

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Hassiba Ben Bouali de Chlef Faculté de Technologie

Département de Génie mécanique



THÈSE

Présentée pour l'obtention diplôme de

DOCTORAT

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Par

BENABDELLAZIZ OURDIA

Thème :

Etude de l'efficacité d'une nouvelle conception sur les performances des mélangeurs Statiques.

Soutenue le **12/12/2024** devant le jury composé de :

Mr. ZIDANE Ibrahim	Professeur	UHB-Chlef	Président
Mr. KHELIL Ali	Professeur	UHB-Chlef	Examineur
Mr. SAHEL Djamel	Professeur	UAT- Laghouat	Examineur
Mr. BOUSSOUFI Mustapha	MCA	USTO- Oran	Examineur
Mr. Youcef KAMLA	MCA	UHB-Chlef	Encadreur
Mr. Abdelkader KARAS	Professeur	UIK-Tairret	Co- Encadreur

Remerciements

Mes louanges et mes gratitudes intarissables vont en premier lieu à Dieu
Que son nom soit exalté, le tout-puissant qui m'a prodigué le courage, la volonté et la patience afin
d'accomplir cette modeste œuvre.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers le Dr **YOUCEF KAMLA**
Pour son soutien indéfectible, sa guidance éclairée et son expertise inestimable tout au long de ce
parcours de recherche. Ses conseils avisés, sa disponibilité et sa patience ont grandement contribué
à l'aboutissement de ce travail.

Mes remerciements vont également le Professeur **ABDELKADER KARAS**, pour ses précieux
enseignements, son encadrement attentif et ses remarques constructives qui ont enrichi ce travail
de thèse.

Mes remerciements vont également aux Examineurs, à savoir **Pr. KHLIL Ali, Pr. SAHEL
Djamel** et **Dr. Boussoufi Mustapha**.

Pour avoir accepté de consacrer leur temps à évaluer ce travail Leurs remarques et suggestions ont
été d'une valeur inestimable.

Je tiens à remercier chaleureusement le chef du laboratoire de rhéologie mécanique, Pr. H. Zhoul,
Pour avoir mis à ma disposition les ressources nécessaires à la réalisation de cette recherche. Je
n'oublie pas de remercier également le président de la CFD, Professeur Zidane Ibrahim.

Je suis également reconnaissant envers mes collègues et amis pour leur soutien et leur
encouragement tout au long de cette aventure.

Enfin, je dédie ce travail à **ma famille** et pour **moi-même**

Qui a été mon pilier de force et ma source d'inspiration.

Leur amour, leur soutien inconditionnel et leurs encouragements

Ont été les moteurs de ma persévérance.

Dédicaces

A mes chers parents.

A mes frères et sœurs.

À tous amis. À tous ceux qui ont cru en moi, merci.

Résumé

Cette étude analyse l'impact d'un nouveau design de mélangeur statique de type Kenics sur les performances de mélange et de transfert thermique. Des simulations numériques, réalisées avec le code de calcul ANSYS-Fluent 20, ont permis d'examiner divers paramètres, notamment l'effet du nombre de Reynolds (variant de 10 à 100), les pertes de charge, le nombre de Nusselt, ainsi que le comportement rhéologique des fluides. Les résultats montrent l'importance de la géométrie : quatre configurations ont été conçues, chacune étant caractérisée par des perforations réparties sur toute la longueur des éléments hélicoïdaux du mélangeur. La quatrième configuration, qui comporte quatre vides occupant toute la longueur de l'hélicoïde, s'est montrée la plus performante, avec une amélioration de 99 % en efficacité thermique et de mélange. Toutefois, ces améliorations entraînent une augmentation des pertes de charge, atteignant jusqu'à 13 %.

Mots clés : Kenics mixer, mélange, Nusselt, efficacité.

Abstract

This study analyzes the impact of a new design of Kenics-type static mixer on mixing and heat transfer performance. Numerical simulations, conducted using the ANSYS-Fluent 20 calculation code, allowed for the examination of various parameters, including the effect of the Reynolds number (ranging from 10 to 100), pressure losses, the Nusselt number, as well as the rheological behavior of the fluids. The results show the importance of geometry: Four configurations were designed, each characterized by perforations distributed along the entire length of the helical elements of the mixer. The fourth configuration, which features four voids occupying the entire length of the helicoid, proved to be the most efficient, with a 99% improvement in thermal and mixing efficiency. However, these improvements lead to an increase in pressure losses, reaching up to 13%.

Keywords: Kenics mixer, mixing, Nusselt, efficiency

ملخص

تتناول هذه الدراسة تأثير الشكل الهندسي لخلط ثابت من نوع Kenics على تحسين كفاءة الخلط بين سائلين وتبادل الحرارة. تم إجراء محاكاة رقمية باستخدام برنامج Fluent-ANSYS 20 ، مما أتاح دراسة عدة معايير، بما في ذلك تأثير عدد رينولدز (الذي يتراوح بين 10 و100)، فقدان الضغط، عدد نوسلت، والسلوك الريولوجي للسوائل. تُظهر النتائج أهمية الشكل الهندسي في تعزيز فعالية الخلط الستاتيكي، حيث تم اقتراح أربع أشكال مختلفة لهذا النوع من الخلط، يتميز كل منها بوجود ثقب أو فراغات موزعة على طول العناصر الحلزونية للخلط. الشكل الرابع، الذي يحتوي على أربعة فراغات تمتد على طول الحلزون بالكامل، أظهر أداءً أفضل، مع تحسن قدره 99% في الكفاءة الحرارية والخلط. ومع ذلك، أدت هذه التحسينات إلى زيادة في فقدان الضغط بنسبة تصل إلى 13% مقارنة بالأشكال الهندسية الأخرى.

الكلمات المفتاحية : خلط كينيكس، الخلط، نوسيلت، الكفاءة.

TABLES DES MATIERES

Remerciements

Dédicaces

Résumé

Abstract

ملخص

LISTE DES TABLEAUX X

NOMENCLATURE XI

Introduction Générale 2

CHAPTER I: Étude bibliographique

I.1. Introduction 5

I.2. Mécanismes d'agitation 7

I.3. Différents types des mélangeurs 8

I.3.1. Mélangeurs convectifs 8

I.3.2. Cuves tournantes 8

I.3.3. Agitateurs rotatifs 9

I.3.4. Mélangeurs ultrasons 10

I.3.5. Mélangeurs statiques 10

I.4. Types des mélangeurs statiques 11

I.4.1. Mélangeurs Sulzer 11

I.4.2. Mélangeurs Lightnin 13

I.4.3. Mélangeurs Ross 13

I.4.4. Mélangeurs Kenics 14

I.5. Applications du processus 15

I.6. Industriel Applications 15

I.7. Revue de la littérature 16

I.8. Conclusion 35

CHAPITRE II :Modélisation mathématique et approche Numérique

II.1. Introduction 38

II.2. Génération de la géométrie 39

<i>II.3. Maillage.....</i>	<i>40</i>
<i>II.4. Caractérisation de l'efficacité du mélange thermique.....</i>	<i>42</i>
II.4.1. <i>Grandeurs physiques pour caractériser l'efficacité de mélange des mélangeurs statiques</i>	<i>42</i>
II.4.2. <i>Indice de mélange (MI) : analyse numérique de l'efficacité du mélange.....</i>	<i>43</i>
II.4.3. <i>Fonction de densité de probabilité Pdf (T).....</i>	<i>44</i>
II.4.4. <i>Indice thermique de mélange (TMI)</i>	<i>44</i>
<i>II.5. Conservation Equations</i>	<i>44</i>
II.5.1. <i>Equation de continuité</i>	<i>44</i>
II.5.2. <i>Equation de conservation de la quantité de mouvement</i>	<i>45</i>
II.5.3. <i>Equation de conservation de l'énergie.....</i>	<i>46</i>
<i>II.6. Propriétés physiques des fluides.....</i>	<i>46</i>
II.6.1. <i>Fluide newtonienne</i>	<i>46</i>
II.6.2. <i>Fluide non-newtonienne.....</i>	<i>47</i>
II.6.3 <i>Conditions aux limites.....</i>	<i>48</i>
II.7. Conclusion	49

Chapitre III : Résultats et discussion

Partie 1 : Effet de la géométrie sur la structure de l'écoulement

III.1. Résultats et discussion.....	49
III.1.2. Effet de la configuration géométrique sur la performance de mélange	49
III.1.2.1. <i>Effet du nombre de Reynolds</i>	<i>50</i>
III.1.3. <i>Vitesse tangentielle.....</i>	<i>53</i>
III.1.4. <i>Perte de charge</i>	<i>55</i>
III.1.5. <i>Effet de la géométrie sur les Performance thermique</i>	<i>57</i>
III.1.6. Conclusion	59

Partie 2 :Effet de la géométrie sur les performances de mélange des fluides

Newtonien

III.2.1. <i>Effet de la géométrie du mélangeur statique sur le mélange de fluides</i>	<i>60</i>
III.2.1.2. <i>Structure de l'écoulement dans les différentes configurations géométriques étudiées</i>	<i>63</i>
III.2.2. <i>Effet de la géométrie sur l'efficacité thermique</i>	<i>66</i>
III.2.2.1. <i>Indice de mélange thermique.....</i>	<i>66</i>

III.2.2.2. Fonction de densité de probabilité	67
III.2.3.Conclusion	68

Partie 3 :Effet de la géométrie sur les performances de mélange des fluides non Newtonien

III.3. Introduction.....	69
<i>III.3.1. Performances de mélange</i>	69
<i>III.3.2. Evolution de l'indice de mélange dans les mélangeurs</i>	70
<i>III.3.3. Evolution de l'indice de mélange thermique :</i>	73
<i>III.3.4. Fonction de densité de probabilité</i>	75
III.3.5.Conclusion	77
<i>Conclusion Générale</i>	78
Références.....	64

