

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE « SALHI AHMED » DE NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE
Spécialité : Génie Mécanique
Option : Energétique
Mémoire de master Intitulé

**Caractérisation hydrodynamique et énergétique des agitateurs hélicoïdaux dans une cuve
cylindrique**

Présenté par :

AMMANI Nourhane

Soutenu publiquement le :03/07/2019

devant le jury :

Mr : BENOUCI Mohammed Zakaria	Président	MCB	CU Naâma
Mr : AMEUR Houari	Encadreur	MCA	CU Naâma
Mr : KAID Noredine	Examineur	MCB	CU Naâma
Mr : NAIMA Khatir	Examineur	MCA	CU Naâma

Année universitaire 2018-2019

remerciment

Je tien en premier lieu à remercier Allah le puissant qui nous a donné la croyance et la force, pour arriver à préparer un tel travail.

Je voudrais tout d'abord adresser mes remerciements les plus profonds et les plus sincères à mon directeur de thèse monsieur le professeur Ameur Houari je tiens exprimer ma profonde gratitude pour son attention, son implication presque quotidienne et sa disponibilité malgré ses très nombreuses occupations, ses précieux conseils ainsi la confiance qu'il a bien voulu m'accorder tout long de ce travail.

Merci également aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail ce pour l'intérêt qu'ils ont porté à nous travail

J'adresse mes profonds remerciements à mes chers parents, mes frère mes tantes mes oncles Et toute ma famille pour leurs soutient e dans les moments difficile et pour leurs encouragements

Je tien vivement à remercier mon amie Benaouicha Fatima qui m'a aidé, soutenu et conseillé

Sans oubli mes amis et mes camarades qui ont participé par leurs conseils et encouragement Et même leurs entho

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mon grand père et ma grande mère pour leurs soutenu et encouragement

A mes chères sœurs Fatima Soumia ,Laila ,Noure El Houda et Amel pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes frères Boudéjmaa, Ahmed Abd El Kader pour leurs soutenue

A mes tantes Nacira, Houaria, Zineb Khadidja pour leur appui et leur encouragement,

A mes oncles Mostafa, Abd El Basset Mohamed et leurs enfants

A mes belles sœurs et leurs enfants ,et mes cousines et cousin

A toute ma famille et mes chers amis et collègues pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A mon encadreur Mr Ameur Houari qui m'a encourage et aide à réaliser ce travail

Résumé

Le présent mémoire est une investigation numérique des performances des agitateurs hélicoïdaux dans une cuve cylindrique. Le travail est réalisé à l'aide de l'outil ICEM CFD pour créer la géométrie et discrétiser le domaine de calcul, et ensuite le code de calcul CFX est utilisé pour achever les différentes simulations. Le code est basé sur la méthode du volume finis. Différents paramètres qui peuvent influencer sur l'hydrodynamique induite dans le système d'agitations sont explorés : il s'agit de la vitesse de rotation de l'agitateur, diamètre de la cuve et viscosité du fluide. Aussi, une comparaison est faite entre un ruban simple et un autre ruban double

Abstract

This paper is a numerical study of the performance of helical agitators in a cylindrical vessel. The computer tool ICEM CFD is used to create the geometry and to mesh the computational domain, and then the CFX compute code is used to achieve all simulations. This code is based on the finite volume method .Various parameters that can influence the hydrodynamics induced in the stirring system are explored: it concerns the impeller rotational speed, the vessel diameter and the fluid viscosity. Also, a comparison is made between a single ribbon and another double ribbon

هذه الورقة عبارة عن دراسة عددية لأداء المحرضين الحلزونيين في وعاء أسطواني وذلك باستعمال ICEM CFD

CFX يستخدم لإكمال المحاكاة المختلفة

الهندسة وتقدير

يعتمد هذا البرنامج على طريقة الحجم المحدود. يتم استكشاف مختلف المعايير التي يمكن أن تؤثر على الهيدرو ديناميكية

النتيجة عن نظام التحريك : إنها تتعلق بالسرعة الدوار نية المحرك وقط الوعاء ولزوجة المائع . أيضا يتم إجراء مقارنة بين شريط واحد و شريط مزدوج آخر.

Nomenclature :

LETTRES ALPHABETIQUE :

D : diamètre de l'agitateur	[m]
d : diamètre de la pale	[m]
t : Temps	[s]
H : hauteur de l'agitateur	[m]
N : vitesse de rotation d'agitateur,	[tr/min]
P : pression	[Pa]
Q : débit de circulation de fluide dans la cuve	[m^3/s]
Qv : dissipation visqueuse	[S^{-2}]
P : puissance	[W]
D : diamètre de l'agitateur	[m]
T : diamètre de la cuve	
f : Fréquence	[S^{-2}]
bt : épaisseur de la pale,	[m]
c : espacement du fond de la cuve	[m]
e : excentricité de l'agitateur,	[m]
ds : diamètre de l'agitateur	[m]
dt : diamètre du disque,	[m]
g : accélération de la pesanteur	[m/s^2]
h : hauteur de la pale, m	[m]
V : vitesse,	[m/s]
A : surface	[m^2]
t_c : temps de circulation,	[S]
t_m : temps de mélange,	[S]
c, x et y – constantes	
Z : coordonnée axiale,	[m]
V : volume de la cuve	[m^3]
U : composante de la vitesse suivant x	[m/s]

NDICES:

e : Point de la grille situé à l'est du point où se fait le calcul.

p : Point de la grille où se fait le calcul.

w : Point de la grille situé à l'ouest du point où se fait le calcul.

n : Point de la grille situé au nord du point où se fait le calcul.

LETTRES GRECQUES :

Γ : Coefficient de diffusion	[-]
w : Grandeur physique	[-]
: Masse volumique	[Kg/m ³]
{ : Angle sur le plan (r-z)	[rad]
: Vitesse angulaire	[rad/s]
~ Viscosité dynamique	[Pa.s]
– viscosité apparente,	[Pa s]
– coordonné angulaire	[Degré]
– paramètre du modèle rhéologique de Carreau, s.	[-]
Δ : variation	[-]
∂ : dérivée partielle	[-]

Nombres sans dimension:

Re : nombre de Reynolds pour un fluide Newtonien

Fr : nombre de Froude

Np : nombre de puissance

N_Q représente le nombre de circulation

Listes des figures :

Chapitre 1 :

Figure 1.1 : Présentation schématique des types d'écoulements	03
Figure 1.2 : Les mélangeurs à jet	03
Figure 1.3: Mélangeurs statiques	04
Figure 1.4 : Bipale classique	06
Figure 1.5 : Bipale cadre	06
Figure 1.6 : Agitateur à ancre	06
Figure 1.7 : Agitateurs hélicoïdal	07
Figure I.8 : agitateur de type Turbine	08
Figure 1.9 : Hélice Marine	09

Chapitre2 :

Figure 2.1 : Schéma représentatif d'un volume de contrôle	17
Figure 2.2 maille d'un volume de contrôle	18

Chapitre 3 :

Figure 3.1 : Les modules principaux du CFX 13.0	23
Figure 3.2 : Géométrie et génération du maillage par « ICEM CFD 13.0 CFX	24
Figure 3.3 : Géométrie importée par le CFX-Pre	25
Figure 3.4 : Convergence des résultats par le solveur	25
Figure 3.5 : Interface du CFX-Post	26
Figure 3.6 : Géométries du problème étudié	29
Figure 3.7 : Grille du maillage (tetrahedral)	30
Figure 3.8 : Repère fixe	31
Figure 3.9 : Repère mobile	31

Chapitre 4 :

Figure 4.1 : Vitesse axiale pour un ruban double, $\alpha = 90^\circ$	34
	36
Figure 4.2 : Contours de vitesse sur un plan vertical pour un double ruban, glycérol, $D = 0.1$ [m]	
Figure 4.3 : Contours de vitesse pour un double ruban, glycérol, $D = 0.1$ [m]	37
Figure 4.4 : Distribution de vitesse en fonction de la hauteur de la cuve, à $2R/D = 0.7$, pour un double ruban, glycérol, $D = 0.1$ [m]	38
Figure4.5 : Contours de vitesse sur un plan vertical, pour un double ruban	39
Figure 4.6 : Distribution de vitesse en fonction de la hauteur de la cuve, à $2R/D = 0.7$, pour un double ruban, glycérol, $N = 70$ tr/min	40
Figure4.7: Lignes de courant sur un plan vertical, pour $N=70$ tr/min, double ruban, $D = 0.1$ [m]	41

Figure 4.8 : Distribution de vitesse en fonction de la hauteur de la cuve pour $N=70$ tr/min, double ruban, $2R/D = 0.7$, $D = 0.1$ [m]	41
Figure4.9: Contours de vitesse sur un plan vertical pour $N=70$ tr/min, double ruban, $D = 0.1$ [m]	42
Figure 4.10 : Contours de vitesse pour $N = 70$ tr/min, double ruban, $D = 0.1$ [m]	43
Figure4.11: Lignes de courant sur un plan vertical, pour $N = 70$ [tr/min], glycérol, $D = 0.1$ [m]	44
Figure4.12: Contours de vitesse sur un plan vertical, pour $N = 70$ [tr/min], glycérol, $D = 0.1$ [m]	45
Figure 4.13: Contours de vitesse sur un plan horizontal à $Z/D = 0.5$, pour $N = 70$ [tr/min], glycérol, $D = 0.1$ [m]	46
Figure 4.14: Variations du nombre de puissance en fonction de la viscosité (Eau, Glycerol), pour $N = 10$ tr/min, ruban simple	47
Figure 4.15: Variations du nombre de puissance en fonction du type des agitateurs (ruban simple et ruban double), pour $N = 10$ tr/min	48
Figure 4.16: Variations du nombre de puissance en fonction de la vitesse de rotation de l'agitateur, ruban double, glycerol	48

Liste de tableau :

Tableau 3.1: Propriétés des fluides	29
-------------------------------------	----

Remercîment	
--------------------	--

Table des matières

Dédicace	
Résumé	
Abstract	
Liste des figures	
Liste de tableau	
introduction général	01
Chpaire 1 Caractéristiques d'Agitation et Types d'Agitateurs	
1.1 .introduction	03
1.2 . types des agitateurs	03
1.3.les déférentes modes d'agitation	04
1.4.les agitateurs pour fluide hautement visqueux	06
1.4.1. Les agitateurs plans	06
1.4.2.les agitateurs hélicoïdal	08
1.5. les agitateurs pour fluide peu visqueux	08
1.5.1.les turbines	08
1.5.2. Les hélices	09
1.6. paramètres liés à un système d'agitation	10
1.6.1.temps de mélange	10
1.6.2 puissance d'un agitateur	10
1.6.3.temps de circulation	14
Chapitre 02 :Méthode des volume finis	
2.1. Méthode de discrétisation	16
2.2. Méthode des déférences finis	16
2.3. Méthode des élément finis	17
2.4. Méthode de volumes finis	17
2.4.1.équation de transport	18
Chapitre 03 : Simulation numérique	
3.1. résolution numérique	23
3.2. Présentation du solveur CFX5	23
3.2.1. ICEM CFD	24
3.2.2. CFX Pre	25
3.2.3. CFX Solver	26

3.2.4. CFX Solver Manager	27
3.2.5. CFX Post	27
3.3. Les étapes de la simulation (par ICEM et CFX)	28
3.2.1. Création de la géométrie	28
3.2.3. Résolution du problème (Le Pre-processing)	28
3.3.Considérations du problème	29
3.4. Présentation de géométrie	30
3.5.Modélisation numérique d'une cuve agitée	31
Chapitre 04 : résultat et discussion	
4.1. Validation	34
4.2. Résultats et discussion	35
4.2.1. Influence de la vitesse de rotation d'agitateur	35
4.2.2. Influence du diamètre de la cuve	39
4.2.3. Effet de la viscosité du fluide	40
4.2.4. Comparaison entre un ruban simple et un ruban double	44
4.2.5. Puissance consommé	47
Conclusion général	49
Référence	50

Introduction

General

Le mélange, qui est une opération unitaire visant à réduire l'inhomogénéité d'un milieu en vue d'obtenir un produit aux spécifications données, est essentiel dans l'industrie. On en retrouve des exemples dans plusieurs types de procédés, qu'ils soient alimentaires, pétroliers, miniers, ou encore pharmaceutiques, où le mélange joue un rôle prépondérant dans le transfert de matière ou de chaleur. C'est un procédé également important dans le traitement des eaux usées et des déchets, et de la pollution atmosphérique.

La connaissance fine des structures hydrodynamique des écoulements turbulents dans les cuves agitées, permet de comprendre et d'appréhender les phénomènes de transfert qui s'y développent et éventuellement leurs interactions mutuelles. Elle permet également d'améliorer les performances des mobiles d'agitation mis en œuvre, par la mise au point des conditions géométriques et opératoires optimales assurant simultanément l'amélioration de la qualité de mélange et de l'économie d'énergie

Ce travail est une investigation numérique de la structure des écoulements générés par un agitateur hélicoïdal. C'est une simulation numérique de l'écoulement des fluides Newtoniens dans une cuve mécaniquement agitée par un ruban hélicoïdal simple et un autre à double rubans. L'étude a été faite à l'aide du code de calcul (CFX 13.0), qui offre une visualisation tridimensionnelle des résultats sous différentes formes et configurations. Les résultats obtenus donnent un bon accord avec la littérature et mettent en évidence l'influence de quelques paramètres géométriques ainsi que l'influence du régime hydrodynamique sur le processus.

Notre travail est organisé de la façon suivante :

- Le premier chapitre est consacré à la définition de l'agitation mécanique, les différents types d'agitateur, les régimes d'écoulement ainsi que les paramètres liés à un système d'agitation.
 - Le deuxième chapitre est réservé aux méthodes numériques, et spécifiquement sur la méthode des volumes finis.
 - Le troisième chapitre est dédié à la présentation du code de calcul et les différentes méthodes de modélisation de l'agitateur ainsi que les conditions aux limites imposées dans notre simulation. Enfin une étude de maillage suivie par les critères de convergence.
 - Le quatrième chapitre est essentiellement la simulation numérique, constitue le noyau principal de notre étude, qui offre une visualisation tridimensionnelle des résultats sous différentes formes et configurations au moyen du logiciel CFD (CFX 13.0).
- Enfin, nous présentons les conclusions générales de ce travail.

