

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

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Intitulé de Mémoire

Effet des Générateurs des Vortex sur l'Efficacité d'un
Mélangeur Statique : Etude Hydrodynamique

Présenté par :

REGHIOUAT Nassira

SAGHI Akila

Devant le jury composé de :

Mr. TAIBI Bouziane

Ctr Univ Naama

Président

Dr. AMEUR Houari

MCA

Ctr Univ Naama

Encadreur

Mr. KAID Noureddine

Ctr Univ Naama

Examineur

Année universitaire 2017-2018





Remerciements

Nos remerciements s'adressent en premier lieu à notre Dieu pour nous avoir donné l'esprit et les moyens pour arriver à ce stade de connaissance, nous prions pour que nous restions fidèles à lui.

Nous exprimons toute notre gratitude à l'encadreur *Dr. AmeurHOUARI* pour l'effort fourni, les conseils prodigués, sa patience et sa persévérance dans le suivi.

Nous adressons également nos remerciements, à tous nos enseignants du département de Technologie Centre Universitaire Salhi Ahmed, Naâma, Qui nous ont donné les bases de la science.

Nous remercions très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien accepté de juger ce travail.

Nos remerciements vont enfin à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Dédicace

**Je dédie ce travail à mes chers
parents qui m'ont éclairé et
encouragé et soutenu tout au long
de mes études.**

**A tous les membres de mes
familles.**

A mes professeurs.

**A tous mes amis, pour leur
soutien aux moments difficiles de
mon travail.**

REGHIOUAT Nassira



Dédicace

A tout les mots se sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : je dédie cette mémoire de fin d'étude pour master à :

A ma tendre Mère Leila : Tu représente pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

A mon très cher père.

A mes belles sœurs : Sophi et Ritage.

A mes Très chers amis : Nassira , Fouzia, Ghrissi , Rabie, Bachir , Sarra , Sanaa , Assia, Khadidja , Ghania, Taki .

A monsieur Ameer : qui ne cessé pas de m'encourager et me conseillée. Cette humble dédicace ne saurait exprimer mon grand respect et ma profonde estime.

A tous les membres de ma promotion 2018.

A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.

SAGHI Akila



Résumé

Des générateurs de vortex sont placés dans un mélangeur statique pour améliorer son efficacité. Il s'agit des éléments semi-circulaires insérés au sein du tube pour intensifier la turbulence hydrodynamique. L'étude est réalisée par voie de simulation numérique. Les fluides utilisés possèdent un comportement pseudoplastique modélisé par la loi d'Ostwald. L'effet de quelques paramètres sur la structure des écoulements et pertes de charges est mis en évidence. Il s'agit de la hauteur des chicanes, espace inter-chicané, nombre de Reynolds et propriétés rhéologiques du fluide.

Mots-clés : *Mélangeur statique ; Générateurs de vortex ; Ecoulement tridimensionnel ; Investigation numérique.*

Abstract

Vortex generators are placed in a static mixer to enhance its efficiency. It concerns semi-circular baffles inserted in the tube in order to intensify the turbulence of flows. The study is performed via numerical simulations. The working fluids have a shear thinning behavior modeled by the Otswald law. Effects of some parameters on the flow structures and pressure drop are explored. It concerns the baffle height, the spacing between baffles and rheological properties of fluids.

Keywords: *Static mixer; Vortex generators; Three dimensional flows; Numerical investigation.*

Nomenclature

Symbole	Unité
D : Diamètre	[m]
d : distance.....	[m]
e : élasticité du fluide	[N/m]
f : forces volumiques à longues portées.....	[N]
h : Hauteur du GV	[m]
U : le vecteur vitesse	[m .s ⁻¹]
L : Longueur	[m]
m : indice de consistance	[Pa. s ⁿ]
m : la masse	[kg]
n : indice de comportement	[-]
N_c : nombre des chicanes	[-]
p : Pression	[Pa]
q_m : Débit massique	[kg/s]
q_v : Débit volumique.....	[m ³ /s]
Re : Nombre de Reynolds	[-]
S_M : le tenseur des forces volumiques	[-]
t : temps	[s]
u : vitesse moyenne du fluide.....	[m .s ⁻¹]
V : volume	[m ³]
x, y, z : coordonné	[m]

ρ : Masse volumique	[kg/m ³]
ν : Viscosité cinématique	[m ² /s]
μ : Viscosité dynamique.....	[Pa.s]
τ : Contraintes de cisaillement	[N/m]
τ_0 : Contrainte seuil d'écoulement	[N/m]
$\dot{\gamma}$: Le tenseur de déformation.....	[s ⁻¹]
η_a : viscosité apparente	[Pa.s]
η_0 : viscosité plastique de Bingham	[Pa.s]
λ' : temps de relaxation.....	[s]
\otimes : Produit tensoriel	[-]
∂ : Dérivée partielle.....	[-]
∇ : Coefficient de diffusion.....	[-]
δ : Symbole de Kronecker	[-]

Table des matières

Résumé

Abstract

Nomenclature

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre 1 : Rhéologie des Fluides Complexes

1.1. Généralité. 2

1.2. Quelques définitions 3

1.2.1. Fluide parfait et réel 3

1.2.2. Fluide compressible et incompressible 4

1.2.3. viscosité d'un fluide 4

1.2.4. Notions de débit 4

1. 3. Régimes d'écoulement, nombre de Reynolds 5

1.4. Notions de rhéologie 7

1.4.1. Fluides newtoniens 8

1.4.2. Fluides non newtoniens 8

1.4.2.1. Comportement non newtonien indépendant du temps 9

1.4.2.2. Comportements non newtoniens dépendants du temps 13

1.4.2.3. Fluides viscoélastiques 13

1.5. Equations gouvernantes..... 14

Chapitre 2: Types des mélangeurs statiques

2.1. Qu'est ce qu'un mélangeur ? 15

2.2. Mélangeurs rotatifs 15

2.3. Mélangeurs statiques 16

2.4. Conception des mélangeurs statiques 16

2.5. Applications	17
2.6. Types de mélangeurs statiques	17
2.6.1. Le mélangeur SMV	17
2.6.2. Mélangeur « Sulzer mixer » (SMX)	18
2.6.3. Le mélangeur SMR « Sulzer »	19
2.7. Classification des mélangeurs statiques	20
2.8. Principe de fonctionnement	22
2.9. Avantages et inconvénients	24

Chapitre 3 : Présontation du code de calcul

3.1.Introduction.	25
3.2. Résolution numérique	25
3.3. Présentation du solver CFX5	26
3.4. Présentation de l'ANSYS ICEM CFD	27
3.5. CFX Pre.....	27
3.6. CFX Solver	28
3.7. CFX Solver Manager	28
3.8. CFX Post	28
3.9. Présentation du problème étudié	29
3.9.1.Géométrie	29
3.9.2. Considérations du problème	29
3.9.3. Les différents paramètres étudiés	30
3.9.4. Maillage du domaine de calcul	30

Chapitre4: Résultats et Discussion

4.1. Validation	33
4.2. Influence de la hauteur du GV	36
4.3. Influence du nombre des chicanes (N_c)	39
4.4. Influence du nombre de Reynolds	42
4.5. Influence de l'indice de comportement	45

Conclusion générale	48
----------------------------------	----

Références bibliographiques	49
--	----

Liste des figures

CHAPITRE 1 :

Figure 1.1 : Expérience de Reynolds	5
Figure 1.2 : Les différents régimes d'écoulements des fluides	6
Figure 1.3 : Les différents comportements des fluides non newtoniens	8
Figure 1.4 : Rhéogramme des fluides newtoniens et non newtoniens indépendants du temps.....	12
Figure 1.5 : viscosité apparente des fluides à comportement indépendant du temps	12

CHAPITRE 2:

Figure 2.1 : Quelques types des mélangeurs rotatifs	16
Figure 2.2: Le mélangeur SMV statique	18
Figure 2.3 : Le mélangeur SMX statique	18
Figure 2.4 : Le mélangeur Kenics Mixer	19
Figure 2.5 : Le mélangeur SMR Sulzer	19
Figure 2.6 : Représentation schématique d'un mélangeur statique.....	23

CHAPITRE 3:

Figure 3.1 : Les modules principaux du CFX 16.0	27
Figure 3.2 : Configuration du mélangeur statique	29
Figure 3.3 : Maillage de la géométrie	31
Figure 3.4 : Grille de maillage.....	31
Figure 3.5 : Convergence de la solution vers une erreur de 10^{-5}	32

CHAPITRE 4:

Figure 4.1 : Pertes de charge en fonction du nombre de Reynolds	35
Figure 4.2 : Variation de vitesse axiale pour $Re = 20$, $N_c = 7$, $n = 0.8$	36
Figure 4.3 : Contours de vitesse pour $Re = 20$, $N_c = 7$, $n = 0.8$	37

Figure 4.4 : Lignes de courant pour $Re = 20, N_c = 7, n = 0.8$	37
Figure 4.5 : Chute de pression pour $Re = 20, N_c = 7, n = 0.8$	38
Figure 4.6 : Vitesse axiale pour $Re = 20, h/D = 0.5, n = 0.8$	39
Figure 4.7 : Contours de vitesse pour $Re = 20, h/D = 0.5, n = 0.8$	40
Figure 4.8 : Lignes de courant pour $Re = 20, h/D = 0.5, n = 0.8$	40
Figure 4.9 : Chute de pression pour $Re = 20, h/D = 0.5, n = 0.8$	41
Figure 4.10 : Variation de vitesse axiale pour $h/D = 0.5, N_c = 7, n = 0.8$	42
Figure 4.11 : Variation de vitesse axiale pour $z/D = 0.001, h/D = 0.5, N_c = 7, n = 0.8$	43
Figure 4.12 : Contours de vitesse pour $h/D = 0.5, N_c = 7, n = 0.8$	43
Figure 4.13 : Lignes de courant pour $h/D = 0.5, N_c = 7, n = 0.8$	44
Figure 4.14 : Chute de pression pour $h/D = 0.5, N_c = 7, n = 0.8$	44
Figure 4.15 : Vitesse axiale pour $Re = 20, N_c = 7, h/D = 0.5$	45
Figure 4.16 : Contours de vitesse pour $Re = 20, N_c = 7, h/D = 0.5$	46
Figure 4.17 : Lignes de courant pour $Re = 200, N_c = 7, h/D = 0.5$	46
Figure 4.18 : Vitesse axiale pour $Re = 200, z/D = 0.001, N_c = 7, h/D = 0.5$	47
Figure 4.19 : Chute de pression pour $N_c = 7, h/D = 0.5$	47

Liste des tableaux

CHAPITRE 2:

Tableau 2.1 : Classification des mélangeurs statiques selon leur design.....	20
--	----

Introduction

Introduction générale

En mécanique des fluides, un mélangeur statique est un dispositif de mélange en continu. Ce dispositif permet de mélanger des liquides mais il peut aussi être utilisé avec des gaz ou pour mélanger des gaz et des liquides.

Les propriétés mécaniques des mélangeurs sont nécessaires à optimiser pour obtenir un mélange homogène. Aussi, le temps pris dans le processus de mélange doit être réduit.

Dans ce contexte, on s'intéresse à l'étude des performances d'un mélangeur statique chicané. Au premier chapitre, nous allons commencer par une rhéologie des fluides complexes utiles pour caractériser le comportement des liquides visqueux, Newtoniens et non-Newtonien.

Le deuxième chapitre s'articule sur les types des mélangeurs statiques et les caractéristiques géométriques des mélangeurs et nous parlons aussi des avantages et des inconvénients.

Nous présenterons ensuite dans le chapitre 3, le code de calcul et des détails sur la méthodologie de résolution du problème à l'aide de code de calcul CFX.

Les résultats présentés dans ce travail sont obtenus par voie numérique et sont englobés en chapitre 4 avec une discussion des phénomènes physiques.

En fin, le manuscrit se termine par une conclusion générale qui synthétise les résultats de prédiction numérique.

Chapitre 1
Rhéologie des
Fluides
Complexes

Chapitre 1

Rhéologie des Fluides Complexes

1.1. Généralités

La mécanique des fluides est la science des lois de l'écoulement des fluides. Elle est la base sur le dimensionnement des conduites des fluides et des mécanismes de transfert des fluides. C'est une branche de la physique qui étudie les écoulements de fluides c'est-à-dire des liquides et des gaz lorsque ceux-ci subissent des forces ou des contraintes. Elle comprend deux grandes sous branches:

- La statique des fluides, ou hydrostatique qui étudie les fluides au repos. C'est historiquement le début de la mécanique des fluides, avec la poussée d'Archimède et l'étude de la pression.

- La dynamique des fluides qui étudie les fluides en mouvement.

On distingue également d'autres branches liées à la mécanique des fluides : l'hydraulique, l'hydrodynamique, l'aérodynamique, etc. Une nouvelle approche a vu le jour depuis quelques décennies: la mécanique des fluides numérique (CFD ou Computational Fluid Dynamics en anglais), qui simule l'écoulement des fluides en résolvant les équations qui les régissent à l'aide des ordinateurs.

La mécanique des fluides a de nombreuses applications dans divers domaines comme l'ingénierie navale, l'aéronautique, mais aussi la météorologie, la climatologie ou encore l'océanographie.

1.2. Quelques définitions

Un fluide peut être considéré comme étant une substance formée d'un grand nombre de particules matérielles, très petites et libres de se déplacer les unes par rapport aux autres. C'est donc un milieu matériel continu, déformable, sans rigidité et qui peut s'écouler. Les forces de cohésion entre particules élémentaires sont très faibles de sorte que le fluide est un corps sans forme propre qui prend la forme du récipient qui le contient, par exemple : les métaux en fusion sont des fluides qui permettent par moulage d'obtenir des pièces brutes de formes complexes.

On insiste sur le fait qu'un fluide est supposé être un milieu continu : même si l'on choisit un très petit élément de volume, il sera toujours beaucoup plus grand que la dimension des molécules qui le constitue. Par exemple, une gouttelette de brouillard, aussi petite soit-elle à notre échelle, est toujours immense à l'échelle moléculaire. Elle sera toujours considérée comme un milieu continu. Parmi les fluides, on fait souvent la distinction entre liquides et gaz.

Les fluides peuvent aussi se classer en deux familles relativement par leur viscosité. La viscosité est une de leur caractéristique physico-chimique qui définit le frottement interne des fluides. Les fluides peuvent être classés en deux grandes familles : la famille des fluides "Newtoniens" (comme l'eau, l'air et la plupart des gaz) et celle des fluides "non Newtoniens" (quasiment tout le reste... le sang, les gels, les boues, les pâtes, les suspensions, les émulsions...). Les fluides "Newtoniens" ont une viscosité constante ou qui ne peut varier qu'en fonction de la température. La deuxième famille est constituée par les fluides "non-Newtoniens" qui ont la particularité d'avoir leur viscosité qui varie en fonction de la vitesse et des contraintes qu'ils subissent lorsque ceux-ci s'écoulent (**Ben Hamouda, 2008**).