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Agitation mécanique.....	7
Figure I.2 : Mélangeur à vis.	8
Figure I.3 : mélangeur à cuves tournantes.....	9
Figure I.4 : Les agitateurs mécanique (site web).	9
Figure I.5 : Agitateurs magnétiques (site web).	10
Figure I.6 : Le mélangeur ultrasons (site web).....	10
Figure I.7 : Dispersion gaz-liquide en mélangeur SMV	11
Figure I.8 : Mélangeur SMX.....	12
Figure I.9 : Mélangeur SMXL.....	12
Figure I.10 : Mélangeur SMR.....	13
Figure I.11 : Mélangeur Lightnin.....	13
Figure I.12 : Mélangeur LPD	13
Figure I.13 : Mélangeur ISG	14
Figure I.14 : Mélangeur HEV	14
Figure I.15 : Éléments de mélange d'un mélangeur statique.....	15
Figure I.16. Schéma du mélangeur statique à six éléments Kenics avec un rapport d'aspect de (a) 0,4 (b) 1,0.....	18
Figure I.17. Ligne de trajectoire d'une particule traversant un mélangeur statique hélicoïdal à six éléments.....	18
Figure I.18. Grille tétraédrique du mélangeur superposé.....	19
Figure I.19. Calcul de la chute de pression en fonction de Corrélations empiriques pour divers nombres de Reynolds.	19
Figure I.20. Ensemble de mélangeur statique SMX à quatre éléments.....	22
Figure I.21. Résultats de calcul pour la chute de pression en fonction de Re	22
Figure I.22. géométries du tube équipé de différents mélangeurs statiques.	24
Figure I.23. validation du modèle basée sur f et Nu de komax.....	25
Figure I.24. Configuration du mélangeur statique KSM pour $n = 4$	28
Figure I.25. Résultat du calcul numérique	28
Figure I.26. Projections isométriques de la CAO 3D des mélangeurs ondulés utilisés pour les mesures expérimentales.....	29
Figure I.27. Données expérimentales pour la perte de pression biphasée dans des mélangeurs ondulés de 2 pouces pour $RL = 44$ (cercles rouges) et $RL = 290$ (diamants violets).	29
Figure I.28. Schéma de la configuration expérimentale.....	30
Figure I.29. Résultat du calcul numérique	31
Figure I.30. Mélangeur statique de type QSM	32
Figure II.1: Géométries des mélangeurs statiques des différentes cas étudiés.....	40
Figure II.2: maillage tétraédrique (a) entrée, (b) conduite, (c) sortie et (d) mélangeur hélicoïdal...	41
Figure II.3 Test de de maillage.....	42
Figure III.3.1: Forme des différentes élément hélicoïdales des différentes mélangeurs statiques étudié.	49
Figure III.3.2: Champs de vitesse pour le cas l'origine dans la section de sortie de mélangeur, (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$	51
Figure III.3.3: Champs de vitesse pour le cas N°1 dans la section de sortie de mélangeur, (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$	51
Figure III.3.4 : Champs de vitesse pour le cas N°2 dans la section de sortie de mélangeur, (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$	51
Figure III.3.5: Champs de vitesse pour le cas N°3 dans la section de sortie de mélangeur (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$	51
Figure III.3.6: Champs de vitesse pour le cas N°4 dans la section de sortie de mélangeur, (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$	52
Figure III.3.7: Champs de vitesse pour le cas standard dans milieu de mélangeur, (a) $Re = 10$, (b)	52

Re = 30, et Re = 50.....	52
Figure III.3.8: Champs de vitesse pour le cas N°1 dans milieu de mélangeur, (a) Re = 10, (b) Re = 30, et (c) Re= 50.....	52
Figure III.3.9: Champs de vitesse pour le cas N°2 dans milieu de mélangeur, (a) Re = 10, (b) Re = 30, et (c) Re= 50.....	52
Figure III.3.10: Champs de vitesse pour le Cas N°3 dans milieu de mélangeur, (a) Re = 10, (b) Re = 30, et (c) Re= 50.....	53
Figure III.3.11: Champs de vitesse pour le cas N°4 dans milieu de mélangeur, (a) Re = 10, (b) Re = 30, et (c) Re = 50.....	53
Figure III.3.12: Vitesse tangentielle pour la géométrie standard dans la section de sortie.	54
Figure III.3.13: Vitesse tangentielle pour différentes valeurs du nombre de Reynolds dans la section de sortie. (a) cas n° 2, et (b) cas n° 4.	54
Figure III.3. 14 : Vitesse axiale pour les géométries originales et modifiées dans milieu de mélangeur (a) Re = 5, et (b) Re = 20.....	55
Figure III.3.15: Vitesse tangentielle pour les géométries originales et modifiées aux mailleaux à (Z = dans milieu de mélangeur) (a) Re = 5, et (b) Re = 20.....	55
Figure III.3.16: Chute de pression pour différentes valeurs de Re.....	56
Figure III.3.17: Chute de pression pour différents cas	56
Figure III.3.18 : (a) Nombre de Nusselt pour différentes cas (b) Coefficeient de performance pour différentes cas.....	58
Figure III.3.19 : Flux thermiques pour différentes valeurs de Re (a) coefficient d'échange global pour différentes configurations géométriques (b).	58
Figure III.4.1 : Présente un schéma descriptif de l'entrée de ces fluides dans le mélangeur statique.	60
Figure III.4.2: Distribution de fraction massique à la sortie pour différents mélangeurs	61
Figure III.4. 3 : Distribution de fraction massique dans différents plans à différentes valeurs de nombre de Reynolds pour la géométrie (Cas N°4)	62
Figure III.4.4: Variation de l'indice de mélange à la sortie avec des nombres de Reynolds pour toutes les géométries	63
Figure III.4.5 : Evolution de l'indice de mélange au plan de sortie de la toux géométries (a = Re 50 ; b =80) Différentes en fonction de la distance parcourue.	63
(e)	64
Figure III.4.6: Vitesse axiales pour différentes Re (a = géométrie Standard, b = Cas N° 1, c = Cas N° 2, d = Cas N° 3, e = Cas N° 4).....	64
Figure III.4.7: Vitesse axiales pour différentes Cas (a : Re= 50, b : Re = 10).....	65
Figure III.4.8: Vitesse tangentielles pour différentes Cas ((a)Re= 10, (b)Re = 30, (c)Re= 50, (d)Re = 60, (e)Re = 80)	66
Figure III.4.9: Indice thermique de mélange pour différentes Re	67
Figure III.4.10 : La fonction de densité de probabilité PDF (%) à la sortie des géométries considérées (a = Cas N° 1, b = Cas N° 2, c = Cas N° 3, d = Cas N° 4) avec la géométrie standard pour (Re = 80)	68
Figure III.5.1 : présente un schéma descriptif de l'entrée de ces fluides dans le mélangeur statique.	69
Figure III.5.2 : Distribution de fraction massique dans différents plans à différentes géométries de nombre de Reynolds = 50 n =75.	70
Figure III.5.3 : Variation de l'indice de mélange pour différents cas dans le plan à la sortie ((a) n = 49, (b) n = 0.75, (c) n = 0.93).....	71
Figure III.5.4 : Évolution du degré de mélange en fonction de la position le long de la géométrie pour Re = 80 (a : Cas n°1, b : Cas n°2, c : Cas n°3, d : Cas n°4).....	72
Figure III.5.5 : le degré de mélange thermique pour différents nombres de Reynolds ((a) n = 49, (b) n = 0.75, (c) n = 0.93).....	73
Figure III.5.6 : vitesses axiales pour différents cas, Re = 50 ((a) n = 0.49 ; (b) n = 0.75 ; (c) n = 0.93).....	74

Figure III.5.7 : vitesses axiales pour différents cas, $Re = 10$ ((a) $n = 0.49$; (b) $n = 0.75$; (c) $n = 0.93$)..... 75

Figure III.5.8 : La fonction de densité de probabilité PDF (%) à la sortie des géométries considérées $n=0.75$ pour différents géométrie ((a) Cas N°1,; (b) Cas N°2; (c) Cas N°3 ;(d) Cas N°4)) ($Reg = 80$) 76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Avantages des mélangeurs statiques par rapport à la cuve agité	11
Tableau I.2 : Types de Ecoulement Mélangeurs Statiques.	15
Tableau I.3: applications industrielles des mélangeurs statique	15
Tableau II.1 Dimensions of the Kenics static mixer	39
Tableau II.2: Comparaison des statistiques de maillage et des paramètres de mélange dispersif pour le mélangeur statique Kenics et les différents cas modifiés.	41
Tableau II.3 : Propriétés thermodynamiques de fluide Newtonien.....	47
Tableau II.4 : Propriétés thermodynamiques de fluide non Newtonien - Fellouah et al. ; Pinho et al. [80-81].	47
Tableau II.5 : Nombre de Reynolds : (a) pour newtonien fluide (b) pour non-newtonien fluide. ...	48

NOMENCLATURE

SYMBOLES LATINS

c	Capacité calorifique massique	$[j.kg^{-1}.K^{-1}]$
C_i	Fraction massique de l'espèce "i"	–
\bar{C}	Fraction massique moyenne du mélange	–
Cop	Coefficient de Performances thermiques	–
D_i	Coefficient de diffusion	$[m^2.s^{-1}]$
D_h	Diamètre hydraulique	$[m]$
D_m	Degré de mélange	–
DP	Pertes de charge	$[Pa]$
h	Coefficient de convection	$[w.m^{-2}.k^{-1}]$
L	Longueur totale du mélangeur	$[m]$
m	Indice de consistance	$[Pa.s^n]$
MI	Indice de mélange	–
N	Nombres de points dans une section transversale	–
n	Indice de comportement rhéologique du fluide	–
Nu_{moy}	Nombre de Nusselt moyen	–
Re	Nombre de Reynolds	–
Re_g	Nombre de Reynolds généralisé	–
T	Température	$[K]$
\bar{T}	Température moyenne dans une section transversale	$[K]$
TMI	Degré de mélange thermique	–
\bar{u}	Vitesse moyenne à l'entrée	$[m.s^{-1}]$
V	Vecteur vitesse	$[m.s^{-1}]$
V_x, V_y, V_z	Composantes cartésiennes de la vitesse	$[m.s^{-1}]$
$ V $	Module de vitesse	$[m.s^{-1}]$
W	Largeur du mélangeur	$[m]$
X, Y, Z	Coordonnées cartésiennes	$[m.s^{-1}]$