Chapitre 01

**Caractéristiques D'agitation
Et Types D'agitateurs**

Chapitre 1

Caractéristiques d'Agitation et Types d'Agitateurs

1.1. Introduction

L'agitation constitue une opération unitaire requise à de très nombreux stades des procédés. La majeure partie des opérations d'agitation et de mélange s'effectuent au moyen d'un agitateur pendulaire tournant autour d'un arbre placé dans une cuve qui est généralement de forme cylindrique. Les cuves sont ainsi présentes depuis le stockage des matières premières jusqu'à celui des produits finis en passant par les opérations de mise en contact, réaction, séparation qui jalonnent invariablement tout procédé.

1.2. Types d'agitateurs

Les agitateurs ou les éléments mobiles sont généralement centrés, c'est-à-dire que leurs axes sont confondus avec celui de la cuve. Ils sont classés suivant les flux des fluides qui sortent du volume balayé par l'agitation en rotation. Il existe trois types :

- **Ecoulement axial**

Les mobiles à débit axial créent un mouvement de fluides dans la direction axiale (vers le haut ou vers le bas de la cuve). Ils génèrent une circulation importante de fluide en créant une seule boucle de circulation.

- **Ecoulement tangentiel**

L'agitateur développe un écoulement primaire essentiellement tangentiel, c'est-à-dire dans le sens de rotation du mobile où le milieu tourne dans sa totalité autour de l'arbre d'agitation et jusqu'à la périphérie de la cuve. Ce type d'agitateur est généralement utilisé pour les opérations de transfert de chaleurs pour les fluides très visqueux.

- **Ecoulement radial**

Ces mobiles fournissent un débit perpendiculaire à l'arbre d'agitation et ils créent des effets de cisaillement relativement importants. Le flux du liquide est expulsé depuis les pales du mobile vers les parois de la cuve et se divise en deux parties créent ainsi deux boucles de circulation : une au-dessus du mobile et l'autre en dessous. Les turbines sont les principaux mobiles de type radial.

Les mouvements réels du liquide dans la cuve résultent de la composante de ces trois mouvements principaux : axial, radial et tangentiel. [03].

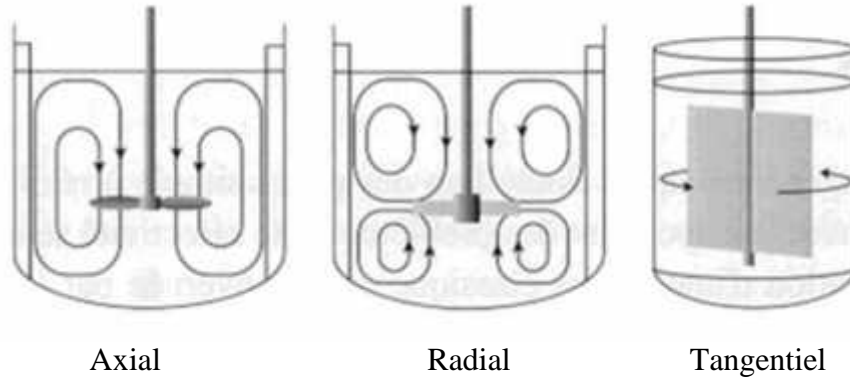


Figure 1.1 : Présentation schématique des types d'écoulements

1.3. Les différents modes d'agitation

Mélanger ou agiter un ou plusieurs fluides c'est pour intérêt d'obtenir un certain degré d'uniformité des caractéristiques chimique ou physique du produit résultant. Nous pouvons distinguer les plus importants modes d'agitation pour les milieux liquides qui sont très différents les uns des autres.

- **Les mélangeurs à jet**

Le mélange par jet impactant trouve de nombreuses applications industrielles telles que le mélange de gaz ou de liquides. Leur utilisation permet d'améliorer le contact entre deux fluides et favoriser les échanges de chaleur et de matière.

L'utilité du jet impactant dans les cuves agitées permet d'obtenir un excellent micro-mélange ; notamment lorsque les vitesses du jet sont comprises entre 2 et 5 m/s. Néanmoins, la zone d'action des jets s'étendant sur un faible volume. Un exemple est illustré sur la Figure (1.1).

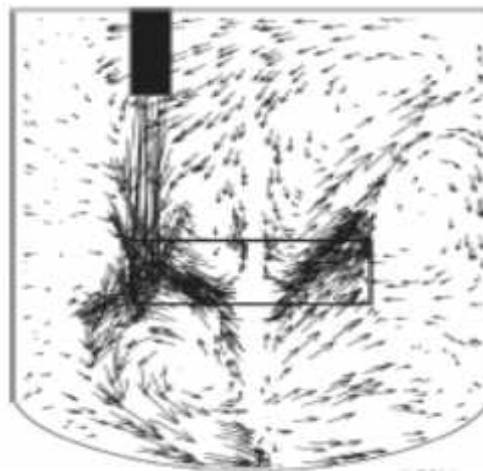


Figure 1.2 : Les mélangeurs à jet

- **Mélangeurs statiques**

Un mélangeur statique est composée d'un ensemble immobile placée à bout dans un tube [05]. Chaque élément à une structure géométrique rigide particulière qui divise le flux et le recombine. En général, le contact entre les fluides a lieu grâce un mouvement radial engendré dans les mélangeurs. L'efficacité de l'opération de la mise en œuvre dans un mélangeur statique dépend beaucoup du régime d'écoulement. Différentes géométrie des mélangeurs sont créées pour s'adapter aux écoulement laminaire et turbulent vu que les mécanismes de mélange de ces deux types d'écoulement sont différents. De nombreuses géométries ont été développées au cours des années [05]. Parmi les mélangeurs statiques les plus efficaces, celui présenté sur la Figure 1.2.



Figure 1.3 : Mélangeurs statiques

- **Agitation mécanique par rotation de l'agitateur**

La majorité des opérations d'agitation et de mélange s'effectuent au moyen d'un agitateur pendulaire tournant, placé dans une cuve généralement de forme cylindrique. Le rôle de l'agitateur est d'accélérer les phénomènes de transfert dans le mélange. Par conséquent, l'agitateur est préconisé pour l'homogénéisation des liquides miscibles, pour mettre en suspension des solides dans des liquides, ou pour disperser un gaz dans un liquide.

- **Agitation magnétique par rotation de l'agitateur**

Elle est de loin la plus pratique et la plus simple à mettre en œuvre. On place un barreau magnétique recouvert d'un revêtement interne dans le mélange à agiter. Suivant les récipients, il existe différentes formes de barreaux : des barreaux simples pour les récipients à fond plat, en forme d'olive pour les ballons et en formes de croix pour les tubes à essai. Le barreau magnétique présent dans le milieu est entraîné par un aimant tournant situé sous le récipient. On utilise le plus souvent des agitateurs magnétiques chauffant, permettant comme leur nom l'indique très clairement, de coupler l'agitation et le chauffage.

Les ultrasons de puissance sont des ondes sonores dont les fréquences sont comprises entre 16 kHz (limite supérieure de l'audibilité humaine) et 1 MHz. Ils sont en général émis par une surface plane vibrant de façon sinusoïdale autour de sa position d'équilibre.

L'onde se propage en milieu solide, liquide ou gazeux avec une certaine célérité, qui dépend des propriétés physiques du milieu.

À la traversée de milieux visqueux ou diphasiques denses, une partie de l'énergie acoustique va se dégrader en chaleur sous l'effet des frottements visqueux, et l'amplitude de l'onde diminue donc avec la distance à la source.

Deux mécanismes permettent d'expliquer l'effet des ultrasons sur l'émulsification : l'onde génère des instabilités à l'interface liquide-liquide, qui vont induire la formation de gouttes; l'implosion des bulles de cavitation près des gouttes de liquide va casser ces gouttes et on observe une réduction progressive du diamètre moyen de l'émulsion.

1.4. Les agitateurs pour fluides hautement visqueux

Ces agitateurs tournent à faible vitesse afin de limiter la consommation énergétique, en poussant le liquide tangentiellement et en ne provoquant qu'un faible brassage dans la direction verticale. Ils sont souvent utilisés pour favoriser le transfert thermique ou la circulation à proximité de la paroi de la cuve.

On distingue deux grandes familles :

- Les agitateurs plans où l'écoulement engendré est tangentiel tel que le bipale, l'ancre et la barrière.
- Les agitateurs hélicoïdaux où l'écoulement engendré est axial tel que les vis hélicoïdales et les rubans hélicoïdaux.

1.4.1. Les agitateurs plans

- **Le bipale**

C'est la forme la plus simple, le rapport du diamètre de l'agitateur sur le diamètre de la cuve (d/T) est compris entre 0.3 et 0.9. Le rapport de la hauteur de l'agitateur sur le diamètre de la cuve (H/T) varie de 1/12 jusqu'à 1/3 pour un bipale classique.

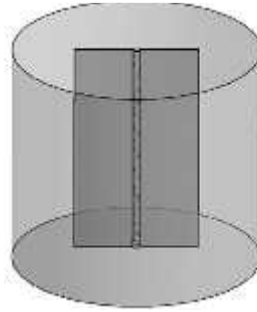
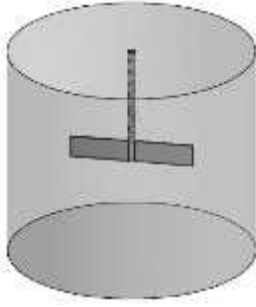


Figure 1.4 : Bipale classique Figure 1.5 : Bipale cadre

Lorsque le rapport (H/T) devient grand (au voisinage du 1), l'agitateur devient de type cadre ou feuille. Il est généralement utilisé pour des agitations douces avec une vitesse des pales qui ne dépasse pas 3 m/s. Ce type d'agitateur génère essentiellement un flux tangentiel.

- **Les barrières**

Sont constituées d'un ensemble de barres horizontales et verticales. Les vitesses de rotation sont généralement faibles pour réduire la consommation d'énergie.

Elles sont souvent utilisées pour l'agitation dans les grandes cuves pour des opérations de traitement des eaux.

- **Agitateur à ancre**

Les agitateurs à ancre sont utilisés particulièrement pour l'écoulement fortement visqueux de 10 à 100 Pa.s, dans des réactions de polymère et quelques processus dans les industries alimentaires[09]. La plupart de ces mélangeurs sont caractérisés par des bras horizontaux qui suivent des pales verticales fixées aux extrémités des bras pour favoriser le mouvement vertical du mélange (Figure 1.3).

Ils ont un diamètre qui varie entre 0.95-0.98 du diamètre de l'ancre. La largeur du bras varie entre 0.05 à 0.10 du diamètre de l'ancre. Les vitesses périphériques sont généralement faibles (1 à 3 m/s).



Figure 1.6 : Agitateur à ancre

1.4.2. Les agitateurs hélicoïdaux

Les rubans hélicoïdaux et les vis d'Archimède sont utilisés dans le mélange des fluides extrêmement visqueux (Figure 1.4). Ils sont généralement utilisés pour des applications où les viscosités sont assez élevées. Compte tenu du fait que ces derniers ont pour rôle de faire circuler le fluide à haute viscosité dans tout le volume de la cuve, leur profil d'écoulement est souvent majoritairement axial [01].



Figure 1.7 : Agitateurs hélicoïdal

1.5. Les agitateurs de fluides peu visqueux

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

1.5.1. Les turbines

- **Les turbines à pales droites**

Elles génèrent un écoulement composé de deux boucles de circulation se développant de part et d'autre du plan médian de la turbine. Le fluide est aspiré axialement au-dessus et au-dessous du mobile d'agitation puis refoulé radialement sur le côté. Ce flux appelé courant de décharge, se décompose en deux courants au niveau de la paroi.

- **Les turbines à disque**

Les turbines ont des pales montées verticalement sur des disques horizontaux avec de nombreuses différentes conceptions. La plus classique d'entre elles comprend six pales appelées turbine de Rushton. Elle a été employée comme mélangeur pendant beaucoup d'années.

- **Les turbines à pales inclinées**

Pour les liquides contenant des particules solides en suspension, c'est la turbine à pales planes inclinées qui donne le meilleur résultat. La turbine à pales inclinées se caractérise par un écoulement intermédiaire entre la turbine de Rushton et l'hélice. Les turbines entraînent et jettent le fluide dans un flux principalement radial. Par conséquent la forme des cuves agitées a une grande importance pour les performances de la turbine.



Turbine Rushton



turbine SCABA



Turbine Radial à pales inclinées



turbine à 8 pales incurvées

Figure I.8 : agitateur de type Turbine

1.5.2. Les hélices

Le type le plus utile des hélices est le type marin souvent avec trois pales (Figure 1.5). L'agitation avec ce genre de mobile se fait par un écoulement axial qui crée un mouvement des fluides dans une direction axiale (vers le haut ou le bas) par rapport à l'axe de rotation de l'hélice. Les hélices peuvent être utilisées pour mélanger des liquides ayant une viscosité allant jusqu'à 2 Pa.s [10].



Figure 1.9 : Hélice Marin

1.6. Paramètres liés à un système d'agitation

1.6.1. Temps de mélange

Avant de définir ce qu'est le temps de mélange, il est important de préciser ce qu'est le mélange et comment on le caractérise.

- **Définition du mélange**

Il est nécessaire de distinguer en premier entre agitation et mélange. L'agitation correspond à la mise en mouvement d'une quantité de fluide dans une cuve par un agitateur. Le mélange correspond quant à lui à l'interpénétration d'au moins deux phases initialement séparées [04]. Il a été montré précédemment que les mécanismes de mélange ne sont pas les mêmes pour le régime laminaire et le régime turbulent mais le but reste le même: celui de disperser et distribuer les particules de fluide. Un milieu homogène correspond donc à un milieu dont les particules sont à la fois bien dispersées et bien distribuées [07].

Notons ici que le mélange s'effectue à trois échelles différentes [08]:

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

Batchelor). Le mélange à l'échelle micro est la principale limitation des réactions chimiques.

