perspectives et les recommandations pour de futures recherches dans ce domaine.



# Chapitre I :

Généralité sur  
l'agitation mécanique



## I.1 Introduction

L'agitation d'un milieu fluide c'est le mélange de deux ou plusieurs portions de ce milieu en vue de l'obtention d'un certain degré d'uniformité des caractéristiques chimiques ou physiques du produit fini. Le mélange joue un rôle majeur dans le transfert de matière ou de chaleur. Dans son sens le plus général, le terme agitation se rapporte aux mouvements artificiellement créés dans une masse fluide en vue de diminuer l'hétérogénéité des propriétés des fluides [1]. Les techniques d'agitation sont très utilisées en génie des procédés et leurs domaines d'applications sont très variés. [2]

## I.2 Historique du mélange

L'histoire du mélange industriel remonte au 16<sup>ème</sup> siècle avec les travaux de Georgius Agricola en France. Cependant, c'est avec le développement de la deuxième vague de la révolution industrielle et technologique dans la seconde moitié du 19<sup>ème</sup> siècle que William Froude (1868) et Osborne Reynolds (1885) ont proposé des nombres adimensionnels marquant 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 ont commencé à être utilisés dans le mélange.

75 ans plus tard, en 1950, John Henry Rushton a proposé le premier agitateur ayant une géométrie devenue standard de nos jours. Avant même l'apparition du premier livre dédié au mélange industriel en 1966, des scientifiques se posaient déjà des questions sur les surfaces libres dans les cuves de mélange, et des publications scientifiques ont commencé à apparaître dans les années 1950. [3]

La décennie suivante a été marquée par de nombreuses publications sur la surface libre, notamment avec l'édition du livre de mélange compilant tous les travaux de Shiji Nigata en 1975. Les années 1980 ont marqué le début de la simulation numérique appliquée au mélange, et depuis, la recherche sur le mélange a pris une place importante dans la recherche académique et industrielle. Actuellement, la recherche sur le mélange est présente dans différentes régions du monde, telles que l'Amérique du Nord/Sud, l'Europe, l'Inde et l'Asie de l'est. [22]

### I.3 Définition de mélange :

Un mélange est lorsque vous combinez deux substances ou plus et chacune de ces substances conserve sa propre composition chimique. Pour être un mélange, les substances ne peuvent pas former ou rompre des liaisons chimiques entre elles.

Pour être considérées comme un mélange, les substances doivent satisfaire trois propriétés générales. Les composants d'un mélange peuvent être facilement séparés, ils conservent chacun leurs propres propriétés chimiques et la proportion des composants est variable. [23]

On distingue deux grands types de mélanges :

- Un mélange homogène est un mélange où toutes les substances dans le mélange sont réparties uniformément dans l'ensemble du mélange.
- Un mélange hétérogène est un mélange de deux ou plusieurs articles qui ne produisent pas de substances uniformément réparties dans le récipient, même si le mélange a la même composition partout.

### I.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. [4]

### I.5 Mécanisme d'Agitation

#### I.5.1 Définition de l'agitation mécanique

L'agitation mécanique consiste à mettre en mouvement un milieu monophasique ou polyphasique et à brasser, généralement l'agitation n'est pas un but en soi, mais elle est un moyen d'initier ou d'accélérer les phénomènes de transfert (transfert de quantité de mouvement, transfert de matière, transfert de chaleur) dans un grand nombre d'opérations physico-chimiques, le domaine d'application se restreint au mélange d'une phase liquide continue qui peut contenir une ou plusieurs autres phases dispersées (gaz, liquide ou solide)

Le mélange peut être réalisé par la mise en rotation d'un mobile au sein d'une cuve ou par l'insertion en conduite d'obstacles fixes, appelés aussi mélangeurs statiques, ces deux types d'agitateurs présentent des domaines d'application complémentaires :

Les mélangeurs statiques sont adaptés au mélange de fluides hautement visqueux ou de fluides de viscosités très différentes, alors que généralement on leur préfère l'agitation en cuve par une capacité à produire un écoulement et des contraintes uniformes pour un faible coût d'investissement par contre, il se limite à des applications continues. La cuve agitée mécaniquement est utilisable en mode batch ou continu, dans l'ensemble des travaux présentés ici, je m'intéresserai uniquement à la cuve agitée mécaniquement. [5]

## I.5.2 Les mécanismes d'agitation

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. [6]

### I.5.2.1 Agitateurs rotatifs

L'organe d'agitation est placé dans la substance à mélanger où il tourne à plus ou moins grande vitesse et imprime un mouvement au fluide contenu dans la cuve. Les courants fluides qu'il induit varient avec la forme et la taille de l'agitateur. [6]

Il existe deux types d'agitateurs rotatifs :

#### a) 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 mise dans la cuve ou plusieurs hélices à différents niveaux. [6]

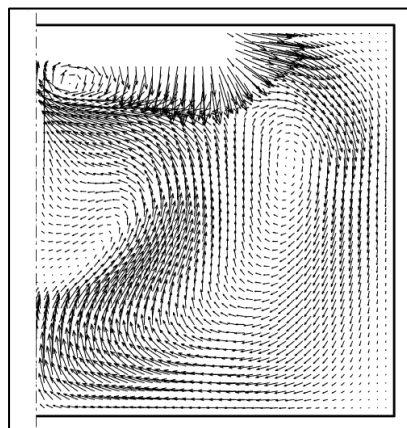
**b) Agitateurs magnétiques**

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. [6]



**Figure I.1** Un agitateur magnétique [6]

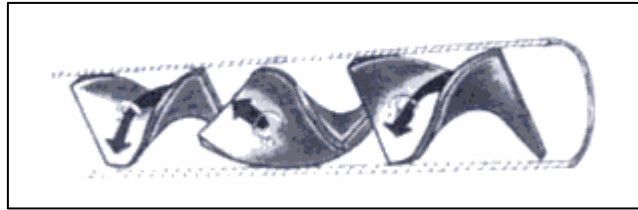


**Figure I.2** Champ de vitesse créé par un agitateur magnétique [6]

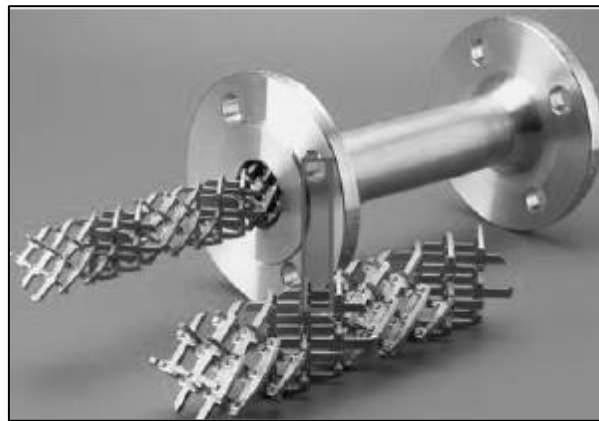
**I.5.2.2 Agitateurs statiques**

Il existe environ 35 modèles de mélangeurs statiques disponibles actuellement sur le marché et une centaine de brevets ont été déposés. 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 (Figure I.3), 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. [7]



**Figure I.3** Mélangeur statique pour fluide visqueux ou pâteux [7]



**Figure I.4** Principe du mélangeur Statique (SMX) [7]

### I.5.2.3 Agitateurs ultra-sons

Le filet fluide passe sur une lame qui vibre à des fréquences ultra soniques. L'utilisation de ce type de mélangeur est répandue pour accélérer des réactions chimiques homogènes (liquides ou solides) ou hétérogènes liquide/solide. [7]

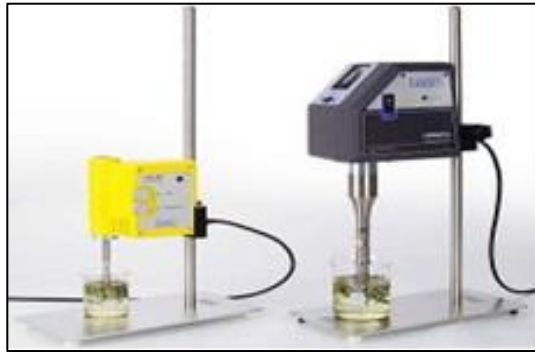


Figure I.5 Appareils ultra-sons [7]

#### I.5.2.4 Agitateurs à jets

Le mélange par jet permet d'améliorer le contact entre deux fluides et favoriser les échanges de chaleurs et de matière, ce mélange est utilisé pour des liquides ou des gaz. L'utilité de jet impactant dans les cuves agitées permet d'obtenir un excellent micro-mélange ; notamment lorsque les vitesses de jets sont comprises entre  $2$  et  $5 \text{ m.s}^{-1}$ . Néanmoins la zone d'action des jets s'étendant sur un faible volume. Le mélange généré par jet est de type turbulent, le phénomène de mélange est d'autant plus favorisé que la turbulence est élevée dans la zone où les fluides se rencontrent. [8]

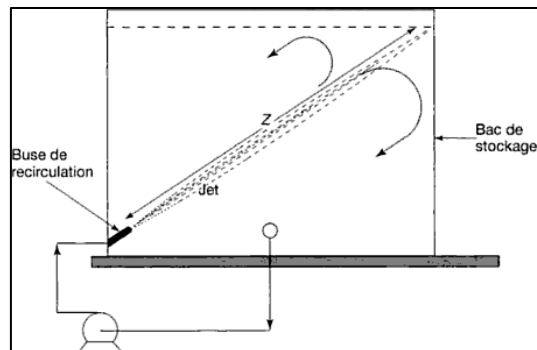


Figure I.6 Principe d'un mélangeur par jet dans une cuve de stockage. [8]

#### I.5.2.5 Agitateur à cuve mobile

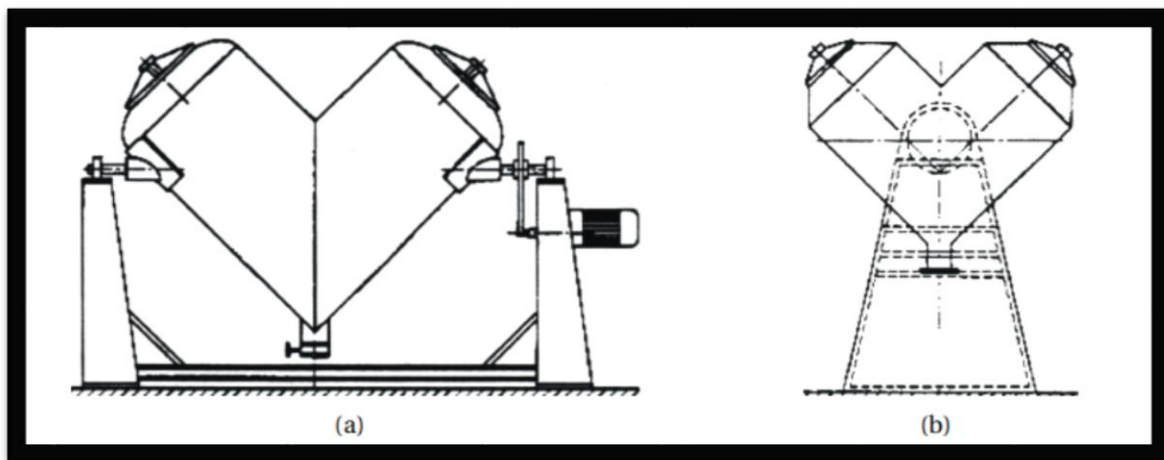
Le principe de fonctionnement des mélangeurs « par retournement » est simple : une enceinte fermée est mise en rotation autour d'un axe forçant les particules à rouler les unes par rapport aux autres à la surface du mélange.

La taille de la cuve est très variable. On trouve des modèles allant de quelques litres pour un mélangeur de laboratoire à plusieurs dizaines de mètres cubes pour les modèles les

plus volumineux. Le taux de remplissage de la cuve est habituellement de 50% du volume total pour laisser les particules se déplacer librement au sein de la cuve.

La vitesse de rotation est variable (de 3 à 100  $\text{tr}\cdot\text{min}^{-1}$ ) et dépend de la capacité de la cuve mais doit normalement être de la moitié de la vitesse critique du mélangeur.

Ces mélangeurs sont les plus simples car ils sont dépourvus de pièces internes ce qui facilite le nettoyage par exemple. De ce fait, ils sont couramment rencontrés dans l'industrie pharmaceutique. Les mélangeurs par retournement les plus utilisés sont les mélangeurs cubiques, cylindriques en V ou en Y (Figure I.7). [24]



**Figure I.7** Agitateur à cuve mobile en « V » ; (a) axe de rotation dans le plan des cuves ; (b) axe de rotation perpendiculaire au plan des cuves [24]

## I.6 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.

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... [10]

---

## I.7 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. [9]

## I.8 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.

Dans une cuve agitée, les trois genres d'écoulements peuvent coexister. [10]

### I.8.1 L'écoulement axial

Il intervient lorsqu'un liquide circule dans une cuve agitée, verticalement de haut en bas, autour de l'axe de l'agitateur, puis remonte le long des parois après Réflexion sur le fond de la cuve ; il est ensuite aspiré verticalement vers le mobile d'agitation qui se trouve en bout d'arbre. [10]

### I.8.2 L'écoulement radial

Il est créé par un mouvement horizontal vers les parois de la cuve, donné au liquide par la rotation du mobile d'agitation.

Le flux se divise en deux courants :

- ✓ L'un allant vers le fond de la cuve,
- ✓ L'autre remontant vers la surface du liquide.


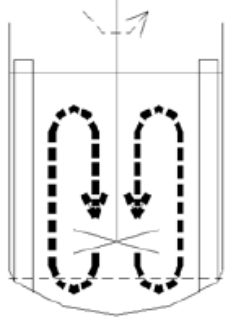

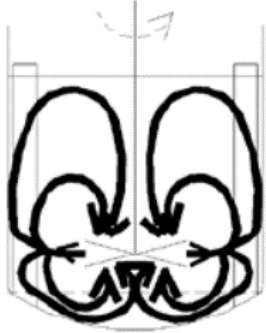

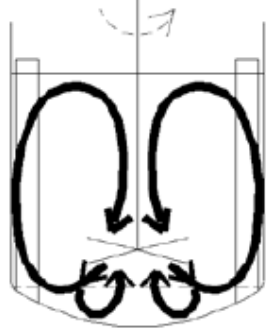


Les agitateurs de type radial, souvent appelés turbines ont une aspiration axiale et un refoulement radial. [10]

### I.8.3 L'écoulement tangentiel

Le liquide à un mouvement de rotation dont l'axe est confondu avec celui de l'agitation, le liquide à tendance à tourner d'un seul bloc autour de cet axe. [10]



**Tableau.I.1** 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.9 Mécanisme de mélange des fluides

### a) Mécanisme de mélange laminaire

Sous les contraintes créées par les agitateurs en mouvement le fluide s'étire sous la forme d'éléments lamellaires. Les surfaces de contact entre les lamelles augmentent et la distance entre les lames diminue. Les lamelles subissent également des phases de découpage et de recombinaison entre elles.

Ces cycles se répètent jusqu'à l'obtention d'une épaisseur caractéristique des lamelles suffisamment fines pour qu'on puisse considérer à l'échelle macroscopique un mélange réussi.

Si l'étape d'étirement est assurée par les gradients de vitesse dans l'installation, les étapes de découpage et recombinaison sont provoquées par des propriétés fluctuantes ou perturbatrices de l'écoulement.

C'est le cas dans une cuve agitée lorsque le fluide voit passer périodiquement une pale d'agitateur. Dans un appareil de mélange, on recherche à la fois l'obtention de lamelles très fines, et une distribution spatiale de l'épaisseur la plus homogène possible. [11]

### b) Mécanisme de mélange 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. [10]

## I.10 Cuves mécaniquement agitées

La configuration "cuve agitée" contient une cuve et un agitateur qui est menu par un moteur d'entraînement, généralement à vitesse variable. L'agitateur en rotation tourne dans la cuve.

Les cuves mécaniquement agitées sont utilisées pour :

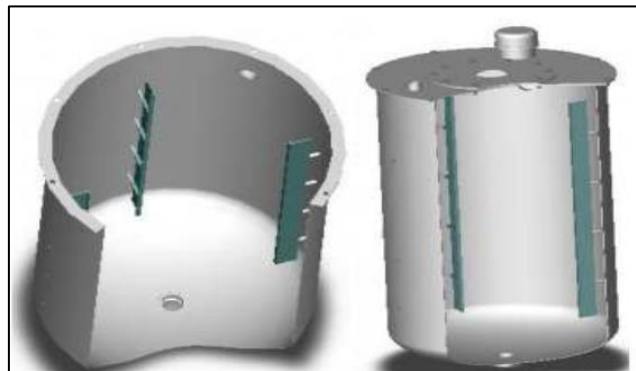
- ✓ Pour assurer un mélange uniforme du point de vue de la concentration ou de la température de 2 ou plusieurs phases.
- ✓ Pour améliorer les transferts de matière ou de chaleur soit le plus souvent pour réaliser les deux opérations simultanément.

### I.10.1 Chicanes

Ce sont des plaques planes collées à la paroi de la cuve ou séparées de celles-ci, leur largeur est comprise entre  $1/10$  et  $1/20$  du diamètre de la cuve et l'on dispose habituellement de 4 ou 6 de manière symétrique (Figure I.8). Ils ont pour but d'améliorer l'efficacité du mélange et l'élimination de la formation de vortex cependant on aura une augmentation en énergie de consommation dans la cuve de mélange.

Plusieurs arrangements de chicanes dans une cuve agitée sont disponibles en fonction de leur application. D'un point de vue optimal il est conseillé d'utiliser autant de contre-pales dans la cuve que l'agitateur a de pales (par exemple : le Maxblend (TM) utilise juste deux chicanes).