Symboles Grecques Rapport D'aspect

ξ	Paramètre géométrique	–
$\dot{\gamma}$	Taux de déformation	$[s^{-1}]$
$\bar{\bar{\tau}}$	Tenseur de contrainte de cisaillement	–
k	Conductivité thermique	$[w.m^{-1}.k^{-1}]$
τ	Contrainte de cisaillement	–
σ	L'écart type	–
ρ	Masse volumique	$[kg.m^{-3}]$
∇	Opérateur nabla	–
σ_0	L'écart type maximale	–
$\bar{\bar{\dot{\gamma}}}$	Tenseur du taux de déformation	–
μ_{app}	Viscosité apparente	$[Pa.s]$

ABBREVIATIONS

COCM	Mélangeur cylindro-conique
CFD	Computational Fluid Dynamics
CMC	Carboxy Methyl Cellulose
HEV	Vortex De Rendement Elevé
HOCM	Mélangeur à haute cisaille
ISG	Générateur de surface interfaciale
KMS	Mélangeur statique hélicoïdal Kenic
LPD	Faible Chute De Pression
MEC	Cout de l'Energie mécanique
Pdf	Fonction de densité de probabilité
SMR	Réacteur mélangeur Sulzer
SMV	Sulzer mixer en V
SMX	Sulzer mixer

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale

De nombreux processus dans l'industrie chimique et alimentaire nécessitent le mélange, la consommation et/ou le refroidissement d'un produit (liquide). Ces opérations peuvent être réalisées de différentes manières : les échangeurs de chaleur et les cuves agitées sont largement connues et utilisées, alors qu'il existe des dizaines de conceptions différentes. Un appareil qui peut combiner les deux opérations est le mélangeur statique de tuiles.

La recherche et le développement de la technologie de mélange est un domaine de recherche actif en physique et en génie chimique en raison de son importance croissante dans de nombreux secteurs de l'industrie. Le mélange peut être réalisé par un fonctionnement discontinu et semi- discontinu avec des agitateurs mécaniques conventionnels, ou par des opérations continues dans ce dernier cas, des mélangeurs statiques sont généralement utilisés. Pour qu'un mélange soit homogène, les différents constituants doivent être en mouvement. Cette mobilité lors du processus de mélange est principalement due aux mécanismes de convection, de cisaillement et de diffusion mais aussi aux possibilités technologiques des dispositifs de mélange. Lors du mélange de deux ou plusieurs fluides, le premier phénomène mis en jeu est la miscibilité des fluides en présence. Lorsque les phases sont non miscibles, on parle alors de dispersion pour désigner l'opération de mélange qui peut également comprendre la dispersion de particules solides. La qualité du mélange sera fonction de deux paramètres et non plus d'un seul : une fonction de la répartition spatiale d'une propriété, comme dans le cas d'une phase unique, mais aussi une fonction de la taille atteinte par les particules, gouttes ou bulles de la phase dispersée. Pour les opérations de mélange au moyen de mélangeurs statiques, l'évaluation de son niveau de réussite est augmentée en conséquence. Le mélange est une composante essentielle de presque tous les processus industriels, allant du simple mélange de fluides de composition ou de température différente aux réactions chimiques complexes pour lesquelles le rendement et la sélectivité de la réaction dépendent fortement des performances de mélange.

La sélectivité est l'aspect clé de tout processus réactif puisqu'il est connu que la rentabilité d'un processus peut varier avec des changements aussi bas que 1% de sa sélectivité.

Avant de poursuivre, il est important de clarifier un certain nombre de concepts qui sont Utilisés tout au long de ce travail. Sous le large mélange de ces derniers, différents processus et plusieurs mécanismes sont compris.

Un mélangeur statique consiste en un tube normal dans lequel des éléments de mélange stationnaires ont été placés.

On trouve diverses configurations de mélangeurs statiques sur le marché. Ces conceptions permettent une classification initiale basée sur leur morphologie en raison de leurs caractéristiques géométriques très distinctes.

En outre, chaque forme de mélangeur produit un flux avec des caractéristiques uniques. En conséquence, les différents mélangeurs peuvent être classés en fonction du type de flux qu'ils produisent et, par conséquent, du type d'activité de mélange pour laquelle ils peuvent être utilisés.

L'objectif de cette thèse est d'approfondir les connaissances sur le mélange de liquides, dans un révélateur statique. Ce dispositif est important dans de nombreux processus industriels et son utilisation gagne en popularité en raison de sa polyvalence et de ses faibles coûts d'exploitation.

Les études expérimentales d'un champ d'écoulement biphasique sont difficiles car les techniques intrusives peuvent perturber l'écoulement. Par ailleurs, le potentiel considérable de la dynamique des fluides numériques Des recherches récentes sur l'écoulement de fluides diphasiques a utilisé la CFD.

Cependant, malgré le fort potentiel de la CFD et le nombre croissant d'articles sur les flux liquides, les flux ne sont toujours pas suffisamment couverts. Ceci est dû à la complexité de l'écoulement diphasique du fluide.

Cette thèse se compose de trois chapitres, Ces chapitres abordent la motivation et l'objectif de ce travail. Le sujet de recherche et le schéma de simulation numérique sont brièvement introduits. Des informations de base sont fournies pour le développement de l'étude. Les principes de stabilisation de base pour les liquides sont discutés, y compris des informations sur les processus de stabilisation et les tensioactifs, puis l'équipement de mélange le plus couramment utilisé est présenté pour illustrer les avantages des dispositifs continus et statiques.

Dans le chapitre 2, l'approche numérique est décrite. La configuration, les procédures et les logiciels utilisés dans ce travail sont présentés en détail.

Le chapitre 3 porte sur la partie analyse de la recherche. Les résultats sont présentés et comparés aux résultats expérimentaux issus de travaux antérieurs. Ensuite, l'analyse est faite pour expliquer et montrer certaines tendances.

CHAPTER I

Études Bibliographiques

Chapitre I

Étude bibliographique

I.1. Introduction

Les mélangeurs statiques sont des dispositifs utilisés pour mélanger des fluides, des particules solides ou des suspensions sans nécessiter de pièces mobiles. Leur principe de fonctionnement repose sur l'utilisation de structures fixes, comme des pales, des baffles ou des canaux, qui modifient le flux du fluide et induisent des turbulences pour assurer un mélange homogène. Contrairement aux mélangeurs dynamiques, qui nécessitent des moteurs ou des composants en mouvement pour effectuer le mélange, les mélangeurs statiques sont particulièrement avantageux pour des applications où la simplicité, la fiabilité et la faible consommation d'énergie sont essentielles.

Ces dispositifs sont couramment employés dans divers secteurs industriels, tels que la chimie, la pharmacie, l'agroalimentaire et la production de matériaux, pour des processus tels que l'homogénéisation de mélanges liquides, la dilution de produits, la réaction chimique continue ou encore l'incorporation de poudres dans des fluides. L'absence de pièces mobiles réduit les coûts de maintenance et minimise les risques de contamination, ce qui les rend particulièrement adaptés à des environnements exigeants, comme l'industrie pharmaceutique.

Cependant, les mélangeurs statiques présentent certaines limitations. Leur performance peut être moins efficace dans les cas de mélanges très visqueux ou lorsque des propriétés spécifiques de mélange sont requises, comme dans les mélanges à haute intensité. En outre, la conception de ces appareils, bien que simple, doit être optimisée pour assurer une performance optimale, ce qui nécessite parfois des innovations technologiques et des études approfondies.

Les recherches récentes dans ce domaine visent à améliorer les caractéristiques de ces mélangeurs en modifiant leurs géométries, en utilisant de nouveaux matériaux et en développant des modèles numériques pour simuler et optimiser les performances de mélange. L'objectif est de rendre ces dispositifs encore plus efficaces, polyvalents et économiques, en particulier pour des applications industrielles de plus en plus exigeantes.

Un état "homogène" est le résultat final d'un processus de mélange, tandis qu'un "état ségrégué" est le point de départ (deux fluides placés dans un réservoir, par exemple), Le

Degré de cette homogénéité ultime est corrélé avec l'efficacité du procédé de mélange, ou avec un degré jugé adéquat pour l'application particulière en question, Mayer-Laigle, C. et al [1]. À certaines échelles spatiales, une condition de mélange peut être considérée comme homogène, mais lorsqu'elle est observée à une échelle inférieure (une émulsion, par exemple), elle ne peut pas être qualifiée d'homogène. En formant des couches de plus en plus minces, le mélange tend en fait à améliorer l'homogénéité des fluides en contact, car les différentes zones de fluide sont réorientées, étirées et pliées, augmentant le gradient scalaire dans le fluide. Ces gradients ont tendance à être atténués par un autre processus de mélange provoqué par l'action de diffusion (moléculaire ou thermique). Par conséquent, l'objectif du mélange est souvent d'éliminer les gradients ou les concentrations de température en accélérant le transfert de masse, de chaleur ou de quantité de mouvement par des flux turbulents ou par advection chaotique laminaire.

L'existence de plusieurs tourbillons qui se forment continuellement dans l'écoulement et qui fusionnent ou disparaissent est la base du mécanisme d'intensification des transferts par turbulence, Tayeb, N. T. et al. [2]. Les particules fluides nécessaires au mélange s'étirent et se plient en raison des variations importantes du champ de vitesse. Cependant, il n'est pas toujours facile d'atteindre un niveau approprié de turbulence dans l'écoulement, En particulier Lorsqu'il s'agit de fluides très visqueux pour lesquels l'utilisation d'écoulements turbulents nécessiterait une Quantité importante d'énergie.

L'utilisation du mélange d'advection chaotique est une option préférable dans certaines circonstances. Ainsi, la définition de l'advection chaotique et son effet sur l'amélioration des échanges de masse et de chaleur seront présentés ci-dessous. Il existe de nombreuses façons différentes de fournir un mélange a des macrosociales telles que la diffusion moléculaire et l'advection

Les processus de mélange peuvent être classés en fonction des phases entre lesquelles se produite transfert de matière :

- Mélange liquide-liquide miscible : toutes les phases sont des liquides miscibles.
- Mélange liquide-liquide non miscible : toutes les phases sont des liquides incapables de se mélanger, comme l'huile et l'eau, et le but du mélange est simplement d'augmenter la surface Interfaciale entre les phases afin d'améliorer le transfert de masse.
- Mélange gaz-liquide : consiste en la dispersion de bulles de gaz au sein d'un milieu liquide afin de créer une interface entre les deux phases afin d'améliorer le transfert de masse.