1.6.2. Puissance d'un agitateur

La puissance d'un agitateur correspond à l'énergie que celui-ci va pouvoir transmettre au fluide, sur un temps donné, afin de mettre celui-ci en mouvement et donc de créer un écoulement.

$$P = P_T - P' = N_p \rho \omega^3 d^5 \quad (1.1)$$

– N_p est le nombre de puissance du système d'agitation ou encore le coefficient de traînée du mobile d'agitation dans le fluide (-)

– ω est la vitesse de rotation du mobile d'agitation (s^{-1})

– d est le diamètre du mobile d'agitation (m)

– ρ est la masse volumique du fluide (kg/m^3)

L'action de l'agitateur sur les mélanges quel que soit leur type nécessite une quantité d'énergie afin de conduire l'opération. Cette énergie sera transmise au liquide et elle se dissipe sous forme de chaleur. La quantification de l'énergie porte une grande importance à la réussite de l'opération de mélange qui permet de choisir le type de moteur à installer et de comparer sur le plan de la consommation d'énergie les performances de plusieurs mobiles d'agitation. La consommation énergétique d'un système d'agitation est liée à plusieurs paramètres :

- La géométrie de la cuve et du rotor.
- La vitesse de rotation du mobile.
- Les propriétés physico-chimiques du liquide.

L'appréciation de l'énergie consommée est basée sur l'analyse adimensionnelle pour désigner le nombre de puissance qui représente une notion généralisée de la consommation d'énergie. Les recensements des variables amènent à exprimer la puissance consommée sous la forme :

$$P = f (N , d , \dots , \sim , g) \quad (1.2)$$

Chapitre 03 Types D'agitateurs

Caractéristiques D'agitation Et

L'analyse dimensionnelle par l'application du théorème de Vashy-Buckingham avec une équation impliquant six variables exprimées à l'aide de trois dimensions[10], aboutit à trois nombres adimensionnels

$$N_p = \frac{P}{\dots N^3 d^5} \quad (1.3)$$

Le nombre de puissance est l'expression adimensionnelle de la puissance

$$R_e = \frac{\dots d U}{\sim} \quad (1.4)$$

$$F_r = \frac{N^2 d}{g} \quad (1.5)$$

Le nombre de Froude est le rapport des forces d'inertie aux forces de la pesanteur. La puissance dissipée (P) dans le fluide, correspond à la puissance totale (P_T) transmise à l'axe du mobile d'agitation, c'est-à-dire la puissance nécessaire à l'entraînement du mobile d'agitation, à laquelle est soustraite la puissance à vide (P'). Elle s'exprime au moyen de l'équation suivante :

$$P = P_T - P' = N_p \dots \xi^3 d^5 \quad (1.6)$$

Où :

- N_p est le nombre de puissance du système d'agitation ou encore le coefficient de traînée du mobile d'agitation dans le fluide (-)
- ξ est la vitesse de rotation du mobile d'agitation (1/s)
- d est le diamètre du mobile d'agitation (m)
- ρ est la masse volumique du fluide (kg/m^3)

L'équation suivante, donnant une relation entre les trois nombres sans dimension, est appelée, dans le cadre de ce travail, la relation $N_p-Re-Fr$ du mobile d'agitation.

Chapitre 03 Types D'agitateurs

Caractéristiques D'agitation Et

$$\Phi = \frac{N_p}{Fr^x} = c R_e^x \quad (1.7)$$

$$N_p = c R_e Fr^x \quad (1.8)$$

Où : c , x et y sont des constantes, sur la plage donnée de nombres de Reynolds et de nombres de Froude (-).

Le nombre de Reynolds du mobile d'agitation (Re) caractérise le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité. Le nombre de Froude du mobile d'agitation, Fr , caractérise le rapport entre les forces d'inertie et les forces de gravité. Ces nombre, Re et Fr , sont définis comme suivant :

$$R_e = \frac{\rho \dot{S} d^2}{\mu} \quad (1.9)$$

$$F_r = \frac{\dot{S}^2 d}{g} \quad (1.10)$$

Où : μ est la viscosité du fluide (Pa.s) et g est l'accélération de la pesanteur (m/s^2).

Lorsque le fluide ne présente pas de déformation de sa surface libre, le nombre de puissance, Np , devient indépendant du nombre de Froude (Fr). De plus, il est admis que, pour des nombres de Froude inférieurs à 300, les équations 1.7 et 1.8 relient Np à Re uniquement.

Numériquement, on calcule la puissance par le calcul de la dissipation visqueuse dans tout le volume de la cuve. La puissance fournie est transmise au fluide et finalement dissipée sous forme de chaleur soit par le mouvement moyen, soit par le mouvement fluctuant induit par le mouvement périodique des pales, soit par le mouvement turbulent.

La fonction de dissipation visqueuse s'exprime comme suivant :

$$P = \gamma \int Q_v dv \quad (1.11)$$

$$Q_v = \frac{(\tau_{yy}^2 + \tau_{xx}^2 + \tau_{zz}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{yx}^2 + \tau_{zx}^2)}{\gamma^2} \quad (1.12)$$

Avec :

$$\ddagger_{yy} = \frac{y^2 \partial v_r}{\partial r} \quad (1.13)$$

$$\ddagger_{r_r} = \left[\frac{r \partial \left(\frac{v_r}{r} \right)}{\partial r} + \left(\frac{1}{r} \right) \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] \quad (1.14)$$

$$\ddagger_{rz} = -y \left[\frac{\partial v_r}{\partial z} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right] \quad (1.15)$$

L'expression de puissance est donnée par la formulation suivante :

$$P = y \int Q_v dv \quad (1)$$

Avec :

$$dv = r dr d_{\theta} dz \quad (1.18)$$

1.6.3. Temps de circulations

C'est le temps que met une particule de fluide pour effectuer un tour dans un plan vertical de la cuve. Le temps de circulation adimensionnel produit de la vitesse de rotation par le temps de circulation. $N.t_c$ pour un fluide Newtonien en régime laminaire est constant [10]. Comme le temps de mélange, le temps de circulation est très étroitement lié à la technique expérimentale qui est employée dans sa mesure. Il est lié à la capacité de pompage de l'agitateur et le débit de circulation. Le temps de circulation est alors :

$$t_c = \frac{V}{Q_c} \quad (1.19)$$

Où : Q est le débit de circulation généré par l'agitateur, et V le volume de la cuve.

Le temps de circulation est souvent ainsi corrélé par un temps de circulation sans dimension, $N.t_c$, qui est le nombre de révolutions exigées pour accomplir une circulation complète. Le temps de circulation et la capacité de pompage de l'agitateur sont reliés par le nombre sans dimensions appelé nombre de circulation adimensionnel, il est donné par la relation suivante :

$$N_Q = \frac{Q}{ND^3} = \frac{V}{t_c ND^3} \quad (1.20)$$

où N_Q représente le nombre de circulation adimensionnel.

En régime laminaire, le temps adimensionnel $N.t_m$ et $N.t_c$ sont constants et ne dépendent que de la géométrie du système d'agitation et des propriétés physique de fluide[10].

Chapitre 02

Méthode Des Volume Finis

Chapitre 2

Méthode des Volumes Finis

2.1. Méthodes de discrétisation

Une grande partie des lois de la nature sont en fait des solutions d'équations différentielles puisqu'elles reposent sur des relations entre divers taux instantanés de changement. Bien sur les équations différentielles ne fondent pas tous les principes de la nature, mais celles-ci sont à la source de la théorie du mouvement des objets, de la lumière, de la chaleur, des gaz, de la théorie atomique, etc.

Dans la pratique, on rencontre souvent des équations différentielles dont on ne peut obtenir facilement les solutions analytiques. Pour résoudre ces équations, il faut choisir une méthode de discrétisation adaptée au problème. Les méthodes de discrétisation approchent la solution des équations différentielles avec une série d'équations algébriques, qui seront résolues en chaque point d'un ensemble de positions dans l'espace et dans le temps. Il existe une grande variété de méthodes de discrétisation, mais les plus souvent utilisées dans la CFD sont : la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis.

2.2. Méthode des différences finies

C'est la méthode la plus ancienne pour la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Elle est supposée avoir été introduite par EULER. (**MAHBOUB Abdelmadjid 2014**) [6] Cette technique est couramment utilisée pour des géométries simples avec des maillages structurés. Pour chaque nœud, les équations différentielles sont approximées en remplaçant les dérivées partielles par la valeur de la fonction. Le résultat est une équation algébrique par nœud et par variable. Cette variable apparait comme une inconnue dans le nœud courant et dans les nœuds voisins. La méthode la plus souvent utilisée pour obtenir l'approximation des dérivées des variables par rapport aux coordonnées est le développement limité en séries de Taylor.

2.3. Méthode des éléments finis

Le concept mathématique d'élément fini est apparu vers 1940 et la définition est posée par Newmark, Hrenikoff, Mc Henry et Courant.[6]

Méthode des éléments finis est très utilisée dans l'industrie, en particulier en aéronautique, dans l'industrie automobile, en météorologie, etc. Les équations sont multipliées par une fonction de poids (facteur) avant d'être intégrée sur l'ensemble du domaine. Le domaine est à nouveau divisé en un ensemble de volumes de contrôle où éléments finis qui sont habituellement non-structurés. La plus simple des méthodes des EF consiste à approximer la solution par une fonction linéaire dans chaque élément afin d'assurer la continuité de la solution à travers la condition limite de l'élément. Cette fonction peut être construite à partir des valeurs aux nœuds des éléments. La fonction de poids a habituellement la même forme. Cette approximation est donc substituée dans l'intégrale multipliée par la fonction de poids de la loi de conservation. L'équation à résoudre est dérivée en imposant la nullité de la dérivée de l'intégrale pour chaque valeur de nœud. Il s'agit de choisir la meilleure solution dans l'ensemble des équations (minimisant le résidu). Le résultat est une série d'équations non linéaires

2.4. Méthode des volumes finis

En analyse numérique, la méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles et cela même pour des géométries complexes, elle exploite des approximations d'intégrales et se base directement sur la forme dite forte de l'équation à résoudre. La méthode des volumes finis a été initialement mise au point pour des lois de conservations hyperboliques, mais des développements récents permettent à présent de les utiliser pour des équations elliptiques et paraboliques.

Les équations aux dérivées partielles sont résolues de manière approchée à l'aide d'un maillage constitué de volumes finis qui sont des petits volumes disjoints appelés volume de contrôle dont la réunion constitue le domaine d'étude, le centre de la cellule du VC contient le nœud où les équations seront résolues et les valeurs des variables sur les nœuds sont des valeurs moyennes locales de la solution du problème physique. Il est nécessaire d'utiliser des méthodes d'interpolation pour relier les nœuds.

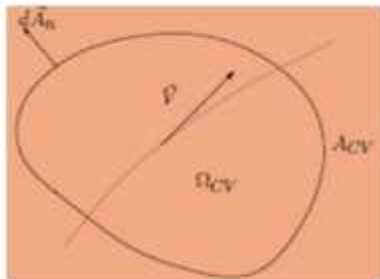
Ces équations aux dérivées partielles contiennent des termes de divergence. En utilisant le théorème de flux – divergence, les intégrales de volume d'un terme de divergence sont

transformées en intégrales de surfaces et ces termes de flux sont ensuite évalués aux interfaces entre les volumes finis. On utilise une fonction de flux numérique pour élaborer une approximation des flux aux interfaces. Puisque le flux entrant dans un volume donné est égal Au flux sortant du volume adjacent, ces méthodes sont conservatives, donc parfaitement adaptées à la résolution de lois de conservation.

Un autre avantage de la méthode des volumes finis est qu'elle est facilement utilisable avec des maillages non structurés car, en matière de discrétisation des lois de conservation, sa formulation ne tient aucun compte de la complexité du maillage. En revanche, les caractéristiques géométriques du maillage peuvent jouer un rôle prépondérant lorsque des flux diffusifs entrent en jeu. [6]

2.4.1. Equation générale de transport

$$\frac{\partial \dots W}{\partial t} + \underbrace{div(\dots W \vec{u})}_{Advection} - \underbrace{div(\Gamma grad W)}_{Dffusion} = \underbrace{S_w}_{Termesource / Puits} \tag{2.1}$$



- Ω_{CV} - Volume (domaine) de contrôle
- Ω_{CV} - fixe dans le temps.
- A_{CV} - Surface extérieure du volume.
- $\rho\phi$ - densité volumique d'une grandeur
- \vec{F} - vecteur flux de la matière

Figure 2.1 : Schéma représentatif d'un volume de contrôle

Sous forme intégrale.[6]

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_{cv}} \dots W d\Omega + \int_{\Omega_{cv}} div(\dots W \vec{u}) d\Omega - \int_{\Omega_{cv}} div(\Gamma grad W) d\Omega = S_w d\Omega \tag{2.2}$$

Pour le volume Ω_{cv} le théorème de Gauss donne :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_{cv}} \dots W d\Omega + \int_{A_{cv}} div(\dots W \vec{u}) d\vec{A}_n - \int_{A_{cv}} div(\Gamma grad W) d\vec{A}_n = \int_{\Omega_{cv}} S_w d\Omega \tag{2.3}$$

Une autre façon de voir la méthode

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_{cv}} \dots w d\Omega = - \int_{A_{cv}} \vec{F} d\vec{A}_n + \int_{\Omega_{cv}} S_w d\Omega \quad (2.4)$$

On note que :

$-\vec{F}d\vec{A}_n$ Est le flux entrant :

Advection : $\vec{F}_c = \dots w \vec{u}$ Diffusion (loi de Fick) : $\vec{F}_d = D \text{grad} w$

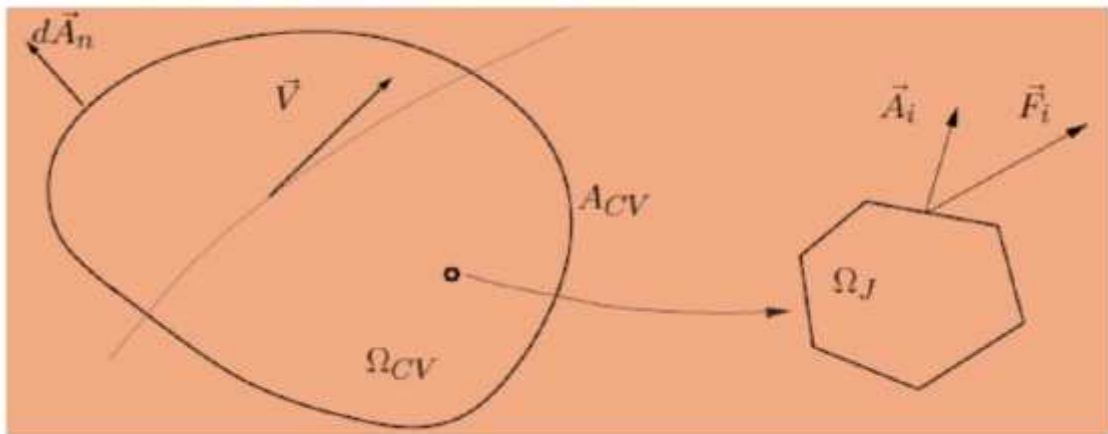


Figure 22 maille d'un volume de contrôle

Bilan sur Ω_J

$$\frac{\partial}{\partial t} (\dots w \Omega_J) + \sum_{faces} (\vec{F}_i \vec{A}_i)_J = (S_w)_J \quad (2.5)$$

Ω_J : valeur moyenne de w sur Ω_J (valeur au centre de Ω_J)

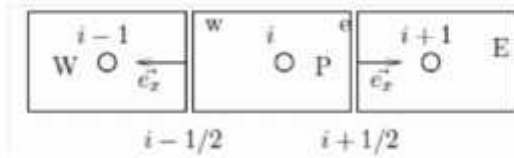
\vec{F}_i : flux moyen sur \vec{A}_i .