D'autre parts le transfert de matière est plus intense dans les cuves sans chicanes, l'analyse du fonctionnement des cuves sans chicanes peut être basée sur une investigation du phénomène vortex puis des conditions hydrodynamiques qui se développent lors de l'agitation. [12]



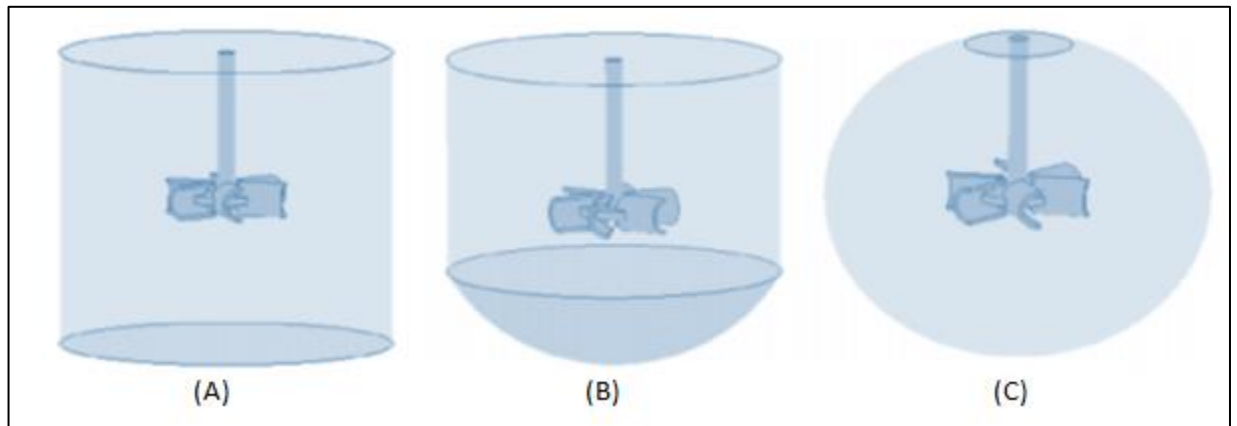
**Figure I.8** Emplacement des chicanes dans la cuve. [12]

### I.10.2 Cuve

La géométrie de la cuve contenant le liquide à agiter joue un rôle important dans le mécanisme d'agitation (Figure I.9).

Les études les plus récentes orientent vers la forme sphérique surtout en ce qui concerne le mélange de fluides de haute viscosité, mais il s'avère que les cuves les plus répandues dans la pratique courante sont cylindriques, leurs diamètres peuvent aller de 10cm pour des dispositifs de laboratoire à 10m et plus pour des installations industrielles. Le fond de la cuve est plat (c'est surtout le cas des installations de laboratoire), bombé ou conique par exemple

pour faciliter les vidanges. Afin d'éviter la création d'un mouvement de rotation du liquide, ces cuves sont souvent munies de chicanes. [13]



**Figure I.9 :** Cuves agitées : a) cuve cylindrique à fond plat, b) cuve cylindrique à fond rond, c) cuve sphérique. [13]

## I.11 Agitateurs mécanique

Généralement ils sont montés sur un arbre vertical centré ou décentré et placés dans une cuve cylindrique verticale, leur domaine d'intervention est largement tributaire des propriétés physico chimiques 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.

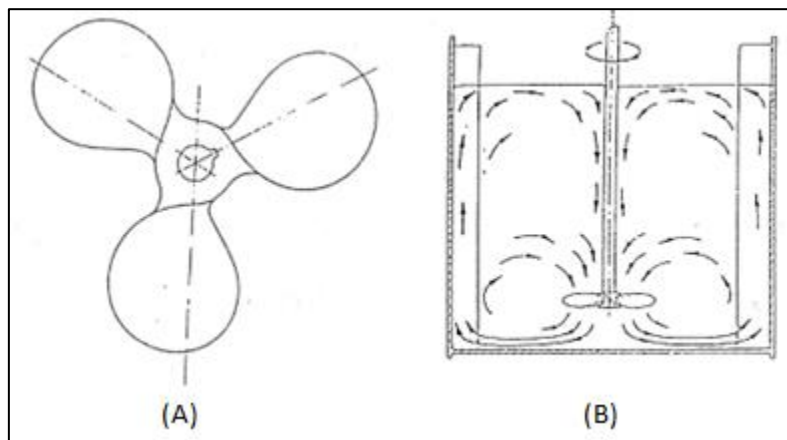
Deux grandes catégories d'agitateurs sont usuellement utilisées, selon la viscosité du fluide [14]

### I.11.1 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. Le régime d'écoulement devient alors turbulent, ce qui augmente, nettement, la complexité du problème. Les agitateurs ont des dimensions faibles allant du 1/4 aux 2/3 du diamètre de la cuve et des vitesses de fonctionnement importantes allant de 500 à 1500 tours par minute. Parmi les mobiles utilisés pour l'agitation de milieux peu visqueux on trouve deux grandes familles de mobiles : les hélices et les turbines. Les hélices, les turbines et les mobiles à pales inclinées sont généralement utilisés pour l'agitation des fluides à basse viscosité. Ces mobiles fournissent un débit perpendiculaire à l'arbre d'agitation, ils créent des effets de cisaillement relativement importants. Ce sont des mobiles de turbulence. [14]

### I.11.2 Agitateurs à hélice

Elles génèrent un écoulement axial, et se scindent en deux catégories : Les hélices marines, les plus connues des non spécialistes dont le pas est égal au diamètre de l'hélice Figure (A) (I.10) Les hélices profilées, regroupant les hélices à pales minces proposées par les constructeurs. L'écoulement généré par ces types de mobiles est essentiellement à refoulement axial Figure (B) (I.10) Le liquide refoulé par l'hélice vers le fond, remonte verticalement le long des parois de la cuve et redescend ensuite le long de l'axe de l'agitateur, on peut trouver aussi l'écoulement en sens inverse en modifiant le sens de rotation de l'hélice. [15]



**Figure I.10 :** a) Les hélices : b) Hélice marine, c) écoulement généré par un hélice marine. [15]

### I.11.3 agitateurs Turbines

Les turbines sont constituées généralement de pales radiales et de pales verticales fixées sur un disque horizontal délivrant essentiellement un débit radial avec un fort cisaillement en bout de la pale Figure I (I.11). Elles sont donc très souvent utilisées dès qu'il s'agit de fragmenter un fluide en bulles ou en gouttes. [16]

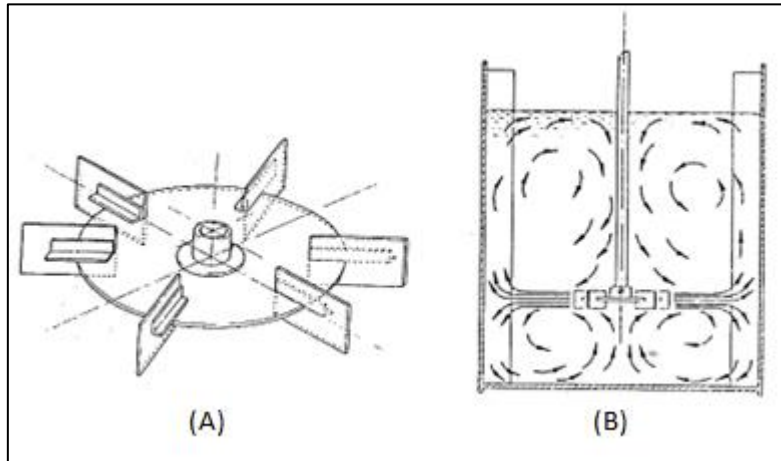
La plus classique d'entre elles comprend six pales Figure I (A) (I.11) appelée turbine de Rushton qui est caractérisée par :

- ✓ Le diamètre souvent égal au tiers sinon entre  $1/5$  et  $2/3$  du diamètre du réacteur.
- ✓ Le nombre de pales, le plus souvent égal à 6.
- ✓ Les dimensions des pales rapportées au diamètre de la turbine, en particulier largeur entre  $1/10$  et  $1/4$  du diamètre de la turbine.

Ces mobiles sont caractérisés par un écoulement à refoulement radial Figure I (B) (I.11).

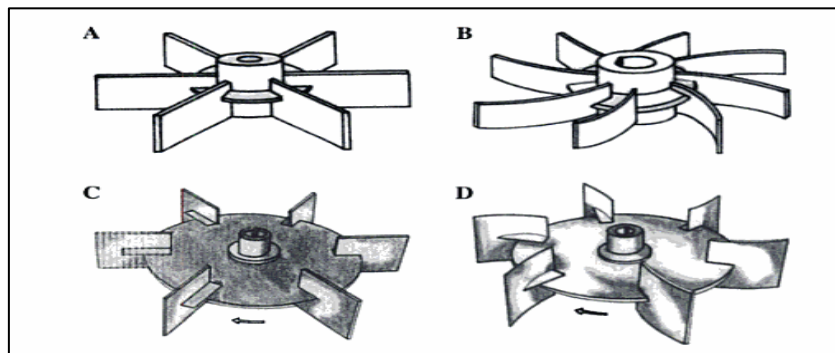
De très nombreuses variantes se distinguent par le nombre, la forme, l'inclinaison des pales, leur courbure ainsi que par la présence ou non d'un disque central, les turbines radiales sans disque sont utilisées pour l'agitation de fluides peu visqueux [16].

Les turbines exigent 10 à 20 fois plus d'énergie que les hélices



**Figure I.11 :** a) Turbine de Rushton, b) Ecoulement généré par une turbine de Rushton. [16]

De nombreuses variantes se distinguent par le nombre, la forme, l'inclinaison des pales, leurs courbures ainsi que par la présence ou non d'un disque central, les turbines exigent 10 à 20 fois plus d'énergie que les hélices. [16]



**Figure I.12 :** Agitateurs de type Turbine : a) turbine à 6 pales plates, b) turbine à 8 pales incurvées, c) turbine à 6 pales plates montées sur un disque, d) turbine à pales courbées montées sur un disque. [16]

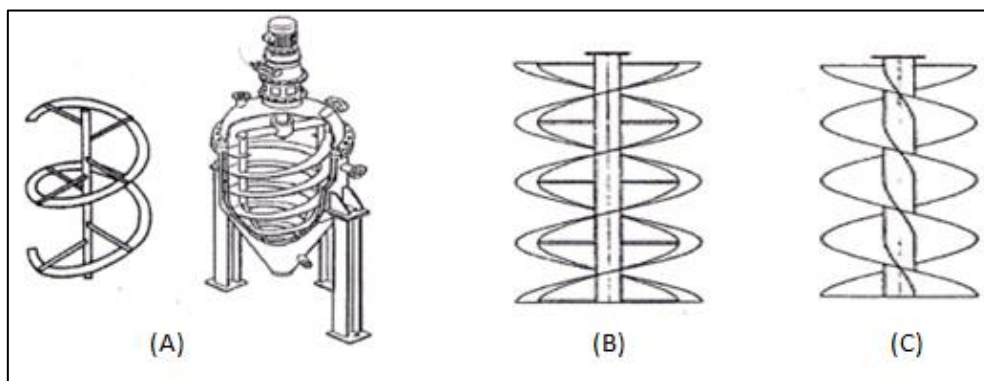
## I.12 Agitateurs de fluides très visqueux

L'agitation de fluides très visqueux est réalisée par des agitateurs de grande surface de manière à éviter l'existence de zones mortes et éviter le cisaillement, mais tournant à faibles vitesses pour diminuer la consommation d'énergie. Le régime d'écoulement est généralement laminaire. Deux grands groupes de système d'agitation sont souvent utilisés : les agitateurs à

écoulement essentiellement axial tels que les vis ou les rubans hélicoïdaux et les agitateurs à pales de grande surface à refoulement tangentiel. [17]

### I.12.1 Agitateurs à écoulement axial

On trouve dans cette catégorie les rubans hélicoïdaux Figure (A et B) (I.13) et les agitateurs à vis sans fin Figure (C) (I.13). Ces systèmes d'agitation sont principalement utilisés pour le mélange et l'homogénéisation de milieux très visqueux. 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 échangé 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. [18]



**Figure I.13 :** a) Agitateur type ruban hélicoïdal, b) type double ruban a pas inverse, c) Agitateur à vis sans fin. [18]

### I.12.2 Agitateurs à écoulement tangentiel

Parmi ces agitateurs on trouve principalement les bipales, les ancres et les agitateurs barrières. D'autres types d'agitateurs dérivant de ces trois types sont aussi utilisés. [19]

#### I.12.2.1. Agitateur bipale

C'est la forme la plus simple, le rapport du diamètre de l'agitateur sur le diamètre de la cuve ( $D/T$ ) peut varier entre 0.5 et 0.9, Le rapport de la hauteur du bipale sur le diamètre de la cuve ( $W/T$ ) peut aller de  $1/12$  jusqu'à  $1/3$  (Figure I.14).Lorsque le rapport ( $D/T$ ) 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. [19]

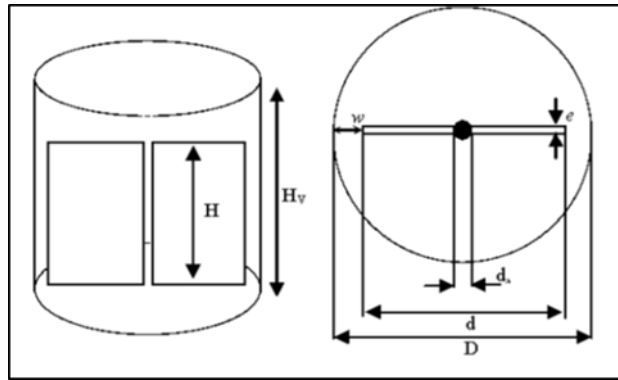


Figure I.14 bipale classique. [19]

### I.12.2.2 Agitateur ancre

C'est le mobile à pale le plus utilisé en pratique pour améliorer le transfert de chaleur (Figure I.15). Il est constitué par un plat qui suit la forme de la cuve, pouvant ainsi faire penser à une ancre marine ou à un fer à cheval. Le diamètre de l'agitateur est assez important, de l'ordre de  $0,95$  à  $0,98T$ . La largeur du bras peut varier de  $0,05$  à  $0,10$  le diamètre de l'ancre. Les vitesses périphériques sont généralement assez faibles ( $1$  à  $3 \text{ m.s}^{-1}$ ). Le raclage des parois peut être associé en particulier pour améliorer le transfert de chaleur. [20]

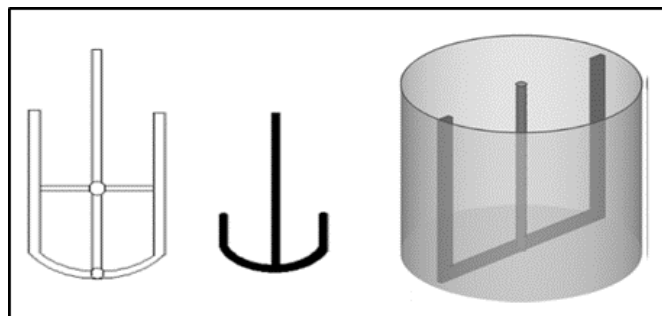
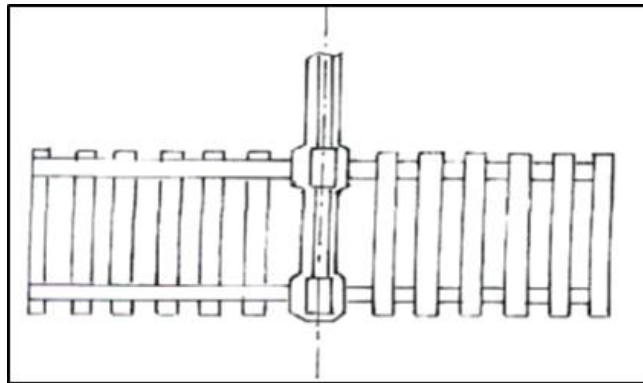


Figure I.15 : Agitateurs à Ancre. [20]

### I.12.2.3. Agitateurs barrières

Sont constitués par une association de plaques horizontales ou verticales. Les vitesses de rotation sont généralement faibles pour réduire la consommation d'énergie. Ils sont souvent utilisés pour l'agitation des grandes cuves surtout pour des opérations de traitement des eaux, (Figure I.16). [20]



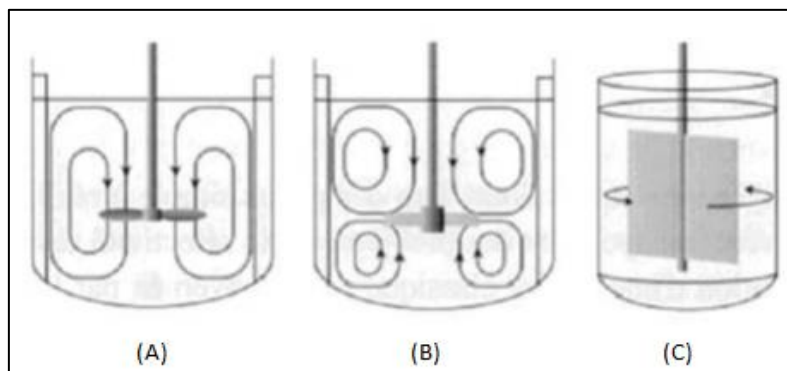


**Figure I.16 :** Agitateur barrière. [20]

### I.13 Choix d'un agitateur mécanique

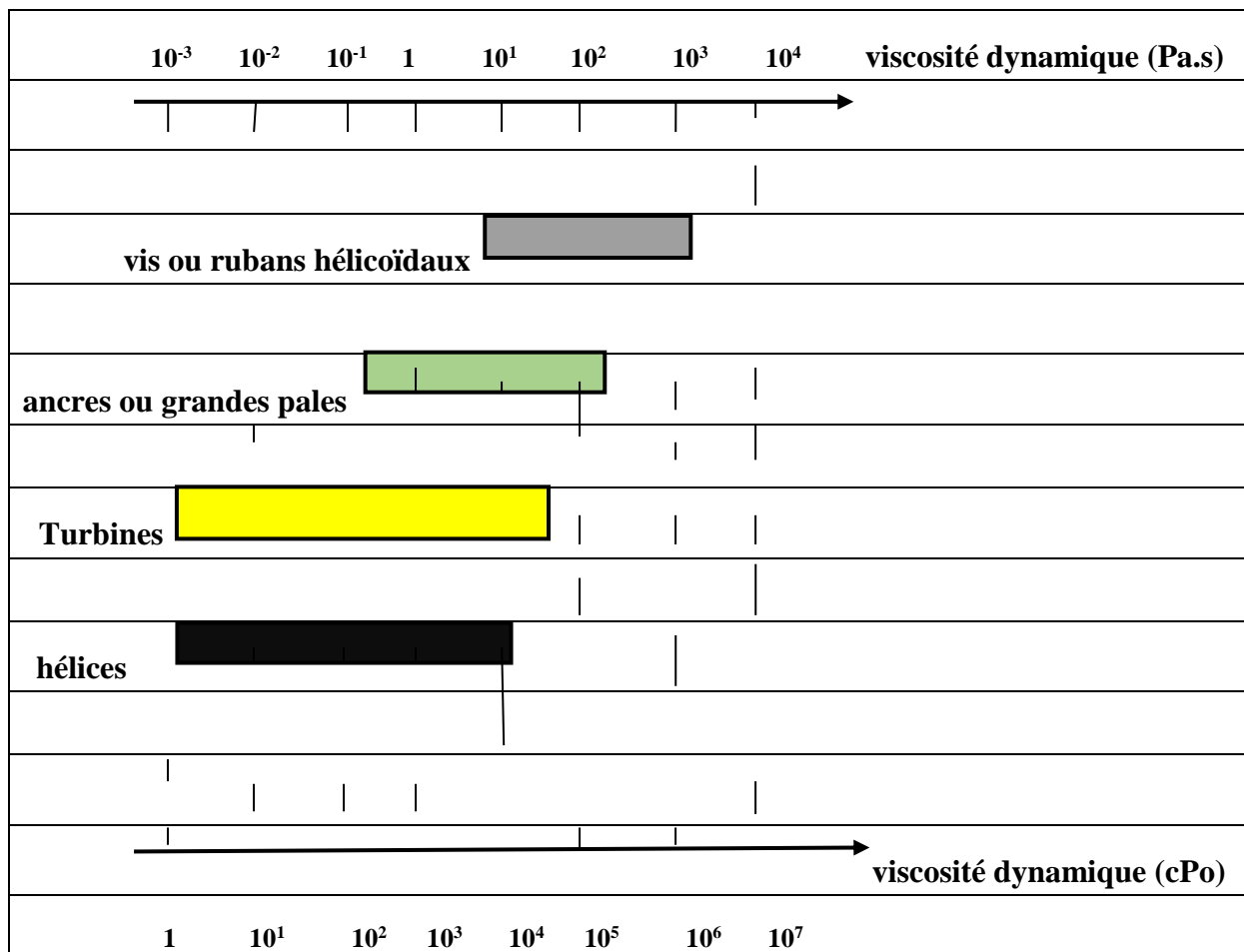
Le choix du mobile d'agitation est souvent fait sur la base de la viscosité du milieu (Figure I.16) et suivant le sens de mouvement qu'ils communiquent au fluide. On distingue les mobiles à écoulements radiaux, à écoulement axiaux, à écoulement mixte et les mobiles adaptés à l'agitation de fluides hautement visqueux.