1.2.1. Fluides parfaits et réels

Un fluide est dit parfait s'il est possible de décrire son mouvement sans prendre en compte les effets de frottement. C'est à dire quand la composante tangentielle de la force est nulle.

Contrairement à un fluide parfait, qui n'est qu'un modèle pour simplifier les calculs, pratiquement inexistant dans la nature, dans un fluide réel les forces tangentielles de

frottement interne qui s'opposent au glissement relatif des couches fluides sont prises en considération. Ce phénomène de frottement visqueux apparaît lors du mouvement du fluide.

C'est uniquement au repos, qu'on admettra que le fluide réel se comporte comme un fluide parfait, et on suppose que les forces de contact sont perpendiculaires aux éléments de surface sur lesquels elles s'exercent. La statique des fluides réels se confond avec la statique des fluides parfaits (**Ben Hamouda, 2008**).

1.2.2. Fluide compressible et incompressible

Un fluide est dit incompressible lorsque le volume occupé par une masse donnée ne varie pas en fonction de la pression extérieure. Les liquides peuvent être considérés comme des fluides incompressibles (eau, huile, etc.). Les gaz sont des fluides compressibles (l'air, l'hydrogène, etc.)

1.2.3. Viscosité d'un fluide

On appelle viscosité la propriété qui traduit la résistance d'un fluide à l'écoulement (**Bouزيد, 2014**). Elle est caractérisée par :

✓ La viscosité cinématique, notée ν . Son unité dans le système international (SI), est le (m^2/s). On utilise souvent le Stokes (St) comme unité de mesure de la viscosité cinématique :
 $1 \text{ St} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$

✓ La viscosité dynamique, notée μ . Son unité dans le système international (SI), est le Pascal seconde (Pa.s) ou Poiseuille (Pl) : $1 \text{ Pa.s} = 1 \text{ Pl} = 1 \text{ kg/m.s}$

$$\mu = \rho \cdot \nu \tag{1.1}$$

La viscosité des liquides diminue si la température augmente. Au contraire, la viscosité des gaz augmente avec la température (**Bouزيد, 2014**).

1.2.4. Notions de débit

Le débit est le quotient de la quantité du fluide qui traverse une section droite de la conduite par la durée de cet écoulement. On distingue deux types de débit : massique et volumique (**Gueraoui, 2010**).

- **Débit massique :** Si dm est la masse de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps dt , par définition le débit-massique est : $q_m = \frac{dm}{dt}$ Son unité est le (kg/s).

- **Débit volumique :** Si dv est le volume de fluide qui a traversé une section droite de la conduite pendant le temps dt , par définition le débit-volume est : $q_v = \frac{dv}{dt}$. Son unité est le (m^3/s).

La masse volumique est donnée par la relation $\rho = \frac{dm}{dv}$ (1.2)

D'où : $q_m = \rho \cdot q_v$ (1.3)

1. 3. Régimes d'écoulement, nombre de Reynolds :

Les expériences réalisées par Reynolds (1883) (Figure 1.1) lors de l'écoulement d'un liquide dans une conduite cylindrique rectiligne, dans laquelle arrive également un filet de liquide coloré, ont montré l'existence de trois régimes d'écoulement : laminaire, transitoire et turbulent.

L'écoulement laminaire (Figure 1.2a) est caractérisé par une seule direction (composante) de vitesse (vecteurs vitesse parallèles), un écoulement turbulent (Figure 1.2c) est caractérisé par des tourbillons dans le fluide. Le passage du régime laminaire au régime turbulent est dit régime d'écoulement transitoire (Figure 1.2b) (**Beriache, 2016**).

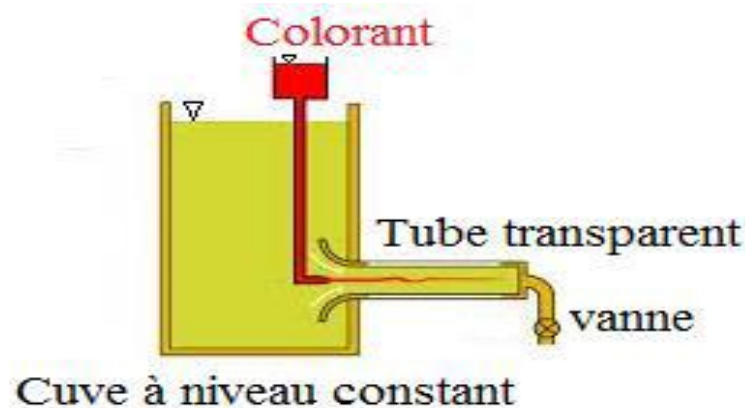


Figure 1.1 : Expérience de Reynolds

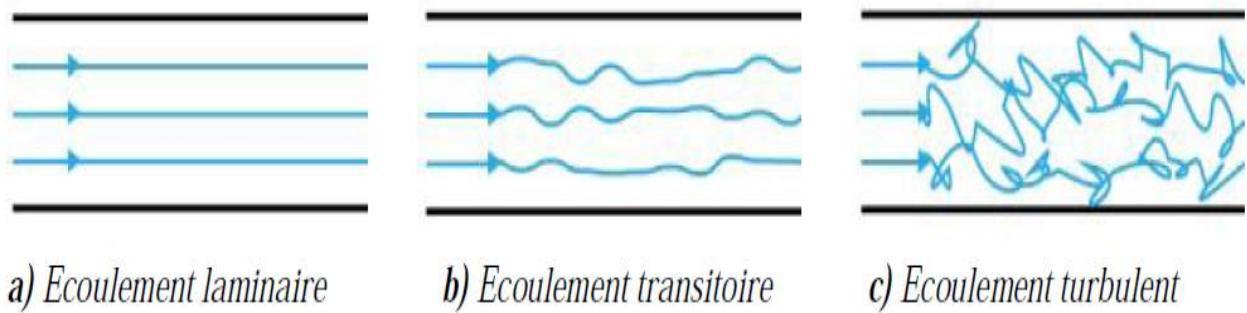


Figure 1.2 : Les différents régimes d'écoulements des fluides

En utilisant des fluides divers (viscosités différentes), en faisant varier le débit et le diamètre de la canalisation, Reynolds a montré que le paramètre qui permettait de déterminer si l'écoulement est laminaire ou turbulent, est un nombre sans dimension appelé nombre de Reynolds.

En effet, il permet de déterminer le régime d'écoulement du fluide. Il est donné par la

relation suivante :

$$R_e = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} = \frac{u \cdot D}{\nu} \quad (1.4)$$

Avec :

R_e : Nombre de Reynolds (sans dimension).

ρ : Masse volumique du fluide ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$).

u : vitesse moyenne du fluide ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$).

D : Diamètre de la conduite (m).

μ : viscosité dynamique du fluide ($\text{Pa} \cdot \text{s}$).

ν : viscosité cinématique (m^2/s). $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ (1.5)

D'après la relation ci-dessus, le nombre de Reynolds représente une balance entre les forces d'inertie et les forces visqueuses (forces de frottement).

De l'expérience, il est montré que pour un écoulement dans une conduite :

- Si $Re < 2000$: le régime est laminaire

- Si $Re > 3000$: le régime est turbulent
- Si $2000 < Re < 3000$: le régime est intermédiaire (appelé aussi transitoire).

1.4. Notions de rhéologie

Un fluide soumis à des sollicitations possède une forme de réponse qui se caractérise par une loi rhéologique établissant la relation entre la contrainte appliquée et le gradient de vitesse qui en résulte.

La rhéologie est un domaine très vaste, qui concerne l'ensemble des propriétés mécaniques des matériaux, et qui met en œuvre des expériences aussi diverses que des tests d'écoulement, de fluage, de relaxation ou encore des expériences oscillatoires, également appelées dynamiques (Ameur, 2012).

La rhéologie des fluides est donc une science universelle qui s'ouvre à l'industrie, l'agro-alimentaire, les cosmétiques, la pharmacie, la médecine, etc....

Elle étudie toute une gamme de comportements allant du comportement parfaitement élastique au comportement purement visqueux. Dans les comportements purement visqueux on sépare les fluides dont le comportement est newtonien, des fluides dont le comportement est non newtonien.

Il existe trois grands types de comportements rhéologiques :

- Le comportement élastique, où le mouvement du milieu ne se produit pas sous l'action d'une force.
- Le comportement visqueux qui est caractérisé par une relation entre la contrainte appliquée et la vitesse de déformation.
- Le comportement plastique, qui est caractérisé par l'existence d'un seuil de contrainte au dessous duquel il n'y a pas de déformation permanente.

Entre ces trois grands groupes, il existe une large gamme de milieux, appelés viscoélastiques qui ont à la fois des propriétés élastiques et visqueuses.

1.4.1. Fluides newtoniens

Les fluides newtoniens obéissent à la loi de proportionnalité entre le tenseur des contraintes de cisaillement τ et le tenseur de déformation $\dot{\gamma}$:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1.6)$$

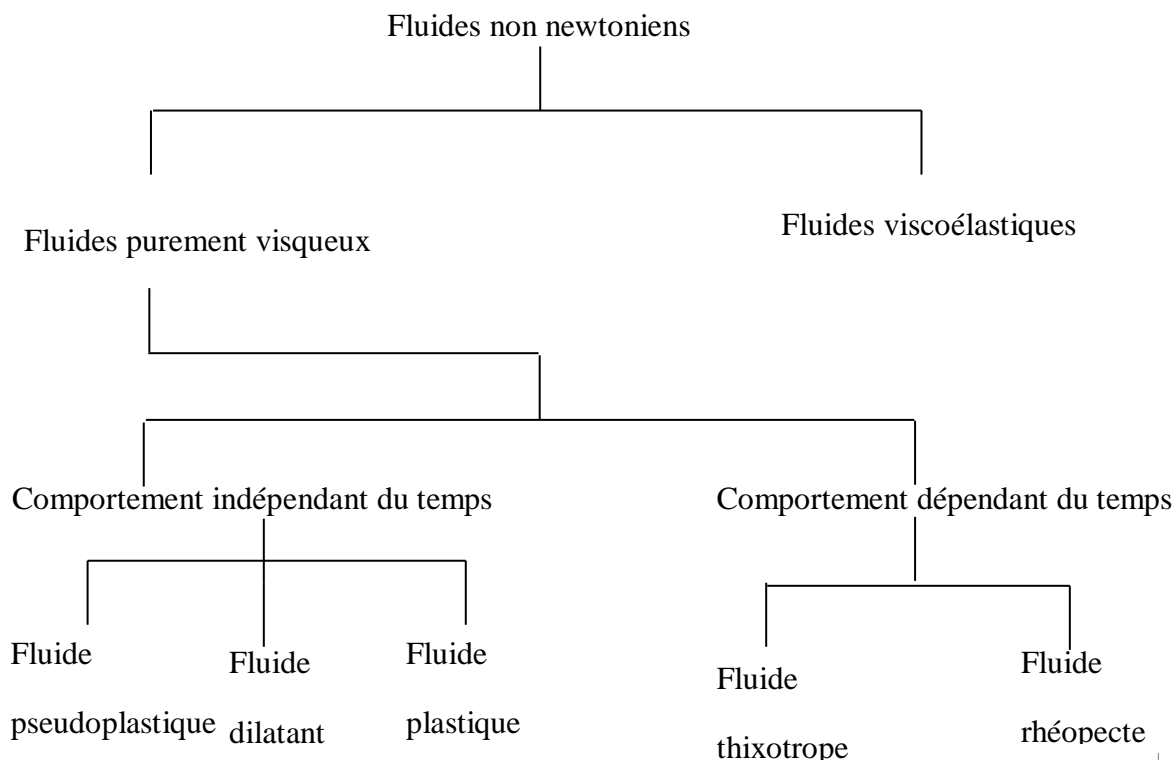
Dans cette expression, ne figure qu'un seul coefficient rhéologique η , appelé viscosité dynamique du fluide.

Pour un fluide newtonien, la viscosité est indépendante du taux de cisaillement et du temps pendant lequel le fluide est sollicité. Elle ne dépend que de la température et de la pression du fluide étudié lorsque c'est un gaz et seulement de la température lorsqu'il s'agit d'un liquide.

Les fluides newtoniens englobent presque tous les gaz, ainsi que certains liquides et solutions dont le soluté a une masse moléculaire faible (**Ameur, 2012**).

1.4.2. Fluides non newtoniens

Figure 1.3 : Les différents comportements des fluides non newtoniens



Tous fluides dont le comportement ne suit pas la loi de Newton sont dits non newtoniens. Pour de tels fluides, il n'est pas possible de définir une viscosité constante. On définit alors, de façon générale, une viscosité apparente, qui dépend de nombreux paramètres et en particuliers du gradient de vitesse, du temps d'application des contraintes et du module d'élasticité du fluide.

1.4.2.1. Comportements non newtoniens indépendants du temps

Le comportement non newtonien est dit indépendant du temps si la viscosité apparente ne varie pas avec la durée de la contrainte. On distingue :

- a. Les fluides fluidifiants (pseudoplastiques)
- b. Les fluides épaississants (dilatants)
- c. Les fluides à comportement plastique

a) Les fluides pseudoplastiques

La viscosité apparente d'un fluide pseudoplastique (ou rhéofluidifiant) décroît lorsque le gradient de vitesse appliqué augmente. Parmi les fluides pseudoplastiques on trouve plusieurs types de peintures, le sang, purée de fruit, etc....

Puisque les recherches effectuées en agitation de fluides non newtoniens mettent en œuvre des fluides pseudoplastiques, il est nécessaire de préciser leurs lois de comportement, c'est-à-dire les relations qui existent entre la contrainte de cisaillement, τ , et le gradient de vitesse, $\dot{\gamma}$ ou, plus commodément, du rapport entre ces deux grandeurs qui représente la viscosité apparente du fluide. De nombreuses relations existent, les ouvrages spécialisés fournissent une large palette d'équations. Nous nous limitons ici à citer :

- **La loi en puissance d'Ostwald de Waele**

$$\tau = m \dot{\gamma}^n \quad (1.7)$$

m représente l'indice de consistance, et n représente l'indice de comportement, dont la valeur est comprise entre 0 et 1, qui traduit l'écart avec le comportement newtonien pour lequel $n = 1$.

La viscosité apparente pour un fluide suivant la loi de puissance se calcule comme :

$$\eta_a = m \dot{\gamma}^{n-1} \quad (1.8)$$

b) Les fluides dilatants

Ils sont caractérisés par l'augmentation de la viscosité apparente avec la vitesse de déformation. Ils sont souvent modélisés en pratique par la loi de puissance avec $n > 1$. Les fluides présentant le comportement dilatant sont beaucoup moins nombreux que les fluides à comportement pseudoplastique ; citons par exemple les suspensions aqueuses d'amidon, de mica et de sable.

c) Les fluides plastiques

Ce genre de fluide se caractérise par l'existence d'une valeur minimale τ_0 de la contrainte, appelée seuil d'écoulement ou contrainte seuil en dessous de laquelle l'écoulement ne se produit pas et qui représente l'ordonnée à l'origine des rhéogrammes. Au-delà de τ_0 , le fluide s'écoule, ce sont surtout des suspensions.