1.2. Mécanismes d'agitation

Les agitateurs mécaniques industriels sont des équipements essentiels dans les procédés industriels, utilisés pour mélanger, agiter et homogénéiser divers types de fluides. Leur utilisation s'étend à de nombreuses industries, permettant d'améliorer la qualité des produits, de réduire les temps de production et d'accroître l'efficacité des processus Shah et Kale [3].

La conception de ces agitateurs peut être modifiée pour répondre à des exigences spécifiques en matière de qualité de mélange ou de capacité de transfert de chaleur, afin d'optimiser leur performance dans des contextes variés.

Ces agitateurs jouent un rôle crucial dans la production de produits finis dans de nombreux secteurs industriels. Dans l'industrie chimique, par exemple, les cuves équipées d'agitateurs servent à l'élaboration de produits liquides et visqueux. Dans le secteur papetier, où la qualité de la pâte et son homogénéisation influent directement sur la qualité du produit final, la conception de cuves adaptées devient indispensable.

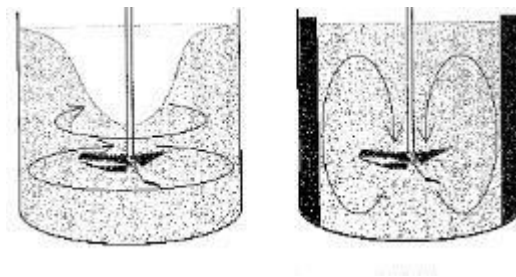


Figure I.1 : Agitation mécanique [3]

Dans l'industrie agroalimentaire par exemple, les cuves sont essentielles à la fabrication de produits laitiers, de jus de fruit, etc...

L'étape du mélange doit se dérouler en évitant toute altération de la texture ou de la qualité des ingrédients.

Ces machines se composent d'un moteur électrique, d'un arbre rotatif et d'une ou plusieurs hélices, roues ou aubes qui tournent à l'intérieur d'une cuve.

Ces équipements peuvent être de différentes tailles et configurations, en fonction des besoins spécifiques de l'application et du processus. Plusieurs modes d'agitation, peuvent être rencontrés dans les domaines industriels ou de recherche.

I.3. Différents types des mélangeurs

Il existe de nombreux mélangeurs sur le marché mais ils peuvent néanmoins être classés dans quelques groupes génériques :

- Les mélangeurs convectifs.
- Les cuves tournantes.
- Agitateurs rotatifs.
- Les mélangeurs ultrasons
- Les mélangeurs statiques.

I.3.1. Mélangeurs convectifs

La majorité des mélangeurs convectifs ont un dispositif fixe avec un système d'agitation installé, équipé par un réservoir Avec un volume allant de quelques litres à plusieurs dizaines de m³, les vitesses de rotation varient de 20 à 60 tours par minute. L'exemple le plus populaire est le mélangeur à ruban.

Certains mélangeurs fonctionnent à des vitesses d'agitation nettement plus rapides, Ce système a tendance à rendre le lit de particules plus fluide.

Cependant, les augmentations rapides de température doivent être surveillées. La zone de mélange dans les mélangeurs à vis peut-être étendue en déplaçant la vis d'agitation vers la périphérie de la cuve conique (Figure I.2) Matsumura, K. [4].



Figure I.2 : Mélangeur à vis [4].

I.3.2. Cuves tournantes

Il s'agit de récipients fermés à rotation automatique qui contiennent les matériaux à mélanger. Ils se déclinent en diverses formes, comme le mélangeur à double réservoir en forme de V (Figure I .3) ou le mélangeur cubique (à haute capacité). Le mélangeur à cuve mobile, par exemple, ne peut être rempli qu'à 50 % de son volume total en raison du mouvement turbulent des récipients, tandis que certains systèmes pilotes ou de laboratoire permettent un mélange plus rapide et efficace.

Bien que ces dispositifs soient performants, il existe un risque de délavage ou d'homogénéité insuffisante si le temps de mélange n'est pas rigoureusement défini et respecté.



Figure I .3 : mélangeur à cuves tournantes [4].

1.3.3. Agitateurs rotatifs

Il existe deux types d'agitateurs rotatifs :

1.3.3.1. Agitateurs mécaniques

Les agitateurs mécaniques sont des dispositifs utilisés dans les procédés industriels pour mélanger, homogénéiser et disperser des fluides ou des solides en suspension. Ils génèrent un mouvement dans un fluide à l'aide d'un mécanisme rotatif, ce qui permet de combiner efficacement différents composants, d'améliorer la qualité du mélange et d'assurer la cohérence des propriétés du produit final. Utilisés dans des secteurs variés comme la chimie, la pharmacie et l'agroalimentaire, les agitateurs mécaniques sont essentiels pour optimiser les Réactions chimiques, le transfert de chaleur et la stabilité des mélanges.



Figure I .4 : Les agitateurs mécanique (site web).

1.2.3.2. Agitateurs magnétiques

Les agitateurs magnétiques sont des appareils utilisés pour mélanger et chauffer des solutions de manière homogène et précise. Grâce à un champ magnétique, ils mettent en mouvement un barreau magnétique plongé dans le liquide, permettant d'agiter les solutions à des vitesses et températures contrôlées. Ce type d'agitateur est couramment employé dans les laboratoires de chimie ainsi que dans diverses applications scientifiques et domestiques.



Figure I .5 : Agitateurs magnétiques (site web).

1.3.4. Mélangeurs ultrasons

Une pale qui vibre aux fréquences ultrasonores est traversée par le filet fluide. Ce type de mélangeur est largement utilisé pour accélérer les réactions chimiques homogènes (liquide ou solide) ou hétérogènes (liquide-solide).



Figure I .6 : Le mélangeur ultrasons (site web).

1.3.5. Mélangeurs statiques

Les mélangeurs statiques sont des dispositifs sans pièces mobiles utilisés pour mélanger des fluides dans des conduits en canalisant les flux à travers une série d'éléments internes fixes. Ces éléments redirigent et divisent les flux de manière à obtenir un mélange homogène, sans avoir recours à une source d'énergie externe pour mélanger les fluides.

Dans l'industrie, les mélangeurs statiques jouent un rôle important pour leur efficacité énergétique, leur faible coût d'entretien et leur capacité à fournir des mélanges uniformes dans les processus de production. Ils sont largement utilisés dans les secteurs chimique, pharmaceutique, alimentaire et pétrochimique pour des applications allant de la dispersion des additifs au contrôle des réactions chimiques.

Tableau I.1 : Avantages des mélangeurs statiques par rapport à la cuve agité	
Mélangeurs statiques	Réacteur agité continu
Faible occupation d'espace	Occupation d'espace au sol importante
Faible coût d'investissement	Fort coût d'investissement
Faible demande énergétique, sauf pour le pompage	Fort coût énergétique
Pas d'éléments mobiles hormis les pompes	Nombreuses pièces mobiles
Faibles temps de séjour	Temps de séjour importants
Ajustement rapide de la formulation, sans Perte de produit	Risque de perte de produit
Aucun risque de contamination avec un Des réservoirs ouverts	Risques élevés de contamination Système fermé

I.4. Types des mélangeurs statiques

I.4.1. Mélangeurs Sulzer

I.4.1.1. Mélangeur SMV (*Sulzer mixer en V*)

Les composants du mélangeur SMV sont constitués de plaques ondulées entrelacées pour créer un réseau de canaux croisés et ouverts (figure I.7). Ce mélangeur est utilisé dans un environnement turbulent, principalement pour les dispersions liquides/liquides à faible viscosité et les combinaisons de liquides ou de gaz à faible viscosité.



Figure I.7 : Dispersion gaz-liquide en mélangeur SMV [5]

1.4.1.2. Mélangeur SMX (Sulzer mixer)

Chaque composant de ce mélangeur est constitué d'un réseau de lames transversales qui sont inclinées par rapport à l'axe. Chaque élément est à 90 degrés de celui qui le précède (figure I.8). Le mode laminaire est l'application principale de ce mélangeur. Il permet le mélange et la dispersion de liquides avec des différences de viscosité importantes ainsi que le mélange de fluides très visqueux.



Figure I.8 : Mélangeur SMX [5].

1.4.1.3. Mélangeur SMXL

Les éléments prennent moins de place dans le tube car la forme du mélangeur SMXL est plus ouverte que celle du mélangeur SMX (figure). Moins de cisaillement du produit que dans la géométrie SMX conduit également à un mélange inefficace. Pour les applications nécessitant un mélange continu sur des longueurs de tube étendues, ce mélangeur sert essentiellement d'échangeur de chaleur. Pour les mêmes raisons que le mélangeur SMX, il est également utilisé comme réacteur de polymérisation.



Figure I.9 : Mélangeur SMXL [5].

1.4.1.4. Mélangeur SMR (Réacteur mélangeur Sulzer)

Les éléments du mélangeur SMR sont constitués de tubes avec la même disposition que les lames du mélangeur SMX. Dans les tubes, un fluide caloporteur circule, formant une importante surface d'échange pour les processus de transfert de chaleur (figure I.10). En présence de réactions chimiques, ces mélangeurs sont utilisés en mode Laminaire comme échangeurs de chaleur. Ils élargissent les capacités des mélangeurs SMX Et SMXL,

Ils sont principalement utilisés dans les situations où la viscosité d'un produit peut augmenter en raison d'un changement de température.

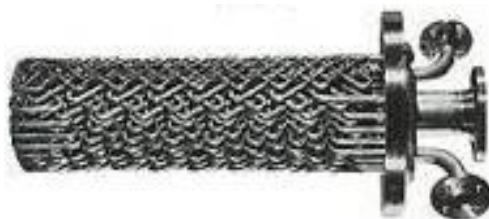


Figure I.10 : Mélangeur SMR [5].