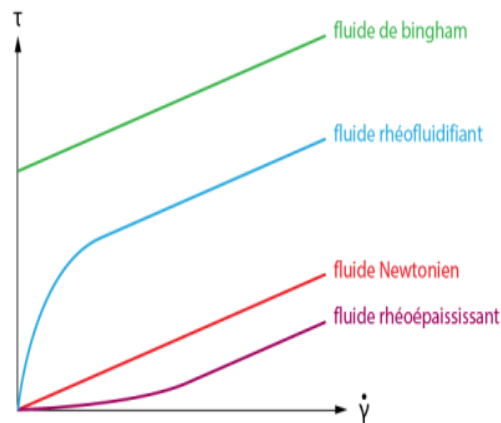
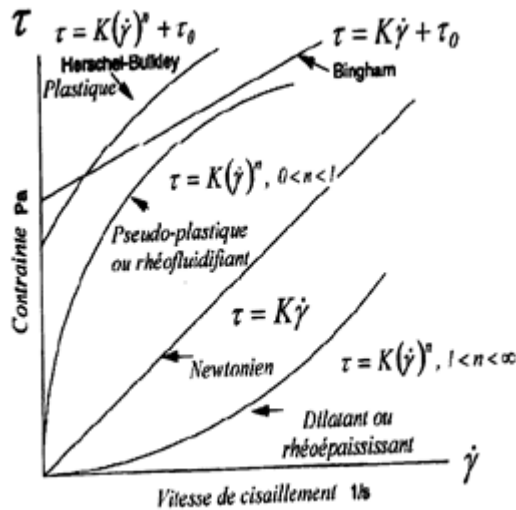
Ils sont dits axiaux lorsque, à son origine, le mouvement se fait suivant l'axe de l'agitateur et radiaux si le mouvement est perpendiculaire à cet axe comme montre (Figure I.17). Certains appareils combinent ces deux possibilités en provoquant un flux mixte. [21]



**Figure 1.17** Présentation schématique des types d'écoulements : a) axial, b) radial, c) tangentiel. [21]

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





. **Figure 1.18** rhéogramme de quelques catégories de fluides

Les rhéogrammes sont des représentations graphiques utilisées pour décrire le comportement des fluides en fonction de la contrainte appliquée et du taux de cisaillement. Différentes catégories de fluides peuvent être caractérisées à partir de ces rhéogrammes.

Un fluide newtonien présente une viscosité constante et son rhéogramme est une ligne droite passant par l'origine. Un fluide pseudoplastique a une viscosité qui diminue avec l'augmentation du taux de cisaillement, ce qui se traduit par une courbe décroissante.

À l'inverse, un fluide dilatant a une viscosité qui augmente avec le taux de cisaillement, ce qui se reflète par une courbe croissante. Les fluides viscoélastiques et thixotropiques ont des comportements plus complexes, avec des rhéogrammes qui peuvent varier avec le temps ou en fonction de l'historique de contrainte. Ces rhéogrammes permettent aux scientifiques et aux ingénieurs de comprendre et de caractériser les propriétés des fluides, ce qui est essentiel dans de nombreux domaines, tels que l'industrie pétrolière, la médecine et la fabrication de matériaux.

## I.14 Etat de l'art

Des méthodologies expérimentales et numériques ont été développées ou appliquées pour bien comprendre les écoulements générés dans ces systèmes. L'étude de [30] se concentre sur l'écoulement généré par des mobiles à pales, qui sont des dispositifs agitateurs utilisés dans divers domaines industriels. Dans cette étude expérimentale, Nagata s'intéresse plus particulièrement à l'écoulement tangentiel généré par ce type d'agitateur. L'écoulement tangentiel se réfère à un mouvement tourbillonnaire ou circulaire qui se produit dans un fluide lorsqu'il est soumis à une agitation. Les mobiles à pales induisent cet écoulement tangentiel en tournant autour de leur axe, créant ainsi des forces de cisaillement qui font circuler le fluide de manière tourbillonnaire. Nagata entreprend une série d'expériences pour étudier les caractéristiques de cet écoulement tangentiel. Il analyse les schémas de circulation du fluide, la vitesse de l'écoulement, ainsi que d'autres paramètres pertinents. L'objectif est de mieux comprendre la dynamique de cet écoulement généré par les mobiles à pales [3].

La publication de Bertrand [2] présente les résultats d'une étude sur l'agitation d'un fluide pseudo-élastique à l'aide d'un agitateur bipale. Le terme "pseudo-élastique" fait référence à un fluide dont le comportement est similaire à celui d'un matériau élastique, c'est-à-dire qu'il peut présenter des propriétés de résistance et de déformation. L'objectif de l'étude de Bertrand est d'explorer les effets de l'agitateur bipale sur le fluide pseudo-élastique. Pour ce faire, des expériences sont menées pour analyser les schémas d'agitation, les forces de cisaillement, les vitesses d'écoulement et d'autres paramètres pertinents. Les résultats de l'étude permettent de mieux comprendre comment l'agitateur bipale interagit avec le fluide pseudo-élastique. Ils mettent en évidence les variations de la distribution des forces de cisaillement à différents endroits de l'écoulement, ainsi que les zones de turbulence et de déformation dans le fluide.

Ces résultats sont importants car ils contribuent à l'amélioration de la conception et de l'efficacité des agitateurs bipales utilisés dans l'industrie. Ils fournissent également des informations précieuses sur la manière dont les fluides pseudo-élastiques réagissent à l'agitation, ce qui peut être utile dans divers domaines tels que la chimie, la pharmacologie ou la fabrication de produits alimentaires. En résumé, la publication de Bertrand en 1983 présente des résultats sur l'agitation d'un fluide pseudo-élastique à l'aide d'un agitateur bipale.

---

L'étude explore les schémas d'agitation, les forces de cisaillement et d'autres paramètres pertinents pour mieux comprendre l'interaction entre l'agitateur et le fluide. Ces résultats ont des implications pratiques pour l'optimisation de la conception des agitateurs dans diverses industries.

En 1992 Kubcewicz présente une simulation numérique en trois dimensions de l'écoulement d'un fluide incompressible autour d'un agitateur à pales et d'une turbine à pales planes. Cette simulation vise à étudier le régime de mélange laminaire dans une cuve agitée et à obtenir les trois composantes de vitesse du fluide. L'objectif de l'étude est de comprendre comment l'écoulement se développe autour de l'agitateur à pales et de la turbine, et d'analyser les différentes caractéristiques de vitesse du fluide. La simulation utilise des modèles mathématiques et des techniques numériques pour représenter de manière précise l'écoulement tridimensionnel [19].

Les résultats de la simulation permettent d'obtenir des informations détaillées sur les schémas d'écoulement, les vitesses du fluide et les variations dans la cuve agitée. Ils mettent en évidence la formation de tourbillons, les zones de cisaillement et d'autres phénomènes liés à l'agitation. Cette simulation numérique en trois dimensions est importante car elle fournit une compréhension approfondie de l'écoulement dans une cuve agitée. Les informations obtenues peuvent être utilisées pour améliorer la conception des agitateurs et des turbines, afin d'optimiser le mélange laminaire dans diverses applications industrielles.

L'étude de Youcfi en 1993 porte sur l'écoulement d'un fluide viscoélastique autour d'un agitateur bipale dans une cuve agitée. L'objectif de cette étude expérimentale est d'obtenir les vitesses d'écoulement dans les plans des pales de l'agitateur ainsi que dans le plan médian, et d'analyser ces vitesses à travers des éléments cinématiques. L'étude examine également l'impact du champ local sur la puissance globale de l'agitateur et sur le processus de mélange. Pour réaliser cette étude, des expériences sont menées pour mesurer les vitesses d'écoulement du fluide viscoélastique dans les différents plans mentionnés. Ces mesures permettent de quantifier les caractéristiques cinématiques de l'écoulement, telles que les vitesses de cisaillement et les profils de vitesse. Les résultats obtenus fournissent des informations sur la dynamique de l'écoulement du fluide viscoélastique autour de l'agitateur bipale. Ils permettent de mieux comprendre l'influence des différentes forces et des caractéristiques du fluide sur le comportement de l'écoulement. L'analyse des vitesses d'écoulement et des éléments cinématiques aide à évaluer l'efficacité de l'agitateur dans le

---

processus de mélange du fluide viscoélastique. De plus, en examinant l'impact du champ local sur la puissance globale de l'agitateur, l'étude permet d'optimiser la conception et les paramètres de fonctionnement de l'agitateur pour améliorer le mélange [7].

L'étude de Bouzouini en 2004 se concentre sur l'écoulement d'un fluide visqueux newtonien dans une cuve agitée par un agitateur à pales. Cette étude utilise des méthodes numériques, plus précisément la méthode des éléments finis, pour réaliser une simulation numérique de cet écoulement. L'objectif principal de cette étude est d'analyser et de comprendre le comportement de l'écoulement du fluide visqueux newtonien sous l'influence de l'agitateur à pales. La méthode des éléments finis permet de discrétiser le domaine de la cuve et de résoudre les équations mathématiques décrivant le fluide en utilisant des techniques numériques avancées. En utilisant cette approche, Bouzouini examine les schémas d'écoulement, les vitesses, les gradients de pression et d'autres paramètres pertinents dans la cuve agitée. Les résultats de l'étude permettent de visualiser et d'analyser l'écoulement du fluide dans différentes conditions de fonctionnement de l'agitateur à pales. Cette étude numérique contribue à une meilleure compréhension de l'écoulement des fluides visqueux newtoniens dans les cuves agitées. Elle fournit des informations détaillées sur les caractéristiques de l'écoulement, ce qui peut être utile pour l'optimisation de la conception de l'agitateur à pales et pour améliorer les performances du mélange dans diverses applications industrielles.

En 2007 dans [19], Bouzit présente une étude sur l'agitation mécanique d'un fluide newtonien dans une cuve agitée par un agitateur bipale. L'objectif de cette étude est de déterminer les caractéristiques hydrodynamiques de l'écoulement en résolvant les équations de quantité de mouvement et de continuité à l'aide de la méthode des volumes finis. De plus, l'étude examine l'influence des paramètres géométriques sur l'agitation. Pour réaliser cette étude, Bouzit utilise la méthode des volumes finis, qui permet de discrétiser le domaine de la cuve et de résoudre numériquement les équations du mouvement du fluide et de conservation de la masse. Cette approche permet d'obtenir des résultats précis sur les caractéristiques hydrodynamiques de l'écoulement, telles que les vitesses, les gradients de pression et d'autres paramètres pertinents. L'étude de Bouzit se concentre également sur l'influence des paramètres géométriques de l'agitateur bipale sur l'écoulement. Ces paramètres comprennent la taille et la forme des pales, l'espacement entre les pales, l'angle d'inclinaison, etc. L'objectif est de comprendre comment ces paramètres affectent les performances de l'agitateur et les caractéristiques de l'écoulement dans la cuve. Les résultats de cette étude permettent de mieux

---

comprendre les caractéristiques hydrodynamiques de l'agitation mécanique d'un fluide newtonien dans une cuve agitée par un agitateur bipale. Ils fournissent des informations sur l'écoulement, les forces de cisaillement, les tourbillons et d'autres aspects importants pour optimiser la conception de l'agitateur et améliorer le processus de mélange dans diverses applications industrielles.

L'étude menée par Kamla Youcef en 2016 [7] porte sur l'écoulement d'un fluide non newtonien dans une cuve agitée mécaniquement par une turbine de Rushton. L'objectif de cette étude est d'analyser et de comprendre le comportement de l'écoulement de ce fluide particulier sous l'effet de l'agitateur. Le fluide non newtonien se réfère à un fluide dont la viscosité dépend du taux de cisaillement. Il présente des propriétés rhéologiques complexes, telles que la thixotropie, la dilatance ou la pseudoplastie. L'étude de Kamla Youcef vise donc à évaluer l'impact de ces propriétés sur l'écoulement lorsque le fluide est agité par une turbine de Rushton. Pour réaliser cette étude, des expériences sont menées pour mesurer les caractéristiques de l'écoulement, telles que les vitesses, les profils de vitesse, les forces de cisaillement et autres paramètres pertinents. Ces mesures permettent d'analyser comment le fluide non newtonien réagit à l'agitation provoquée par la turbine de Rushton. Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre les schémas d'écoulement, les zones de cisaillement, les variations de viscosité et les effets de l'agitation sur le fluide non newtonien. Ces informations sont précieuses pour optimiser la conception et les paramètres de fonctionnement des turbines de Rushton dans les applications industrielles où des fluides non newtoniens sont traités, tels que les industries chimiques, alimentaires et pharmaceutiques.

L'étude menée par Rebiai en 2014 [11] concerne l'analyse numérique des caractéristiques hydrodynamiques d'un agitateur à pales cylindriques. L'objectif de cette étude est de comprendre et de quantifier le comportement de l'écoulement autour de cet agitateur en utilisant la méthode des volumes finis. La méthode des volumes finis est une approche numérique utilisée pour résoudre les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Elle permet de discrétiser le domaine de l'agitateur à pales cylindriques en un ensemble de volumes finis et de résoudre numériquement les équations pour obtenir des informations sur l'écoulement. L'étude de Rebiai se concentre sur l'analyse des caractéristiques hydrodynamiques telles que les vitesses, les pressions, les forces de cisaillement et les tourbillons générés par l'agitateur à pales cylindriques. En utilisant la méthode des volumes finis, l'écoulement est modélisé et résolu numériquement pour obtenir ces informations. Les résultats de cette étude permettent de mieux comprendre la dynamique

---

de l'écoulement autour de l'agitateur à pales cylindriques. Ils peuvent être utilisés pour optimiser la conception de l'agitateur, améliorer l'efficacité du mélange et réduire les coûts énergétiques associés à l'agitation dans diverses applications industrielles.

L'étude menée par Kamla [7] porte aussi sur la simulation numérique de l'écoulement des fluides non newtoniens dans une cuve agitée, en se concentrant sur l'influence des chicanes sur la formation de vortex. L'objectif principal de cette étude est de comprendre comment les chicanes affectent la dynamique de l'écoulement et la formation de vortex dans le fluide non newtonien. Pour réaliser cette étude, Kamla utilise la méthode des volumes finis, une technique numérique couramment utilisée pour résoudre les équations de conservation de la masse et de la quantité de mouvement. Cette méthode permet de discrétiser le domaine de la cuve agitée en un maillage de volumes finis et de résoudre numériquement les équations pour obtenir des informations sur l'écoulement. L'étude de Kamla se concentre spécifiquement sur l'effet des chicanes, qui sont des structures internes placées dans la cuve agitée, sur la formation de vortex. Les chicanes peuvent modifier les schémas d'écoulement, perturber les tourbillons et influencer la distribution de la vitesse et de la viscosité du fluide non newtonien. Les résultats de la simulation numérique permettent de visualiser et d'analyser l'écoulement des fluides non newtoniens dans la cuve agitée avec et sans chicanes. Ces résultats fournissent des informations sur les changements dans la formation de vortex, les forces de cisaillement et les caractéristiques hydrodynamiques globales de l'écoulement. L'étude de Kamla en 2016 contribue à une meilleure compréhension de l'écoulement des fluides non newtoniens dans les cuves agitées et met en évidence l'impact des chicanes sur la formation de vortex. Ces informations sont précieuses pour optimiser la conception des cuves agitées et des dispositifs internes, tels que les chicanes, afin d'améliorer l'efficacité du mélange et les performances dans les applications industrielles.





# Chapitre II :

Formulation mathématique et  
présentation des Systèmes  
simulés

## II. Introduction

L'analyse des systèmes d'agitation se fait généralement expérimentalement, mais cela est coûteux en temps et en argent. Cependant, l'utilisation de la simulation numérique, en particulier la simulation par dynamique des fluides (CFD), permet de visualiser différents paramètres et phénomènes de manière rapide et économique. Ce chapitre souligne donc les avantages de la simulation numérique par rapport à l'expérimentation traditionnelle.

### II.1 Utilité et attendus de la CFD en ingénierie

La simulation par dynamique des fluides (CFD) est une technique de simulation numérique utilisée en ingénierie pour modéliser les phénomènes de fluides, tels que les écoulements de liquides et de gaz. Les avantages de la CFD en ingénierie sont nombreux, notamment :

- Optimisation de la conception : La CFD permet de modéliser les écoulements de fluides à l'intérieur d'un système, ce qui permet aux ingénieurs de mieux comprendre le comportement de ce système. Cela permet d'optimiser la conception des systèmes en apportant des améliorations pour atteindre les meilleures performances.
- Réduction des coûts : La CFD permet de simuler différents scénarios, ce qui réduit les coûts liés à la construction et à l'expérimentation de prototypes. Les ingénieurs peuvent également tester différents
- Accélération de la R&D : La simulation CFD permet aux ingénieurs d'analyser rapidement de nombreux paramètres et phénomènes, ce qui accélère le processus de recherche et développement.
- Prise de décisions éclairées : La CFD 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. [25]

Les attentes de la CFD en ingénierie comprennent une meilleure compréhension des phénomènes de fluides dans un système, l'optimisation de la conception des systèmes pour des performances améliorées, une réduction des coûts liés aux expérimentations physiques et à la construction de prototypes, une accélération du processus de recherche et développement, et des décisions plus éclairées et mieux informées en matière de conception des systèmes.