Parmi les modèles décrivant le comportement plastique on trouve le modèle de Bingham, de Casson et de Herschel-Bulkely (Ameur, 2012).

- **Les liquides de Bingham**

Au-delà du seuil d'écoulement τ_0 , ils se comportent comme des liquides newtoniens, toute augmentation de τ se traduit par une augmentation proportionnel de $\dot{\gamma}$.

Leur équation rhéologique d'état s'écrit par conséquent :

$$\tau = \tau_0 + \eta_p \dot{\gamma} \quad \text{pour } \tau > \tau_0 \text{ et } \dot{\gamma} = 0 \quad \text{pour } \tau < \tau_0 \quad (1.9)$$

L'expression de la viscosité apparente pour ces fluides montre qu'elle décroît avec le gradient de vitesse :

$$\eta_a = \eta_0 + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}} \quad (1.10)$$

Les fluides dont le comportement suit le modèle de Bingham sont rares (dentifrices, peinture à l'huile, encre, ...).

- **Les liquides de Casson et de Herschel-Bulkley**

Dans tous les autres cas, les fluides plastiques sont, soit des fluides pseudoplastiques, soit des fluides dilatants présentent un seuil de contrainte (**Youcefi, 1993**). Leur comportement est représenté par une loi de puissance présentant un seuil de contrainte :

$$\tau = - \left[\eta_0 + \frac{\tau_0}{m} \dot{\gamma}^{(n-1)} \right] \dot{\gamma} \quad (1.11)$$

Les modèles rhéologiques s'écrivent :

➤ le modèle de Casson : $\tau^{1/2} = K_c \dot{\gamma}^{1/2} + \tau_c^{1/2}$ (1.12)

➤ le modèle de Herschel-Bulkley : $\tau = \tau_0 + m \dot{\gamma}^n$ (1.13)

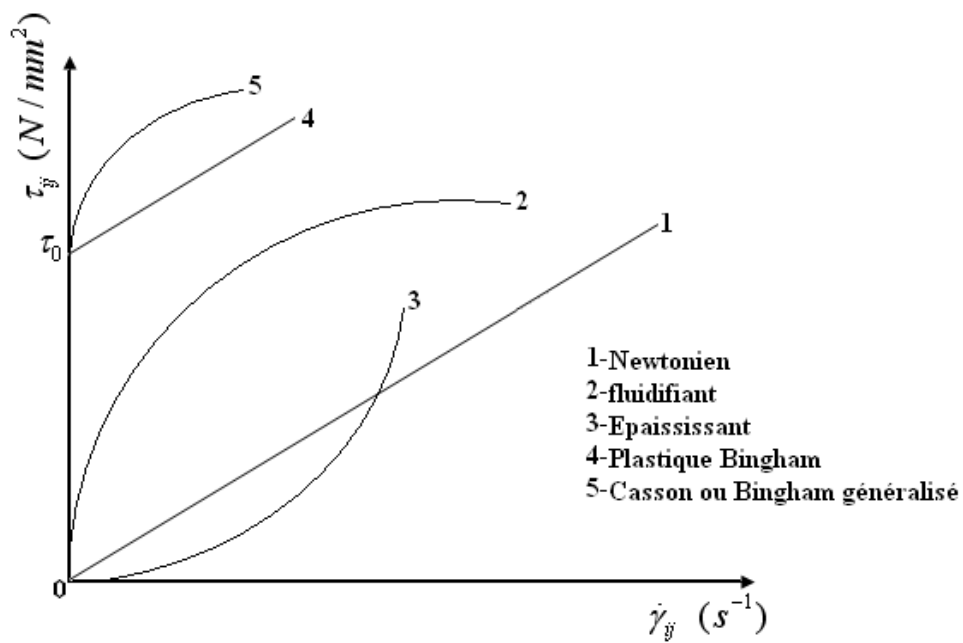


Figure 1.4 : Rhéogramme des fluides newtoniens et non newtoniens indépendants du temps

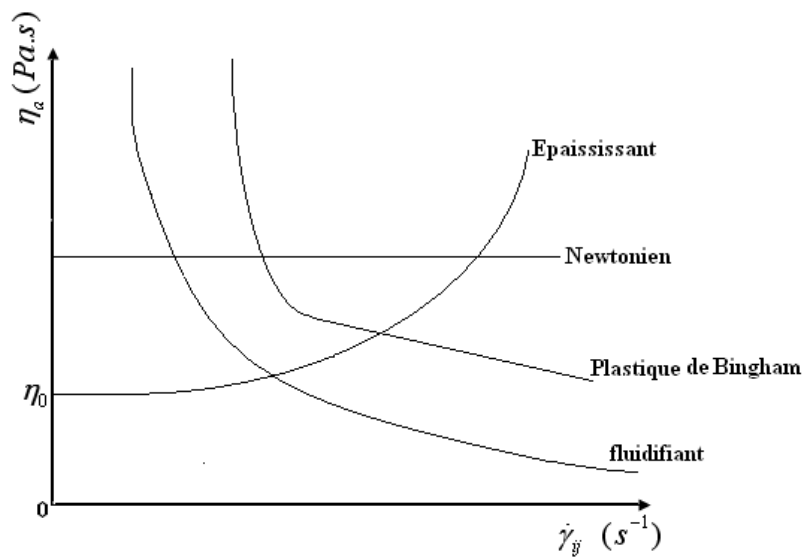


Figure 1.5 : viscosité apparente des fluides à comportement indépendant du temps

1.4.2.2. Comportements non newtoniens dépendants du temps

Ce sont des fluides dont la viscosité apparente dépend non seulement du niveau des sollicitations mais aussi de leur durée, ainsi à température et gradient de la vitesse donnés, la contrainte de cisaillement peut également varier avec le temps durant lequel le cisaillement est imposé.

$$\eta_a = f(\dot{\gamma}, t) \quad (1.14)$$

Un des modes d'étude de cette catégorie de fluides consiste à leur faire subir des cycles complets de contraintes à des vitesses différentes, de la valeur nulle à une valeur maximale puis retour à la valeur nulle. Ils offrent alors un phénomène d'hystérésis plus ou moins marqué selon la vitesse de déroulement de cycle (**Youcefi, 1993**).

Il existe deux sortes de fluides non newtoniens dépendants du temps :

a) Les fluides thixotropes

La thixotropie se caractérise par une diminution de la viscosité apparente lorsque le temps d'application de la contrainte augmente, suite à une altération de sa structure (la structure se reconstitue lorsque l'on arrête les contraintes). Parmi les fluides de cette nature, il faut citer : les polymères fondus, les peintures, les boues de forage et mayonnaise.

b) Les fluides rhéopectiques

La rhéopexie est le comportement inverse de la thixotropie, la viscosité apparente augmente au fur et à mesure que l'on agite le fluide. Ce phénomène est totalement réversible. Les solutions aqueuses de bentonite, les suspensions d'oléate et les suspensions de gypse dans l'eau sont anti-thixotropes.

1.4.2.3. Fluides viscoélastiques

Les fluides viscoélastiques présentent simultanément des propriétés visqueuses et élastiques. En plus des paramètres précédents, la viscosité apparente de ces fluides dépend encore du module d'élasticité e du fluide (**Youcefi, 1993**).

$$\eta_a = f(\dot{\gamma}, t, e) \quad (1.15)$$

Ou, ce qui revient au même, du temps de relaxation λ' qui intervient dans le cas plus simple dans une équation du type (modèle de Maxwell) :

$$\tau + \lambda' . d\tau / dt = -\eta . \dot{\gamma} \quad (1.16)$$

Selon ce modèle si le mouvement est arrêté ($\dot{\gamma} = 0$) la contrainte de cisaillement se relâche suivant une relation simple :

$$\tau = e^{-t/\lambda'} \quad (1.17)$$

λ' est alors bien une mesure de temps, que met le système pour dissiper les contraintes appliquées suite à une immobilisation du fluide.

Si $\lambda' = 0$ on trouve le comportement des fluides newtoniens. Parmi les fluides viscoélastiques, citons : les suspensions de polymères, pâte de pain,...

1.5. Equations gouvernantes

1.5.1. Équation de continuité

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1.18)$$

Où : U est le vecteur vitesse ; ρ : la densité du fluide ; t : le temps.

1.5.2. Équation du bilan de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (1.19)$$

Le tenseur de contrainte τ est lié au taux de déformation par :

$$\tau = \mu (\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U) \quad (1.20)$$

Avec S_M est le tenseur des forces volumiques.

Chapitre 2
Types des
Mélangeurs
statiques

Chapitre 2

Types des Mélangeurs statiques

2.1. Qu'est ce qu'un mélangeur ?

Un mélangeur permet d'obtenir un produit final à partir du mélange de plusieurs ingrédients. Un mélangeur est principalement utilisé par les industries notamment dans le domaine agroalimentaire, pharmaceutique, nucléaire, cosmétique ou encore chimique.

2.2. Mélangeurs rotatifs

En fonction du produit à mélanger, il existe de nombreux types de mélangeurs rotatifs dans des cuves. En effet, pour les produits liquides ou visqueux, l'utilisation d'un mélangeur vertical est conseillée (Ameur, 2012).

D'autres types de mélangeurs sont utilisés dans les milieux industriels comme : le mélangeur à pales, à ruban, etc. (Figure 2.1).

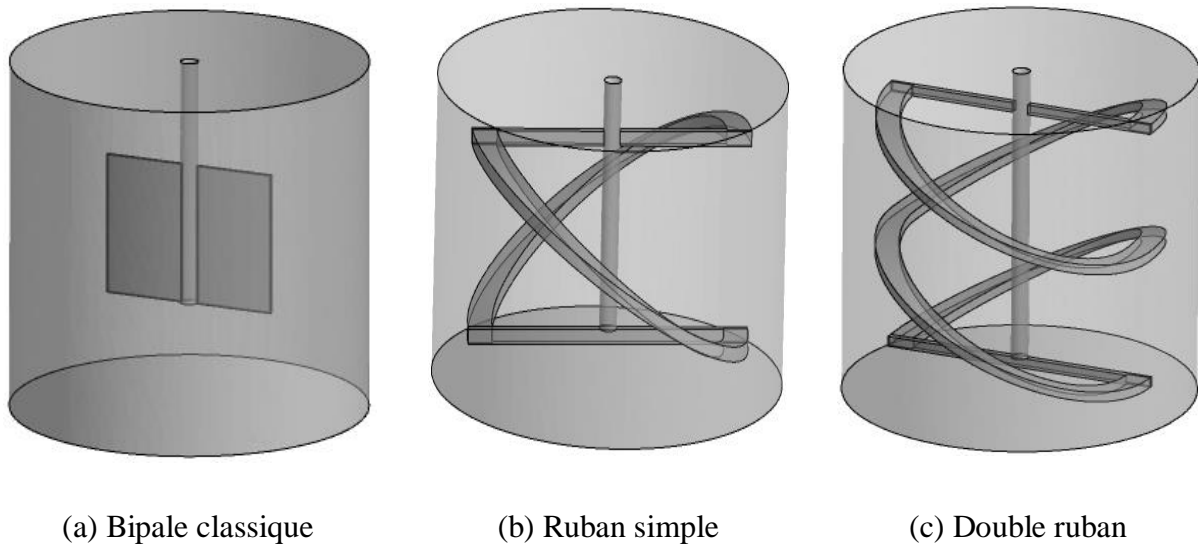


Figure 2.1 : Quelques types des mélangeurs rotatifs (Ameur, 2012)

2.3. Mélangeurs statiques

Les mélangeurs statiques sont des mélangeurs de fluides sans aucune pièce mobile. Bien que des mélangeurs de fluides contiennent des éléments mécaniques mobiles conçus pour les matériaux à mélanger avec force, des mélangeurs statiques sont adaptés à mélanger sans forcer. La conception facilite le mélange des produits chimiques, en exploitant leur tendance naturelle à combiner avec d'autres produits chimiques à proximité. Les scientifiques et les ingénieurs utilisent uniquement des mélangeurs statiques avec des produits chimiques présentant des propriétés favorables à la combinaison sans aucune force extérieure autre que la pression de l'air.

2.4. Conception des mélangeurs statiques

Les mélangeurs statiques contiennent deux éléments importants de la conception. Quand les scientifiques scellent les fluides dans un mélangeur chimique, ils scellent également la pression de l'air à l'intérieur de l'unité. C'est la création d'un système continu : ce système maintient une certaine de la pression dans un environnement, affectant le comportement des matériaux liquides et gazeux. La pression à l'intérieur d'un mélangeur statique induit le déplacement des éléments de fluide dans l'appareil. Le design intérieur d'un mélangeur statique contient également des pièces en plastique ou en métal, souvent dans une conception à double hélice, qui facilite le mouvement des fluides sous pression. Ces pièces tirent profit du

mouvement des fluides sous pression, les obligeant à spirale ou coulent ensemble dans un mouvement de vague. Cette combinaison crée une nouvelle substance (**Mahammedi, 2018**).

2.5. Applications

Les utilisations communes pour les mélangeurs statiques comprennent le gaz ou le raffinage du pétrole, la production de fibres pour la fabrication des procédés et de mélange des liquides et des gaz pour l'énergie, la gestion des eaux usées et la production chimique commerciale. Les mélangeurs statiques fournissent également de nombreuses utilisations dans la production alimentaire commerciale, comme l'ajout de carbonatation des boissons, le mélange des matériaux trouvés dans les barres de chocolat et mélanger les saveurs, les matériaux et les vitamines pour les produits laitiers, comme la crème glacée, le yogourt glacé, caillé de fromage et de lait (**Felicie, 2009**).

2.6. Types de mélangeurs statiques

Au fil des années, le marché des mélangeurs statiques a offert une large gamme de géométries en fonction des mécanismes qui permettent de mettre en œuvre les différents types d'opérations de mélange : dispersions gaz-liquide, liquide-liquide, solide-liquide .

Classifions les différents types en fonction des applications réalisables dans chaque système : le mélange de fluides miscibles, la génération d'interface entre deux phases non miscibles ainsi que l'amélioration du transfert de matière et d'énergie dans les milieux réactionnels (homogénéisation).

Akzo a développé un des premiers mélangeurs nommé « Multiflux mixer » qui alterne les zones d'accélération/décélération (étirement) du mélange à travers des blocs trapézoïdaux.

Une variation de ce modèle a été développée pour la société Dow. Les écoulements à travers ce type de blocs sont reliés entre eux par des tubes permettant d'étirer et de recombinaison les flux plus efficacement (**Site web 1**).