I.4.2. Mélangeurs Lightnin

Les composants en trois parties qui composent le mélangeur Lightnin (série 45) peuvent être assemblés de différentes manières. Il est utilisé pour les réactions rapides et pour mélanger des fluides avec des variances de viscosité ou de densité importantes.



Figure I.11 : Mélangeur Lightnin [5].

I.4.3. Mélangeurs Ross

I.4.3.1. Mélangeur LPD (Faible Chute De Pression)

Les deux diaphragmes semi-elliptiques qui composent chaque composant du mélangeur LPD se croisent au centre à un angle de 45° ou 60° par rapport à l'axe d'écoulement (figure I.12). Ce mélangeur est également livré sous une forme appelée mélangeur LLPD, qui est utilisé dans des situations avec des pertes de pression extrêmement faibles.

Les mélangeurs LPD/LLPD fonctionnent dans des environnements turbulents et laminaires. Les mélanges de liquides peuvent être homogénéisés à l'aide du mélangeur LDP. Des mélanges de liquides ou de gaz à basse pression sont créés à l'aide du mélangeur LLPD.



Figure I.12 : Mélangeur LPD [5].

1.4.3.2. Mélangeur ISG (Générateur de surface interfaciale)

Les parties de ce mélangeur sont formées de telle sorte que deux éléments voisins se réunissent pour former une chambre trapézoïdale. Pour accueillir le flux, quatre minuscules tubes ont été percés dans chaque partie. Les orifices de sortie de ces minuscules tubes sont situés le long d'un diamètre parallèle au diamètre avec lequel les orifices d'entrée sont alignés (figure I.13).

Ce mélangeur est principalement utilisé pour les opérations de mélange additive laminaire. En outre, il peut être appliqué aux homogénéisations thermiques et aux dispersions solides / liquides.



Figure I.13 : Mélangeur ISG [5].

1.4.4. Mélangeurs Kenics

1.4.4.1. Mélangeur Kenics HEV (Vortex de rendement élevé)

Les procédés de mélange d'additifs laminaires sont le but principal de ce mélangeur. L'homogénéisation thermique et les dispersions solides/liquides en sont d'autres applications.



Figure I.14 : Mélangeur HEV [5].

1.4.4.2. Mélangeur Kenics KM

Dans tous les mélangeurs statiques Kenics de la série KM, un élément de mélange hélicoïdal breveté dirige le flux de matériau radialement vers les parois du tuyau et le ramène vers le centre. L'inversion de la vitesse et la division du flux résultent de la combinaison d'éléments alternatifs de droite et de gauche, ce qui augmente l'efficacité du mélange. Tous les matériaux sont mélangés de façon continue et complète, ce qui élimine les gradients radiaux de température, de vitesse et de composition des matériaux.

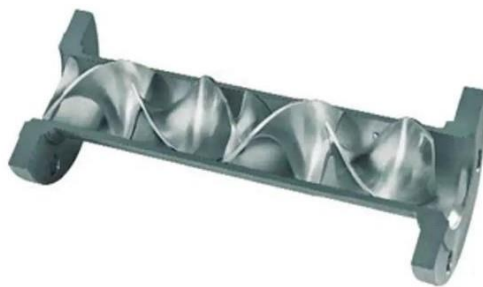


Figure I.15 : Éléments de mélange d'un mélangeur statique [5].

De nombreuses études indépendantes ont montré que les mélangeurs statiques Kenics maximisent l'efficacité du mélange sans le gaspillage d'énergie et le blocage du matériau que l'on trouve généralement dans les mélangeurs immobiles plus restrictifs.

I.5. Applications du processus

Une grande variété d'applications de processus tire parti de la technologie de mélangestatique, notamment :

Tableau I.2 : Types de Ecoulement Mélangeurs Statiques.

Flux laminaire	Flux turbulent
Mélange à haute viscosité.	Mélange de liquides à faible viscosité.
Mélange haute – basse viscosité.	Mélange gazeux.
Amélioration du transfert de chaleur.	Dispersion de liquides non miscibles.
Réacteurs à écoulement piston.	Contact gaz-liquide.

I.6. Industriel Applications

La plupart des industries de traitement des fluides utilisent des mélangeurs statiques avec une très large gamme d'applications, y compris la courte liste d'exemples suivante :

Tableau I.3: applications industrielles des mélangeurs statique

Moulage par injection et extrusion de plastiques	Homogénéiser le colorant, la température de Fusion et la viscosité avant le moulage/la matrice.
Production de polymères	Mélanger des additifs à faible viscosité dans les polymères fondus. Chauffer et refroidir les polymères. Polymérisation dans des réacteurs à écoulement piston.

Industrie chimique	Dissoudre les gaz dans des liquides tels que NH ₃ , SO ₂ , Cl ₂ . Mélanger les matériaux réactifs en petite longueur. Chauffez et refroidissez les matériaux visqueux.
Industrie alimentaire	Ajoutez du CO ₂ aux jus de fruits...etc. Diluez les concentrés. Chauffer et refroidir le chocolat.
Traitement de l'eau et des eaux usées	Dilution et ajout de floculant aux eaux usées. Dissolution de CO ₂ , O ₂ , Cl ₂ , ozone dans l'eau. Mélanger les eaux souterraines et de surface.
Pétrole, gaz et pétrochimie	Contactez le pétrole brut et l'eau pour optimiser les performances du dessaleur. Mélanger les additifs dans l'essence, le mazout, les huiles lubrifiantes. Mélanger la vapeur et l'alimentation en méthane Vers le reformeur.

I.7. Revue de la littérature

La littérature met en évidence les défis associés à l'optimisation des performances, notamment pour des mélanges visqueux ou complexes. Les innovations récentes et les recherches sur l'amélioration des designs, à travers des simulations numériques ou l'utilisation de nouveaux matériaux, sont également des axes majeurs de l'étude. Cette analyse bibliographique permet ainsi d'identifier les tendances actuelles et de proposer des pistes pour améliorer les performances des mélangeurs statiques dans des applications de plus en plus diversifiées et exigeantes.

[5-6] Ils ont étudié numériquement l'effet de l'inclinaison des pales d'un mélangeur statique de type SMX. Ils ont constaté que cette modification de la géométrie a un effet considérable sur la qualité du mélange et réduit de manière significative les pertes de pression dans ce type de mélangeurs par rapport la géométrie standard.

[7] Ils ont comparé les performances de mélange des mélangeurs statiques de type KMX et SMX par simulation numérique. Bien que ces deux types de mélangeurs aient un design similaire, composé d'une série de pales, la forme de leurs pales diffère : courbées pour le

KMX et plates pour le SMX. Ils ont également étudié l'effet du nombre d'éléments de ces mélangeurs sur l'efficacité du mélange. Ils ont constaté que la qualité du mélange s'améliore avec l'augmentation du nombre d'éléments, mais que les pertes de pression augmentent également. De plus, le mélangeur KMX offre une meilleure qualité de mélange pour les fluides newtoniens tout en réduisant les pertes de pression de 20 % par rapport au mélangeur SMX.

[8] et [9] ont étudié les performances des mélangeurs statiques de types HEV, KM et KMX. Ils ont ajouté, à l'intérieur des tubes de ces mélangeurs, huit garnitures rigides semi-circulaires, équidistantes et alternées (chicanes), en tant qu'éléments de mélange. Des expériences ont été réalisées pour déterminer le coefficient de mélange de deux jets d'eau et de saumure, avec un nombre de Reynolds compris entre 60 et 700. La réduction de l'espacement entre les chicanes diminue considérablement la qualité du mélange, mais cela s'accompagne d'une augmentation de la perte de charge dans l'ensemble des mélangeurs statiques. La présence des éléments de mélange (chicanes) induit un écoulement non laminaire de type turbulent, ce qui améliore significativement le mélange. Ce nouveau Design, étudié par ces auteurs, représente une alternative flexible, économique, facile à fabriquer et nécessitant peu d'entretien, en comparaison aux mélangeurs statiques plus complexes actuellement utilisés.

L'écoulement à faible nombre de Reynolds dans un mélangeur statique Kenics à six éléments a été modélisé à l'aide de calculs par éléments finis [10-12]. Les résultats obtenus ont été analysés sous forme de champs de vitesse et de courbes de pression. Pour des nombres de Reynolds compris entre 0,15 et 100, il a été observé que les profils de vitesse restent indépendants du nombre de Reynolds jusqu'à $Re=10$, avec des écarts significatifs au-delà de cette limite. L'indice de mélange, qui représente un indicateur de l'efficacité du mélange, est d'environ 75 % dans la zone centrale d'un élément de mélange, mais tend vers des valeurs plus élevées dans les régions de transition entre les éléments, suggérant que les effets de mélange les plus importants se produisent à ces transitions.

Haddadi et al. ont étudié numériquement le comportement de mélange de deux fluides miscibles dans un nouveau design mélangeur statique pour des nombres de Reynolds compris entre 20 et 160. Ils ont comparé les performances de mélange du nouveau mélangeur avec celles des mélangeurs statiques Kenics, Komax et SMX. Il a été rapporté que le mélangeur innovant présente des performances de mélange plus élevées que les autres mélangeurs comparatifs [13].

Jiang et al. [14] ont montré l'impact de la prédiction de la perte de pression sur la qualité de fabrication des produits pharmaceutiques et des produits chimiques fins. Ils ont développé de

Nombreuses corrélations pour estimer la perte de pression dans les mélangeurs statiques de type Kenics, mettant en évidence que l'épaisseur des éléments est un facteur particulièrement important dans cette perte. Dans cette étude, ils ont examiné l'effet de l'épaisseur des éléments sur la perte de pression dans le mélangeur statique Kenics.

Les mêmes chercheurs, Jiang et al. [15], examinent l'effet de l'épaisseur des éléments sur la chute de pression dans les mélangeurs statiques Kenics en régime turbulent. Ils ont également étudié l'impact de plusieurs paramètres tels que le nombre de Reynolds, le rapport d'aspect, l'épaisseur des éléments et le facteur de frottement sur le temps de mélange. Ils ont également démontré que le rapport d'aspect, qui varie entre 0,2 et 2, a un effet considérable sur le temps de mélange.