## II.2 Démarche de la CFD

La CFD, ou simulation par dynamique des fluides, est une technique de modélisation numérique des écoulements de fluides. Voici les étapes typiques de la démarche de la CFD :

- Définition du problème : Cette étape consiste à définir le problème à résoudre, à identifier les objectifs de la simulation et à rassembler toutes les données nécessaires, telles que les caractéristiques géométriques du système et les propriétés des fluides.
- Modélisation : Une fois que le problème est bien défini, il faut créer un modèle numérique du système. Cela implique la création d'un maillage numérique tridimensionnel du système, c'est-à-dire la division de la géométrie en éléments finis ou en volumes finis.
- Définition des conditions aux limites : Les conditions aux limites sont les contraintes physiques qui sont appliquées aux bords du système. Elles incluent généralement la vitesse, la pression, la température, etc.
- Résolution numérique : À cette étape, l'équation de Navier-Stokes, qui décrit le mouvement des fluides, est résolue numériquement. Il existe plusieurs méthodes numériques disponibles pour résoudre cette équation, telles que les méthodes de volumes finis, les méthodes d'éléments finis et les méthodes de différences finies.
- Analyse des résultats : Une fois que la simulation est terminée, les résultats peuvent être analysés et visualisés. Les résultats incluent généralement des données sur la vitesse, la pression, la température, les turbulences, etc.
- Validation et vérification : Avant d'utiliser les résultats de la simulation pour prendre des décisions importantes en ingénierie, il est important de vérifier et de valider la simulation en le comparant avec des données expérimentales ou d'autres simulations validées.
- Optimisation de la conception : En utilisant les résultats de la simulation et les connaissances acquises, les ingénieurs peuvent optimiser la conception du système pour atteindre les performances souhaitées. [25]

La CFD est une démarche complexe qui nécessite une expertise en mathématiques, en physique, en informatique et en ingénierie. Les résultats de la CFD sont de plus en plus précis et fiables grâce aux progrès de la technologie et à l'amélioration des méthodes numériques.

### II.3 Méthodes de discrétisation

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

La discrétisation se fait par une des trois méthodes suivantes :

- Méthode des différences finies.
- Méthode des éléments finis.
- Méthode des volumes finis.

Dans ce qui suit on se limite à examiner uniquement les méthodes les plus utilisées dans le domaine de la dynamique et la thermique des écoulements de fluides qui sont les méthodes des différences finies et volume finis

#### II.3.1 Méthode des différences finies

La méthode des différences finies est une méthode de discrétisation numérique qui remplace les dérivées partielles par des différences finies ou des combinaisons de valeurs discrètes de la fonction à un nombre fini de nœuds dans un maillage. Cette méthode présente certains avantages et inconvénients :

##### a) Avantages

- Elle est facile à mettre en œuvre, car elle ne nécessite pas de connaissances approfondies en analyse mathématique.
- Elle est relativement peu coûteuse en termes de temps de calcul.

##### b) Inconvénients

- Elle est limitée aux géométries simples et régulières, car la construction de la grille de discrétisation peut être difficile pour des géométries complexes.
- 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.

[26]

Malgré ces inconvénients, la méthode des différences finies est souvent utilisée pour des problèmes simples de mécanique des fluides ou pour des problèmes nécessitant des temps de calcul relativement courts.

### II.3.2 La méthode des éléments finis

Est une méthode de discrétisation numérique qui consiste à approcher la solution d'un problème donné, exprimé sous forme variationnelle, par une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres (les valeurs de la fonction aux nœuds d'un maillage). Cette méthode présente des avantages et des inconvénients :

#### a) Avantages

- Elle permet le traitement de géométries complexes, car elle permet de construire des maillages adaptatifs.
- Elle est plus maîtrisée en termes de convergence et de stabilité.
- Elle peut être utilisée pour des problèmes non linéaires, ce qui en fait une méthode polyvalente.

#### b) Inconvénients

- Elle peut être complexe à mettre en œuvre, car elle nécessite la définition de fonctions d'interpolation pour les éléments du maillage.
- Elle peut avoir un coût en temps de calcul et en mémoire important, en particulier pour des problèmes à grande échelle ou en haute dimension. [26]

Malgré ces inconvénients, la méthode des éléments finis est largement utilisée en mécanique des fluides pour des problèmes de géométrie complexe, de comportement non linéaire ou nécessitant une précision élevée.

### II.3.3 Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est une méthode de discrétisation numérique qui consiste à diviser le domaine de calcul en volumes de contrôle, également appelés cellules. [26]

Cette méthode présente les caractéristiques suivantes :

#### II.3.3.1 Principe de méthode

- Le domaine de calcul est divisé en volumes de contrôle.
- Les équations aux dérivées partielles sont intégrées sur chaque volume de contrôle.
- Les nœuds principaux sont les points centraux des volumes de contrôle.

#### b) Avantages

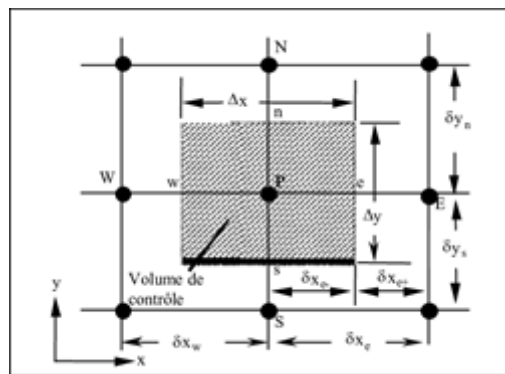
- La méthode des volumes finis peut être appliquée à une large gamme de problèmes, y compris des problèmes non linéaires et des problèmes avec des conditions aux limites complexes.

- Elle est considérée comme une méthode stable et précise pour la résolution des équations aux dérivées partielles.
- Elle permet également une utilisation efficace de la mémoire et une parallélisation facile du calcul.

### c) Inconvénients

- La méthode peut être plus difficile à mettre en œuvre que les méthodes des différences finies ou des éléments finis, car elle nécessite la définition des volumes de contrôle.
- Elle peut également nécessiter des ressources informatiques importantes pour les problèmes à grande échelle, car chaque volume de contrôle doit être résolu individuellement. [26]

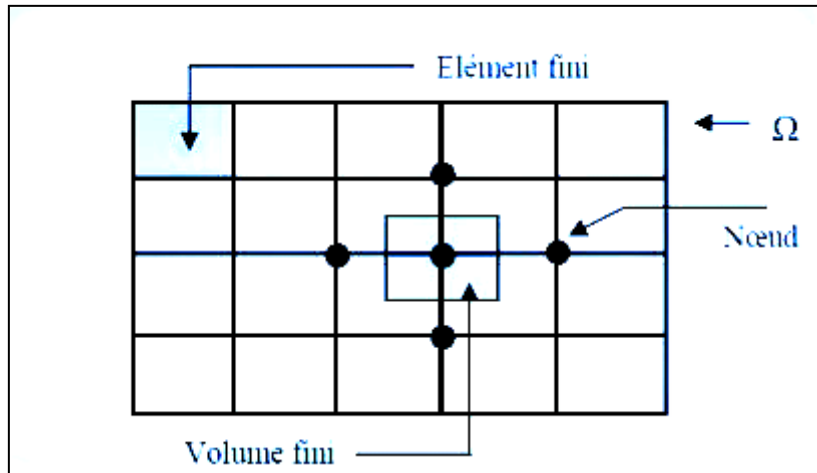
En résumé, la méthode des volumes finis est une méthode numérique populaire en mécanique des fluides pour la résolution des équations aux dérivées partielles. Elle permet de traiter une gamme de problèmes complexes, tout en offrant une précision et une stabilité élevées.



**Figure II.1** Schéma représentant volume de contrôle bidimensionnel.

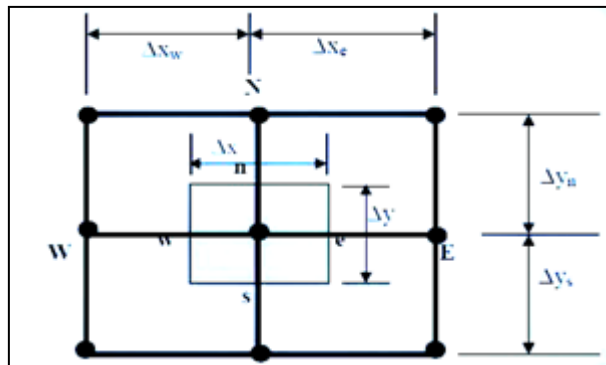
## II.4 Formulation bidimensionnelle par la MVF

Chaque élément contient un nombre fini de nœuds, typiquement quatre ou six dans le cas des éléments triangulaires. Un volume de contrôle entoure chaque nœud, et les équations aux différences finies sont intégrées sur ces volumes de contrôle pour obtenir un système d'équations linéaires qui peut être résolu numériquement. Cette méthode permet de traiter des géométries plus complexes que la méthode des différences finies, mais elle nécessite une mise en œuvre plus complexe et un coût de calcul plus élevé. (Figure II.2 )



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

Dans le cas décrit, le nœud principal est appelé "P" et est entouré de quatre nœuds voisins : "N" au nord, "S" au sud, "W" à l'ouest et "E" à l'est. Les points "e" et "w" sont localisés dans la direction de l'axe x, tandis que les points "n" et "s" sont localisés dans la direction de l'axe y.



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

Comme exemple simple on considère l'équation de Poisson dans le cas bidimensionnel:

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

Lorsqu'on projette cette équation sur une fonction de projection ayant une valeur unitaire, puis qu'on l'intègre sur le volume fini correspondant au nœud P, le résultat est le suivant :

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

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

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

Le choix de l'interpolation est le profil linéaire pour représenter la variation du potentiel  $\phi$  entre les nœuds adjacents, ce qui signifie que le résultat obtenu ne dépend que des valeurs nodales.

$$\begin{aligned} \left( \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e &= \varepsilon_e \left( \frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x_e} \right) \\ \left( \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w &= \varepsilon_w \left( \frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x_w} \right) \\ \left( \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n &= \varepsilon_n \left( \frac{\phi_N - \phi_P}{\Delta y_n} \right) \\ \left( \varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_{s1} &= \varepsilon_s \left( \frac{\phi_P - \phi_S}{\Delta y_s} \right) \end{aligned} \quad (\text{II.4})$$

Si l'on intègre la partie droite de l'équation (II.2), le résultat est le suivant :

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

De cette manière, l'équation algébrique finale peut être exprimée comme suit :

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

Avec :

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

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

Le résultat obtenu correspond à une équation algébrique qui relie l'inconnue du nœud principal "P" aux inconnues des nœuds adjacents "W", "E", "S" et "N" .



## II.5 Méthode de simulation de l'agitateur

### Modélisation géométrique avec Design Modeler

Les étapes suivies pour la réalisation du modèle sont les suivantes :

- Lancer le logiciel Design Modeler et créer un nouveau projet.
- Importer ou créer la géométrie de l'agitateur bipale en utilisant les outils de modélisation disponibles.
- S'assurer de représenter avec précision la géométrie de l'agitateur, y compris les pales, l'axe et les autres composants pertinents.
- Simplifier la géométrie pour la rendre 2D en supprimant les composants non essentiels dans la direction perpendiculaire à l'écoulement.
- Effectuer les modifications nécessaires pour obtenir la géométrie souhaitée.

### Préparation du maillage avec ANSYS Meshing

- Transférer le modèle géométrique de Design Modeler vers ANSYS Mesher.
- Dans ANSYS Mesher, définir les paramètres de maillage tels que la taille des éléments, les raffinements, les types d'éléments, etc.
- Générer un maillage 2D autour de l'agitateur en utilisant les outils de maillage appropriés. Vérifier la qualité du maillage et effectuer les ajustements nécessaires pour obtenir un maillage de qualité.

### Configuration de la simulation avec ANSYS Fluent 21 R2

- ❖ Transférer le maillage 2D d'ANSYS Mesher vers ANSYS Fluent.
- ❖ Lancer ANSYS Fluent 21 R2 et créer un nouveau cas de calcul 2D.
- ❖ Définir les propriétés du fluide, telles que la densité et la viscosité, ainsi que les conditions initiales et les conditions aux limites appropriées pour un écoulement laminaire.
- ❖ Paramétrer les options numériques, telles que les schémas de discrétisation, les itérations, etc.

### Résolution de la simulation

- Lancer le calcul et résoudre les équations de conservation des fluides pour obtenir les résultats de l'écoulement 2D laminaire.
- Surveiller la convergence du calcul en vérifiant les résidus.
- On peut également activer la post-convergence et effectuer des étapes supplémentaires pour raffiner les résultats, si nécessaire.

## Analyse des résultats

- Une fois la simulation terminée, analyser les résultats obtenus à l'aide des outils de post-traitement disponibles dans ANSYS Fluent.
- Étudier les champs de vitesse, de pression, etc., pour comprendre l'effet de la géométrie de l'agitateur sur l'hydrodynamique de l'écoulement.
- Extraire les données pertinentes pour obtenir des informations quantitatives sur l'écoulement, telles que les forces exercées sur l'agitateur, les vitesses, etc.

## II.6 Présentation des logiciels utilisés

### II.6.1 Design Modeler

ANSYS Design Modeler est un logiciel de prétraitement de la suite logicielle ANSYS utilisé pour créer des géométries 2D ou 3D pour les simulations numériques. Il permet de créer et modifier des modèles géométriques complexes à l'aide d'outils de conception tels que la construction par esquisse, la modélisation surfacique et volumique, la modification et la réparation de géométries importées, et la génération de géométries paramétriques. Design Modeler est souvent utilisé en conjonction avec les autres modules de la suite ANSYS pour effectuer des simulations numériques dans des domaines tels que la mécanique des fluides, la mécanique des solides, la thermique, l'électromagnétisme, etc. [27]

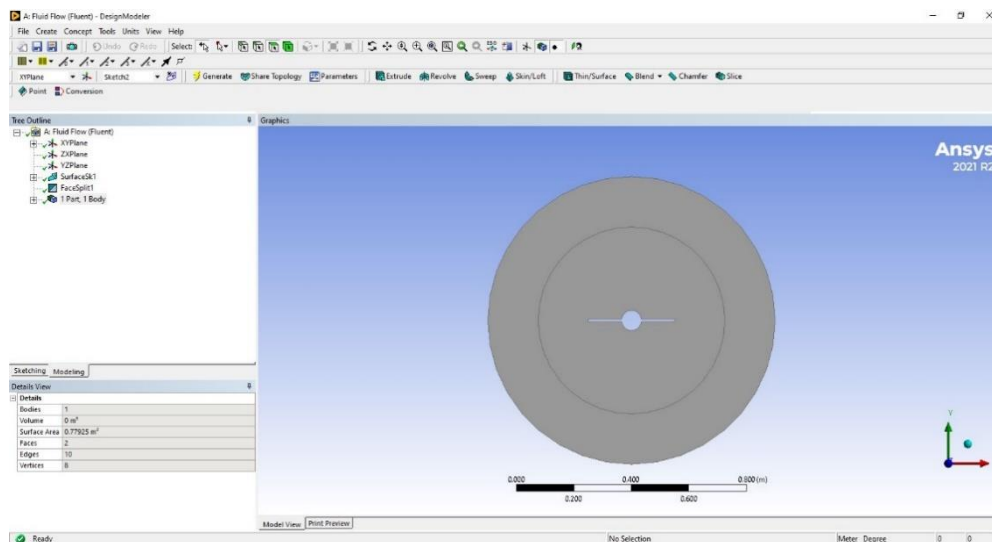
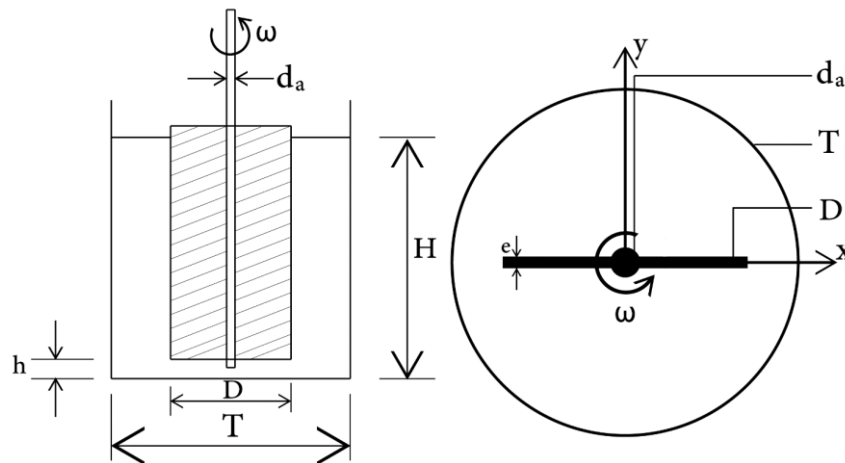


Figure II.4 : la géométrie de l'agitateur bipale

**II. 6.1.2 Géométrie du système d'agitation**

L'objectif est de réaliser une étude hydrodynamique portant sur un fluide visqueux newtonien en agitation dans une cuve cylindrique à fond plat, dépourvue de chicanes et équipée d'un agitateur à deux pales planes de grande surface et de forme simple. La hauteur de l'agitateur est équivalente à celle du niveau du liquide dans la cuve.



**Figure II.5** Représentation schématique de la cuve agitée.

Le tableau suivant (II.1) représente les différentes configurations géométriques réalisées pour notre étude.

**Tableau II.1 :** Dimensions de toutes les géométries réalisées.

Nombre de pales = 2		
D/T	da/T	e/T
0.35	0.07	0.01
0.5	0.07	0.01
0.66	0.07	0.01
0.82	0.07	0.01

### II.6.2 Présentation de d'ANSYS Mesher

ANSYS Mesher est un outil de maillage puissant et polyvalent. Il fait partie de la suite de logiciels ANSYS, largement utilisée dans le domaine de l'analyse numérique et de la modélisation en ingénierie. Le maillage est une étape cruciale dans le processus de simulation numérique, où une géométrie complexe est divisée en éléments plus petits (mailles) pour faciliter la résolution mathématique des équations de la physique appliquée. ANSYS Mesher offre une interface conviviale et intuitive pour créer, manipuler et générer des maillages adaptés à une variété de types de problèmes.