2.6.1. Le mélangeur SMV

Le mélangeur SMV a été créé en 1970 par la société Sulzer (Figure 2.2). Il consiste en un empilement de plaques gaufrées selon un motif en « V », d'où il tire son nom : Sulzer Mixer en « V ». Selon Sulzer, ce mélangeur est adapté pour réaliser les opérations suivantes en régime turbulent :

- dispersions gaz-liquide et liquide-liquide pour le transfert de matière
- Mélange et homogénéisation de liquides et gaz de faible viscosité.
- Réaction.



Figure 2.2: Le mélangeur SMV statique (Site web 2)

2.6.2. Mélangeur « Sulzer mixer » (SMX)

Le mélangeur « Sulzer mixer » (SMX) créé en 1980 est un des plus efficaces, il est composé d'une grille régulière, comporte des écoulements plus ou moins importants, raison pour laquelle il est particulièrement utilisé pour le mélange de polymères ayant des rapports de viscosité élevés. Il permet, pour la même qualité de mélange distributif (nombre de couches obtenues à la sortie), de limiter la perte de charge (Figure 2.3).

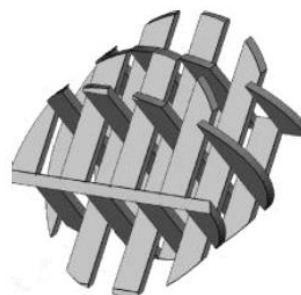


Figure 2.3 : Le mélangeur SMX statique (Site web 3).

Un autre mélangeur basé sur le cisaillement est le « Kenics mixer ». Il dispose d'un certain nombre de plaques en série, recourbées à 180° et placées à 90° les unes par rapport aux autres.

Les qualités en termes de perte de charges sont similaires au SMX, mais il n'est pas recommandé pour des polymères ayant des viscosités très différentes (Figure 2.4).

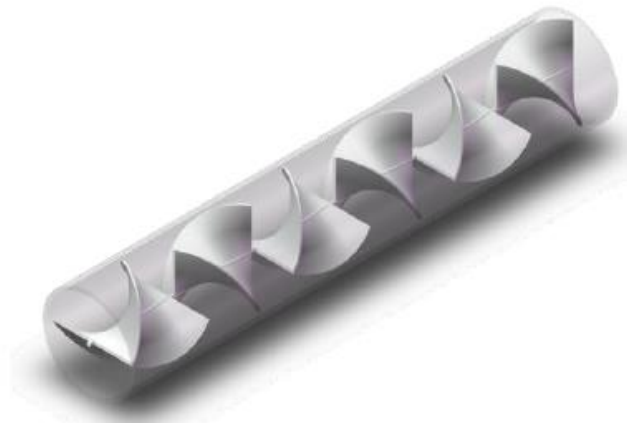


Figure 2.4 : Le mélangeur Kenics Mixer (**Site web 4**)

2.6.3. Le mélangeur SMR « Sulzer »

Le mélangeur SMR « Sulzer » est construit avec des tubes coudés (Figure 2.5). Ils favorisent le transfert de chaleur à travers la structure, créant ainsi un élément de mélange avec des surfaces à température contrôlée. Le SMR est idéal pour des réactions fortement exothermiques comme la polymérisation

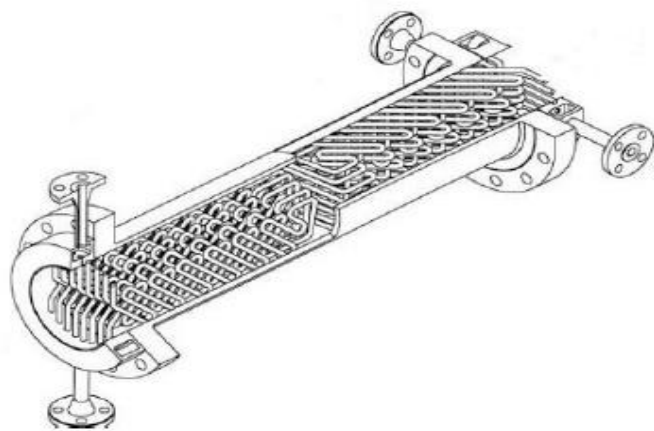


Figure 2.5 : Le mélangeur SMR Sulzer (**Site web 5**)

En général, les mélangeurs statiques offrent des possibilités très intéressantes dans le cadre de l'intensification des procédés (passage au continu, réduction du coût énergétique, etc.). Le succès de leur mode d'opération est directement lié à leur conception. Il est donc intéressant de les considérer et d'étudier l'hydrodynamique de ce type de systèmes afin de réaliser une mise à l'échelle du procédé (Felicie, 2009).

2.7. Classification des mélangeurs statiques

Le marché des mélangeurs statiques offre un large éventail de designs. Dans la mesure où ces designs présentent des caractéristiques géométriques bien différentes, elles permettent de les classer dans un premier temps selon leur morphologie.


Par ailleurs, chaque morphologie de mélangeur génère un écoulement aux propriétés propres. Ainsi, il est possible de classer les différents mélangeurs selon le type d'écoulement qu'ils engendrent, et donc selon le type d'opération de mélanger pour lequel ils peuvent être employés.







Il y a 5 grands types de mélangeurs statiques de part leur type de design, récapitulés dans le Tableau 2.1.



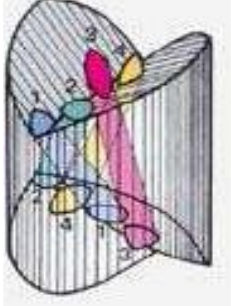
Classifions ces différents types de design suivant des groupes correspondant aux principales applications réalisables en mélangeurs statiques (Mahammedi, 2018):

- Mélange de fluides miscibles
- Génération d'interface entre deux phases non miscibles
- Transfert et homogénéisation thermique.

Tableau 2.1 : Classification des mélangeurs statiques selon leur design (Images d'après sites web Chemineer, Ross, Lightnin et Sulzer)

Type de design	Exemples de mélangeurs
Mélangeurs à design (ouvert) à hélices	 <p>Mélangeur Kenics</p>

	 <p>Mélangeur HEV (High Efficiency Vortex)</p>
<p>Mélangeurs à design (ouvert) à pales</p>	 <p>Mélangeur Ross LPD (Low Pressure Drop)</p>  <p>Mélangeur Serie50 (Lightnin)</p>
<p>Mélangeurs a plaques ondules</p>	 <p>Mélangeur SMV (Sulzer)</p>  <p>Mélangeur SMX(Sulzer)</p>  <p>Mélangeur SMXL (Sulzer)</p>

<p>Mélangeurs multicouches</p>	 <p>Mélangeur SMX plus(Sulzer)</p>  <p>Mélangeur Komax</p>  <p>Mélangeur KMX</p>
<p>Mélangeurs à canaux ou orifices</p>	 <p>Mélangeur Ross ISG (Interracial Surface Génération)</p>

2.8. Principe de fonctionnement

Un mélangeur statique est composé d'un ensemble d'éléments immobiles placés bout à bout dans un tube. Chaque élément a une structure géométrique rigide particulière qui divise le flux et le recombine. En général, le contact entre les fluides a lieu grâce au mouvement

radial engendré par les éléments. Il est évident que le nombre d'éléments constituant le mélangeur influe sur le résultat de l'opération à effectuer

Le mélangeur statique utilise une petite partie de l'énergie de pompage qui est disponible dans la ligne de traitement. Le mélange se fait de trois façons (Figure 2.6) :

- Répartition du débit : à chaque fois qu'un flux du mélange traverse un élément, il est divisé en deux, séparé, en créant des couches.

- Conversion du débit : le produit est poussé par-dessus les éléments suivant les parois en spirale, ce qui provoque le déplacement radial du liquide à partir du centre vers la paroi du tube et le déplacement inverse du mélange de la paroi du tube vers le centre. Cela produit un gradient de vitesse entre les molécules de produit, provoquant le cisaillement et en conséquence favorisant le mélangeage.

- inversion du débit : la direction de rotation du produit se modifie dans chaque élément, recevant une inversion rapide de la force d'inertie, ce qui produit l'agitation du système.

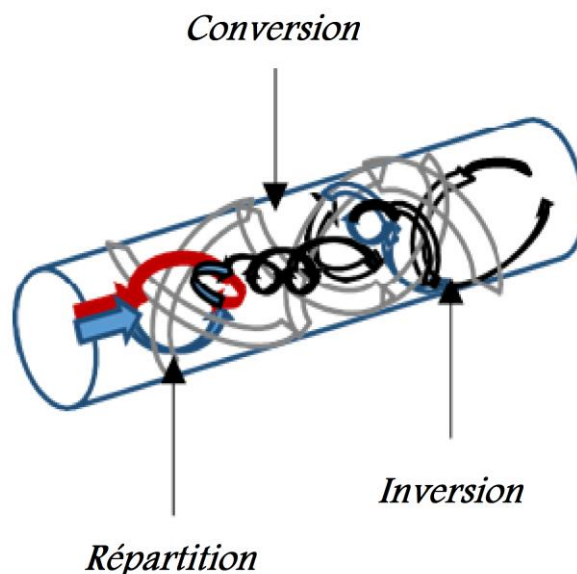


Figure 2.6 : Représentation schématique d'un mélangeur statique

2.9. Avantages et inconvénients

Les avantages des mélangeurs statiques sont multiples : possibilité d'utiliser une géométrie sur une plage de viscosité et de distribution des temps de séjour, faibles coûts d'investissement et de maintenance. Ils sont très souvent utilisés pour le mélange de milieux pâteux ou lorsque les produits sont thermosensibles et qu'il faut réduire les gradients de température et les temps de contact dans les procédés. Les mélangeurs statiques présentent aussi quelques inconvénients en termes de nettoyage, comme tout équipement fermé (Mahammedi, 2018).

Chapitre 3
Présentation du
Code de Calcul

Chapitre 3

Présentation du Code de Calcul

3.1. Introduction

Le présent travail a été réalisé par voie de simulation à l'aide de code de calcul CFX et le générateur du maillage ICEM CFD. Dans ce chapitre, on présente quelques détails sur ce code et sur la méthode numérique entreprise.

3.2. 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 16.0 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.

3.3. 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 16.0). 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 :

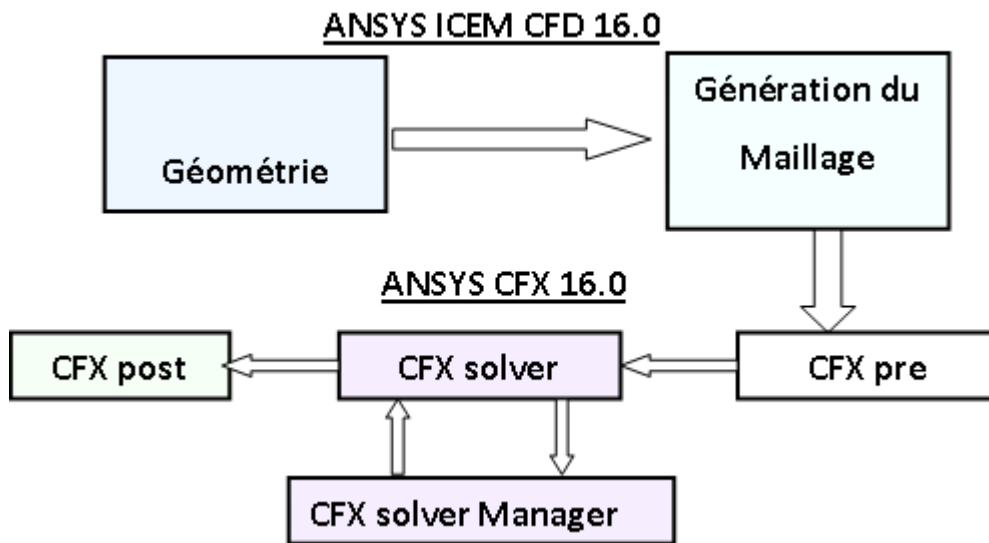


Figure 3.1 : Les modules principaux du CFX 16.0

3.4. Présentation de l'ANSYS 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 maillants 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 16.0 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 16.0 » et qui permet d'exporter le maillage généré au CFX-Pre .

3.5. 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)

3.6. 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 (solver manager) 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 de l'exécution simultanément sur écran .

3.7. 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 16.0;
- Lancer ou arrêter la simulation avec le solveur CFX 16.0 ;
- Surveiller la progression de la solution avec le solveur CFX 16.0 ;
- Lancer une autre simulation en parallèle.

Le calcul doit être effectué avec un taux résiduel choisi, un temps moyen de calcul déterminé, et un nombre d'itération maximum donné.

3.8. CFX Post

C'est une interface très puissante pour la représentation des résultats, graphiquement et quantitativement (courbe, ligne de courant, contoursetc), c'est le post-processing « CFX – post ». Il permet d'exporter les résultats en différents formats, pour tracer l'évolution des variables avec d'autres logiciels graphiques tels que « Origine ou Tecplot ».

3.9. Présentation du problème étudié

3.9.1. Géométrie

La géométrie du problème étudié est illustrée sur la Figure 3.2. Il s'agit d'un tube cylindrique de diamètre $D = 20$ mm et d'une longueur du tube $L = 300$ mm. Le tube est équipé des chicanes semi-circulaires dont le but est de créer et intensifier la turbulence de l'écoulement, même à faible nombre de Reynolds. La première chicane est placée à une distance de 50 mm par rapport à l'entrée. L'épaisseur des chicanes est de 2 mm. Le fluide utilisé est un fluide pseudoplastique modélisé par la loi d'Ostwald.

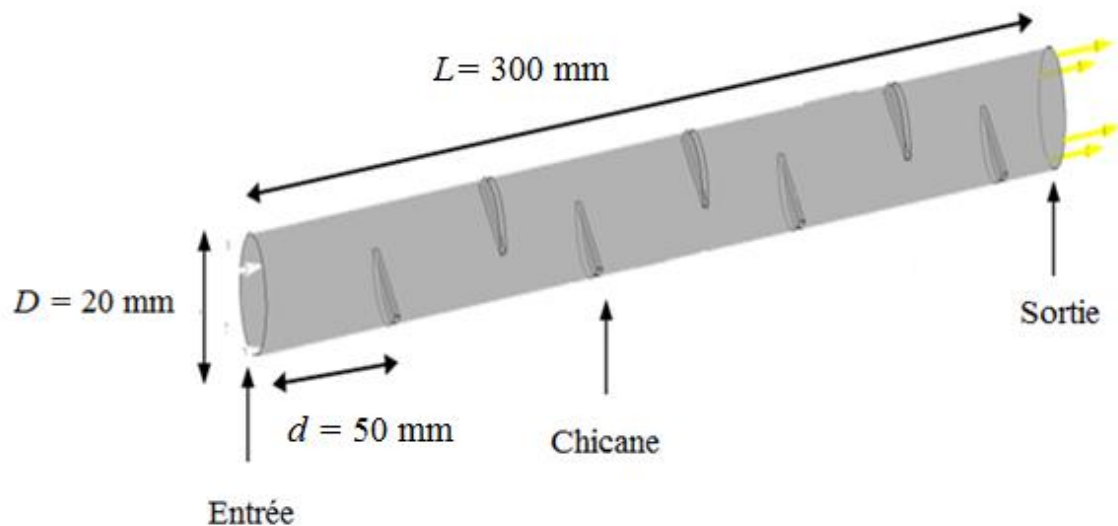


Figure 3.2: Configuration du mélangeur statique

3.9.2. Considérations du problème

- ✓ Les fluides utilisés sont visqueux, incompressibles et non-Newtoniens (pseudoplastique).
- ✓ Le processus est isotherme.
- ✓ Le régime d'écoulement est permanent et laminaire.