-advection :

Dans le cas d'advection pure et en absence de terme source :

$$\vec{u} > \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_{cv}} \dots w d\Omega = -w \dots \Phi \vec{U} d\vec{A}_n \quad (2.6)$$

En 1D



$$\Delta x_i = x_{i+1/2} - x_{i-1/2}$$

$$\Delta x_{i_c} = x_{i+1} - x_i$$

$$V_i = \Delta x_i \Delta y \Delta z$$

Δy - hauteur du volume

$$\Delta z = 1$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{V_i} \dots w dV_i = - \int_{\Delta y} \dots w \bar{u} \bar{e}_x dy \quad (2.7)$$

Formulation volumes finis

$$\frac{\partial}{\partial t} (\dots w)_i V_i = \left((\dots w \bar{u})_{i+1/2} \bar{e}_x \Delta y + (\dots w \bar{u})_{i-1/2} \bar{e}_x \Delta y \right) \quad (2.8)$$

Avec : $(\dots w)_i$ la valeur moyenne sur le volume et $(\dots w)_{i\pm 1/2} = f_{i\pm 1/2}$ les flux moyen dans les cas 2D et 3D) posons $\bar{u} > 0$. Multiplication par \bar{e}_x donne :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\dots w)_i V_i = - \left((\dots w u)_{i+1/2} \Delta y - (\dots w u)_{i-1/2} \Delta y \right) \quad (2.9)$$

Avec la notation WPE :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\dots w)_p V_p = \left((\dots w u)_e \Delta y + (\dots w u)_w \Delta y \right) \quad (2.10)$$

Pour un maillage de type cellule centre $(\dots w)_p$ est connue au moment $t=0$, (initialisation)

Interpolation à partir de valeur connue : choix d'un schéma d'approximation

$$(\dots w u)_e = (\dots w u)_E \} e + (\dots w u)_P (1 - \} e) \quad (2.11)$$

Avec :

$$\} _e = \frac{x_e - x_P}{x_E - x_P} \quad (2.12)$$

Maillage régulier :

$$(\dots Wu)_e = \frac{(\dots Wu)_E + (\dots Wu)_P}{2} \quad (2.13)$$

Discrétisations temporelle-schéma d'Euler :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\dots W)_P = \frac{(\dots W)_P^{n+1} + (\dots W)_P^n}{\Delta T} + v (\Delta t) \quad (2.14)$$

Schéma explicite en temps et centré en espace (Maillage régulier)

$$\frac{(\dots W)_P^{n+1} + (\dots W)_P^n}{\Delta T} V_P = - \left((\dots Wu)_e^n \Delta y - (\dots Wu)_W^n \Delta y \right) \quad (2.15)$$

$$= - \left(\frac{(\dots Wu)_E^{n+1} + (\dots Wu)_W^n}{2} \right) \Delta y \quad (2.16)$$

$$(\dots W)_P^{n+1} = (\dots W)_P^n - \frac{\Delta t}{2V} \left((\dots Wu)_E^n - (\dots Wu)_W^n \right) \Delta y \quad (2.17)$$

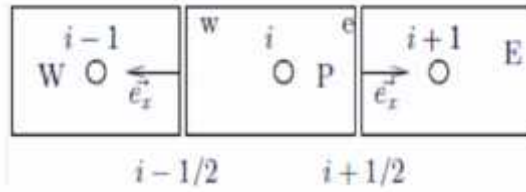
Diffusion :

Le flux diffusif dans l'équation de transport :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega_{cv}} \dots W d\Omega = - \int_{\partial \Omega_{cv}} \vec{F}_d \vec{A}_n + \int_{\Omega_{cv}} S_w d\Omega \quad (2.18)$$

Est $\vec{F}_d = \dots D \text{grad} w$

Formulation de volume finis



En 1D $DgradW = \frac{\partial W}{\partial t} \vec{i}_x$

$$\frac{\partial}{\partial t} (...W)_i V_i = \vec{F}_{d_{i+1/2}} \vec{e}_x \Delta y + \vec{F}_{d_{i-1/2}} \vec{e}_x \Delta y = F_{d_{i+1/2}} \Delta y - F_{d_{i-1/2}} \Delta y \tag{2.19}$$

Avec $(...W)_i$ la valeur moyenne sur le volume et $F_{d_{i\pm 1/2}} = \left(...D \frac{\partial W}{\partial x} \right)_{i\pm 1/2}$

Pour simplifier considérons $... = cste$

Estimation centrée du flux

$$\left(D \frac{\partial W}{\partial x} \right)_{i+1/2} \approx D_{i+1/2} \frac{W_{i+1} - W_i}{x_{i+1} - x_i} \tag{2.20}$$

Avec $D_{i+1/2} = 0.5(D_{i+1} + D_i)$

Intégration explicite en temps donne :

$$W_i^{n+1} = W_i^n \frac{\Delta t}{V_i} \left(D_{i+1/2} \frac{W_{i+1} - W_i}{x_{i+1} - x_i} \Delta y - D_{i-1/2} \frac{W_i - W_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \Delta y \right) \tag{2.21}$$

Advection -diffusion schéma explicite en temps

$$W_i^{n+1} = W_i^n \frac{\Delta t}{V_i} \left[\underbrace{\left((\vec{F}_c^n \Delta y)_{i+1/2} - (\vec{F}_c^n \Delta y)_{i-1/2} \right)}_{Advection} - \underbrace{\left((\vec{F}_d^n \Delta y)_{i+1/2} - (\vec{F}_d^n \Delta y)_{i-1/2} \right)}_{Diffusion} \right] \tag{2.22}$$

Chapitre 03

Simulation Numérique

3.1. Résolution numérique

Les résultats de la simulation numérique sont obtenus à l'aide d'un code de calcul dont la réalisation résulte d'études et de recherches portant successivement sur les thèmes suivants :

- La modélisation du problème physique : elle consiste à traduire la physique en un problème mathématique bien pose, complète par des conditions initiales et des conditions aux limites.
- Une étape de discrétisation, c'est d'approcher ces opérateurs classiques de l'analyse fonctionnelle par des expressions ne faisant intervenir que des opérations arithmétiques. On notera que cette opération de discrétisation se porte non seulement sur les EDP mais également sur le domaine de calcul discrétisé en un maillage constitué d'un ensemble discret d'éléments géométriques (volumes de contrôle élémentaires). Le résultat de cette discrétisation conduit à un système d'équations algébriques de très grande dimension.
- La troisième étape consiste à résoudre le système à l'aide d'un algorithme approprié.

Ces trois étapes fondamentales sont suivies d'une étape de mise en œuvre des discrétisations et des algorithmes associés dans un code de calcul dont la validation permet, d'une part, de vérifier la pertinence des choix techniques effectués et, d'autre part, de préciser le domaine d'application du logiciel et, par conséquent, des modélisations physiques et numériques sous-jacentes.

Le solveur CFX 13.0 est utilisé pour la résolution de notre problème. Il est pratiqué dans le domaine de la dynamique des fluides CFD (ComputationalFluid Dynamics). Il utilise entre autre la méthode des volumes finis (MVF), c'est une méthode semi intégrale qui procède par intégration des équations locales sur un ensemble discret de volumes de contrôle englobant les points de calculs. Cela conduit à des équations discrètes exprimant la conservation exacte de toutes les quantités transportables.

3.2. Présentation du solveur CFX5

Le but de cette section est de présenter une marche à suivre pour effectuer une simulation numérique sur le solveur CFX5 (version 13.0). Ce solveur est conçu pour les simulations dans

le domaine de la dynamique des fluides. On propose ainsi une rapide description des problèmes liés

à la définition de la géométrie, à la génération du maillage et à l'initialisation de la solution. Cette section a uniquement pour but de faciliter la mise en œuvre d'une simulation en mettant en évidence quelques aspects pratiques au niveau de l'utilisation des différents logiciels. Le processus pour effectuer une simulation de CFD (ComputationalFluid Dynamics) est composé comme suivant :

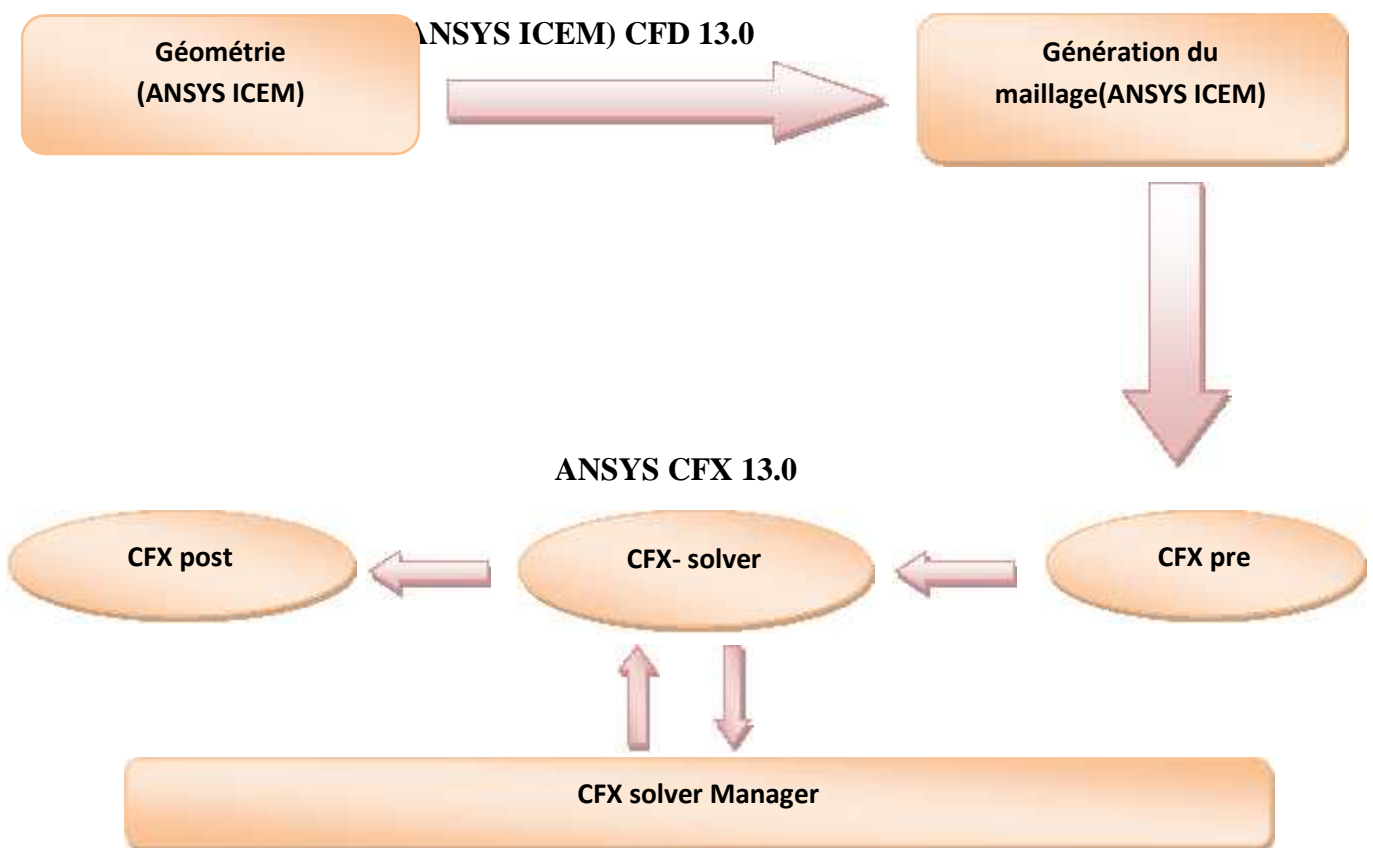


Figure 3.1 : Les modules principaux du CFX 13.0

3.2.1. ICEM CFD

Permet de préparer la configuration géométrique du problème étudié et de générer le maillage de manière assez conviviale bien qu'assez simple. Quand il s'agit de géométries complexes, ICEM CFD peut être couplé avec d'autres logiciels manilleurs pour la réalisation de la géométrie ainsi que le maillage. L'un des avantages de ce logiciel est sa simplicité ainsi que sa robustesse envers la réalisation des géométries les plus complexes. Pour le maillage, ICEM

CFD 13.0 utilise des structures mono ou multi blocs en fonction de la géométrie, il permet de générer deux types de maillages, le maillage en tétraèdre et en hexaèdre.

Pour la création de la géométrie, et le maillage du domaine de calcul nous avons utilisé un software de haute qualité « ICEM CFD 13.0 » et qui permet d'exporter le maillage généré au CFX-Pre.

La figure 3.2 présente l'interface du logiciel ICEM CFD, sur laquelle on voit la géométrie du problème simulé dans ce mémoire ainsi que le type du maillage, qui est un maillage tetrahedral.

La figure 3.2 présente l'interface du logiciel ICEM CFD, sur laquelle on voit la géométrie du problème simulé dans ce mémoire ainsi que le type du maillage, qui est un maillage tetrahedral.