Voici quelques-unes des fonctionnalités clés:

- Préparation de la géométrie : ANSYS Mesher permet d'importer des géométries à partir de différents formats de fichiers (par exemple, fichiers CAO) et de les préparer pour le maillage. Il offre des outils pour nettoyer et réparer les géométries importées, ainsi que pour simplifier les modèles complexes.
- Génération automatique de maillages : L'un des avantages de cette application est sa capacité à générer automatiquement des maillages de haute qualité. Il propose différents algorithmes de maillage adaptatifs qui ajustent automatiquement la densité des mailles en fonction des caractéristiques de la géométrie et des besoins spécifiques de la simulation.
- Contrôle du maillage : L'utilisateur a un contrôle complet sur les paramètres du maillage. Il est possible de définir des critères de qualité de maillage pour assurer des résultats précis et fiables. ANSYS Mesher offre également des outils pour raffiner ou coarser le maillage à des endroits spécifiques, afin de mieux capturer les zones d'intérêt.
- Types de maillages : Le logiciel prend en charge une large gamme de types de maillages, y compris les maillages structurés, non structurés et hybrides. Il offre également des options pour les maillages surfaciques, les maillages volumiques et les maillages mixtes.
- Adaptation et optimisation de maillage : Ansys dispose d'outils avancés pour l'adaptation de maillage, permettant de raffiner ou de coarser automatiquement les mailles en fonction des résultats de la simulation. Il peut également être utilisé pour

l'optimisation de maillage, où les paramètres du maillage sont ajustés pour atteindre certains objectifs spécifiques.

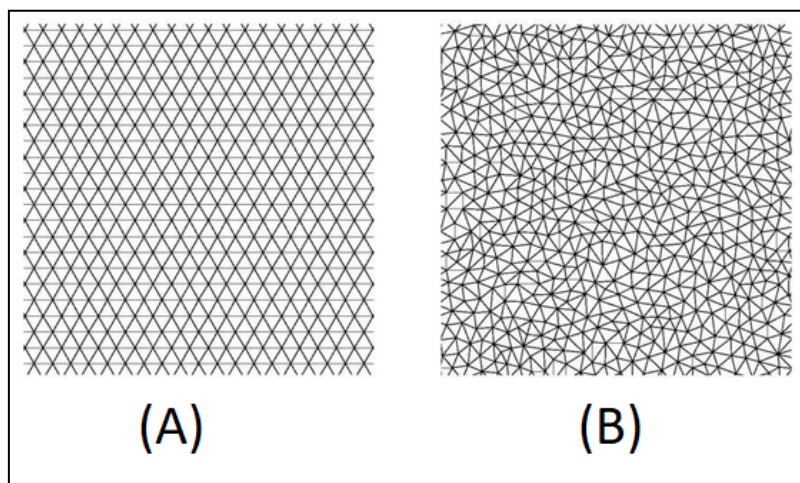
En résumé, ANSYS Mesher est un outil puissant pour la création et la manipulation de maillages dans le cadre des simulations numériques. Il offre une grande flexibilité et des fonctionnalités avancées pour s'adapter à une variété de problèmes d'ingénierie et de domaines d'application.

### II.6.2.1 Maillage

Sous ce logiciel on contrôle l'affichage de tous les types de maille : points (nœuds), lignes (barres), coques (Tris ou quads) et volumes (tétras, pyramides, prismes, hexa). Les sous-ensembles de cette Catégorie sont les mêmes que pour la géométrie. [28]

### II.6.2.2 Différents types de maillage

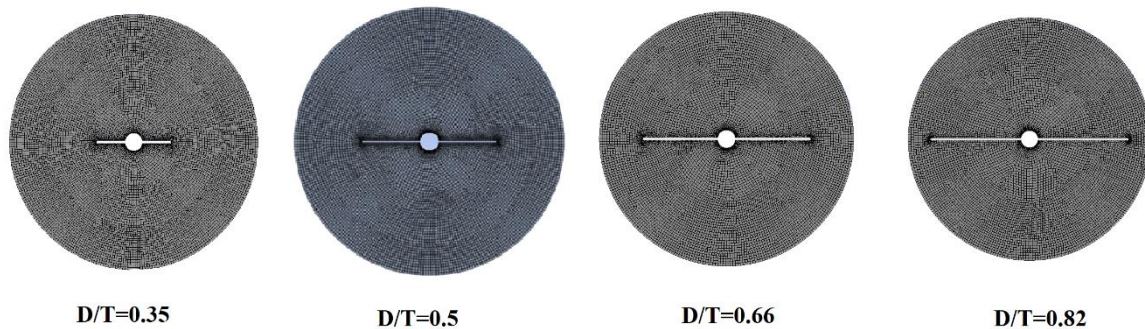
La connectivité d'un maillage peut varier en fonction du type de maillage utilisé. La connectivité est importante car elle détermine comment les éléments voisins interagissent et affecte la précision et la stabilité de la solution numérique [28]



**Figure II.6 :** a) Maillage structuré (gauche), b) maillage non structuré (centre)

### II.6.2.3 Etude de maillage

Le maillage utilisé pour modéliser la cuve et l'agitateur est un maillage non structuré de type tétraèdre/hybride. Ce maillage a été adapté pour être plus fin au niveau des parois de l'agitateur, afin de mieux représenter les gradients de vitesses à cet endroit. La création du maillage a été effectuée à l'aide du pré-processeur ANSYS Meshing .

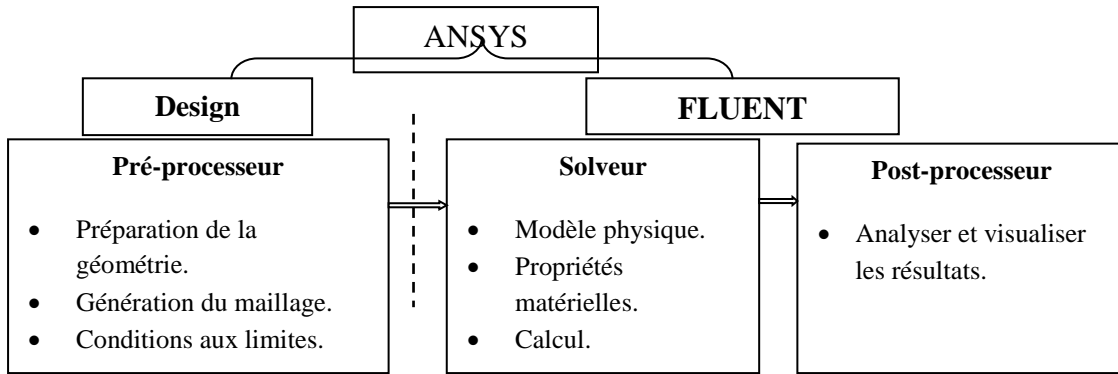


**Figure II.7** : Maillage des sections horizontales de la cuve

## II. 7 Présentation du code de calcul Fluent

Fluent est un code de calcul CFD (Computational Fluid Dynamics) largement utilisé pour résoudre numériquement des problèmes d'écoulement des fluides. Il est développé par ANSYS, Inc. et offre des fonctionnalités avancées pour la modélisation, la simulation et l'analyse des écoulements. Il est basé sur la méthode des volumes finis, qui permet de discrétiser le domaine d'étude en une série de cellules pour résoudre les équations de conservation des masses, des quantités de mouvement, de l'énergie, etc. Le logiciel utilise des schémas numériques précis pour approximer les termes différentiels des équations et résoudre le système d'équations résultant.

Fluent dispose d'une interface graphique conviviale qui facilite la création de la géométrie du domaine, la définition des conditions aux limites, la sélection des modèles physiques et la configuration des paramètres de simulation. Il offre également des options pour visualiser et analyser les résultats de la simulation, notamment les champs de vitesse, de pression, de température, etc. [29]



**Figure II.8** : Structure de base du code "FLUENT".

### II.7.1 Les conditions aux limites

Les conditions aux limites jouent un rôle crucial dans la définition d'un problème et garantissent de trouver une solution unique. Elles consistent à fournir des informations sur les variables dépendantes de l'écoulement aux frontières du domaine et à spécifier les flux de masse, de quantité de mouvement, d'énergie, etc., sur ces frontières.

Pour définir les conditions aux limites, il est nécessaire de :

- Identifier les positions des frontières du domaine, telles que les entrées, les parois et les symétries.
- Fournir les informations spécifiques à ces frontières, en fonction du type de conditions aux limites et des modèles utilisés.
- S'assurer que les informations requises pour les conditions aux limites sont disponibles et les localiser là où les données d'écoulement sont connues et peuvent être raisonnablement approchées [29].

Des conditions aux limites inappropriées peuvent avoir un impact sur les résultats de la simulation.

### II. 8 Hypothèses du problème :

Nous allons commencer notre étude en prenant en considération les hypothèses suivantes :

- Le fluide est considéré comme visqueux newtonien et incompressible, avec une viscosité constante  $\mu$ .
- Voici quelques valeurs typiques des propriétés physiques du fluide glyciné à différentes concentrations de glycérine

$$\text{Densité } d = 1259.9 \text{ kg/m}^3, \text{Viscosité } \mu = 0.799 \text{ m/s}$$

- Le nombre de Reynolds (Re) est inférieur à 50 afin de maintenir un régime d'écoulement laminaire, comme l'ont confirmé les travaux. [1]

- La distance  $h$  entre le fond de la cuve et le bas de l'agitateur est petite par rapport aux autres dimensions. De plus, la hauteur de liquide  $H$  est supposée être suffisamment grande pour que les effets d'extrémité dus au fond de la cuve et à la surface libre soient négligeables, permettant ainsi un écoulement principalement bidimensionnel.
- Notre étude se concentre uniquement sur l'aspect hydrodynamique de la cuve agitée, en supposant que le système est isotherme.
- Le régime d'écoulement est permanent, car l'agitateur génère un écoulement stable où les composantes de la vitesse ne varient pas dans le temps. La solution recherchée est donc celle du régime permanent, car le régime stationnaire s'établit rapidement.

## II. 9 Adimensionnalisation du système :

Les équations sont adimensionnelles avec :

- Le rayon de la cuve  $T/2$  comme longueur caractéristique.
- $\pi NT$  comme vitesse caractéristique de l'écoulement.

$$\bar{v} = \frac{V}{\pi NT} \quad (\text{II.9})$$

$$\bar{r} = \frac{2r}{T} \quad (\text{II.10})$$

$$R_e = \frac{\rho \omega D^2}{\mu} \quad (\text{II.11})$$

## II. 10 Conditions aux limites:

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 de vitesse  $V_r$  est nulle sur toutes les parois.
- La composante tangentielle du vecteur de vitesse  $V_\theta$  est nulle sur la paroi extérieure (la cuve).
- La composante tangentielle du vecteur de vitesse  $V_\theta$  est égale à  $r^*$  sur les parois mobiles (l'arbre d'agitation, l'agitateur).



**II. 11 Conclusion :**

Nous avons présenté en détail les équations, les hypothèses et les conditions aux limites qui constituent la base de l'approche numérique utilisée pour prédire le champ d'écoulement d'un fluide visqueux newtonien dans une cuve agitée. Dans le prochain chapitre, nous présenterons les résultats obtenus au cours de notre simulation.



# Chapitre III :

Résultat et discussion

### III.1 Introduction

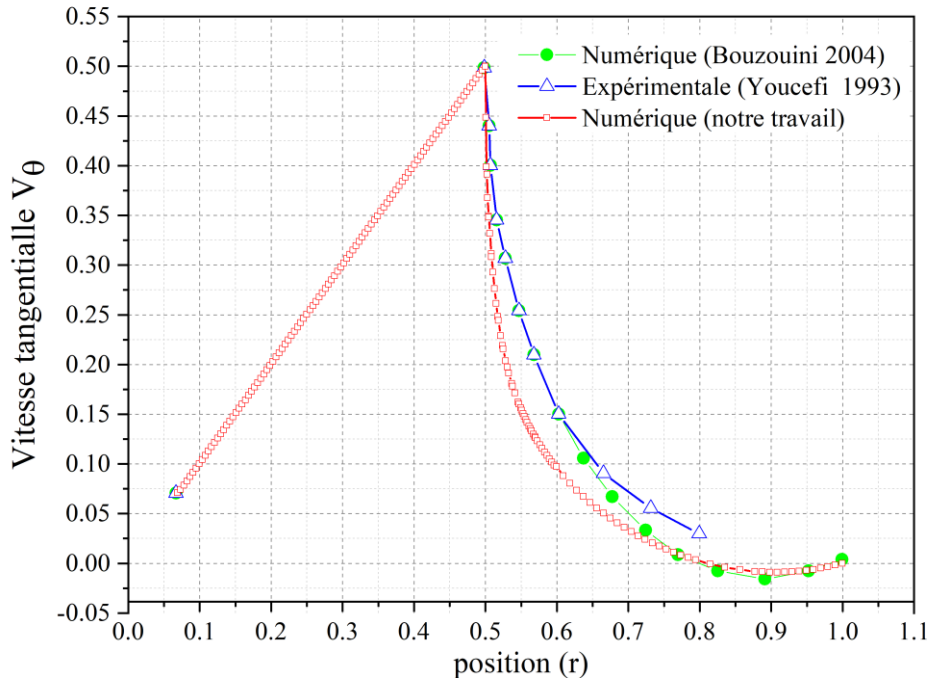
La géométrie du système d'agitation bipale utilisée se compose d'une cuve cylindrique en forme de deux pales planes verticales dont la hauteur est à-peu-près égale à celle du liquide dans la cuve. Ces deux pales sont fixées sur un arbre central tubulaire de dimension  $a/d/T=0.07$ .

Le code de calcul utilisé dans notre travail (FLUENT 21 R1) sert à obtenir des résultats très réalistes. Nous exposons dans la suite ceux qui nous semblent les plus pertinents. Cette étude numérique nécessite la réalisation de plusieurs géométries avec des rapports  $D/T$  différents et leur influence avec le nombre de Reynolds sur la nature des écoulements. Le rapport  $D/T$  prend les valeurs : 0.1 , 1 et 10. A la fin une comparaison avec les résultats expérimentaux de YUCEFI A. 1993 est effectuée.

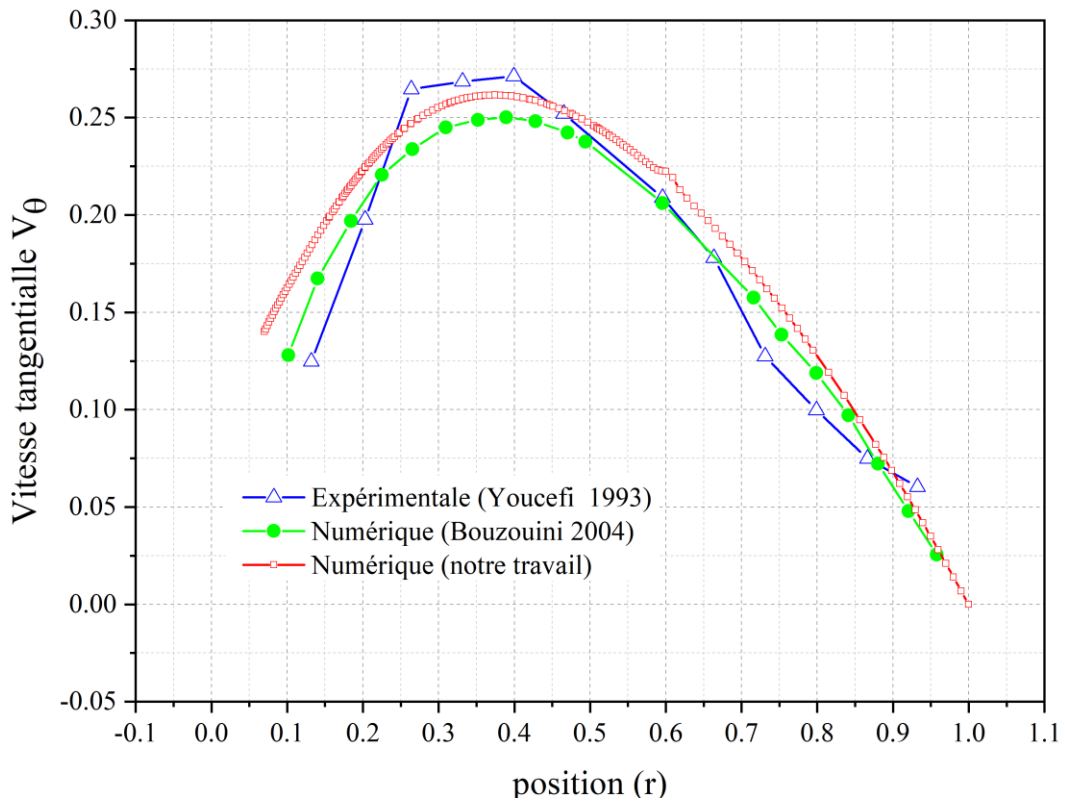
les dimensions de toutes les configurations géométriques utilisées dans cette étude ( voir Tableau II.1)

### III.2 Validation de résultats obtenus

Pour valider une simulation numérique, il est très important de s'appuyer sur une comparaison entre les résultats obtenus et ceux de l'expérience obtenus par d'autres travaux ayant étudié le même problème. Les figures III.1 et III.2 présentent la variation de la vitesse tangentielle en fonction de la position  $r$  d'une part sur la pale et son prolongement ( $\theta = 0$ ) et d'autre part sur la médiatrice ( $\theta = 90$ ) de l'agitateur donnent une confrontation des résultats numériques obtenus et ceux des expériences de YUCEFI A. 1993, BOUZOUINI M.2004 et KAMLA Y. 2016 .Ces résultats concernent, la répartition des vitesses tangentielle sur la pale et son prolongement. On peut remarquer qu'il ya une bonne concordance entre nos résultats et ceux de l'expérience.