3.9.3. Les différents paramètres étudiés

L'influence de quatre paramètres sur les champs d'écoulement et les pertes de charge a été explorée. Il s'agit de :

- [1] Influence de la hauteur du générateur de vortex (GV) : $h = 6, 8, 10, 12$ mm (pour $n = 0.8$, $Re = 20$, $n_b = 7$)
- [2] Influence de l'espacement entre les GVs, c.à.d. influence du nombre des chicanes : $n_b = 3, 5, 7, 9$ (pour $n = 0.8$, $h = 10$ mm, $Re = 20$)
- [3] Influence du nombre de Reynolds (de 0.1 à 300) (pour $h = 10$ mm, $n_b = 7$, $n = 0.8$)
- [4] Influence de l'indice de comportement du fluide pseudoplastique : $n = 0.4, 0.6, 0.8, 1$ (pour $h = 10$ mm, $n_b = 7$, $Re = 20$).

3.9.4. Maillage du domaine de calcul

Le maillage utilisé lors de notre simulation est un maillage du type tetrahedral (Figures 3.3 et 3.4), qui est un maillage semi-automatique et nécessite moins d'étapes par rapport au maillage hexahedral. Près des parois du tube et chicanes, des éléments tetrahedriques de petite taille ont été créés afin de détecter les détails de la couche limite. Après le teste du maillage, le compromis entre la précision des résultats et le temps de calcul réduit nous a permis d'opter pour un nombre d'élément d'environ 477856.

Pour une machine i3 avec 4 Ghz de RAM, et une erreur de convergence de 10^{-5} (Figure 3.5), le temps de calcul était de 40 à 90 min, dépendant des propriétés du fluides et des conditions géométriques et opératoires.

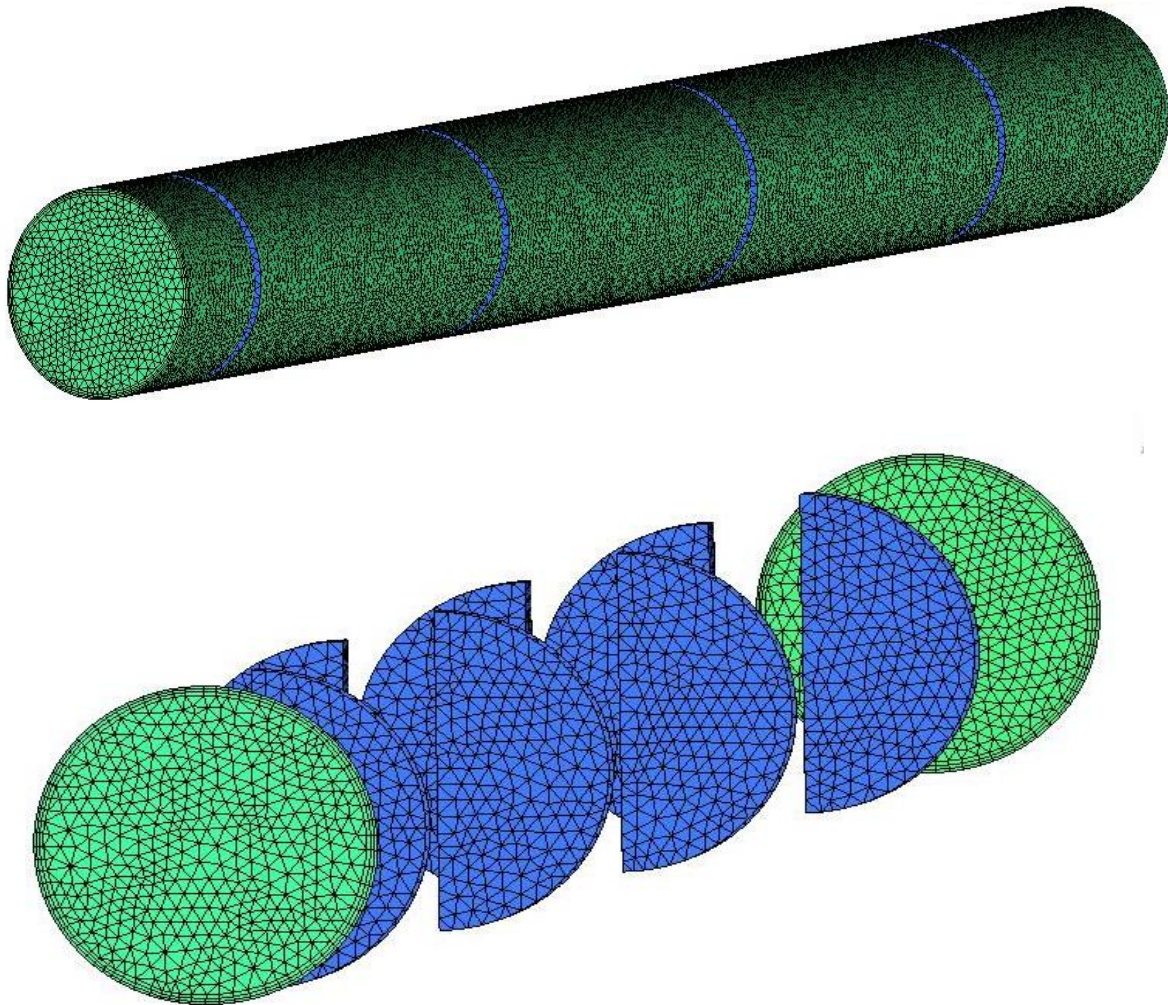


Figure 3.3: Maillage de la géométrie

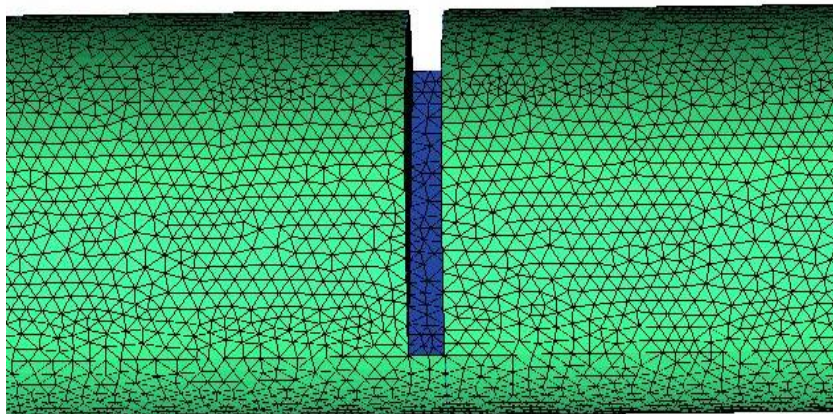


Figure 3.4: Grille de maillage

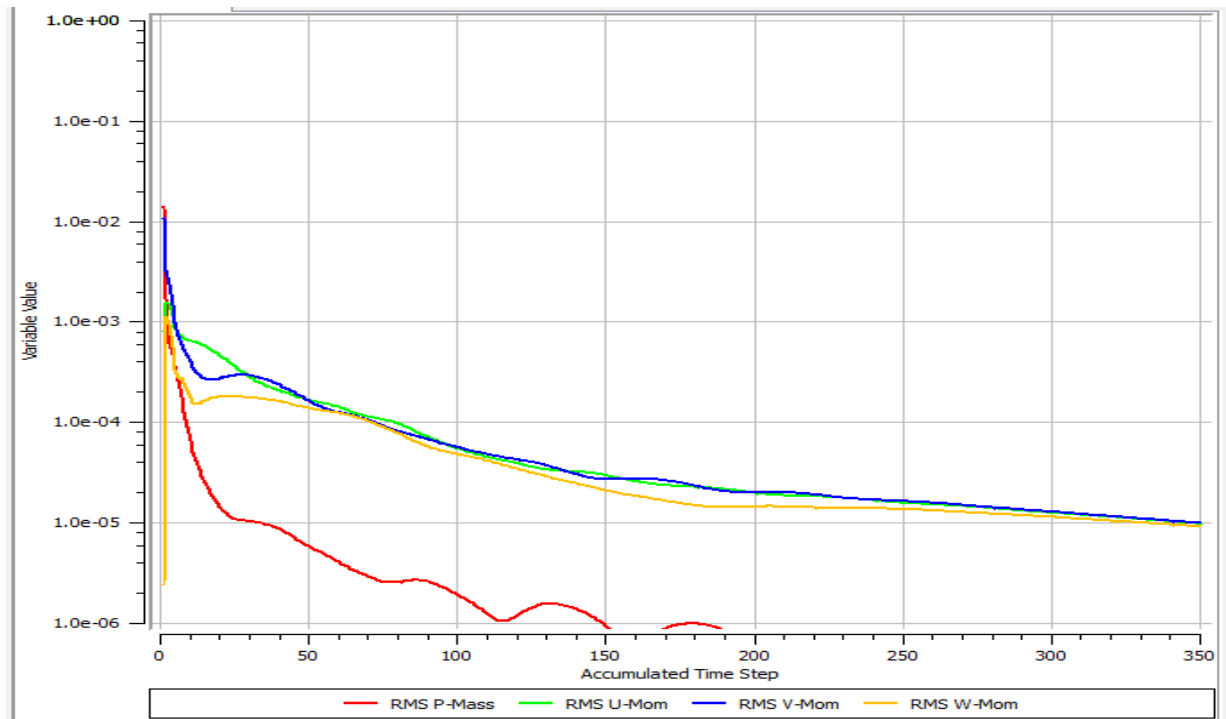


Figure 3.5 : Convergence de la solution vers une erreur de 10^{-5}

Chapitre 4
Résultats et
Discussion

Chapitre 4

Résultats et Discussion

4.1. Validation

Le mélange joue un rôle important sur la qualité du produit final dans plusieurs procédés industriels, comme l'homogénéisation, la dispersion des gaz, la cristallisation et la polymérisation. Un mélange efficace se traduit par une bonne qualité de produit final avec un coût de production minimal. Par conséquent, la détermination des caractéristiques du mélange est extrêmement importante, en particulier pour les fluides visqueux et non-Newtoniens, où la probabilité de présence de zones peu mélangées ou isolées est forte.

Plusieurs techniques pour achever l'opération de mélange sont disponibles. La technique de « cuve agitée » est fréquemment utilisée, mais elle est connue par une consommation de puissance considérable (Ameur et al., 2017). Comme solution alternative, les mélangeurs statiques sont connus par leurs coût énergétique et espace d'équipement réduits (Mahammedi et al., 2017).

La puissance requise vient directement de la pompe qui entraîne l'écoulement en ligne et aucun moteur supplémentaire n'est nécessaire. En outre, les mélangeurs statiques sont préférés pour leur bonne qualité de mélange à faible taux de cisaillement, faible coût d'équipement, petites exigences d'espace, distributions du temps de séjour nettes, capacité d'auto-nettoyage et production de surface interfaciale élevée (**Ghanem et al., 2014**).

Ces mélangeurs statiques sont largement rencontrés dans de nombreuses industries, comme les industries du pétrole, l'industrie pharmaceutique, de la peinture et de l'alimentation, pour réaliser une large gamme d'opérations telles que les réactions chimiques, le raffinage, la climatisation et le traitement des gaz (**Bi et al., 2013**).

Les mélangeurs statiques sont également de bonnes solutions de rechange pour le traitement des milieux agressifs et corrosifs et pour des opérations à haute pression (**Rabha et al., 2015**). Les mélangeurs statiques sont également utilisés pour améliorer les taux de transfert de masse du gaz au liquide (**Munter, 2010**).

Dans le présent travail, des générateurs de vortex sont placés dans un mélangeur statique pour améliorer son efficacité. Il s'agit des éléments semi-circulaires insérés au sein du tube pour intensifier la turbulence hydrodynamique. L'étude est réalisée par voie de simulation numérique. Les fluides utilisés possèdent un comportement pseudoplastique modélisé par la loi d'Ostwald. L'effet de quelques paramètres sur la structure des écoulements et pertes de charges est mis en évidence. Il s'agit de la hauteur des chicanes, espace inter-chicané, nombre de Reynolds et propriétés rhéologiques du fluide.

Avant de commencer notre investigation, il est nécessaire de faire une vérification de la fiabilité du code de calcul et de la méthode numérique utilisée. Pour cela, on s'est référé au travail expérimental réalisé par **Xu et al. (1997)**. Avec le même fluide utilisé par ces auteurs (c.à.d. un fluide non-Newtonien pseudoplastique) pour un mélangeur statique (il s'agit des éléments hélicoïdaux dans un tube), et pour un flux laminaire, les résultats de pertes de charge obtenus à partir de la simulation par CFD ont été comparés avec les données expérimentales de Xu et ces co-auteurs (Figure 4.1). La comparaison entre les deux résultats montre un bon accord sur toute la gamme de nombre de Reynolds.

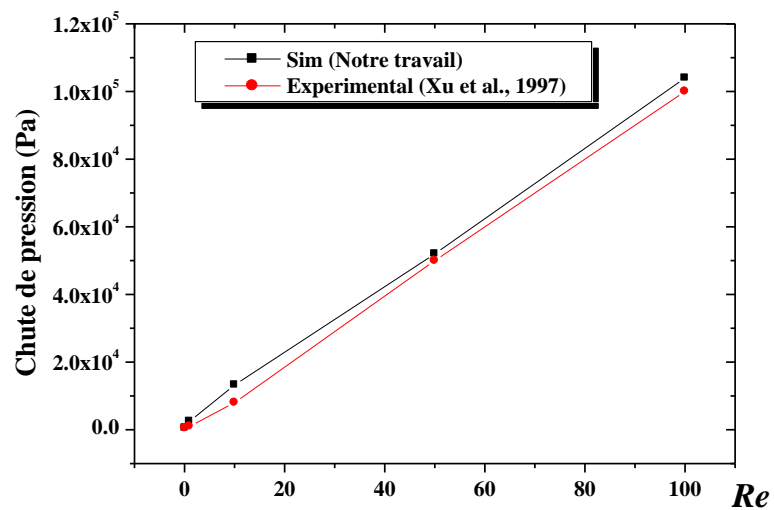


Figure 4.1 : Pertes de charge en fonction du nombre de Reynolds

4.2. Influence de la hauteur du GV

Commençons notre investigation par la recherche de l'effet de la hauteur (h) du générateur de vortex (GV) sur la structure hydrodynamique et pertes de charges. Quatre géométries sont réalisées à ce propos, et qui sont : $h/D = 0.3, 0.4, 0.5$ et 0.6 .