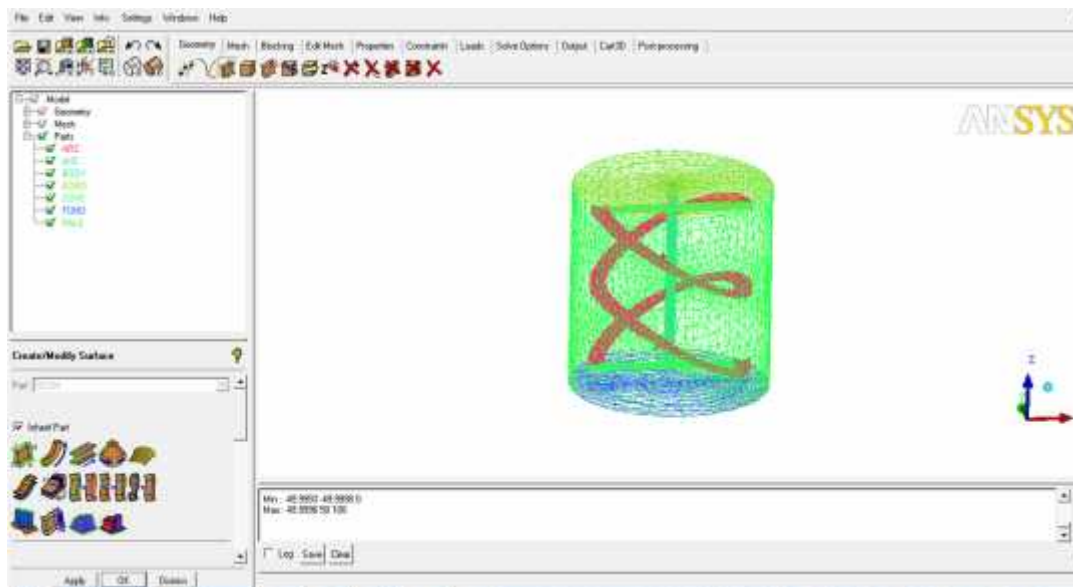


Figure 3.2 : Géométrie et génération du maillage par « ICEM CFD 13.0 CFX

3.2.2. CFX Pre

C'est une interface puissante pour la définition du problème (modèle choisit, condition initiale, condition aux limite, propriété du fluide ...etc.) c'est le pré-processing « CFX-pre ».

Il permet d'importer le maillage de la géométrie étudiée, construit par le module CFX-BUILD ou l'importer à partir d'un autre logiciel (DAO), générateur de maillage tels que ICEM

CFD, GAMBIT. Le CFX-Pre est conçu pour spécifier la nature de l'écoulement (permanent ou transitoire), laminaire ou turbulent, et pour introduire les conditions initiales et aux limites du problème étudié ainsi que les paramètres de convergence (nombre d'itérations et la tolérance d'erreur).

La figure 3.3 présente l'interface du code de calcul CFX-Pre, sur laquelle on voit domaine de calcul.

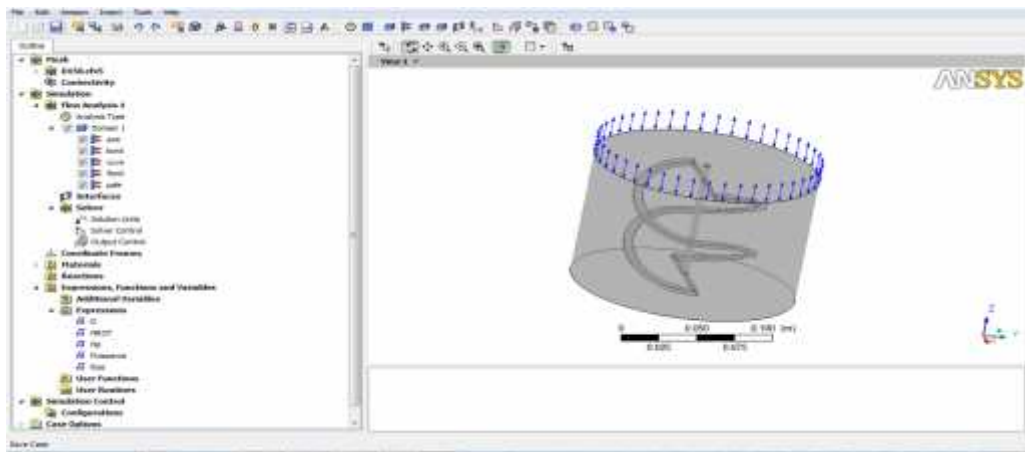


Figure 3.3: Géométrie importée par le CFX-Pre

3.2.3. CFX Solver

Il permet de résoudre les équations de l'hydrodynamique modélisant le problème physique étudié. Toutes les spécifications du problème produites dans le module CFX-Pre sont résolues par CFX Solver pour un nombre d'itération bien défini et une erreur tolérée.

Un solveur de solution (solvermanager) qui permet le retour d'information sur la progression de convergence à travers la définition d'exécution et le contrôle, avec des graphes configurés pour l'utilisateur aussi bien que l'affichage du multiple exécution simultanément sur écran.

La figure 3.4 présente l'interface du code de calcul CFX-solver, sur laquelle on voit la convergence des courbes des vitesses et pressions.

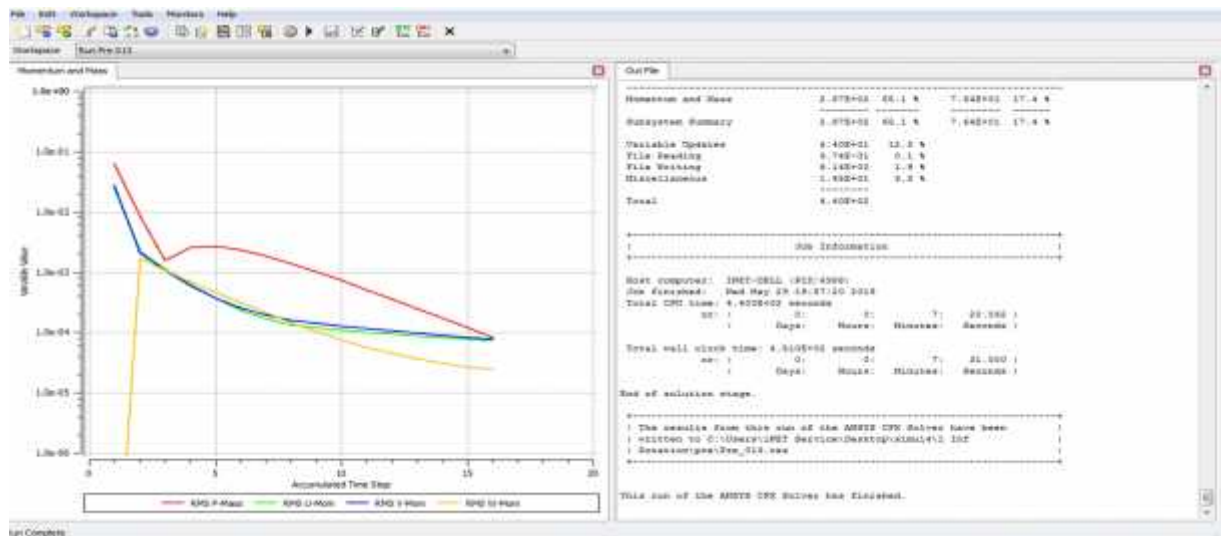


Figure 3.4 : Convergence des résultats par le solveur

3.2.4. CFX Solver Manager

C'est un module qui permet de gérer la tâche CFD. Ses fonctions principales sont les suivantes :

- Indiquer les dossiers d'entrée au solveur CFX 13.0;
- Lancer ou arrêter la simulation avec le solveur CFX 13.0 ;
- Surveiller la progression de la solution avec le solveur CFX 13.0 ;
- Lancer une autre simulation en parallèle.
- Le calcul doit être effectué avec un taux résiduel choisi, un temps moyenne de calcul déterminé, et un nombre d'itération maximum donné.

3.2.5. CFX Post

Permet de visualiser les résultats obtenus par le solveur, champs de vecteurs , de température ,les surfaces d'iso valeur , les lignes de courant ainsi que beaucoup d'autre paramètres ou de valeur de fonctions qui dépendent de ces paramètres ; il permet aussi de tracer des graphes de variables et exporter les résultats vers d'autre logiciels graphiques comme « Origine ou Tecplot ».

La figure 3.5 présente l'interface du CFX-Post, sur laquelle on voit un exemple des lignes de courant dans la cuve agitée.

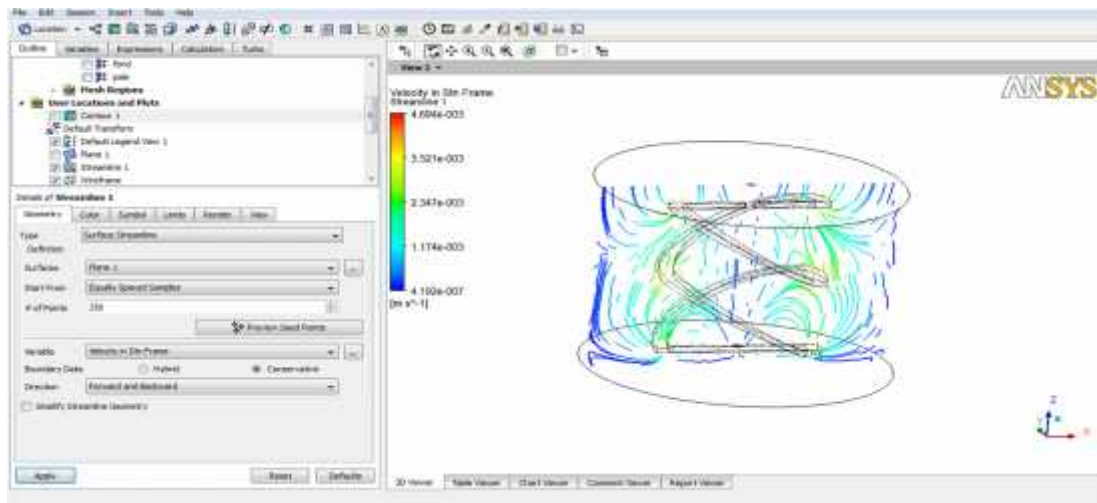


Figure 3.5 : Interface du CFX-Post

3.3. Les étapes de la simulation (par ICEM et CFX) :

L'objectif de ce travail est de faire une simulation numérique d'un écoulement d'un fluide Newtonien dans une cuve mécaniquement agitée.

Pour ce type de simulation, on doit passer par quelques étapes nécessaires pour arriver aux résultats escomptés :

Premièrement, on commence par dessiner la géométrie et ensuite générer un maillage à l'aide du logiciel ICEM CFD, ensuite faire la simulation en utilisant le CFX. Pour avoir une bonne prédiction au cours de cette simulation, il est nécessaire d'injecter tous les paramètres entrants dans la configuration de cette étude.

3.2.1. Création de la géométrie

Pour générer la géométrie on utilise le logiciel ICEM CFD 13.0. Tout d'abord, on doit choisir un système de coordonnées afin de caractériser la géométrie, pour cela on doit avoir recours au pré -processeur afin d'indiquer, dans le système de coordonnées choisi, les coordonnées des points délimitant chaque bloc de forme potentiellement irrégulières.

3.2.2 Génération du maillage

La spécification du maillage dépend de la complexité de la géométrie, le logiciel ICEM-CFD nous donne la possibilité soit de générer un maillage tétraédrique ou hexaédrique ; le maillage tétraédrique est un maillage semi-automatique très simple à générer, par contre le maillage hexaédrique nécessite des étapes supplémentaires tel que les projections des courbes et des surfaces

Dans la région proche de la paroi, les effets de la couche limite provoquent un grand gradient de la vitesse, normale à la surface.

Numériquement, un maillage efficace dans cette région exige que les éléments aient la hauteur aplatie. Si la forme tétraédrique est utilisée, nous risquons d'avoir des éléments tétraédriques fortement tordus. Le maillage du ICEM-CFD surmonte ce problème en employant des prismes pour créer un maillage fin qui est normale à la paroi, mais parallèle à elle.

3.2.3. Résolution du problème (Le Pre-processing)

Avant de lancer le CFX, on doit respecter et connaître les données suivantes :

- Les critères de convergence

Une procédure est convergente si toute erreur tend à décroître au cours des itérations, elle est convergée lorsque les itérations ne produisent plus de changements significatifs sur les variables selon un critère qu'on doit définir, donc le critère de convergence est utilisé pour stopper le processus itératif lorsqu'il est satisfait.

Le critère de convergence utilisé par le CFX14.0 repose sur le résidu d'une équation du problème qu'on définit : $R = \sum_{\text{des mailles}} (a^* + S - a^*)$

- Temps de simulation de l'écoulement

Dans le cas d'un écoulement non permanent, deux possibilités s'offrent à l'utilisateur; soit il lui suffit de spécifier la valeur des pas de temps déterminant le temps sur lequel l'utilisateur souhaite étudier son écoulement avec une taille de pas de temps pouvant varier tout au long de la simulation (fixed time stepping), soit il fixe une valeur de pas de temps maximale, une valeur de pas de temps minimale et un temps de simulation.

Ensuite, le logiciel utilise le pas de temps maximal et le réduit lorsqu'il y a un problème de convergence selon un critère de réduction du pas de temps défini par l'utilisateur. Un critère d'augmentation est également nécessaire dans le cas de convergence sur un nombre (donné aussi par l'utilisateur) de pas de temps consécutifs ("adaptive time stepping").

3.3.Considérations du problème

Les considérations suivantes sont prises pour notre simulation :

- a) Le nombre de Reynolds est inférieur à 500 (régime laminaire).
- b) Le processus est isotherme.
- c) Le régime est permanent.
- d) Les fluides simulés sont visqueux, Newtoniens et incompressibles (eau et glycérol). Le tableau 3.1 résume les propriétés des fluides utilisés.