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

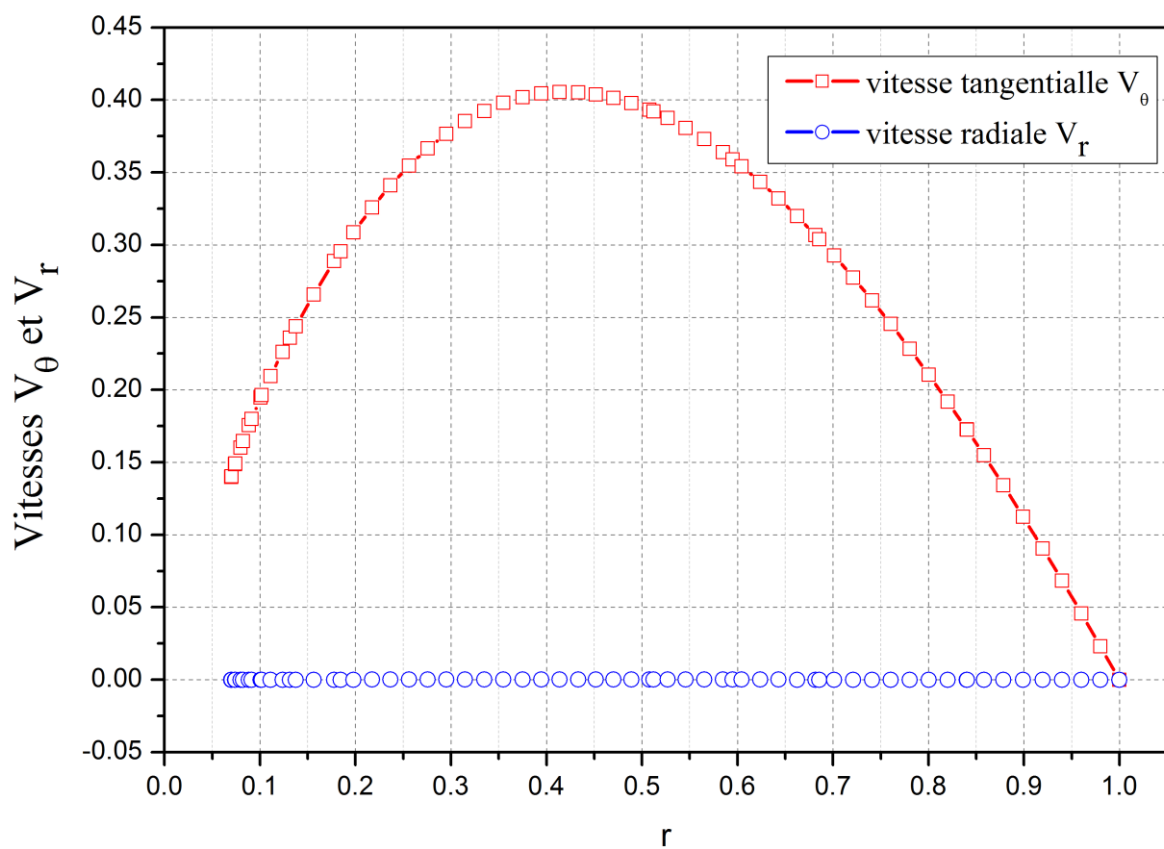


**Figure III.2** Évolution de la vitesse tangentielle sur la médiatrice de l'agitateur ( $Re=1$ ,  $\theta=90$ )

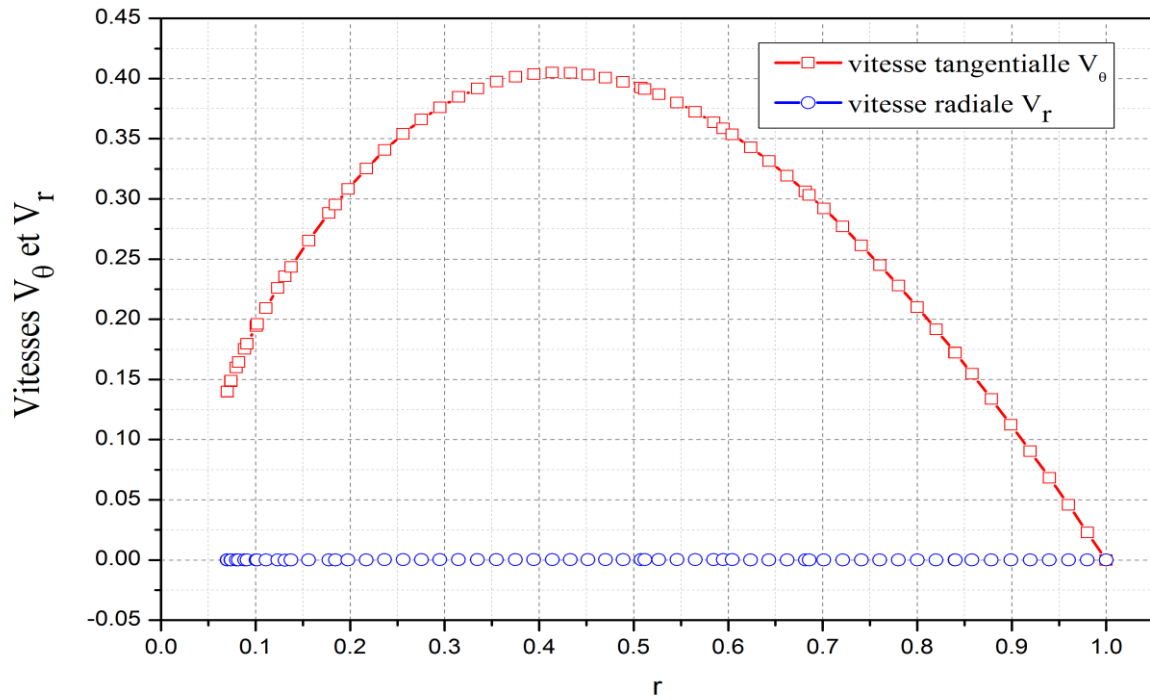
### III.3 Composantes de la vitesse

Les figures III.3 à III.5 montrent la variation de la vitesse tangentielle et la vitesse radiale sur la pale et la médiatrice en fonction de la position radiale. Nous avons varié le nombre de Reynolds des écoulements, on a établi que la vitesse radiale  $V_r$  est presque nulle dans tous les points de la cuve.

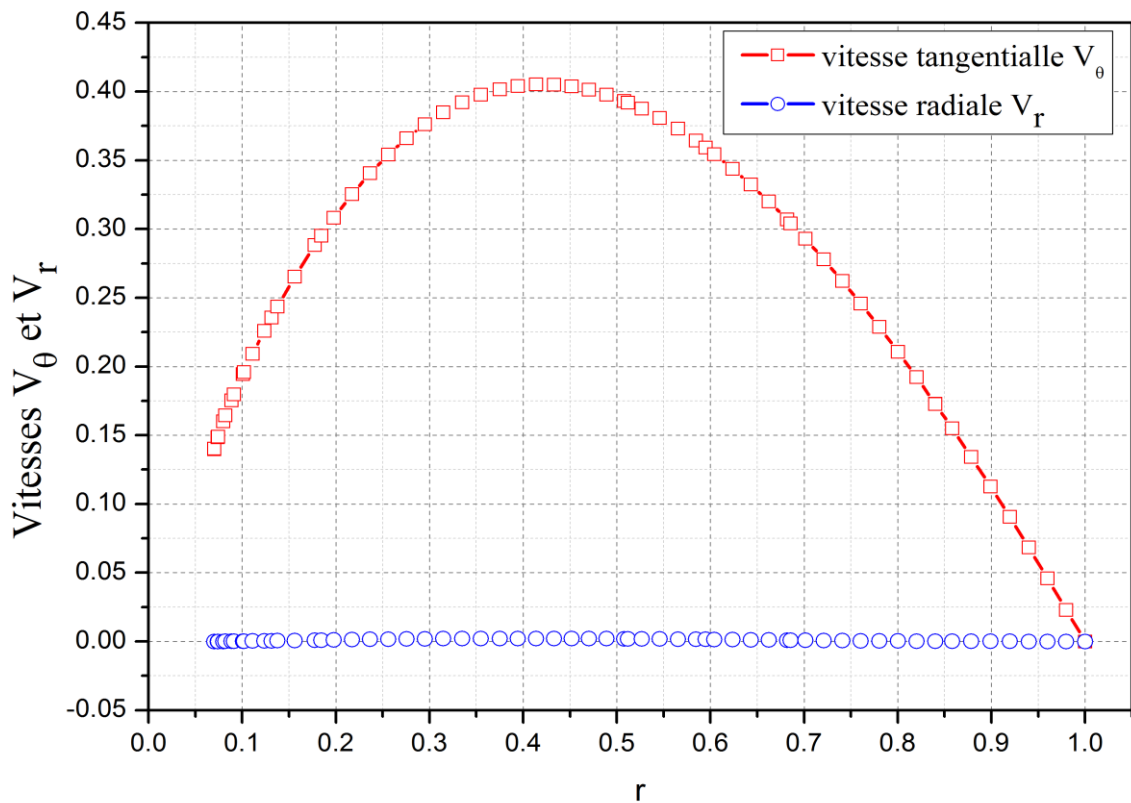
Quel que soit la valeur du nombre de Reynolds (0.1 à 10) la vitesse radiale est confinée entre 0.032 à 0.5 les figures de III.6 à III.8 représentent l'évolution de la vitesse radiale sur la pale et la médiatrice. Le résultat est que l'écoulement sur le bipale est généralement un écoulement tangential.



**Figure III.3** Evolution de la vitesse tangentielle  $V_\theta$  et la vitesse radiale  $V_r$  sur la médiatrice de l'agitateur à  $Re = 0.1$   $D/T = 0.66$ .



**Figure III.4** Evolution de la vitesse tangentielle  $V_\theta$  et la vitesse radiale  $V_r$  sur la médiatrice del'agitateur à  $Re = 1$   $D/T = 0.66$ .



**Figure III.5** Evolution de la vitesse tangentielle  $V_\theta$  et la vitesse radiale  $V_r$  sur la médiatrice del'agitateur à  $Re = 10$   $D/T = 0.66$ .

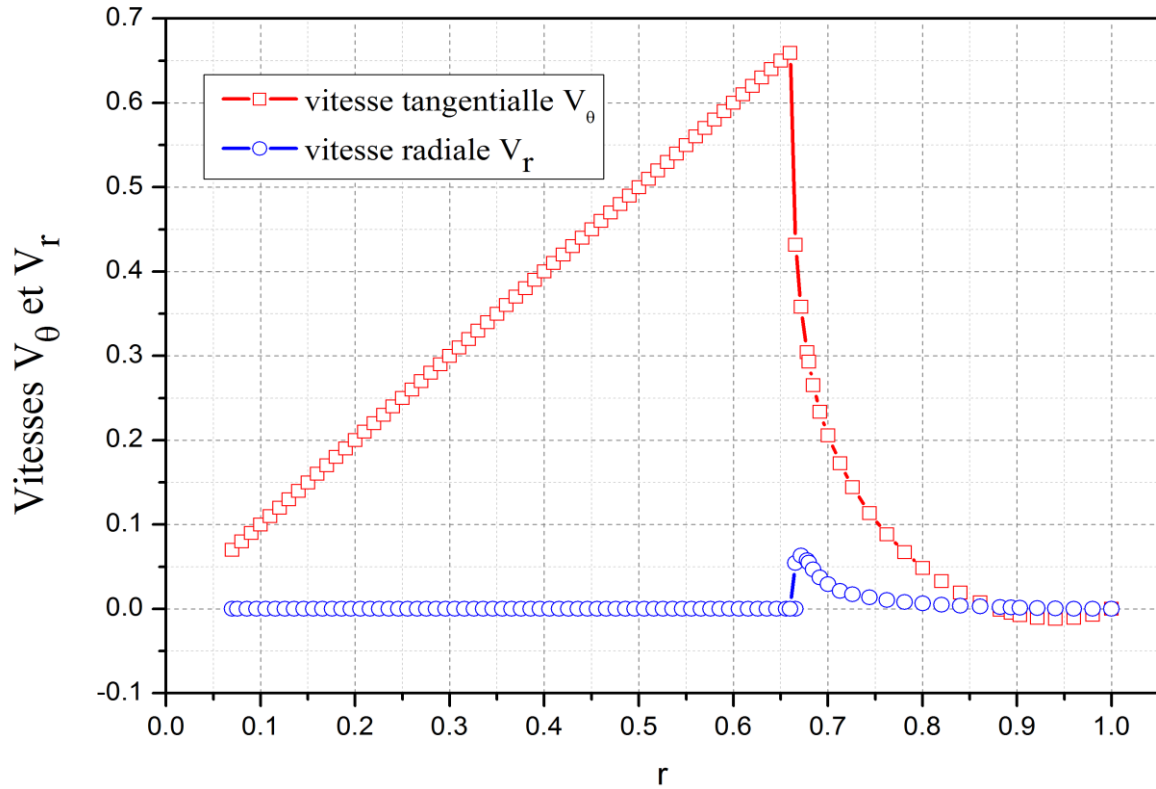


Figure III.6 Evolution de la vitesse tangentielle  $V_\theta$  et la vitesse radiale  $V_r$  sur la pale à  $Re = 0.1$   
 $D/T=0.66$

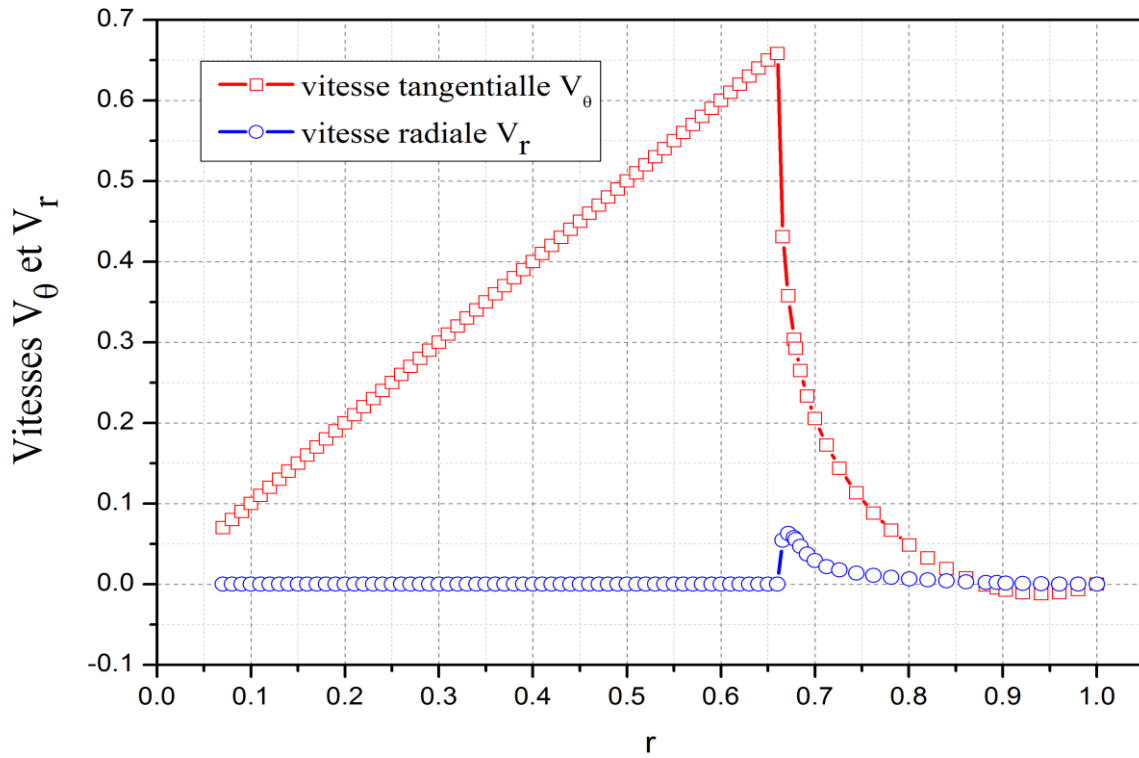
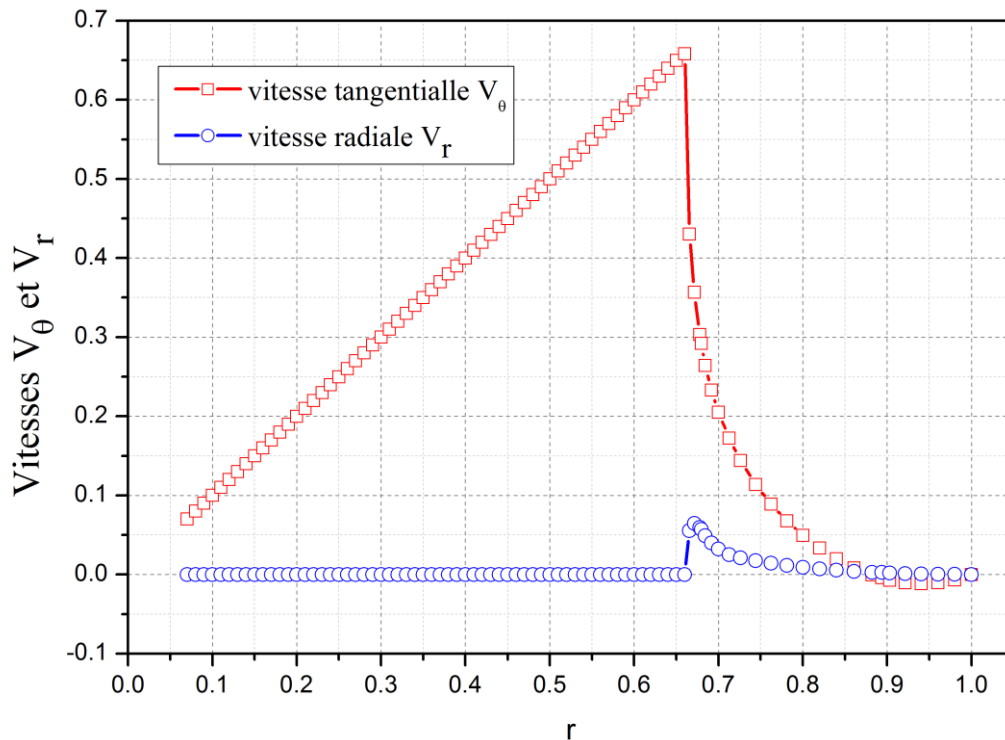


Figure III.7 Evolution de la vitesse tangentielle  $V_\theta$  et la vitesse radiale  $V_r$  sur la pale à  $Re = 1$   
 $D/T=0.66$



**Figure III.8** Evolution de la vitesse tangentielle  $V_{\theta}$  et la vitesse radiale  $V_r$  sur la pale à  $Re=10$   
 $D/T=0.66$

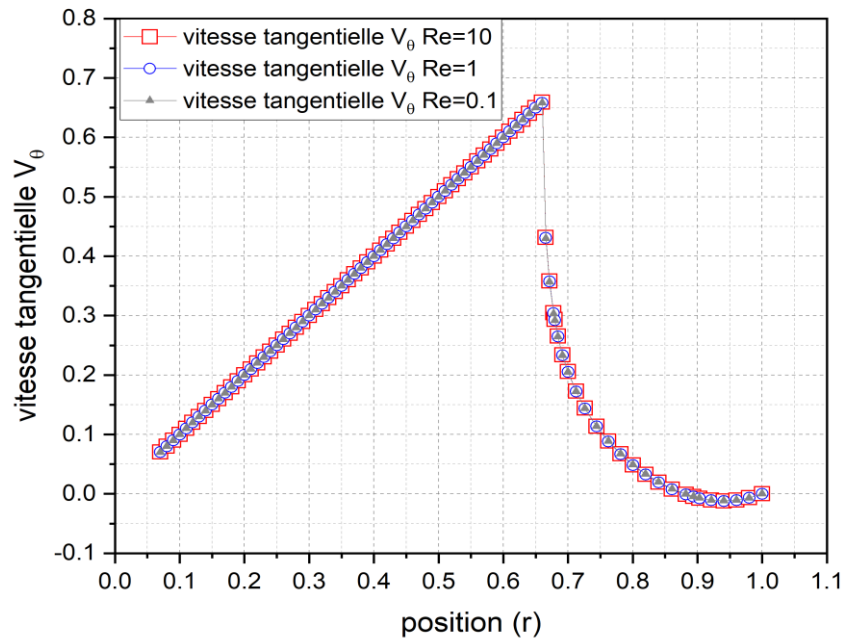
#### III.4 Influence du $Re$ sur différentes vitesse tangentielle $V_{\theta}$

Lorsque le nombre de Reynolds ( $Re$ ) augmente, cela peut avoir une influence sur le rapport géométrique de l'agitateur en termes de diamètre. Les interactions entre l'agitateur et le fluide sont modifiées, ce qui peut avoir un impact sur la performance de l'agitateur. Des valeurs élevées de  $Re$  sont souvent associées à une meilleure agitation et à une dispersion plus efficace des composantes dans le fluide. En d'autres termes, un nombre de Reynolds élevé favorise généralement une agitation plus intense et une meilleure capacité de mélange de l'agitateur.