Pour une position très proche de la paroi et sur une distance entre deux chicane consécutives, la variation de la vitesse axiale est suivie pour différentes valeurs de h/D (Figure 4.2).

Les résultats montrés sur cette figure confirment la périodicité de l'écoulement. La vitesse du fluide commence à augmenter à partir de la chicane, elle diminue dès qu'on arrive dans la zone face à la chicane inférieure, puis elle augmente du nouveau et enfin elle sera nulle au contact immédiat avec la chicane.

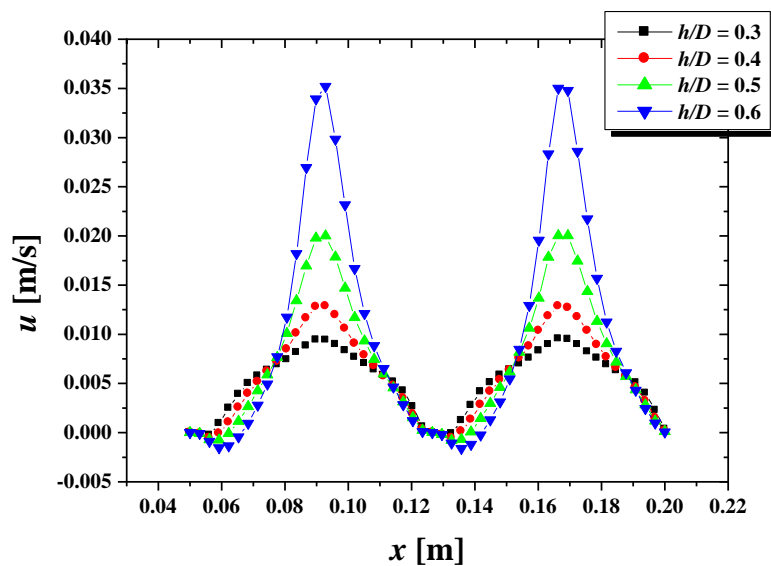


Figure 4.2 : Variation de vitesse axiale pour $Re = 20$, $N_c = 7$, $n = 0.8$

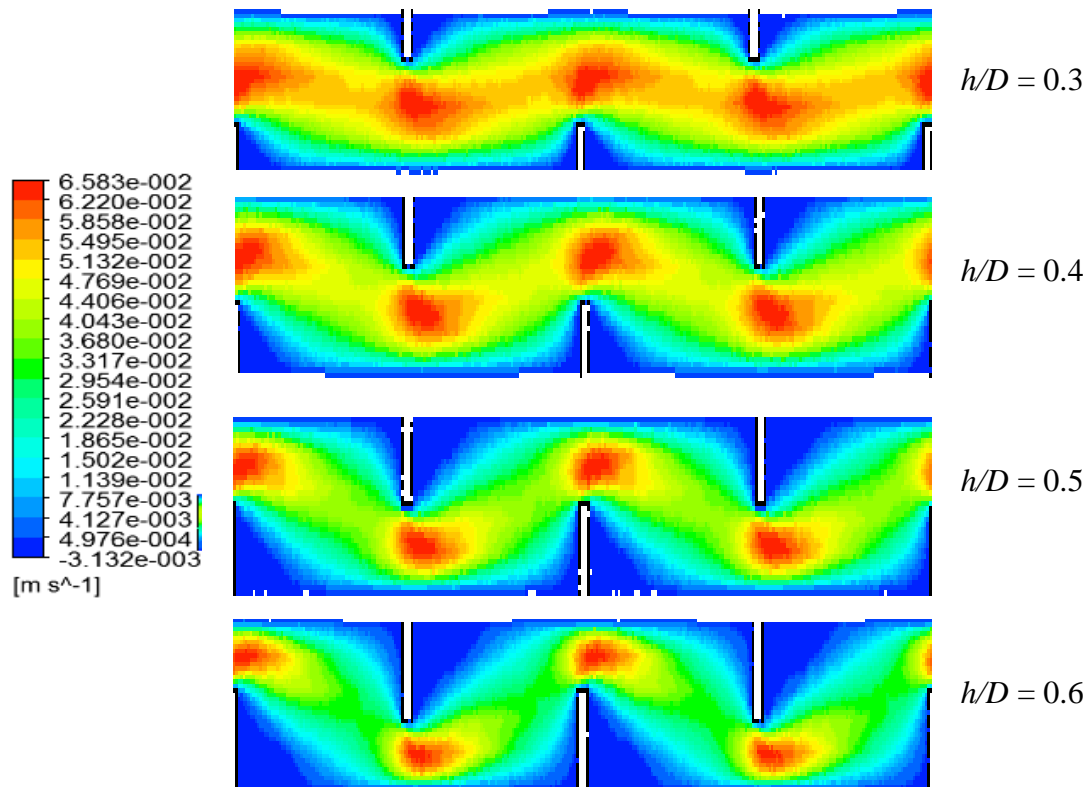


Figure 4.3 : Contours de vitesse pour $Re = 20$, $N_c = 7$, $n = 0.8$

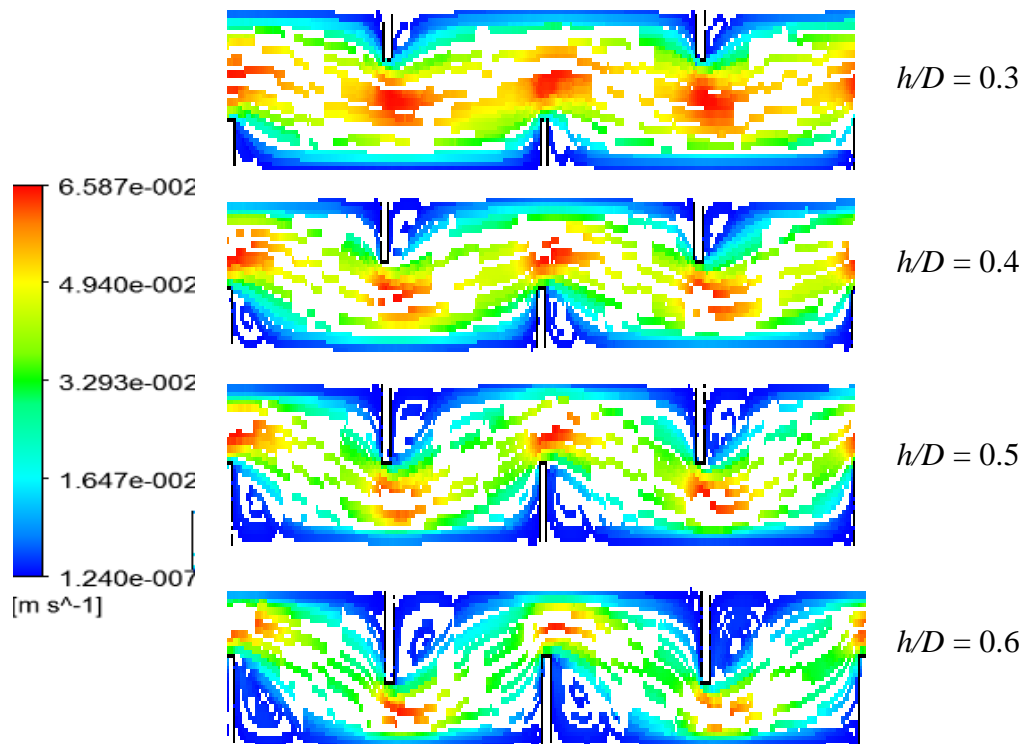


Figure 4.4 : Lignes de courant pour $Re = 20$, $N_c = 7$, $n = 0.8$

Plus d'éclaircissement sur les champs de vitesse est présenté sur les Figures 4.3 et 4.4. La vitesse est maximale au bout de la chicane, quelque soit sa hauteur. L'écoulement axial est intense sur la ligne centrale, cette intensité se perd avec l'augmentation de la hauteur du GV, et elle sera convertie en recirculation formée derrière ces GV.

La taille de ces vortex augmente avec l'augmentation du rapport h/D du GV, ceci est un indice de bonne interaction entre les particules de fluide. Ce qui peut engendrer une bonne homogénéisation du produit final. Mais cela se répercute aussi sur les pertes de charges (Figure 4.5).

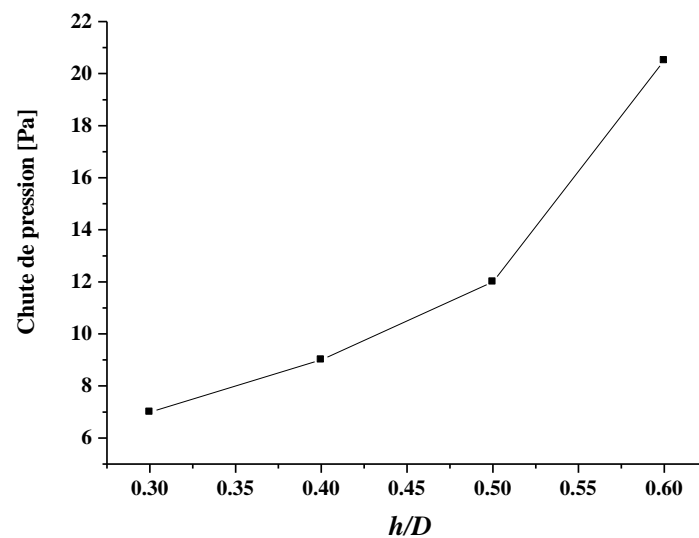


Figure 4.5 : Chute de pression pour $Re = 20$, $N_c = 7$, $n = 0.8$

4.3. Influence du nombre des chicanes (N_c) :

L'effet d'un autre paramètre géométrique est exploré dans cette section, il s'agit du nombre de chicanes (N_c). Quatre cas sont considérés et qui sont $N_c = 3, 5, 7$ et 9 .

La vitesse axiale est présentée sur la Figure 4.6 le long de la ligne centrale pour différentes valeurs du N_c . Premièrement, on observe clairement la périodicité de l'écoulement. Aussi, l'augmentation du nombre des chicanes (c'est-à-dire la réduction de l'espace inter-chicané) fait augmenter la valeur maximale atteinte au bout du GV.

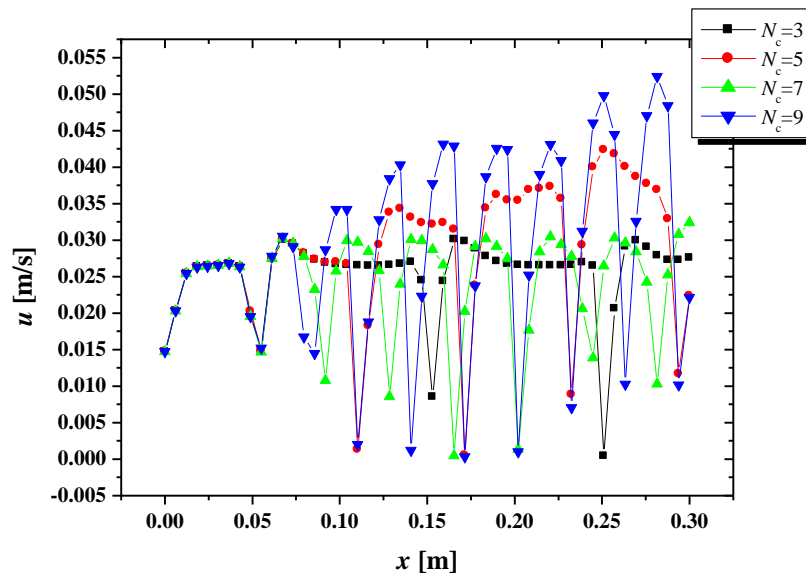


Figure 4.6 : Vitesse axiale pour $Re = 20$, $h/D = 0.5$, $n = 0.8$

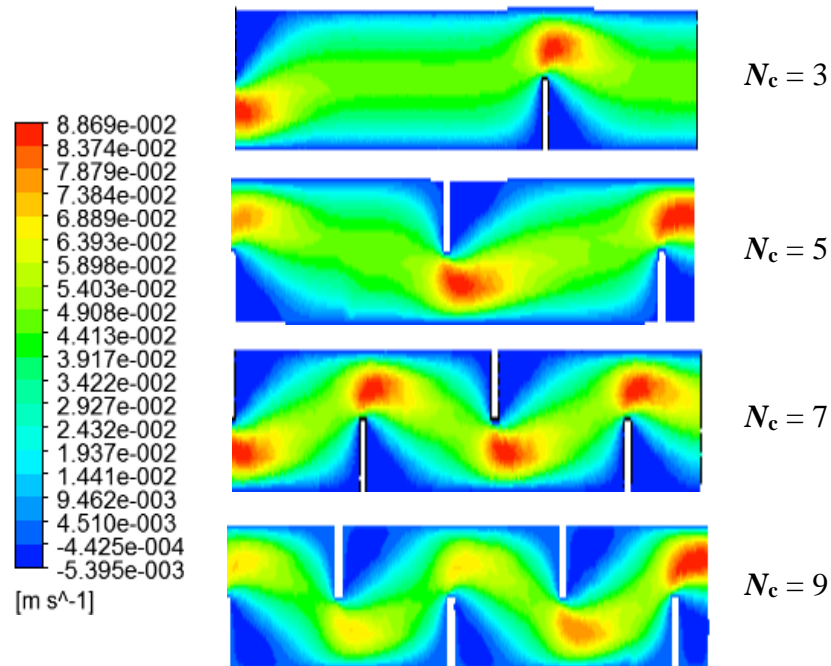


Figure 4.7 : Contours de vitesse pour $Re = 20$, $h/D = 0.5$, $n = 0.8$

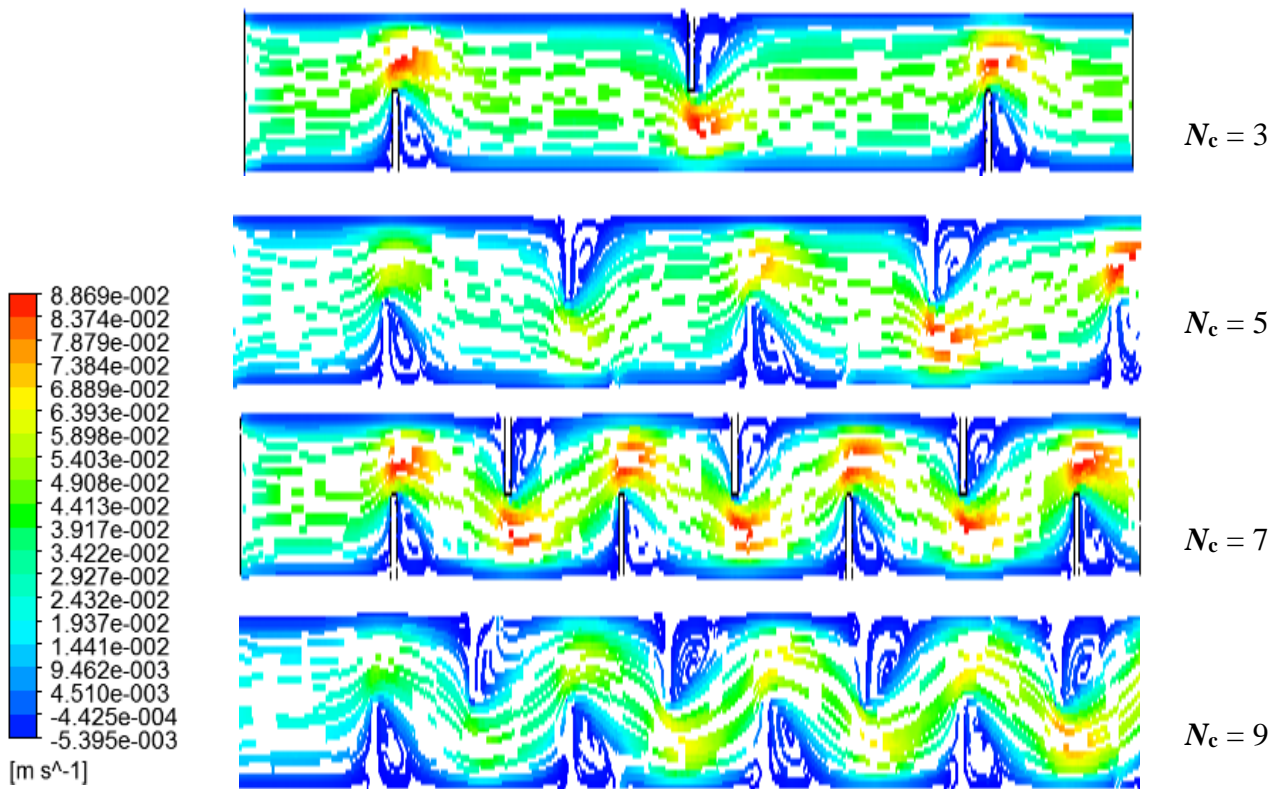


Figure 4.8 : Lignes de courant pour $Re = 20$, $h/D = 0.5$, $n = 0.8$

Les champs d'écoulement sont illustrés sur un plan horizontal XY et sous différentes formes : contours de vitesse (Figure 4.7) et lignes de courant (Figure 4.8).