Tableau 3.1: Propriétés des fluides

Glycérol	Eau
Densité = 1262 [kg /m ³]	Densité = 997.0 [kg/ m ³]
Masse molaire = 92.09 [kg/ kmol]	Masse molaire = 18.02 [kg /kmol]
Viscosité Dynamics = 1495 x 10 ⁻³ [kg /m s]	Viscosité dynamique = 8.899 x 10 ⁻⁴ [kg/ m s]

3.4. Présentation de géométrie

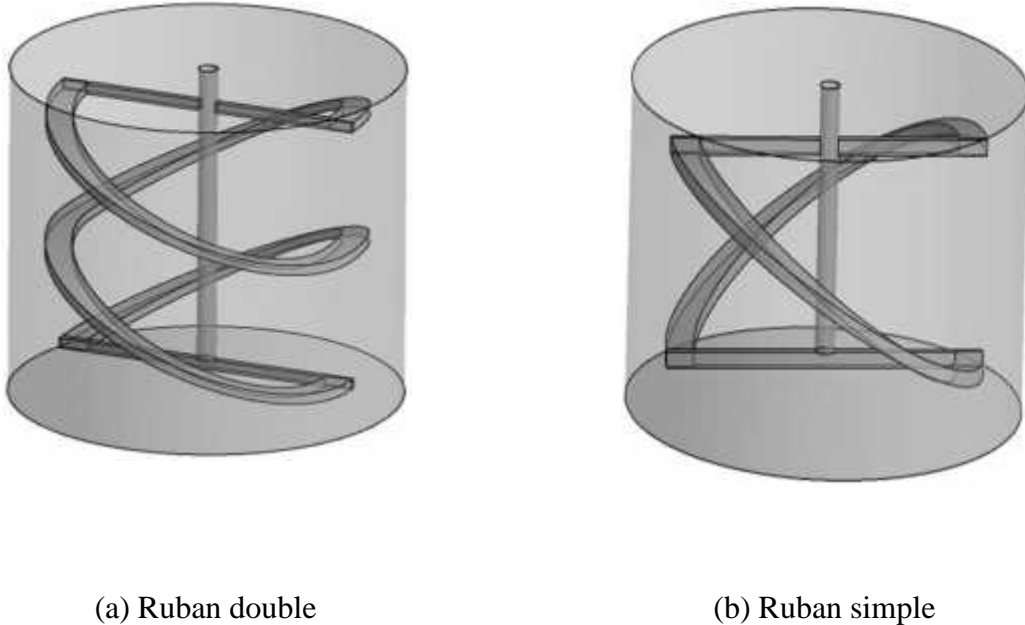


Figure 3.6 : Géométries du problème étudié

La géométrie du problème étudié est une cuve cylindrique à fond plat et non chicanée (Figure 3.6), le niveau du liquide est égal à la hauteur de la cuve $H = 100$ mm. Le diamètre de l'arbre d'agitateur $d_s/H = 0.05$. Une comparaison a été faite entre un ruban simple et autre ruban double, comme le montre cette figure. En outre, l'effet du diamètre de la cuve est investigué et 2 cas sont considérés : $D = 0.1$ et 0.2 m. la hauteur de l'agitateur est presque égale à la hauteur de la cuve.

Concernant le maillage choisit, c'est le type tetrahedral comme le montre la figure 3.7.

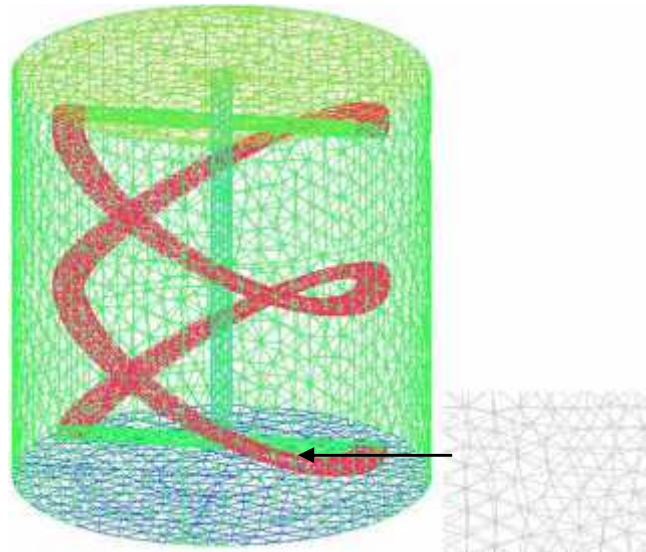


Figure 3.7 : Grille du maillage (tetrahedral)

Avec : nombres des nouds : 341232

3.5. Modélisation numérique d'une cuve agitée :

L'écoulement laminaire et isotherme d'un fluide agité par un mélangeur tournant dans une cuve est décrit par les équations de continuité et de quantité de mouvement suivantes :

$$\frac{\partial \dots}{\partial t} = -\nabla \cdot \dots v \tag{3.1}$$

$$\frac{\partial (\dots v)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\dots v v) - \nabla p + \nabla \cdot \ddagger + \dots g + F \tag{3.2}$$

Avec : ρ , p , v , g , F et \ddagger respectivement sont : la densité du fluide, pression, vitesse, pesanteur, force, et le tenseur de contrainte donné par :

$$\ddagger = \mu \left[(\nabla v) + (\nabla v)^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot v) I \right] \tag{3.3}$$

Dans l'équation précédente, μ est la viscosité moléculaire, et I est le tenseur unité. Pour un fluide incompressible, le tenseur de contrainte est donné par :

$$\ddagger = \sim [(\nabla v) + (\nabla v)^T]$$

- **Repère spatial**

Dans un système de repère fixe lié à la paroi de la cuve, la vitesse en un point donné périodiquement à la fréquence de passage des pales de l'agitateur. Nous avons choisi un système de repère mobile lié à l'agitateur tournant à la même vitesse angulaire car la vitesse en un point donné est une valeur constante. Dans le repère mobile, le problème est analogue à un écoulement d'un fluide autour des pales maintenues fixes par rapport à une cuve en rotation.

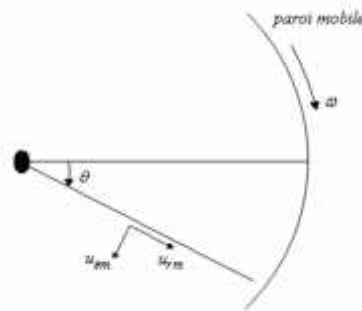
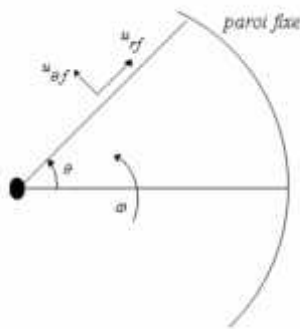


Figure 3.8 :Repère fixe Figure 3.9 : Repère mobile

La rotation de l'agitateur introduit un régime hydrodynamique périodique. Pour obtenir un régime permanent et pour simplifier l'écriture des conditions aux limites, il faut choisir un repère tournant lié à l'agitateur, dans lequel celui-ci est fixe tandis que la paroi de la cuve tourne. La vitesse radiale u_r ne se trouve pas modifiée alors que la vitesse Tangentielle $u_{,m}$ obéit à la loi :

$$u_{,f} = u_{,m} + \Omega.r \tag{3.4}$$

$u_{,f}$: vitesse tangentielle dans le repère fixe.

$u_{,m}$: vitesse tangentielle dans le repère mobile.

Où r : position radiale où la vitesse tangentielle est calculée.

ω : vitesse angulaire constante de l'agitateur.

- **Mise sous forme adimensionnelle :**

Afin de rendre la formulation du problème adimensionnelle, nous avons retenu comme grandeurs de référence le rayon de la cuve $D/2$, la vitesse linéaire de la paroi de la cuve ND et la masse volumique du fluide ρ . De nouvelles inconnues sont ainsi définies :

$$r^* = \frac{2r}{D} \quad (3.5)$$

$$v^* = \frac{v}{fND} \quad (3.6)$$

Chapitre04

Résultat Et Discussion

4.1. Validation

Au début, et avant de commencer notre investigation sur le problème en question, on a vu nécessaire de vérifier la fiabilité du code de calcul et de la méthode numérique utilisée. A cette fin, on s'est référé au travail de [2] et nous avons réalisé une configuration géométrique similaire (il s'agit d'une cuve cylindrique fond plat et non chicanée, équipé d'un agitateur à double ruban). Pour une position angulaire correspondant à $\theta = 90^\circ$, la vitesse axiale est présentée sur la figure 4.1. Comme illustré sur cette figure, la comparaison entre nos résultats et ceux de Anne-Archard et ces co-auteurs montre un accord satisfaisant.

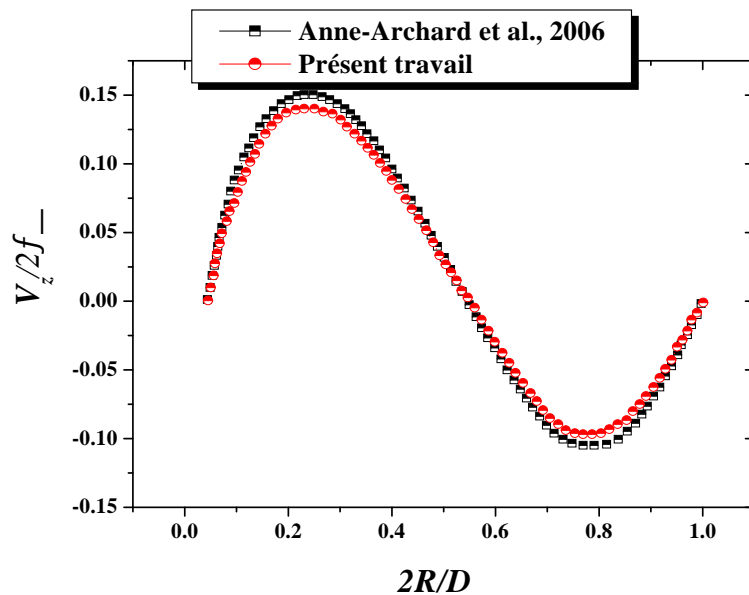


Figure 4.1 : Vitesse axiale pour un ruban double, $\theta = 90^\circ$

4.2. Résultats et discussion

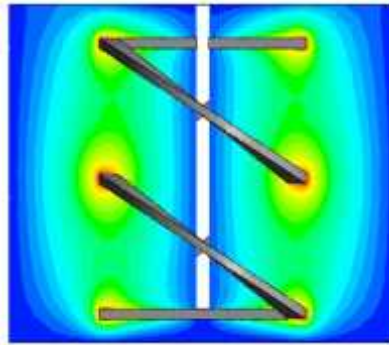
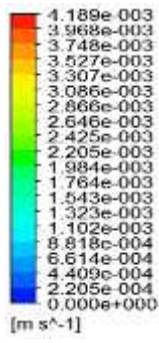
4.2.1. Influence de la vitesse de rotation d'agitateur

Commençons l'analyse en testant les effets de la vitesse de rotation d'agitateur sur les champs d'écoulements générés. Le nombre de tours (N) a été varié de 1 à 150 tr/min. L'origine de coordonnées tangentielle () est située sur l'allongement de la pale.

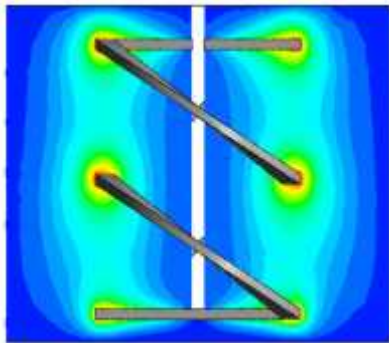
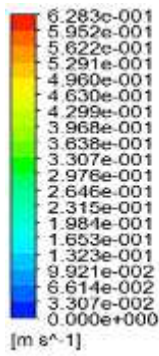
La Figure 4.2 représente les contours de vitesse sur un plan vertical le long de la pale et son extension (c.à.d. $\theta = 0^\circ$). Une autre visualisation des champs d'écoulement est présentée sur la Figure 4.3, où un plan horizontal situé à mi-hauteur de la cuve ($Z/D = 0.5$) est choisit. Puis et pour avoir plus de détails sur la variation de vitesse en fonction de la hauteur de la cuve (Figure 4.4), les courbes sont choisit à une position proche de l'extrémité des pales.

Il peut être clairement vu que la vitesse augmente rapidement pour atteindre son maximum au bout de la pale, puis elle commence à diminuer lorsqu'on s'éloigne de la source mécanique, jusqu'à ce qu'elle devient nulle sur la paroi de la cuve.

Comme observé sur ces figures, à bas nombre de tours ($N = 1$ tr/min), la circulation des particules de fluide est très faible, mais l'augmentation du N donne des taux de cisaillement plus élevés. La vitesse de rotation suffisante de l'agitateur peut éliminer la zone morte générée au niveau de chaque côté de la pale et fait améliorer la circulation axiale du fluide. Par conséquence, la zone agitée devient plus large et l'écoulement plus intense.