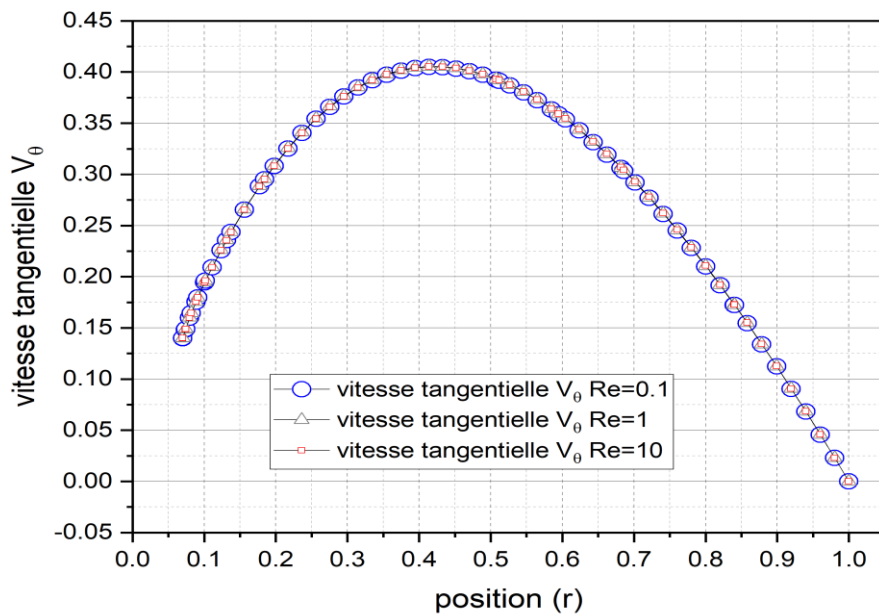
La vitesse tangentielle croît plus rapidement près de l'axe au niveau de la médiatrice que le long de la pale, atteignant ainsi sa valeur maximale. Cependant, cette valeur maximale diminue en se rapprochant de la paroi de la cuve. L'inclinaison de cette diminution est plus faible que celle de la partie de la courbe où la vitesse augmente.

Les deux figures (III.9 et III.10) illustrent l'influence du nombre de Reynolds sur les profils des vitesses tangentielles dans le plan de la pale. Sur ces figures, on peut observer que la vitesse est linéaire et égale à la vitesse de la pale. Cette variation de vitesse dépend du nombre de Reynolds et peut être visualisée graphiquement.





**Figure III.9** Influence du nombre de Reynolds évolution de la vitesse tangentielle sur la pale de l'agitateur.  $D/T=0.66$



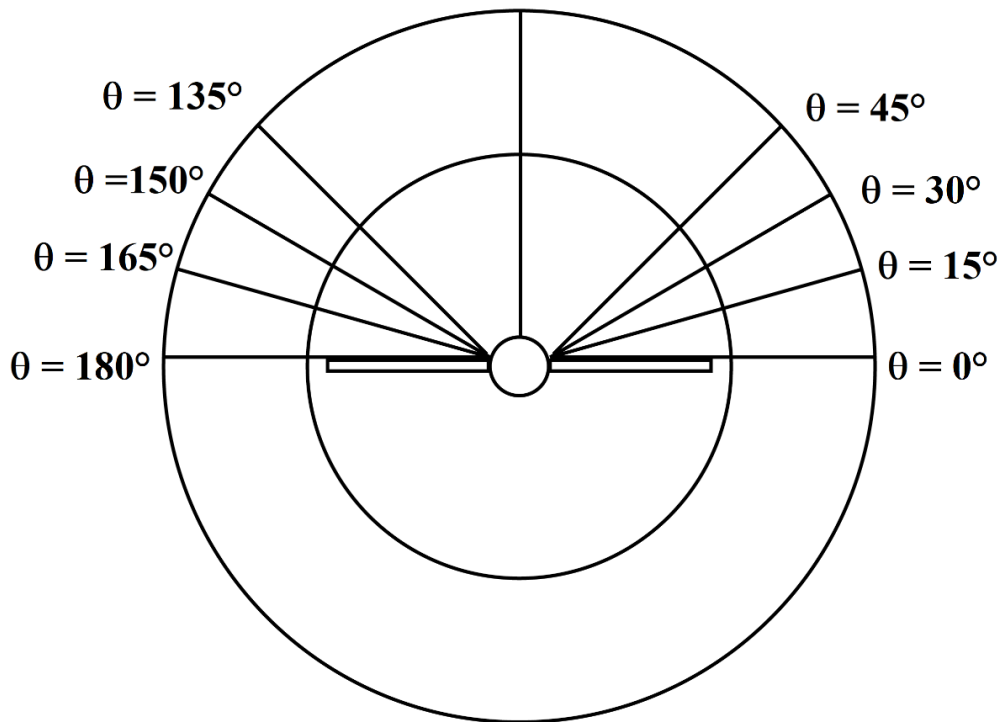
**Figure III.10** Influence du nombre de Reynolds évolution de la vitesse tangentielle sur la médiatrice de l'agitateur.  $D/T=0.66$

### III.5 Différente position angulaire des rayons

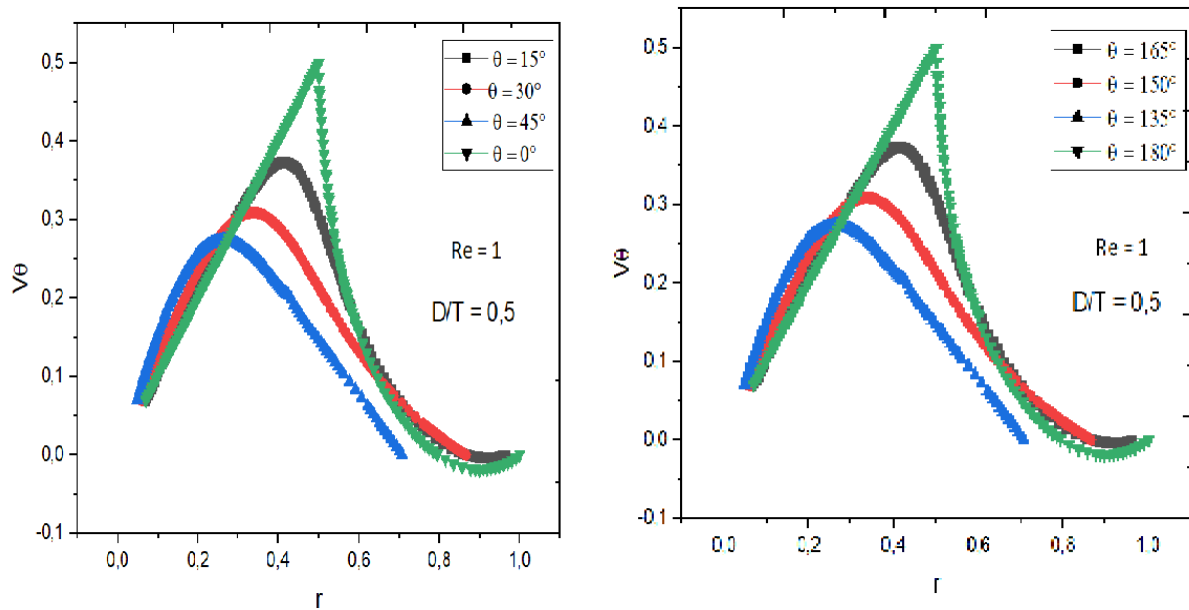
Après avoir déterminé les vitesses tangentielles dans les deux quarts dans notre géométrie (premier quart de  $q=0$  à  $q=90^\circ$  ; deuxième quart de  $q=90^\circ$  à  $q=180^\circ$ ) les vitesses sont égales, ça signifie qu'il suffit de les déterminer dans le premier quart et les déduire par symétrie dans les autres quarts voir (figure III.12).

**Tableau III.2** : Position angulaire des rayons R1 à R8

R	R	R	R	R	R	R	R	R
$\Theta$	0	15	30	45	135	150	165	180



**Figure III.11** Représentation des rayons R1 à R8



**Figure III.12** Évolution de la vitesse tangentielle  $V_{\theta}$  sur différents rayons

### III.6 Influence de géométrie sur différentes vitesse tangentielle $V_{\theta}$

#### III.6.1 rapport $D/T$

Les résultats numériques liés à l'influence du rapport géométrique  $D/T$ , qui représente le rapport entre le diamètre du mobile d'agitation ( $D$ ) et le diamètre de la cuve ( $T$ ), jouent un rôle important dans le régime hydrodynamique et le mélange du fluide.

Ce rapport géométrique influence à la fois la longueur du mobile d'agitation et la surface du fluide raclée par le mobile. Lorsque le rapport  $D/T$  augmente, cela signifie que le mobile d'agitation devient plus large par rapport à la cuve. Cela a pour effet d'augmenter la surface du fluide raclée par le mobile lors de son mouvement. En conséquence, les vitesses axiale et tangentielle du fluide sont fortement proportionnelles à ce rapport géométrique  $D/T$ . Plus le rapport  $D/T$  est élevé, plus les vitesses axiale et tangentielle sont élevées. Cela a des implications importantes sur le régime hydrodynamique du fluide et le mélange. Un rapport  $D/T$  plus élevé entraîne un régime hydrodynamique plus actif, avec des vitesses plus élevées du fluide autour du mobile d'agitation. Cela favorise un mélange plus efficace du fluide, permettant une meilleure dispersion des composants, une agitation plus intense et une meilleure homogénéité.

Ainsi, le rapport D/T peut être utilisé comme un paramètre qualificatif du mélange. Une augmentation du rapport D/T peut indiquer un régime hydrodynamique plus intense et un potentiel de mélange amélioré. Les figures III.13. et III.14 fournissent des informations visuelles sur les effets de ce rapport géométrique sur le régime hydrodynamique et le mélange du fluide.

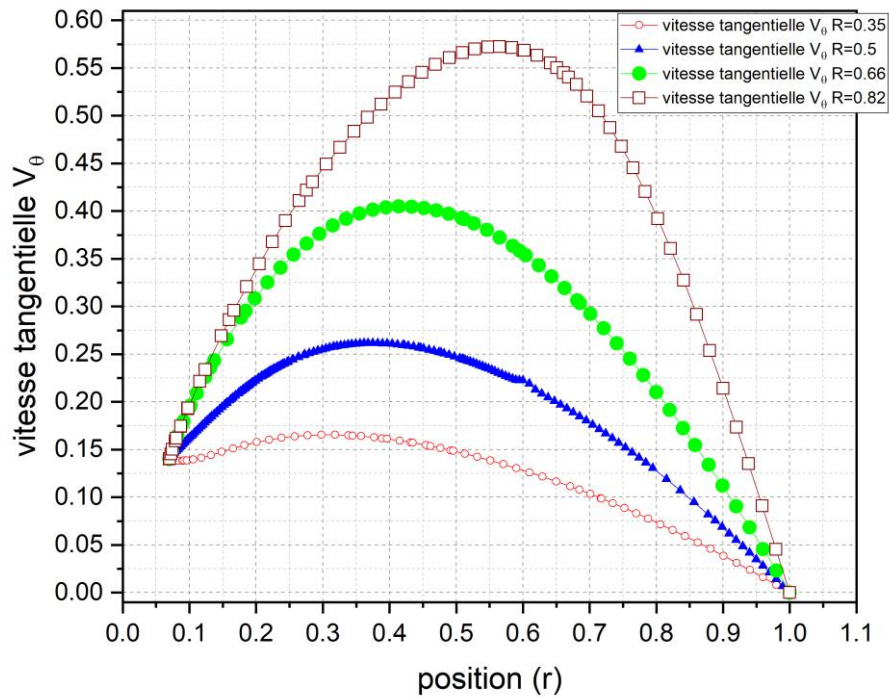


Figure III.13 Vitesse tangentielle pour différents rapport géométrique D/T ,  $Re=1$  et  $\Theta=90^\circ$

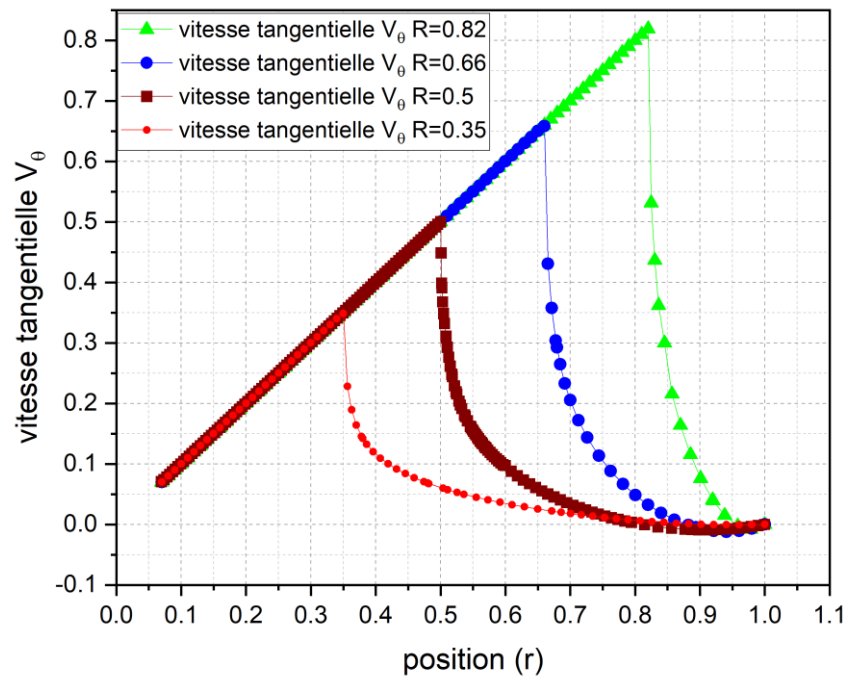


Figure III.14 Vitesse tangentielle pour différents rapport géométrique  $D/T$ ,  $Re=1$  et  $\Theta=0^\circ$

### III.7 Contours des vitesses

Sur la représentation des contours de la vitesse radiale et tangentielle pour différents rapport géométrique, nous observons une concentration de vitesse au niveau de l'agitateur, en particulier à l'extrémité de la pale.

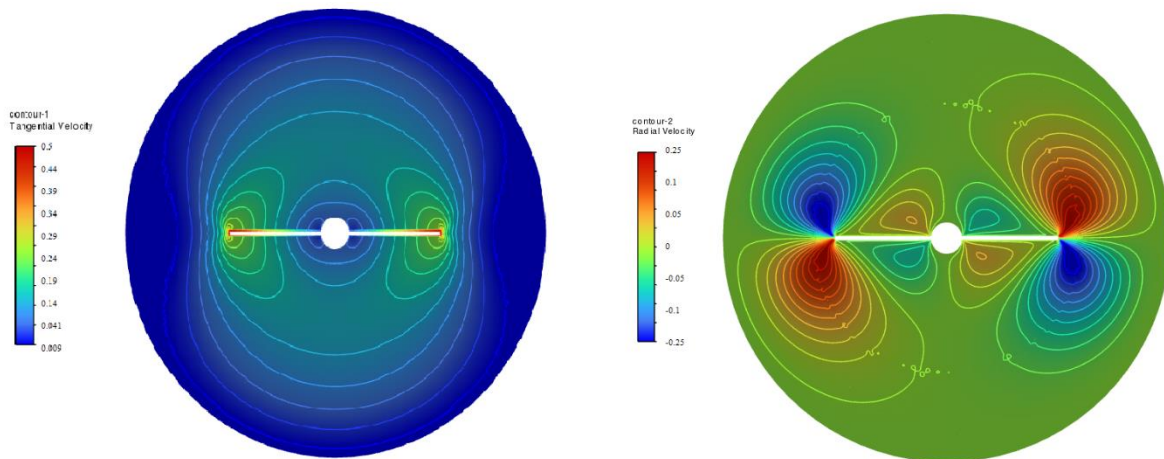


Figure III.15 Contour de vitesse radiale et vitesse tangentielle à  $Re = 1$ ,  $D/T=0.5$



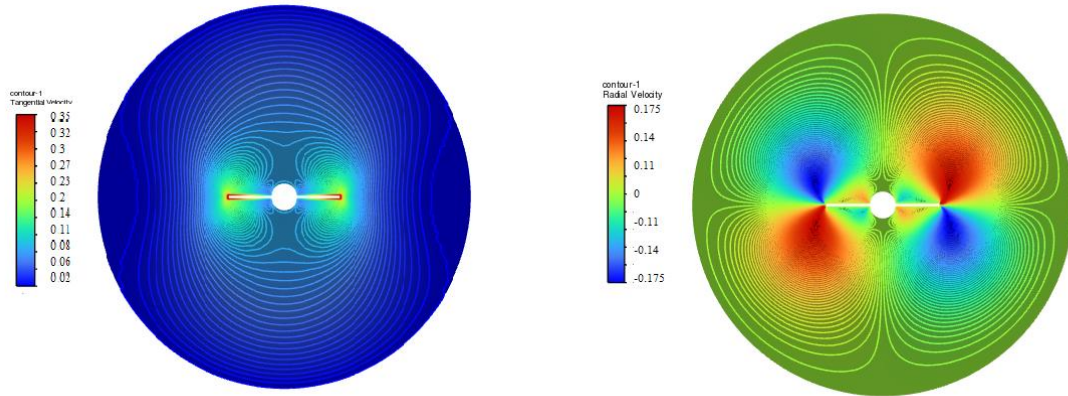


Figure III.16 Contour de vitesse radiale et vitesse tangentielle à  $Re = 1$  ,  $D/T=0.35$