L'augmentation du nombre des chicanes, autrement dit : la réduction de l'espace inter-chicané, semble avantageuse en termes d'intensification de l'écoulement et interactions moléculaires. Mais cela avec une perte de charge supplémentaire (Figure 4.9)

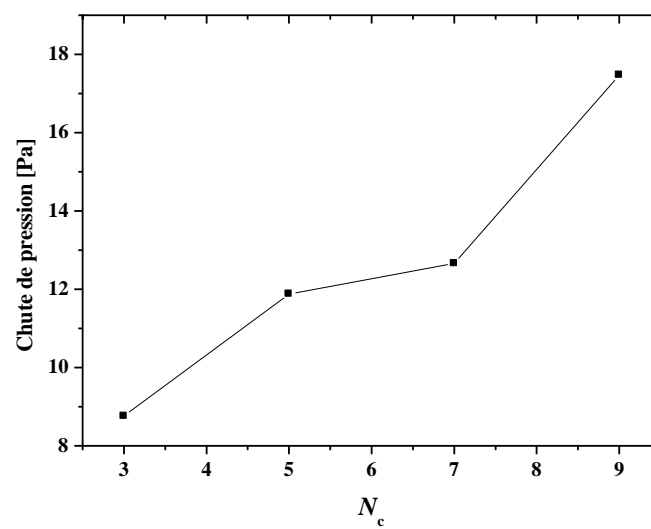


Figure 4.9 : Chute de pression pour $Re = 20$, $h/D = 0.5$, $n = 0.8$

4.4. Influence du nombre de Reynolds

L'influence du nombre de Reynolds est aussi explorée. Re a été changé sur une gamme du 1 à 250.

Comme attendu, l'augmentation du débit volumique se traduit par la croissance de la vitesse axiale (Figures 4.10 et 4.12). Aussi, avec un débit rapide, l'écoulement change sa direction juste après la chicane et les vitesses négatives sont plus grandes (Figure 4.11). La valeur négative de la vitesse indique l'existence d'une recirculation de l'écoulement.

La taille de ces vortex peut être remarquée plus visiblement sur la Figure 4.13, où les lignes de courant sont présentées sur un plan horizontal XY .

Un favorable mouvement des particules de fluide est obtenu avec l'augmentation du Re , mais cela est toujours avec pénalité supplémentaire en termes de chute de pression. Ici, la cause principale de cette chute c'est bien l'augmentation du frottement visqueux entre les molécules et avec la paroi.

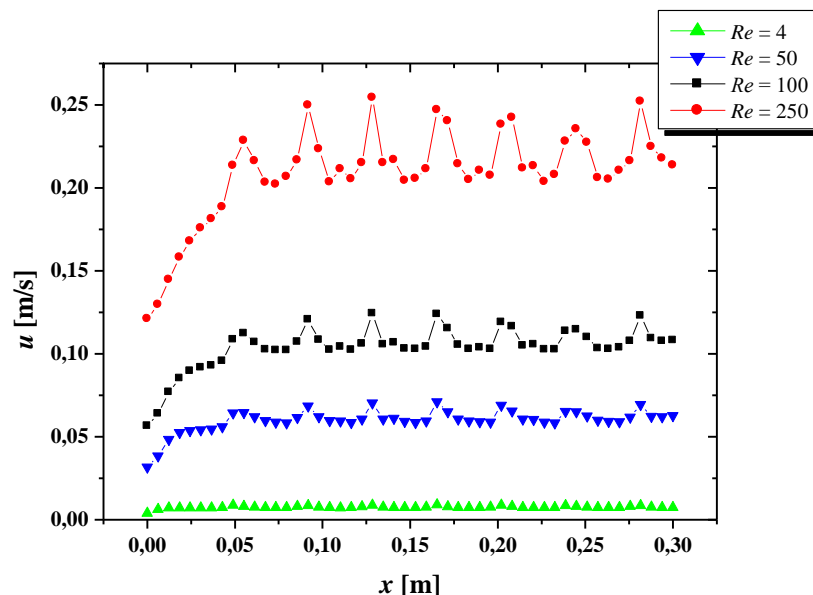


Figure 4.10 : Variation de vitesse axiale pour $h/D = 0.5$, $N_c = 7$, $n = 0.8$

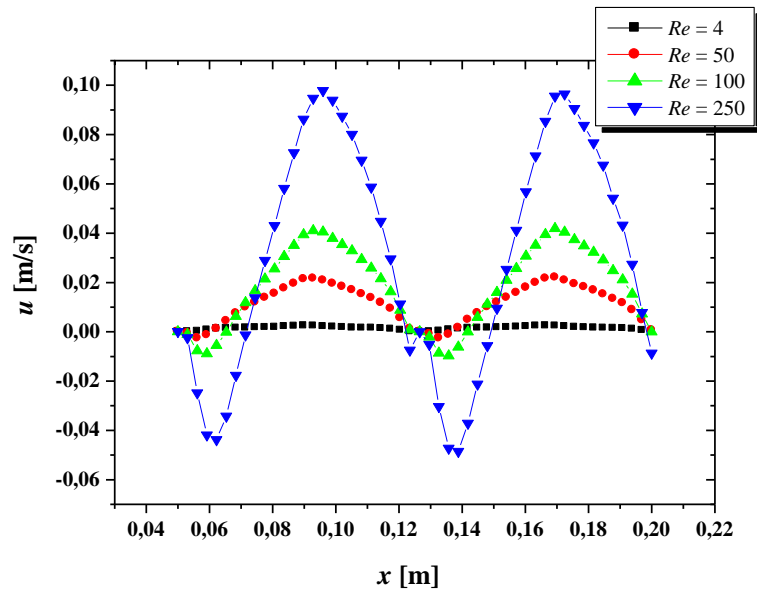


Figure 4.11 : Variation de vitesse axiale pour $z/D = 0.001$, $h/D = 0.5$, $N_c = 7$, $n = 0.8$

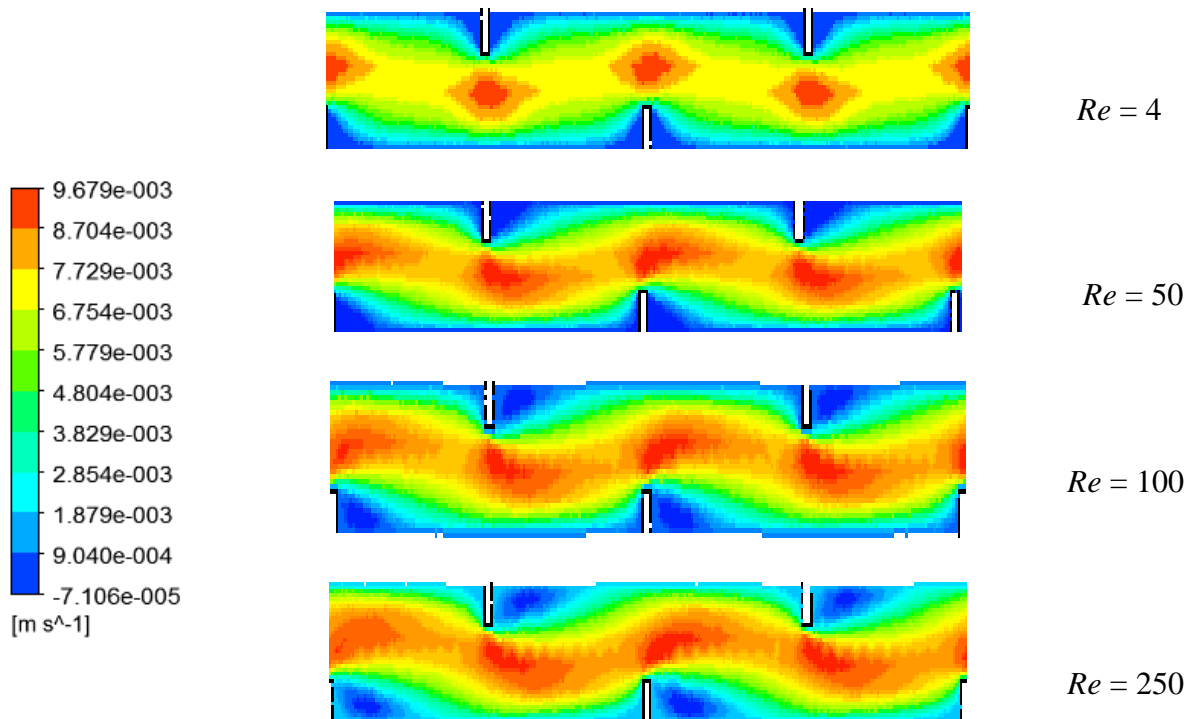


Figure 4.12 : Contours de vitesse pour $h/D = 0.5$, $N_c = 7$, $n = 0.8$

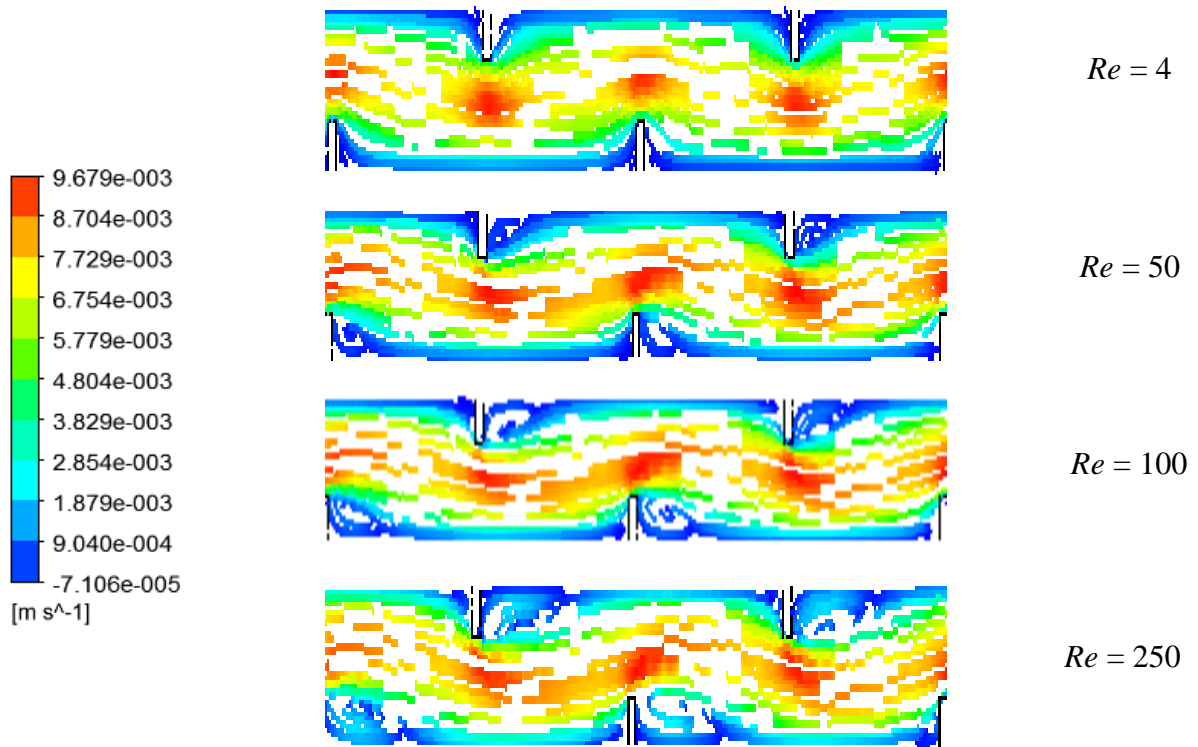


Figure 4.13 : Lignes de courant pour $h/D = 0.5$, $N_c = 7$, $n = 0.8$

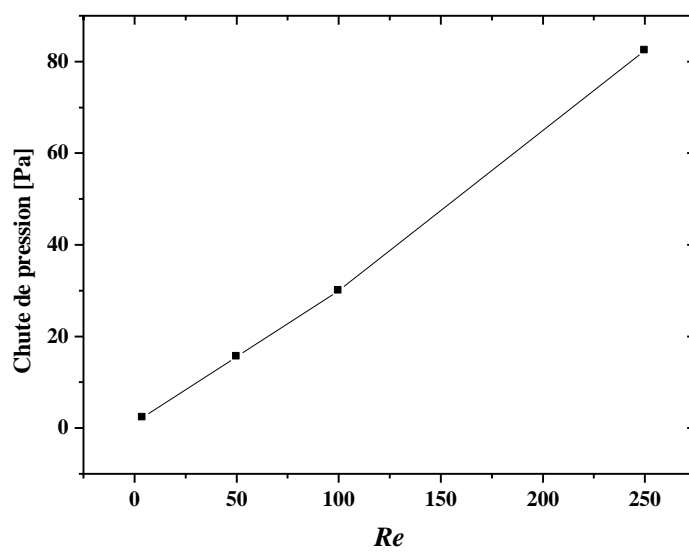


Figure 4.14 : Chute de pression pour $h/D = 0.5$, $N_c = 7$, $n = 0.8$

4.5. Influence de l'indice de comportement

Dans la dernière partie de notre travail, on simule l'influence des propriétés rhéologiques du fluide. On rappelle que le fluide en question est le CMC (Carboxy-Mythyl-Cellulose) qui a un comportement pseudoplastique modélisé par la loi d'Ostwald. L'indice du comportement (n) est varié entre 0.4 et 1.