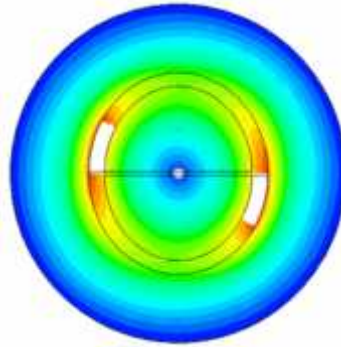
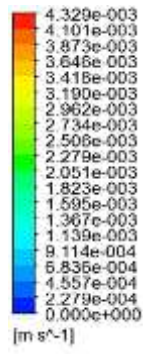


$N=1\text{tr/min}$

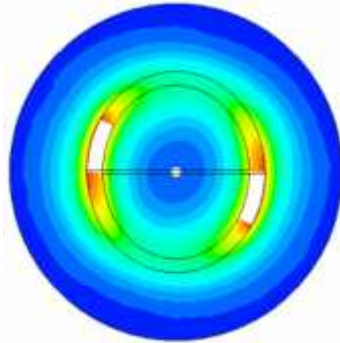
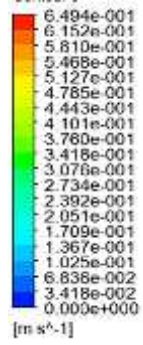


$N=150\text{tr/min}$

Figure 4.2 : Contours de vitesse sur un plan vertical pour un double ruban, glycérol, $D = 0.1$ [m]



$N=1\text{tr}/\text{min}$



$N=150\text{tr}/\text{min}$

Figure 4.3 : Contours de vitesse pour un double ruban, glycérol, $D = 0.1$ [m]

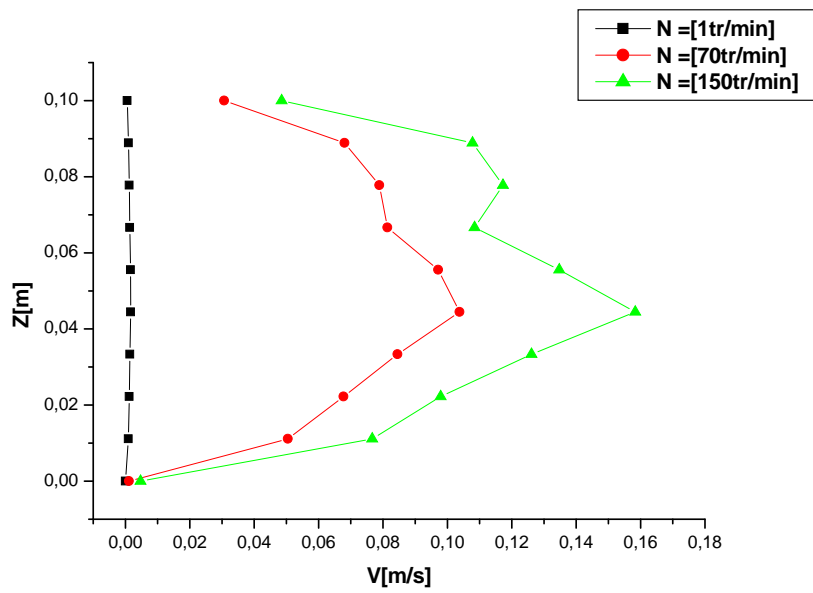
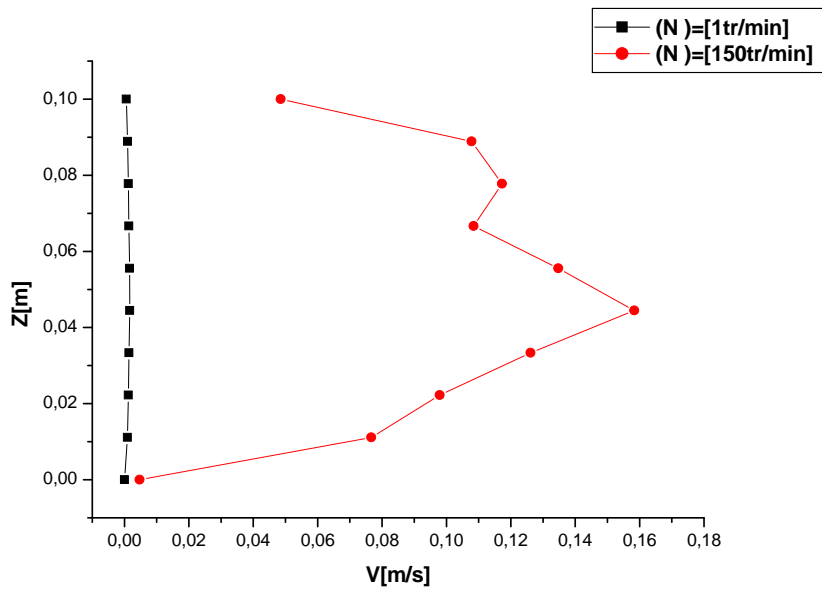


Figure 4.4 : Distribution de vitesse en fonction de la hauteur de la cuve, à $2R/D = 0.7$, pour un double ruban, glycérol, $D = 0.1$ [m]



4.2.2. Influence du diamètre de la cuve

Ici, on explore l'effet d'un autre paramètre géométrique sur la structure d'écoulement. Il s'agit de l'ampleur du volume de la cuve. Deux valeurs du diamètre de la cuve sont prises pour effectuer le test, et qui sont : $D = 100$ et 200mm .

Les champs d'écoulement sont présentés sur la Figure 4.5 sur un plan vertical qui passe par le prolongement des bras de l'agitateur. Aussi, une visualisation des variations des vitesses le long de la hauteur de la cuve est illustrée sur la Figure 4.6 pour les deux valeurs des diamètres de la cuve.

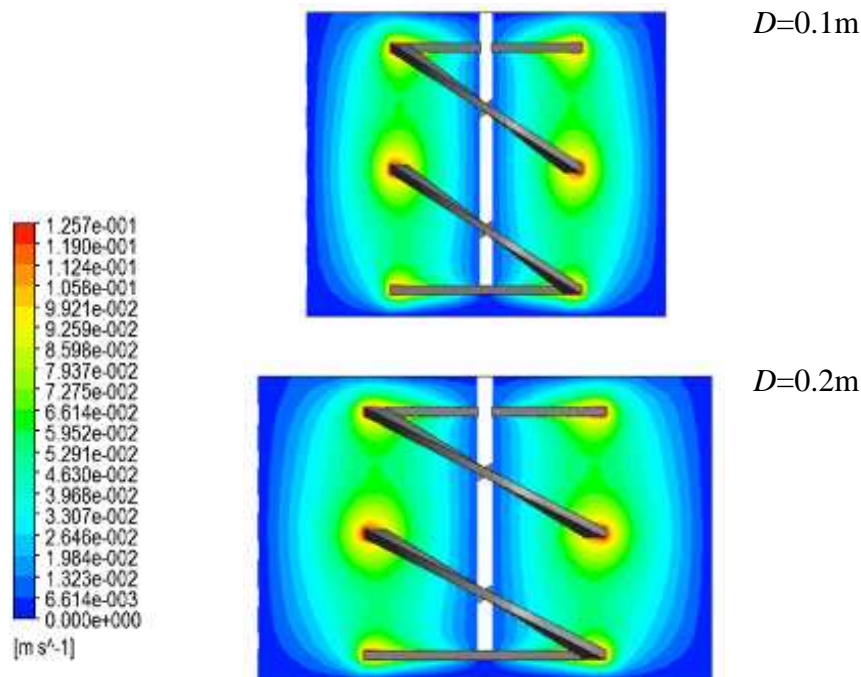


Figure4.5 : Contours de vitesse sur un plan vertical, pour un double ruban

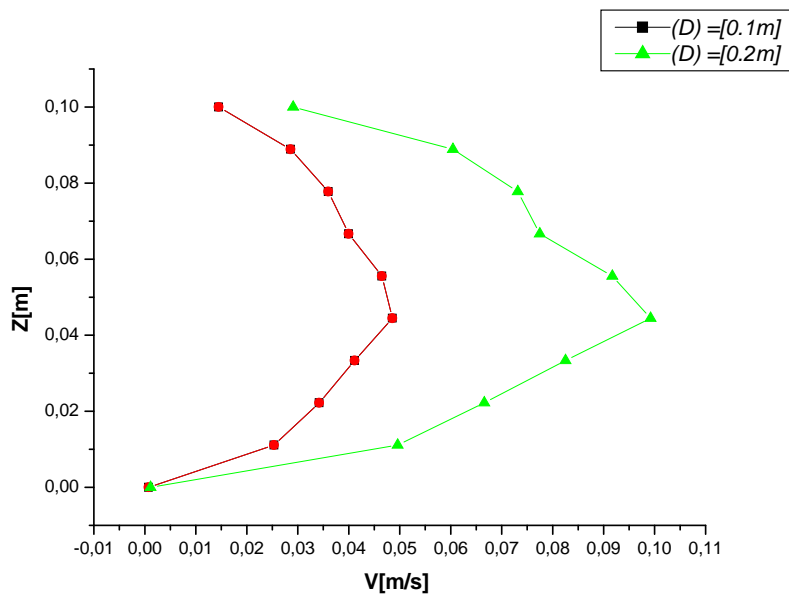


Figure 4.6 : Distribution de vitesse en fonction de la hauteur de la cuve, à $2R/D = 0.7$, pour un double ruban, glycérol, $N = 70$ tr/min

4.2.3. Effet de la viscosité du fluide

Dans la troisième partie de notre étude, on s'est intéressé à une propriété du fluide, c'est sa viscosité. Deux fluides sont utilisés et qui sont : l'eau et le glycérol.

Les résultats prédits numériquement montrent que, la faible force de liaison moléculaire permet une circulation rapide des particules de fluide et une formation tourbillonnaire près des pales (Figure 4.7). Et s'il s'agit du même nombre de tours, la vitesse maximale atteinte est marquée pour le fluide plus visqueux (Figure 4.8). Ainsi, la taille de la zone bien agitée est plus large pour un fluide peu visqueux (Figures 4.9 et 4.10).

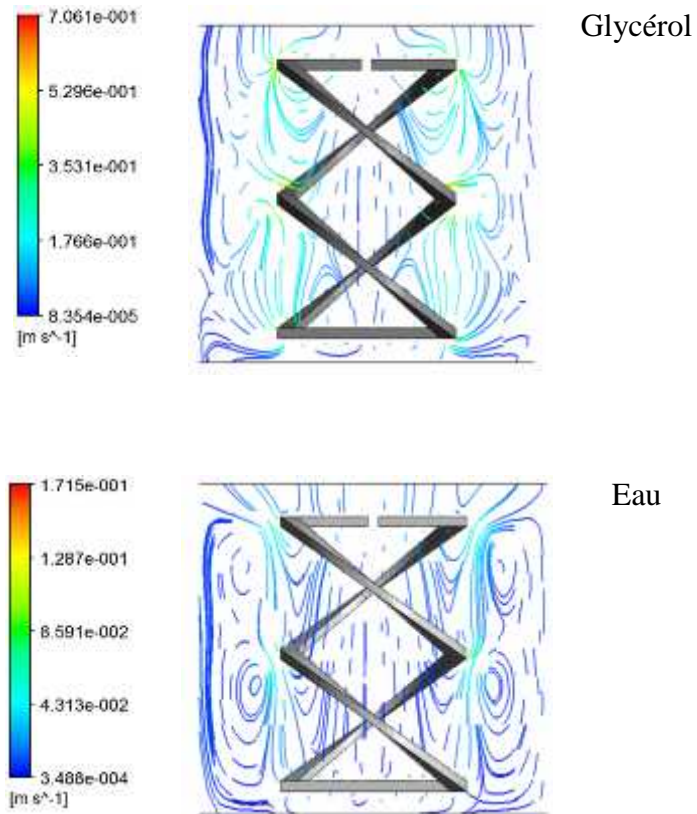


Figure 4.7: Lignes de courant sur un plan vertical, pour $N=70$ tr/min, double ruban, $D = 0.1$ [m]

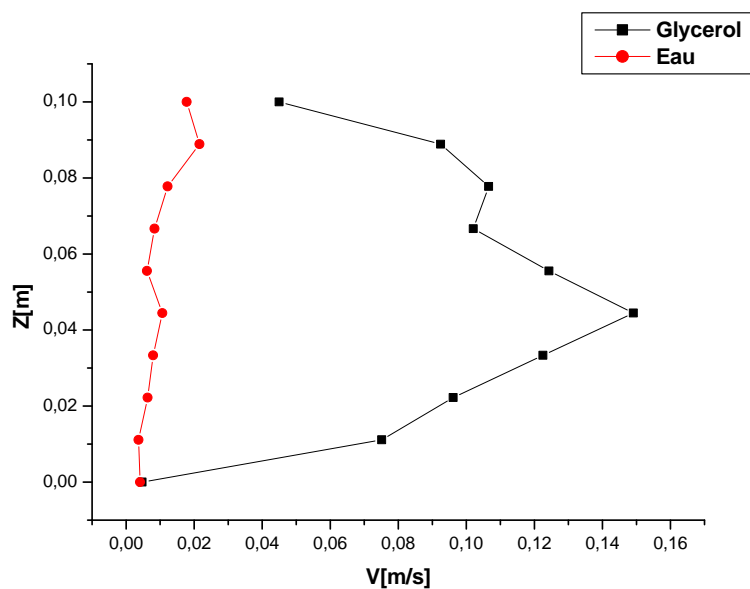
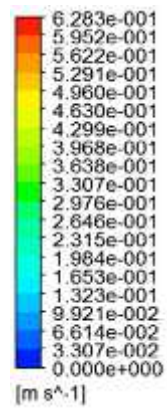
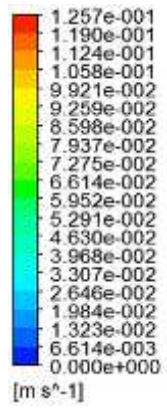
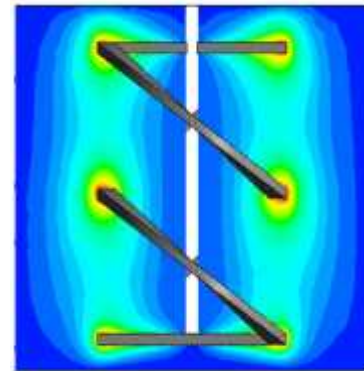


Figure 4.8 : Distribution de vitesse en fonction de la hauteur de la cuve pour $N=70$ tr/min, double ruban, $2R/D = 0.7$, $D = 0.1$ [m]



Glycérol



Eau

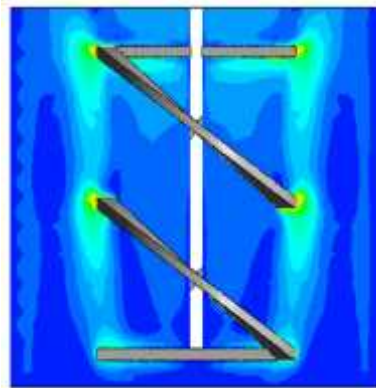
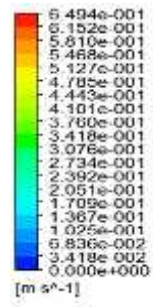
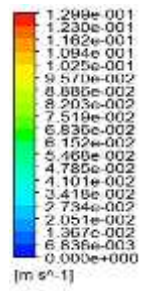
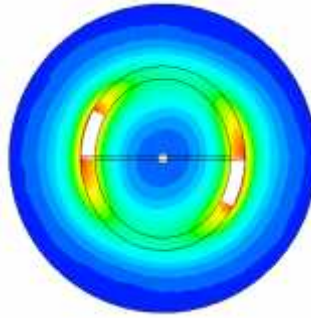


Figure4.9: Contours de vitesse sur un plan vertical pour $N=70$ tr/min, double ruban, $D = 0.1$ [m]



Glycérol



Eau

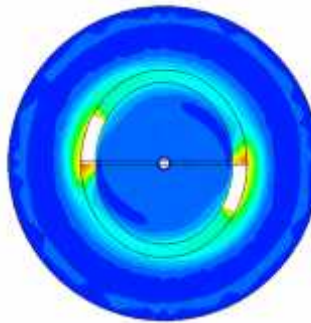


Figure4.10: Contours de vitesse pour $N=70$ tr/min, double ruban, $D = 0.1$ [m]

4.2.4. Comparaison entre un ruban simple et un ruban double

L'effet d'un autre paramètre géométrique est exploré dans cette section, il s'agit du nombre des rubans. Une comparaison est faite entre un simple ruban et un double ruban.