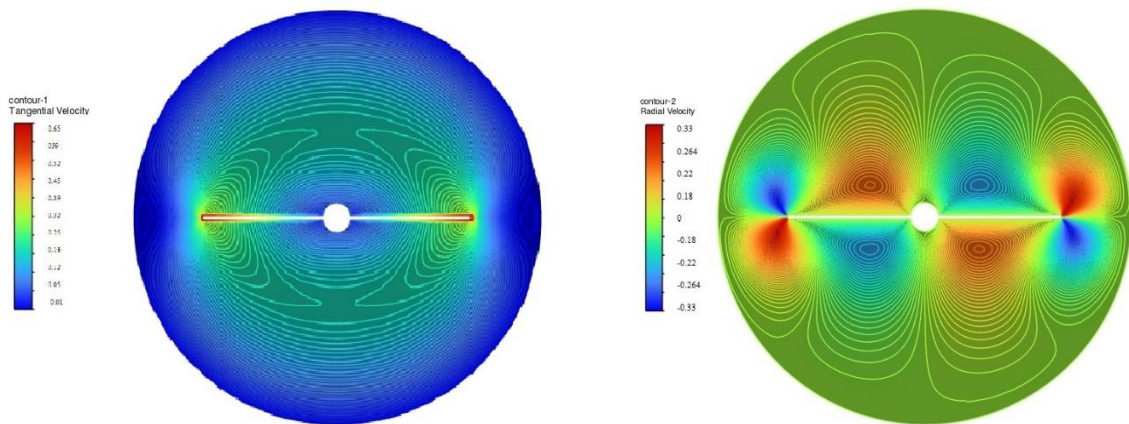


Figure III.17 Contour de vitesse radiale et vitesse tangentielle à  $Re = 1$  ,  $D/T=0.66$

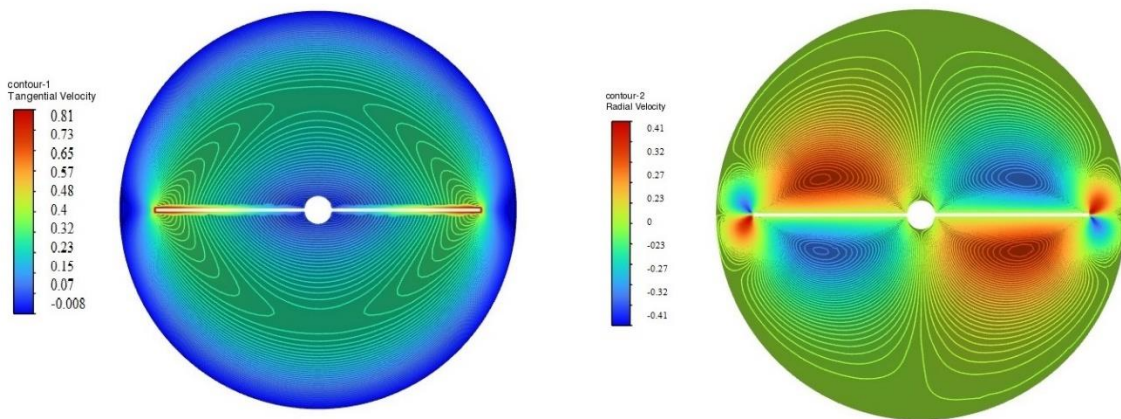
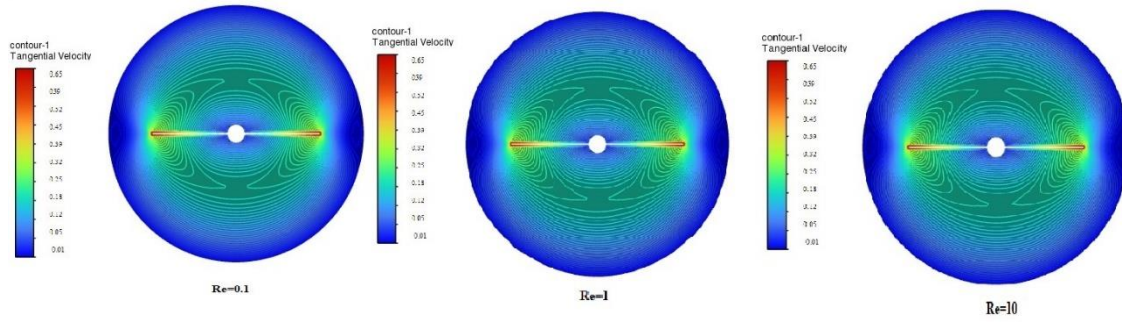
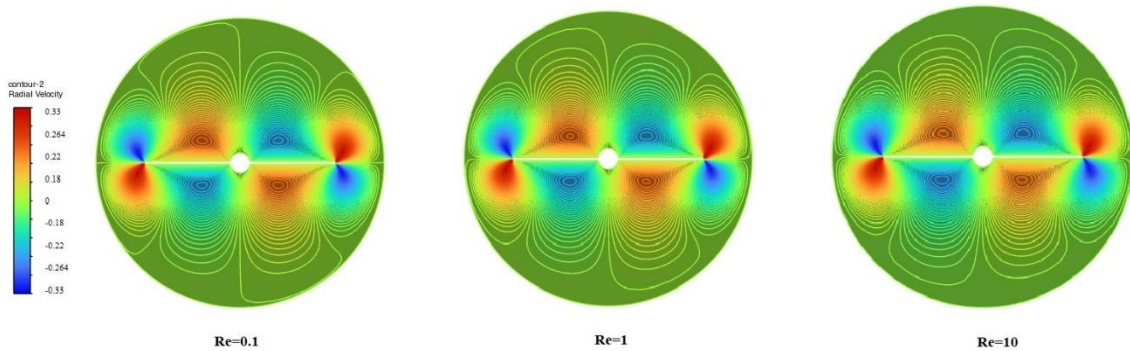


Figure III.18 Contour de vitesse radiale et vitesse tangentielle à  $Re = 1$  ,  $D/T=0.82$



**Figure III.19** Contour de vitesse tangentielle,  $D/T=0.66$



**Figure III.20** Contour de vitesse radiale,  $D/T=0.66$

### III.8 Conclusion

Les résultats présentés ici sont issus de nos simulations dans le contexte de l'agitation d'un fluide newtonien visqueux en régime laminaire. Ces simulations ont été réalisées en utilisant un bipale de différentes tailles pour générer les écoulements.

Il convient de souligner tout d'abord la bonne concordance observée entre nos résultats numériques et ceux de la bibliographie. L'analyse a été portée sur l'effet de la taille de l'agitateur sur la structure des écoulements. Lorsque l'agitateur est de grande taille, l'écoulement tangential prédomine, ce qui caractérise le comportement hydrodynamique. En revanche, pour un bipale de petite taille, l'écoulement devient fortement radial.



**Conclusion**

**Générale**



### Conclusion Générale

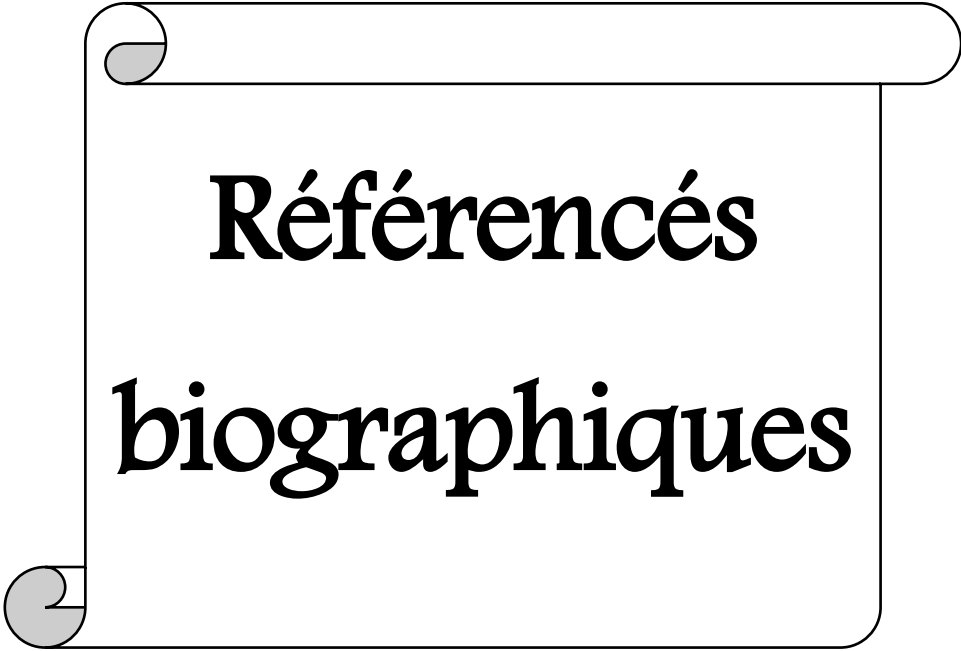
Notre travail a pour objectif d'analyser l'influence des différentes configurations géométriques sur le comportement hydrodynamique d'une opération d'agitation mécanique dans une cuve agitée contenant un fluide visqueux newtonien en régime laminaire. Pour résoudre les équations régissant l'écoulement, nous avons utilisé le logiciel de calcul ANSYS Fluent (version 21 R1), qui se base sur la méthode des volumes finis.

Tout d'abord, nous avons validé nos résultats numériques en les comparant aux résultats expérimentaux et numériques de la littérature sous les mêmes conditions.

La simulation montre que les écoulements générés par les pales du mélangeur sont des écoulements plans, ce qui confirme l'hypothèse couramment acceptée de la bidimensionnalité de ces écoulements. L'écoulement dominant est de nature tangentielle, car les composantes de la vitesse radiale sont négligeables par rapport aux composantes de la vitesse tangentielle. La variation du nombre de Reynolds n'a qu'une influence imperceptible sur la vitesse tangentielle.

Les valeurs de la vitesse tangentielle le long de la pale augmentent en partant de l'axe de l'agitateur jusqu'à l'extrémité de la pale. À l'extrémité de la pale, la vitesse atteint une valeur maximale, puis diminue jusqu'à devenir nulle dans l'espace confiné entre l'extrémité de la pale et la paroi de la cuve. Après avoir déterminé les vitesses tangentes dans les deux quarts de notre géométrie, où elles sont équivalentes, il suffit d'étudier un seul quart et d'extrapoler symétriquement les résultats pour les autres positions angulaires.

Pour la suite de ce travail et comme perspectives, il est important de passer au stade des dispositifs expérimentaux pour proposer des géométries capables d'attirer l'intérêt des industriels. La deuxième perspective est de proposer une géométrie optimale, avec peut-être des courbures, capable de générer un très bon mouvement de fluide avec une consommation moindre en matière de puissance.

A decorative scroll frame with rounded corners and a slight shadow, containing the text.

**Référencés**  
**biographiques**

- [1] A. Youcef, «Etude Expérimentale de l'Écoulement d'un Fluide Viscoélastique autour d'un agitateur Bipale en Cuve Agitée». Thèse de Doctorate, INP de Toulouse, France (1993).
- [2] Abid M, Catherine X, Bertrand J. «Modelling of the 3D hydrodynamics on 2-blades impellers in stirred tanks filled with a highly viscous fluid». *Can. J. Chem. Eng.*, 72, 184-193, 1994.
- [3] Nagata, S, Yamamoto.K. (1966), Criteria for the Scaling Up of Mixing Vessels Department of Chemical Engineering Tokyo University, 76-85
- [4] Michel ROUSTAN et Jean-Claude PHARAMOND, Alain LINE. Opérations unitaires agitation et mélange [www.techniques-ingenieur.fr](http://www.techniques-ingenieur.fr) Réf. Internet : 42486 | 2nde édition
- [5] H. Ameer, Mohamed Bouzit et Mustapha Halmaoui «numerical study of fluid flow and power consumption in a stirred vessel with a scaba Scaba 6SRGT impeller» *Chem. Eng.*, 32(4), 351-366, 2011.
- [6] Paul Alexandre Mosser, 2012. Comparaison de méthodes de détection du vortex dans des cuves agitées. Phd these en génie chimique. Ecole polytechnique de Montréal.
- [7] 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.
- [8] Greenville R.K., Tilton J.N., 1996. A new theory improves the correlation of blend time data from turbulent jet mixed vessel. *Trans IChemE*, 74, Part A, 390-396.
- [9] Le Long André. Etude des cuves agitées hydrodynamique et transfert à la paroi. Thèse de Doctorat. France 1975.
- [10] 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.
- [11] REBIAI MOUSSA, Prédiction numérique des caractéristiques hydrodynamique d'un agitateur à pales cylindriques Thèse de magister usto mb2014

- [12] Guntzburger, Y., Fradette, L., Farhat, M., Heniche, M., Tanguy, P. A., & Takenaka, K. (2009). Effect of the geometry on the performance of the Maxblend impeller with viscous Newtonian fluids. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 4, 528-536.
- [13] Hamid LAKHDARI, Hydrodynamique d'écoulement dans une cuve mécaniquement agitée, Université M'hamed BOUGARA 2009
- [14] ERROUANE SORAYA Simulation numérique d'écoulement de fluide newtonien dans une cuve agitée par une turbine Rushton usto 2019
- [15] Z. Štěrbáček et P. Tausk, "Mélange dans l'industrie chimique", 1965
- [16] AMMAR M, DRISS Z, CHTOUROU W, ABID M S. 2011. Effects of baffle length on turbulent flows generated in stirred vessels [J]. *Central Européen Journal of Engineering*, 1: 401–412.
- [17] Lakhdar RAHMANI, Belkacem DRAOUI, Agitation des Fluides Très Visqueux, 2011
- [18] Archard D. Anne, Marouche M, Boisson H.C., 2006. Hydrodynamics and Metzner-Otto correlation in stirred vessels for yield stress fluids. *Chemical Engineering Journal* 125 (2006) 15–24.
- [19] Bouzit M. Simulation numérique de l'écoulement de fluides newtoniens autour d'un agitateurbipale. Thèse de Doctorat d'état, USTO (2007).
- [20] Dominique Anne-Archard, Henri-Claude Boisson, Mohamed Marouche Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse <<Etude expérimentale d'une cuve agitée en fluide viscoplastique>>
- [21] 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.
- [22] Devals C., Heniche M., Takenaka K., Tanguy P. A. CFD analysis of several design parameters affecting the performance of the Maxblend impeller. *Comp. Chem. Eng.* 32, 1831-1841, 2008.
- [23] <http://fr.scienceaq.com/Chemistry>
- [24] N. HARNBY, M.F. EDWARDS & A.W. NIENOW, coord. *Mixing in the process industries*. Butte worth/Heinemann, 2nd Édition, 1985.

- [25] M. Grégory BEAUME MODELISATION ET SIMULATION NUMERIQUE DIRECTE DE L'ÉCOULEMENT D'UN FLUIDE COMPLEXE Docteur de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris 2008
- [26] D'HAMONVILLE Thierry TARDIF et ILINCA Adrian. Modelisation de l'écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne. Rapport interne Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne LREE-05 –2008.
- [27] Chris Greenshields Henry Weller 11th April 2022 Notes on CFD Copyright © 2015-2023 CFD Direct Ltd
- [28] M. Hamel Initiation à la simulation numérique des écoulements de fluides (CFD) Introduction à l'ANSYS
- [29] Abdelhamid Bouhelal, Arezki Smaïli Introduction à la CFD (Computational Fluid Dynamics) National Polytechnic School of Algiers 2022
- [30] Nagata, S, Yamamoto.K. (1966), *Criteria for the Scaling Up of Mixing Vessels*

## ملخص

تتناول الدراسة الحالية التحليل العددي لتدفق السوائل النيوتنية في نظام ثنائي الابعاد في حالة التدفق الهيدروديناميكي. تستخدم هذه الدراسة برنامجًا تجاريًا (ANSYS Fluent) لإجراء التحليل. تم تحليل تأثيرات رقم رينولدز بشكل شامل في هذه الدراسة، حيث تم افتراض أن التدفق يكون بدرجة حرارة ثابتة ولزوجة ثابتة. تم إجراء بحث مرجعي حول تدفقات الهيدروديناميكا في الخزانات المحركة. ثم تم تحقيق بروتوكول عددي لدراسات المحاكاة وفقًا للخطوات التالية: إنشاء مجال الحسابات، دراسة الشبكة، تحديد شروط الحدود، وحل المعادلات الحاكمة. تمت مقارنة النتائج المحصل عليها وتقديمها بالتفصيل. وتقدم الدراسة استنتاجات عامة وتوجهات للأبحاث المستقبلية.

الكلمات المفتاحية: الخلط الميكانيكي، تدفق صفحي، سائل نيوتوني، محاكاة عددية.

## Résumé

Les cuves agitées sont largement utilisées dans de nombreux domaines industriels tels que l'industrie chimique, pétrolière, agroalimentaire et pharmaceutique. La présente étude traite numériquement de l'écoulement hydrodynamique d'un fluide newtonien dans un régime laminaire ; cette recherche a été réalisée à l'aide du logiciel commercial (ANSYS Fluent). Les effets du nombre de Reynolds ont été largement analysés dans cette étude, où l'écoulement a été supposé isotherme avec une viscosité constante. Une recherche bibliographique sur les écoulements hydrodynamiques dans les cuves agitées a été réalisée. Ensuite, le protocole numérique des études de simulation a été réalisé en suivant les étapes suivantes : établissement du domaine de calcul, étude du maillage, marquage des conditions aux limites et enfin résolution des équations gouvernantes. Les résultats obtenus sont comparés et présentés en détail. Des conclusions générales et des perspectives de travail sont proposées.

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

## Abstract

The present study focuses on the numerical analysis of the hydrodynamic flow of a Newtonian fluid in a laminar regime within stirred tanks. Various industries such as chemical, crude oil, agro-alimentary, and pharmaceutical industries extensively utilize stirred tanks. The investigation was conducted using the commercial software (ANSYS Fluent). The study extensively analyzed the effects of Reynolds number, assuming an isothermal flow with constant viscosity. A literature review on hydrodynamic flows in stirred tanks was conducted. Subsequently, a numerical simulation protocol was established, encompassing steps such as defining the computational domain, studying the mesh, flagging boundary conditions, and solving the governing equations. The obtained results were compared and presented in detail, and general conclusions and future perspectives are provided.

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