La croissance de cet indice fait augmenter la vitesse axiale le long du mélangeur (Figures 4.15 et 4.16). Le vortex développé derrière le GV sera ainsi plus ample (Figure 4.17). Ceci est plus explicite sur la Figure 4.18 où la vitesse u est suivie sur une distance inter-chicanée à une position très proche de la paroi : la vitesse négative est plus grande pour $n = 0.8$ que celle pour $n = 0.4$. D'un autre côté, la chute de pression sera en augmentation continue (Figure 4.19). Cela est dû principalement aux forces visqueuses qui marquent ce type de fluides connus sous le nom : pseudoplastiques.

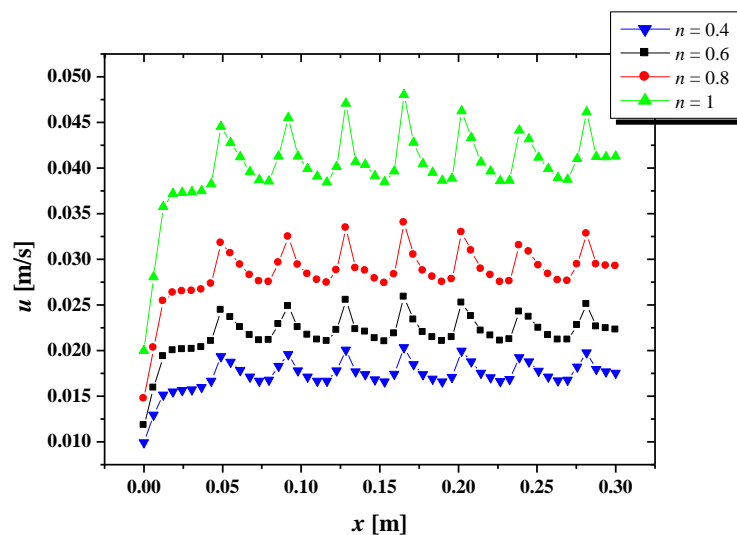


Figure 4.15 : Vitesse axiale pour $Re = 20$, $N_c = 7$, $h/D = 0.5$

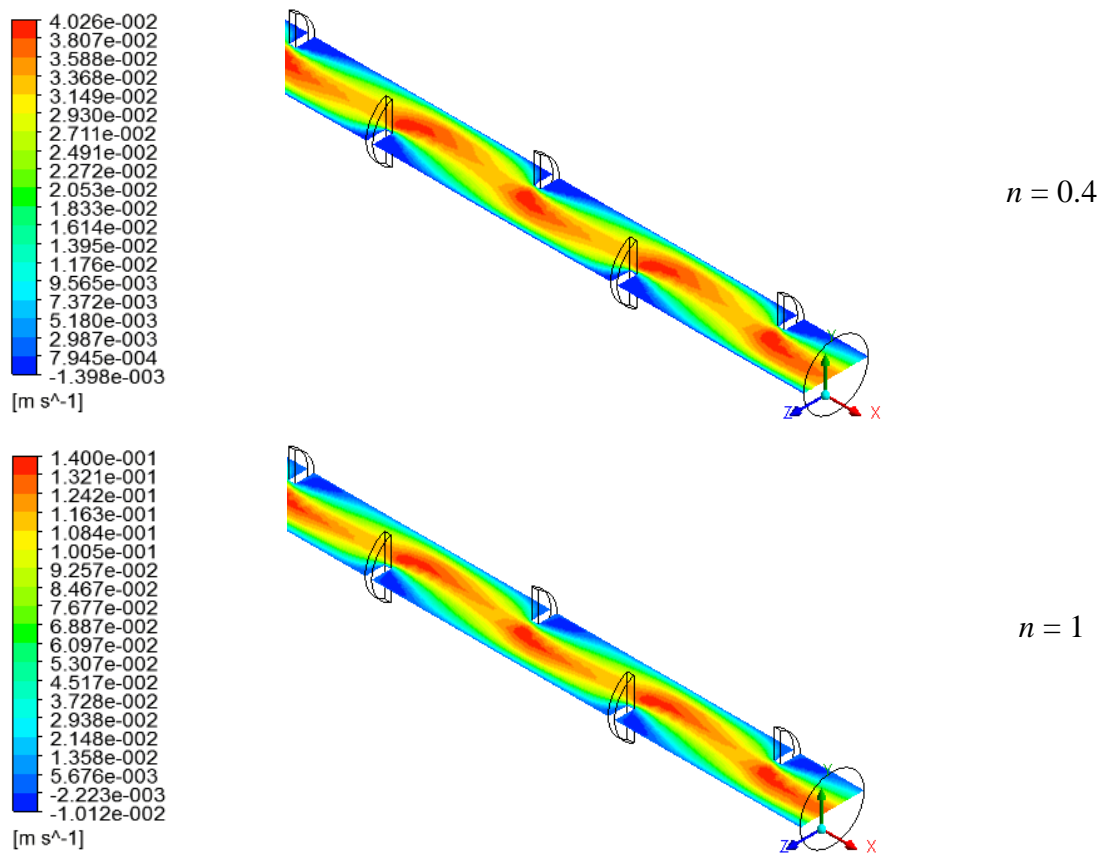


Figure 4.16 : Contours de vitesse pour $Re = 20$, $N_c = 7$, $h/D = 0.5$

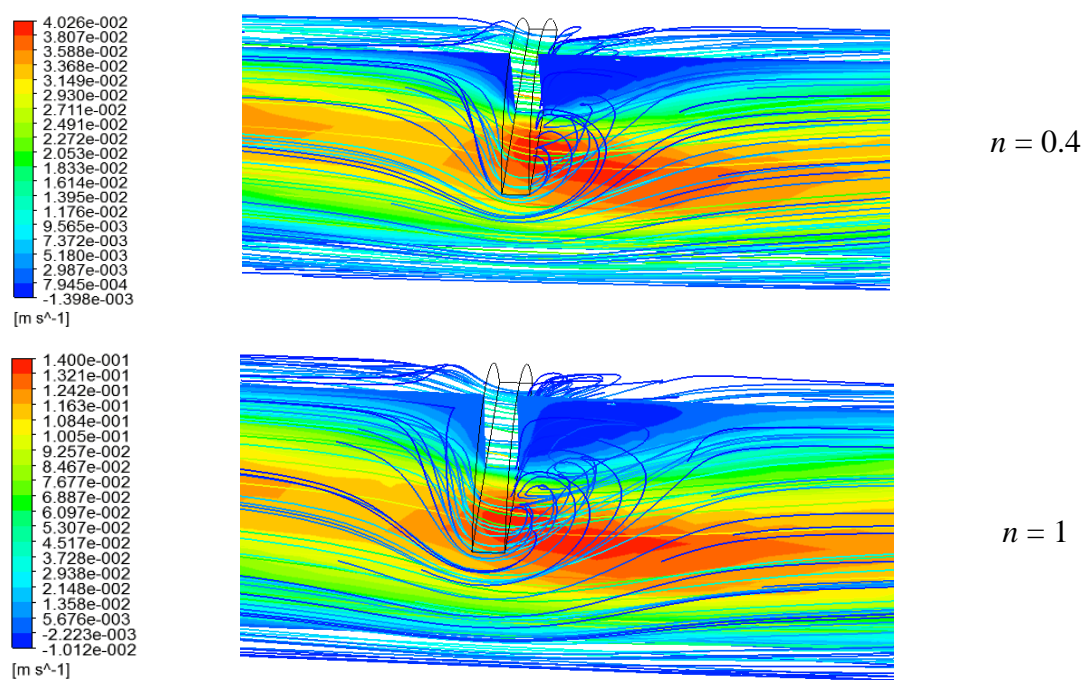


Figure 4.17 : Lignes de courant pour $Re = 200$, $N_c = 7$, $h/D = 0.5$

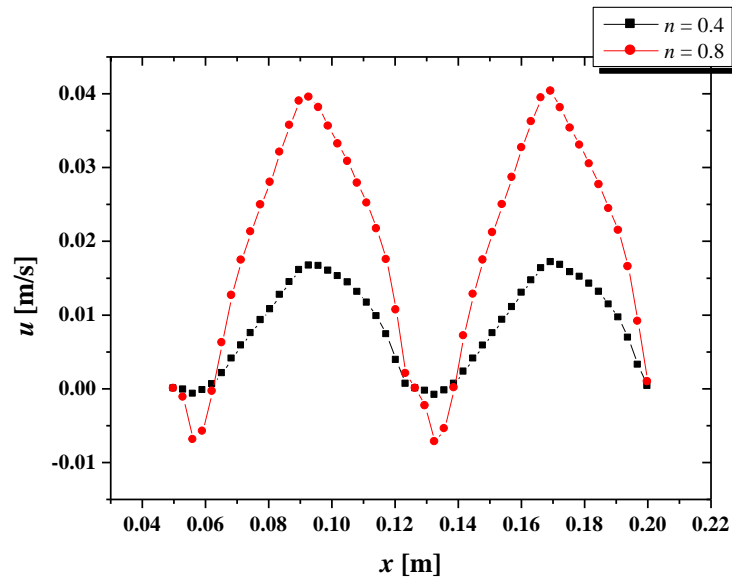


Figure 4.18 : Vitesse axiale pour $Re = 200$, $z/D = 0.001$, $N_c = 7$, $h/D = 0.5$

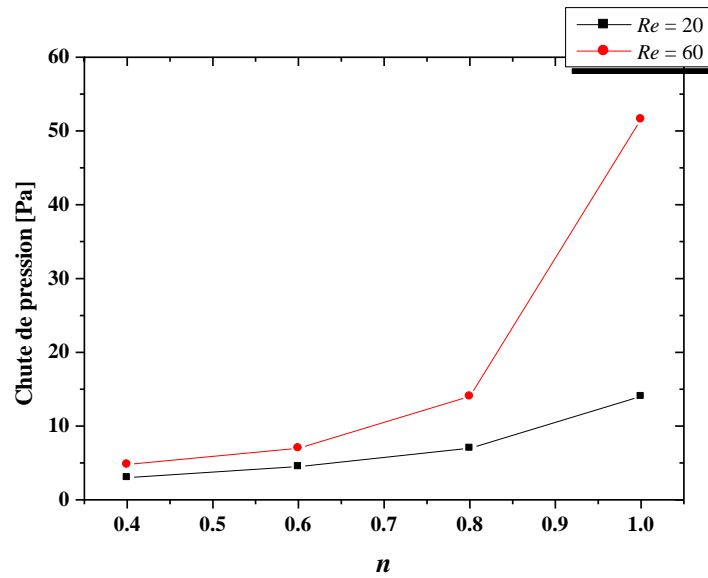


Figure 4.19 : Chute de pression pour $N_c = 7$, $h/D = 0.5$

Conclusion

Conclusion Générale

Dans le présent travail, la structure hydrodynamique et pertes de charges dans un mélangeur statique sont déterminés à l'aide d'un code de calcul. Cet outil numérique a permis la visualisation tridimensionnelle de l'écoulement à travers tous le mélangeur.

Les générateurs de vortex (GVs) installés dans le système ont prouvé leurs efficacités en termes d'amélioration de la circulation du fluide. L'influence des différents paramètres étudiés (hauteur h/D du GV, nombre des GVs, nombre du Reynolds et indice de comportement du fluide) peut être résumée comme suite :

L'augmentation du rapport h/D et du nombre des GVs (N_v) (c'est-à-dire la réduction de l'espace inter-chicané) sont bénéfiques en termes d'intensification du mouvement des particules du fluide, mais avec une perte de charges en proportionnelle croissance qui est dû à la singularité géométrique du système.

La taille des vortex derrière les chicanes peut être aussi augmentée avec la croissance du nombre de Reynolds et indice de comportement, mais avec une chute de pression supplémentaire, qui est le résultat des forces visqueuses.

Références bibliographiques

Ameur H. Simulation des fluides visqueux dans une cuve agitée par des mobiles à pales, à disques, hélicoïdaux et Maxblend. Thèse de Doctorat, USTO-MB, 2012.

Ameur H., Sahel D., Kamla Y. Energy efficiency of a deep hollow bladed impeller for mixing viscoplastic fluids in a cylindrical vessel. *Advances in Mechanical Engineering* 9, 1-7, 2017.

Ben Hamouda R. Notions de mécanique des fluides -cours et exercices corrigés. Centre de Publication Universitaire, Tunis 2008.

Beriache M. Mécanique des fluides. Université Hassiba Benbouali Chlef, 2016.

Bi R., Yang X., Tan T., Zheng S. A method to predict phosgenation reaction performance to produce toluene diisocyanate in jet reactors. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 52, 15353-15358, 2013.

Bouزيد. S. Introduction a la mécanique des fluides. 2014.

Felicie T. Conception et mise en œuvre d'un procédé intensifié continu de micro encapsulation par polycondensation interrassiale. Page 24-27, 2009.

Ghanem A., Lemenand T., Valle D.D., Peerhossaini H. Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods – A review. *Chemical Engineering Research and Design* 92, 205-228, 2014.

Gueraoui K. Complément de mécanique des solides et introduction à la mécanique des fluides. Université Mohammed V-Agdal, Maroc, 2010.

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.

Mahammedi AEK. Caractérisation numérique des performances des mélangeurs statiques : applications aux fluides Newtoniens et non-Newtoniens. Thèse de Doctorat, ENP d'Oran, 2018.

Munter R. Comparison of mass transfer efficiency and energy consumption in static mixers. *Ozone – Science Engineering* 32, 399-407, 2010.

Rabha S., Schubert M., Grugel F., Banowski M., Hampel U. Visualization and quantitative analysis of dispersive mixing by a helical static mixer in upward co-current gas-liquid flow. *Chemical Engineering Journal* 262, 527-540, 2015.

Site web 1 : Mélangeurs et agitateurs industriels | MIXEL - Fabricant d'agitateurs ...www.mixel.fr/melangeur/ (dernière visite : le 25/12/2017).

Site web 2 : <http://www.stamixco-usa.com> (dernière visite : le 25/12/2017).

Site web 3 : www.cherd.ichemejournals.com (dernière visite : le 25/12/2017).

Site web 4 : <http://www.cherd.ichemejournals.com> (dernière visite : le 25/12/2017).

Site web 5 : www.directindustry.fr (dernière visite : le 25/12/2017).

Xu G., Feng L., Li Y., Wang K. Pressure drop of pseudo-plastic fluids in static mixers. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 5, 93-96, 1997.

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.