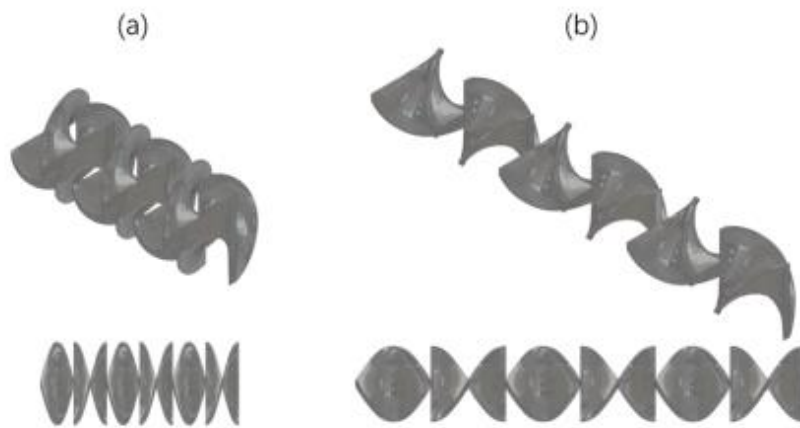


Figure I.16. Schéma du mélangeur statique à six éléments Kenics avec un rapport d'aspect de (a) 0,4 (b) 1,0 [15].

Ils ont constaté qu'un faible rapport d'aspect facilite un temps de mélange plus court et réduit la longueur du mélangeur. De plus, le rapport d'aspect a un impact significatif sur l'uniformité du mélange.

De nombreux autres auteurs ont étudié l'effet de rapport d'aspect sur le temps de mélange dans des différents types des mélangeurs statiques.

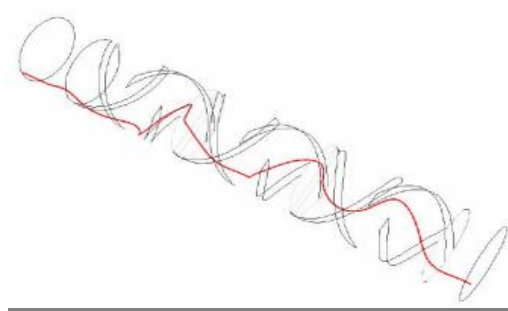


Figure I.17. Ligne de trajectoire d'une particule traversant un mélangeur statique hélicoïdal à six éléments [15].

À de faibles nombres de Reynolds ($Re < 25$), le rapport d'aspect exerce une influence

significative sur l'uniformité du mélange. Un rapport d'aspect faible favorise un mélange

Uniforme à faibles Re , avec des temps de mélange plus courts et des longueurs de mélangeur réduites. D'autre part avec l'augmentation de nombre de Reynolds, l'impact du rapport d'aspect sur l'uniformité du mélange tend à diminuer. De plus, un rapport d'aspect plus petit contribue également à une réduction de la perte de pression à travers le mélangeur. [16]

[17] ont examiné numériquement le comportement d'écoulement laminaire et de mélange de fluides newtoniens incompressibles dans différentes configurations de mélangeurs modifiés, dans une plage de nombres de Reynolds (Re) de 0,15 à 100.



Figure I.18. Grille tétraédrique du mélangeur superposé [17].

Les effets des éléments hélicoïdaux superposés et du rapport d'aspect sur l'efficacité du mélange ont été évalués à l'aide de l'analyse des résultats qui présentes la perte de pression et l'indice de mélange. La performance des nouveaux configurations géométriques du mélangeurs statiques ont été comparée à celle du mélangeur statique Kenics standard. Les mélangeurs statiques avec la géométrie standard ont montré un mélange rapide et une meilleure qualité de mélange par rapport au mélangeur Kenics. De plus, une augmentation du rapport d'aspect a permis de réduire la perte de pression.

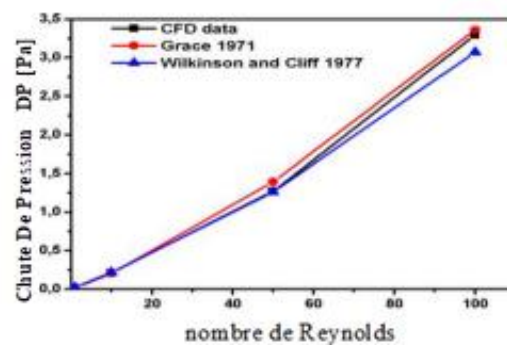


Figure I.19. Calcul de la chute de pression en fonction de Corrélations empiriques pour divers nombres de Reynolds [17].

Le mélangeur modifié avec un rapport d'aspect de 1,5 a présenté la plus haute efficacité de mélange, avec une longueur de mélange courte et une perte de pression légèrement supérieure à celle des autres mélangeurs. En revanche, ils ont trouvé que le mélangeur avec un rapport d'aspect de 2 présente une efficacité de mélange plus importante en termes de faible perte de pression et de besoins énergétiques, mais il nécessite une longueur de mélange légèrement plus grande.

[18, 19] Ils ont évalué l'effet des longueurs et de l'espacement entre les éléments d'un mélangeur de type Kenics sur les performances de mélange. Ils ont constaté que le mélangeur Kenics avec des espaces plus élevés entre les éléments présente des performances de mélange inférieures par rapport au mélangeur standard.

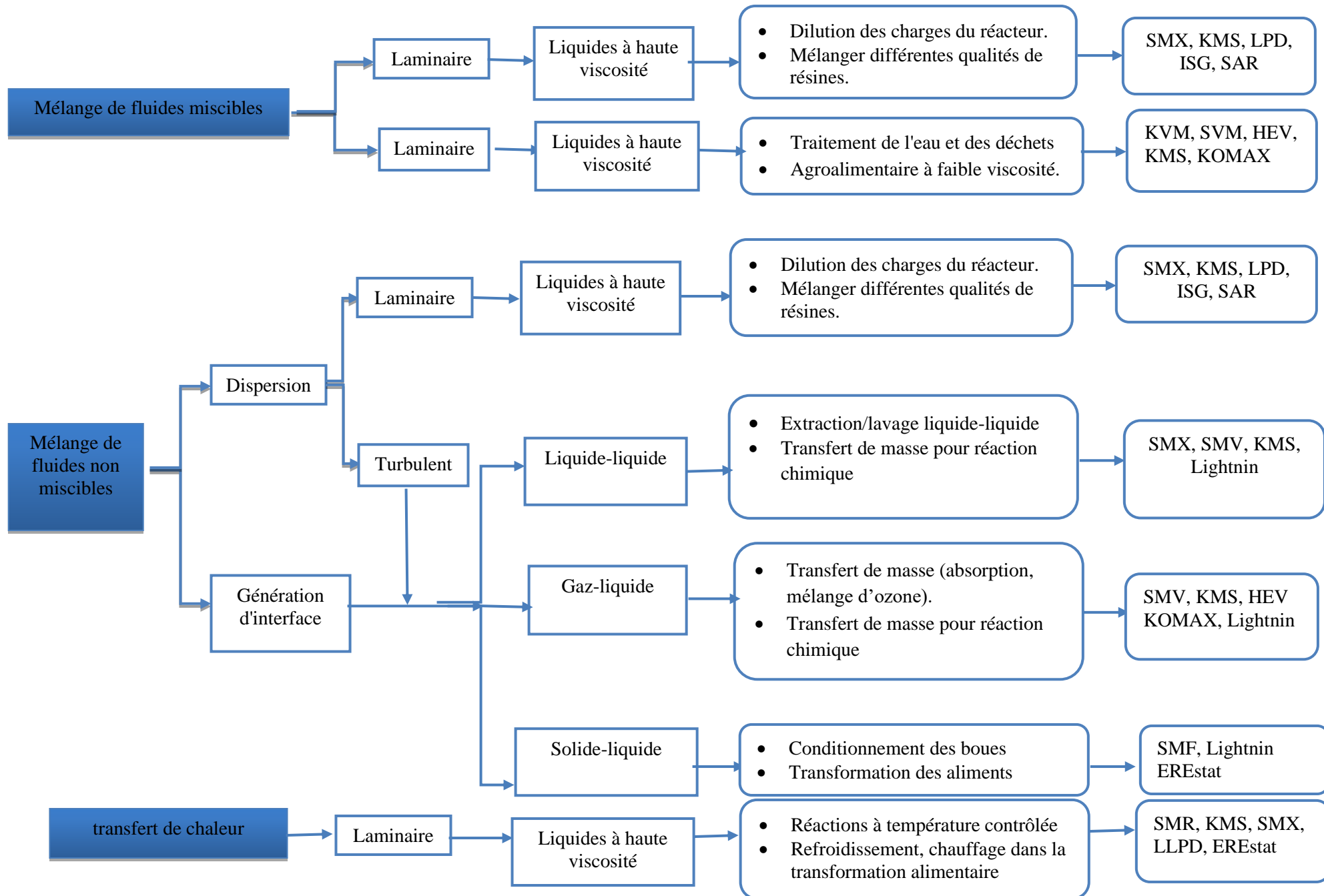
[20] ont examiné le rôle des mélangeurs statiques dans l'industrie des procédés ainsi que la littérature disponible sur ces dispositifs, en particulier dans le traitement des systèmes complexes en phase liquide. L'article de ces auteurs se concentre sur les avancées réalisées dans la compréhension hydrodynamique des dispersions liquide-liquide immiscibles et de la formation d'émulsions à l'aide de mélangeurs statiques, tant par des approches expérimentales que par des Méthodes computationnelles. Ils ont montré que les modèles et corrélations concernant des

Paramètres clés du processus, tels que la taille moyenne des gouttelettes et la perte de pression, proposés au cours des dernières décennies, sont compilés et discutés. De plus, ils ont inclus une brève revue des concepts

Fondamentaux du mélange liquide statique et de la formation d'émulsions afin d'enrichir davantage la discussion sur les innovations dans ce domaine.

[21,22] Ils ont comparé deux types de mélangeurs statiques les plus couramment utilisés dans l'industrie (SMX et hélicoïdal) en régime laminaire ($Re = 0,1 - 100$) pour un fluide newtonien monophasé. Selon les résultats obtenus par simulation numérique, ils ont constaté que le mélangeur statique SMX présentait une performance supérieure à celle du mélangeur hélicoïdal.