Les lignes de courant, les contours de vitesses sur un plan vertical et un autre horizontal sont présentés sur les Figures 4.11, 4.12 et 4.13, respectivement.

Il semble que l'augmentation des nombres des rubans est bénéfique si l'on souhaite intensifier l'écoulement, améliorer la circulation des particules des fluides dans la direction tangentielle et axiale, et aussi élargir la taille de la zone bien agitée.

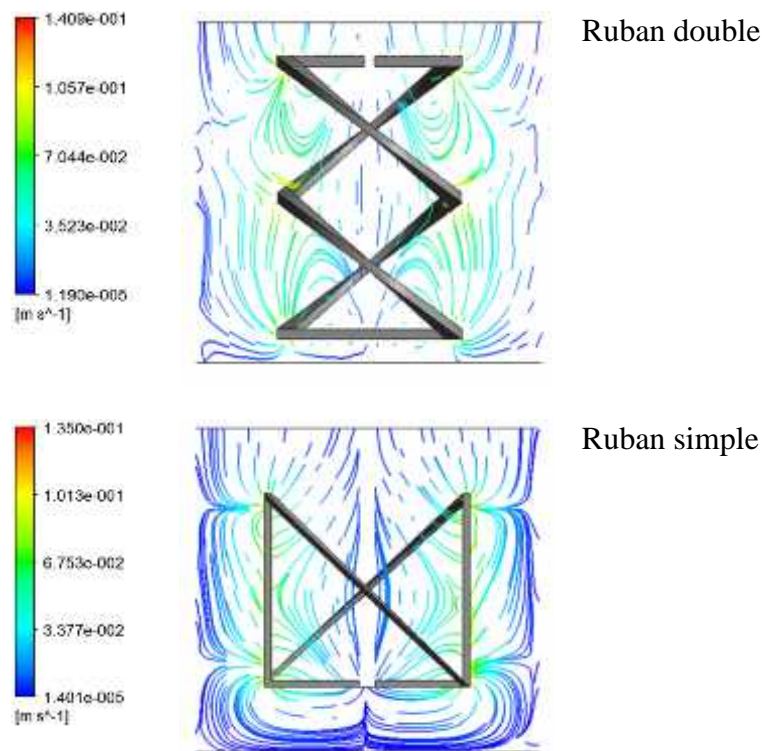


Figure4.11: Lignes de courant sur un plan vertical, pour $N = 70$ [tr/min], glycérol, $D = 0.1$ [m]

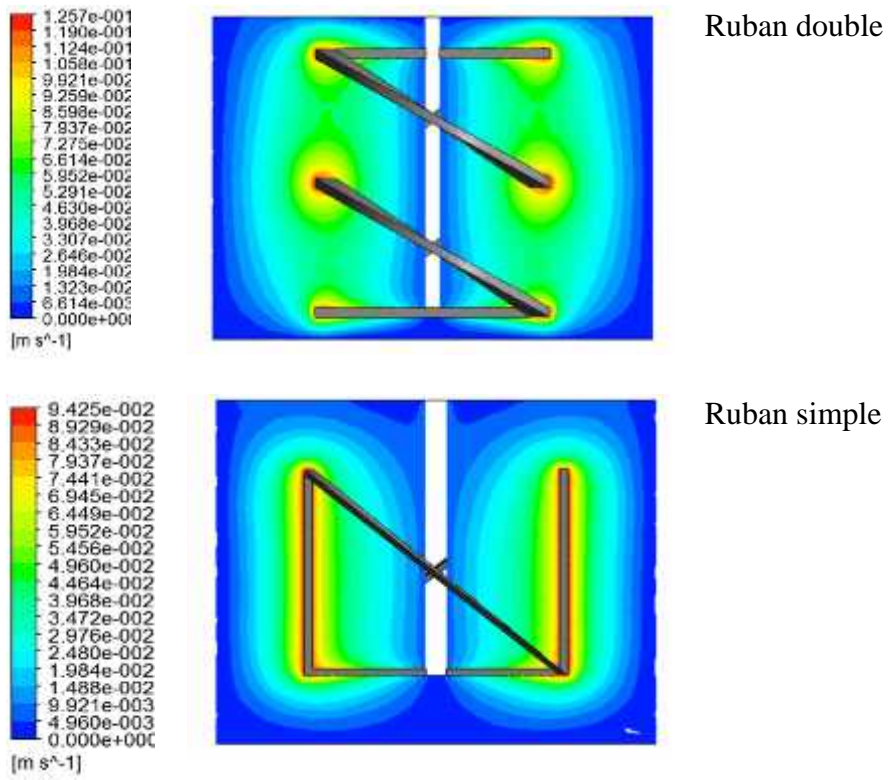
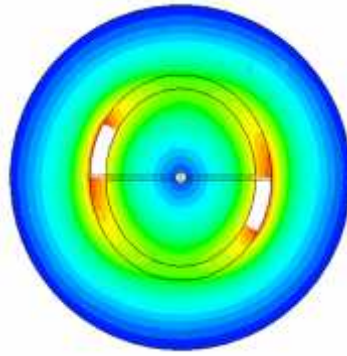
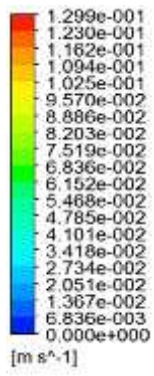
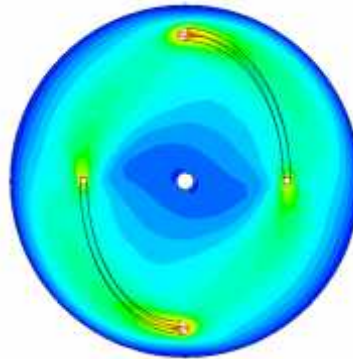
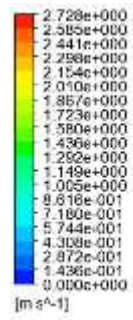


Figure4.12: Contours de vitesse sur un plan vertical, pour $N = 70$ [tr/min], glycérol, $D = 0.1$ [m]



Ruban double



Ruban simple

Figure 4.13: Contours de vitesse sur un plan horizontal à $Z/D = 0.5$, pour $N = 70$ [tr/min], glycérol, $D = 0.1$ [m]

4.2.5. Puissance consommée

La puissance consommée est l'un des paramètres très importants pour déterminer les performances globales d'un système mécaniquement agité. La puissance consommée est exprimée par le nombre adimensionnel Np (nombre de puissance) défini dans le chapitre 1. Dans cette section, nous présentons les résultats du Np en fonction des différents paramètres étudiés.

Les figures 4.14, 4.15 et 4.16 illustrent respectivement les valeurs du Np en fonction de la viscosité du fluide, du nombre des rubans et vitesse de rotation de l'agitateur.

L'augmentation de la viscosité du fluide crée plus de frottement entre les molécules du fluide et avec les parois de la cuve et agitateur. Par conséquent, plus de dissipation visqueuse sera générée au niveau des pales de l'agitateur. La puissance consommée sera ainsi augmentée (Figure 4.14).

L'augmentation du nombre des pales a été trouvée bénéficiaire en termes d'amélioration de la circulation des particules du fluide (section précédente), mais cela a demandé plus de consommation de puissance (Figure 4.15).

Enfin, le nombre de tours de l'agitateur est en proportionnalité avec le nombre de puissance (Figure 4.16). L'augmentation du N fait diminuer la puissance requise.

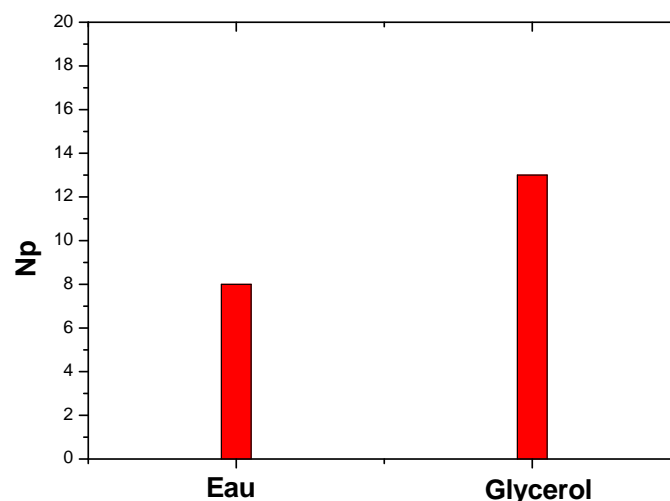


Figure 4.14: Variations du nombre de puissance en fonction de la viscosité (Eau, Glycerol), pour $N = 10$ tr/min, ruban simple

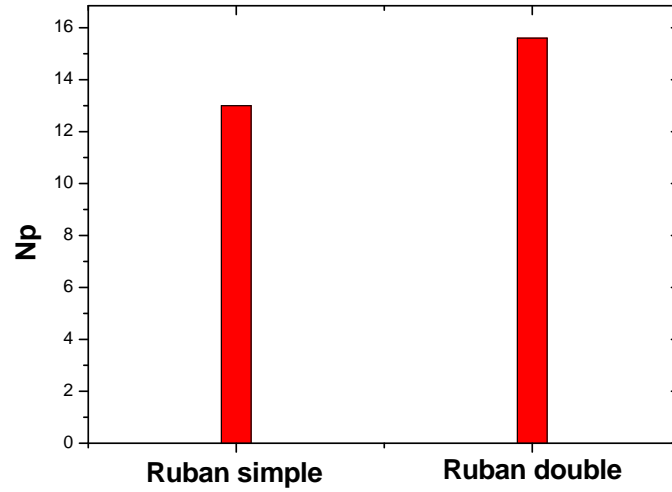


Figure 4.15: Variations du nombre de puissance en fonction du type des agitateurs (ruban simple et ruban double), pour $N = 10$ tr/min

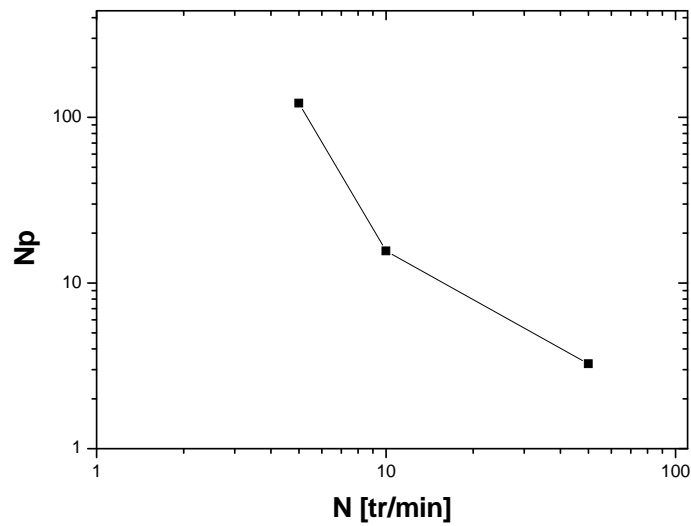


Figure 4.16: Variations du nombre de puissance en fonction de la vitesse de rotation de l'agitateur, ruban double, glycerol.

Conclusion

General

Les performances hydrodynamiques d'un agitateur hélicoïdal dans une cuve cylindrique ont été déterminées numériquement. L'investigation a été achevée à l'aide du code de calcul CFX. L'influence de certains paramètres a été explorée : vitesse de rotation du mélangeur (N) et viscosité du fluide, diamètre de la cuve (D) et nombre des rubans.

Les principaux avantages de ce type des agitateurs sont la génération des contraintes de cisaillement relativement uniformes dans tout le volume, contrairement aux turbines, où de hauts cisaillements sont situés au voisinage de la turbine. Ce type d'agitateur est plus adapté aux fluides très visqueux, en régime laminaire (à faible nombre de Reynolds).

Les résultats obtenus ont montré une valeur maximale de la vitesse atteinte au bout de la pale. Ce maximum augmente, aussi la taille de la zone agitée est élargie, avec l'augmentation du nombre de tours de l'agitateur, diamètre de la cuve, la viscosité du fluide et le nombre des rubans.

Dans le but d'avoir des connaissances plus fines sur les performances de ce type d'agitateur, qui peuvent être utiles pour l'utilisateur, d'autres travaux sont proposés. Cela concerne :

- l'implantation des fluides complexes de différents comportements rhéologiques,
- régime instationnaire,
- détermination du temps de mélange et puissance consommée pour chaque cas.

Enfin, les résultats de la puissance mécanique consommée ont illustré que ce paramètre augmente avec l'augmentation de la viscosité du fluide et le nombre des rubans, et il diminue avec l'augmentation de la vitesse de rotation de l'agitateur

Référence

- [01] Ameer, H.; Bouzit, M.; Ghenaim, A. Hydrodynamics in a vessel stirred by simple and double helical ribbon impellers. *Central European Journal of Engineering*, 3, 87-98, 2013.
- [02] Anne-Archard D., Marouche M., Boisson H.C. Hydrodynamics and Metzner–Otto correlation in stirred vessels for yield stress fluids. *Chem. Eng. J.*, 125, 15-24, 2006.
- [03] André, L. L. Etude des Cuves Agitées, Comportement Hydrodynamique et Transfert à la paroi. Thèse de doctorat, France 1975.
- [04] Bertrand, F. Mécanique des fluides appliquée. Presses Internationales de Polytechniques, 2009.
- [05] Mahammedi, A.; Ameer, H.; Ariss, A. E. K. Numerical investigation of the performance of Kenics static mixers for the agitation of shear thinning fluids. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 10, 889-899, 2017.
- [06] MAHBOUB, A. étude numérique d'un écoulement turbulent dans une cuve agitée par un cylindre magnétique. ORAN, 2014
- [07] Manas - Zloczower, I. Mixing and compounding of polymers: Theory and practice. Munich: Hanser, 2009.
- [08] Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., Kresta, S. M. Handbook of Industrial Mixing. Wiley-Interscience, 2004.
- [09] Pedrosa S.M.C.P., Nunhez J.R. The behaviour of stirred vessels with anchor type impellers. *Comp. Chem. Eng.*, 24, 1745-1751, 2000.
- [10] Youcefi A. Etude expérimentale de l'écoulement d'un fluide viscoélastique autour d'un agitateur bipale en cuve agitée. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, 1993