[23] ont étudié la performance thermique d'un fluide dans différents types des mélangeurs statiques, par simulation numérique. Ils ont évalué le champ d'écoulement et du transfert de chaleur en régime turbulent. Quatre types de mélangeurs ont été examinés : le turbulateur à bande torsadée, le LPD, le SMX et le KSM, à différents nombres de Reynolds.



Les résultats ont montré que le turbulateur à bande torsadée avait l'effet le plus faible sur l'amélioration du taux de transfert de chaleur, tandis que le SMX présentait l'effet le plus élevé. Cependant, le SMX présente une perte de pression plus importante que les autres mélangeurs. Ils ont également testé l'effet de l'angle d'inclinaison des plaques des éléments du mélangeur SMX pour des valeurs de Reynolds supérieures à 80 000, avec un nombre d'éléments de mélangeur SMX égal à 5 et un angle de la plaque variant de 5° à 45° . Les performances thermo-fluides du mélangeur optimisé (SMX-Optimisé) ont indiqué une augmentation du taux de transfert de chaleur de 1,78 fois pour des mélangeurs avec des éléments portant des plaques inclinées à 45° par rapport à ceux avec des plaques non inclinées.

[24-26] ont montré l'effet de l'utilisation combinée de la traçabilité des particules par émission de positrons (PEPT) et de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) pour évaluer le mélange dans la géométrie du mélangeur statique SMX, qui présente une grande importance dans l'industrie.



Figure I.20. Ensemble de mélangeur statique SMX à quatre éléments [24].

Ils se sont concentrés sur l'étude du mélange distributif d'un fluide newtonien, le glycérol. Grâce à l'implémentation des techniques PEPT et IRM, les auteurs ont pu élucider des indices de mélange intégrant à la fois les vitesses locales et les champs de concentration à des intervalles de 0,5 mm sur une longueur de neuf éléments SMX de 1,0 L/D.

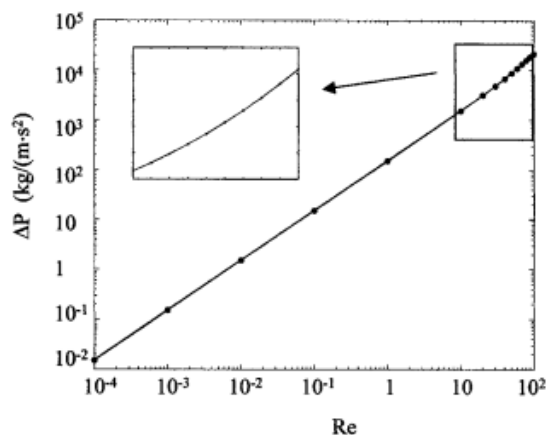


Figure I.21. Résultats de calcul pour la chute de pression en fonction de Re [24].

Des études expérimentales et numériques ont été réalisées [27-29]. Elles ont examiné l'effet du nombre d'éléments de mélangeur SMX (de 6 à 18), de la température de la paroi du Mélangeur (variant de 293 à 363 K) et du débit de fluide (de $2,78 \times 10^{-6}$ à $1,11 \times 10^{-4}$ m³/s). Il a été démontré que l'amélioration du mélange des fluides entraîne une pénalité en termes de perte de charge, pouvant atteindre jusqu'à 23 fois celle d'un tube vide.

Une conception modifiée du mélangeur Kenics, intégrant des espaces entre les éléments de mélange, permet d'atteindre le même niveau de mélange que la configuration standard, mais avec moins d'éléments de mélange et une perte de charge réduite. Dans cette étude, l'introduction d'espaces permet de diminuer la longueur de mélange dans les configurations droite-droite avec un rapport espace/diamètre de 0,5 ou 1,0, comparé à la configuration standard, tout en réduisant les pertes de charge [30].

Des études expérimentales ont été réalisées pour tester l'effet des comportements rhéologiques sur le temps de mélange et les pertes de pression. [31-32] examine plusieurs types de fluides indépendants et dépendants du temps. Ces derniers présentent un effet considérable sur la structure de l'écoulement et influencent le choix du type de mélangeur utilisé pour garantir une opération de mélange efficace.

Un modèle CFD a été développé pour prédire l'écoulement turbulent dans un mélangeur statique hélicoïdal [33, 34]. Ces études ont été motivées par l'intérêt d'utiliser des mélangeurs statiques dans les stations de traitement d'eau potable. Cependant, les méthodes et résultats présentés sont applicables à une variété d'applications en ingénierie environnementale où les mélangeurs statiques sont utilisés.

Li, H. Z., et al [35] ont démontré que le coefficient de transfert thermique du mélangeur statique Sulzer est environ cinq fois supérieur à celui d'un tube vide.

De nombreuses recherches ont également étudié l'influence de différents types et configurations de mélangeurs statiques sur le transfert de chaleur et la chute de pression. Il a été constaté qu'à mesure que l'apport d'énergie par unité de masse augmente, le coefficient de variation (CoV) diminue, un effet qui devient plus marqué avec l'augmentation du nombre d'éléments de mélange. Comparé au modèle standard, le mélangeur à palque pivotante a montré une amélioration significative des performances de mélange tout en entraînant une chute de pression plus faible.

Pour évaluer et améliorer les caractéristiques thermiques des mélangeurs, de nombreuses études ont été réalisées pour tester l'effet des configurations géométriques des mélangeurs statiques. Ces travaux ont montré que le nouveau modèle SMX Plus, doté d'espaces entre les

barres, présente une chute de pression inférieure de plus de 50 % par rapport aux modèles Standards, tout en générant un effet de mélange très similaire. [36-37]

De plus, l'analyse du champ d'écoulement, des résultats de chute de pression et de l'indice de mélange a révélé que la nouvelle conception des mélangeurs permet d'obtenir un mélange amélioré, tant en termes de mélange dispersif que de mélange distributif. Le mélangeur SMX Avec des dentelures circulaires a permis de réduire la perte de charge d'environ 33 à 35 % par rapport au mélangeur SMX standard. [38-42]

Meng, H. et al. [43] ont étudié par simulation numérique l'influence de différents diamètres de trous ajoutés dans les plaques d'un élément de mélangeurs de type Kenics. Ils ont démontré que le facteur de frottement, le taux de transfert de chaleur et la performance thermique, mesurée par le coefficient de performance (COP), sont significativement affectés par l'augmentation du diamètre des trous.

Leurs résultats ont également été comparés à ceux d'une géométrie standard. Ils ont trouvé une diminution de la perte de charge et du taux de transfert de chaleur allant jusqu'à 44,2 % et 10,5 % respectivement en présence d'un trou de 5 mm de diamètre. En revanche, le COP a montré une augmentation de 9,9 % par rapport au cas standard de ce type de mélangeur statique.

Meng, H. et al. [44] ont étudié les caractéristiques thermiques d'un mélangeur statique KSM utilisant des tubes inclinés à l'intérieur de ce type de mélangeur. Ils ont constaté que le transfert de chaleur augmente avec l'augmentation des rapports d'inclinaison. D'autre part. Les caractéristiques d'écoulement turbulent et de transfert de chaleur dans le mélangeur statique Komax ont été étudiées expérimentalement et numériquement par Meng, H. et al. [45] pour des nombres de Reynolds (Re) allant de 2640 à 17600.



Figure I.22. géométries du tube équipé de différents mélangeurs statiques [45].

L'évolution des tourbillons, le nombre de Nusselt (Nu), le facteur de frottement (f) et le coefficient de performance (COP) ont été calculés pour évaluer la performance de ce type de mélangeur. De plus, les auteurs ont établi des corrélations empiriques pour Nu et f, avec des erreurs de prédiction inférieures à $\pm 6,20$ %.

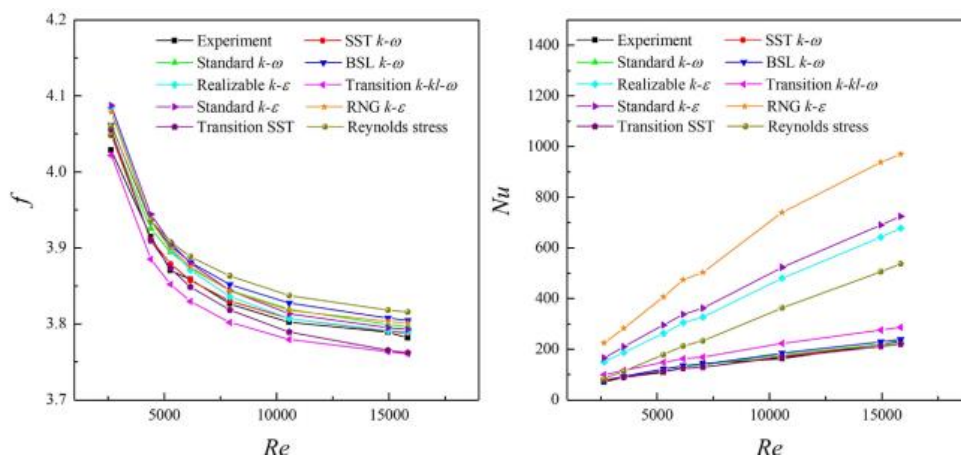


Figure I.23. validation du modèle basée sur f et Nu de komax [45].

Thomas, K. M. et al. [46] ont montré que le mélangeur fixe Knicks offre des performances de cristallisation comparables à celles du mélangeur standard Kennex, tout en réduisant la chute de pression et en améliorant la stabilité des cristaux, ce qui optimise l'efficacité de la cristallisation continue. Ils ont également réalisé une caractérisation Numérique et expérimentale de cristaux à l'aide de mélangeurs fixes.

Selon Meng et al. La conception d'un mélangeur Kenics à vis permet d'optimiser le mélange tout en maintenant une perte de pression relativement faible, ce qui est essentiel pour des opérations continues [47].

Plusieurs études ont été menées pour évaluer les performances thermiques et hydrauliques des mélangeurs Kenics. Par exemple, une étude de Zhang et al. a utilisé la dynamique des fluides numérique (CFD) pour modéliser le comportement d'écoulement et a constaté que l'augmentation du nombre de Reynolds améliore considérablement le transfert de chaleur [48]. Par ailleurs, Ahmed et al. ont exploré les impacts de la variation de la vitesse de mélange sur le comportement des fluides non-Newtoniens dans les mélangeurs Kenics, concluant à une amélioration notable du taux de transfert de chaleur [49].

Comparés à d'autres types de mélangeurs, les mélangeurs Kenics présentent des avantages notables en termes d'efficacité de mélange. Une étude de Li et al. a montré que, pour des fluides non-Newtoniens, les mélangeurs Kenics surpassent les mélangeurs standards en matière de réduction de la taille des gouttelettes et d'amélioration de l'homogénéité [50].

Récemment, des chercheurs ont proposé des modifications de conception pour améliorer encore les performances des mélangeurs Kenics. Par exemple, Wang et al. ont introduit des dispositifs d'insertion supplémentaires à l'intérieur du mélangeur, ce qui a conduit à une augmentation du coefficient de transfert thermique de 20 % [51].

Les mélangeurs statiques de type Kenics sont également utilisés dans le traitement des eaux pour améliorer la dispersion des agents de traitement. Selon une étude menée par Xu et al. L'utilisation de mélangeurs Kenics a permis d'atteindre une réduction significative du temps de réaction dans les procédés de floculation [52].

Noureddine, Kaid, et al. [53] ont évalué l'écoulement des fluides avec transfert de masse dans deux types de générateurs de vortex dans un canal rectangulaire. Pour des nombres de Reynolds de 50, 100 et 150, les pertes de pression observées dans ce nouveau modèle tridimensionnel étaient extrêmement faibles. Le mélangeur étudié se compose d'un conduit rectangulaire de 400 mm de long et de 20 mm de hauteur et de largeur. Afin d'améliorer les performances thermiques et de transfert de masse du mélangeur statique, ils ont ajouté cinq barrières coniques et quatre rubans torsadés longitudinaux de tailles respectives de 3, 6 et 9 mm, utilisés comme générateurs de vortex. L'eau a été employée comme fluide principal et Un colorant rouge comme traceur. Les résultats ont montré que l'utilisation de ce nouveau Design avec une barrière de 9 mm de hauteur améliorerait considérablement les performances de mélange, jusqu'à 94 %, tout en maintenant une très faible perte de pression, la plus faible parmi toutes les configurations testées. En revanche, la hauteur de ruban torsadé de 6 mm s'est révélée moins performante en termes d'amélioration du mélange et du transfert de Chaleur par rapport aux hauteurs de 3 mm et 9 mm.

Jiaheng Zhao et al. [54] ont étudié l'effet de la géométrie des mélangeurs statiques sur leur performance, dans le but de réduire simultanément les pertes de charge et de maintenir un mélange efficace dans différentes conditions d'écoulement, un aspect pratique pour améliorer les performances des processus de traitement de l'eau. Ils ont également montré que, pour une Gamme de vitesses d'écoulement allant de 0,2 à 1,8 m/s, les nouveaux mélangeurs multi-étages (HOVM et COVM) permettaient des réductions significatives des pertes de charge (89,4 % pour le HOVM et 52,9 % pour le COVM) et des valeurs de G (67,3 % pour le HOVM et 31,3 % pour le COVM) par rapport au mélangeur Kenics. L'intensité de l'énergie cinétique turbulente dans le HOVM était bien inférieure à celle du COVM et des mélangeurs Kenics. Par ailleurs, les pertes de charge des mélangeurs HOVM et COVM étaient nettement inférieures à celles de divers types de mélangeurs traditionnels (Kenics, SMX, SMV, ISG, Inliner Lightnin).

Jiefeng Zhou et al. [55] ont développé un modèle tridimensionnel de transfert de masse qui décrit la distribution dynamique des tailles de gouttelettes. Ce comportement dynamique est influencé par deux processus principaux : le transfert de masse entre les étapes et les changements physiques des gouttelettes, tels que leur fragmentation et leur coalescence. Il est

intéressant de noter que les chercheurs ont découvert que, même avec un nombre limité d'éléments de mélange (seulement cinq) et une faible vitesse d'entrée de liquide de 0,7 m/s, le mélangeur statique Kenics parvenait tout de même à offrir d'excellentes performances en matière de transfert de masse.

Prashant Patil et al. [56] ont réalisé des simulations tridimensionnelles portant sur un écoulement turbulent incompressible dans un échangeur de chaleur MICI. Ils ont montré d'après les résultats obtenus pour le nombre de Nusselt et le facteur de friction concordait bien avec la littérature existante, attestant de la fiabilité des simulations. Une analyse comparative a été menée entre le SISL, un tuyau vide et le mélangeur statique standard Kenics (KSM) afin d'évaluer les différences de performance. Le CISM à quatre fentes a démontré un coefficient de transfert thermique supérieur de 38 % à 52 % par rapport au mélangeur statique traditionnel dans la plage de nombres de Reynolds étudiée. Ces résultats mettent en évidence l'efficacité du CIIS pour améliorer le rendement du transfert de chaleur.

Zheng, N.B., et al. [57] ont simulé et optimisé l'amélioration du transfert thermique dans un tube d'échangeur de chaleur équipé d'inserts à tige de vortex, montrant des améliorations significatives des performances thermiques. Ils ont étudié comment ces vortex peuvent influencer la turbulence et, par conséquent, améliorer le transfert thermique dans des Systèmes industriels.

Wang, Y.F., et al. [58] ont exploré l'effet des générateurs de vortex longitudinaux pour améliorer le transfert thermique dans des tubes circulaires. Ils ont démontré que ces dispositifs augmentaient efficacement la turbulence locale et amélioreraient le rendement thermique dans une large gamme de conditions d'écoulement.

Liu, X.X., et al. [59] ont mené une étude approfondie sur le transfert de chaleur en flux laminaire dans des tubes avec des inserts de bande ondulée conique. Ils ont trouvé que ces inserts favorisent un transfert thermique amélioré en augmentant la turbulence près des parois du tube, Ruengpayungsak, K., et al. [60] ont évalué la performance thermohydraulique d'échangeurs de chaleur équipés de rubans tordus perforés, montrant une amélioration significative du transfert de chaleur par rapport à des configurations classiques dans des écoulements turbulents et laminaires.

Yingying, Nie., et al [61]. Les auteurs ont conçu un mélangeur microfluidique à échelle élevée présentant une structure poreuse. Cette conception vise à améliorer l'efficacité du transfert de masse et de chaleur, en utilisant des simulations de dynamique des fluides (CFD) pour analyser et optimiser le mélangeur.

L'étude étudie divers facteurs qui affectent les performances du mélangeur, notamment

l'angle de rotation, la porosité et l'espacement des déflecteurs. Ces paramètres sont essentiels pour optimiser la structure du mélangeur.

L'étude conclut que le mélangeur micro fluidique à échelle élevée avec une structure poreuse améliore efficacement les performances de transfert de masse et de chaleur. Cette recherche fournit des renseignements précieux pour la conception et le développement de mélangeurs à échelle élevée novateurs.

José-Alejandro et al. [62] ont exploré l'impact des mélangeurs statiques sur l'efficacité des procédés multiphasiques dans l'industrie pétrolière, notamment en améliorant l'homogénéité des phases et en optimisant la séparation des gaz.

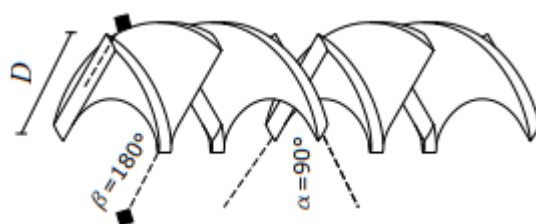


Figure I.24. Configuration du mélangeur statique KSM pour $n = 4$ [62].

Leur étude met en avant l'application du mélangeur KMS pour réduire la présence de gaz dans les mélanges de pétrole, tout en prolongeant le temps de sédimentation, ce qui améliore l'efficacité globale des processus d'extraction. Les chercheurs ont combiné des expériences et des simulations numériques pour analyser la dynamique d'écoulement des fluides multiphasiques.

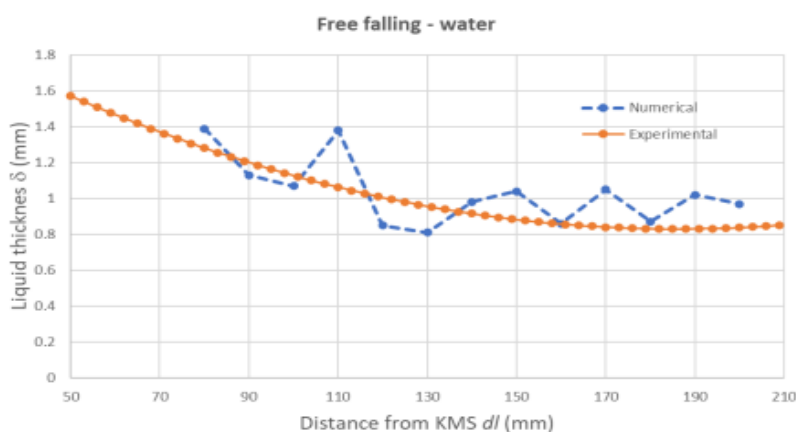


Figure I.25. Résultat du calcul numérique [62].

Li, Y., Wu, S., et al. [63] ont concentré leur recherche sur l'optimisation de la forme des mélangeurs en T pour améliorer les performances de mélange. Ils ont utilisé des techniques d'optimisation basées sur les polynômes de Bernstein et des méthodes adjointes pour ajuster le profil des parois. Leurs résultats montrent que le nouveau micromélangeur statique a triplé l'efficacité du mélange par rapport aux mélangeurs statiques traditionnels, avec des tailles de particules plus petites, suggérant son potentiel à remplacer les mélangeurs dynamiques à haut

Cisaillement dans certaines applications industrielles.

E., Agaev., et al [64]. Ont étudié les mélangeurs-batteurs verticaux en se concentrant sur leurs performances thermiques et de mélange. Ils ont analysé la productivité moyenne cyclique et horaire des mélangeurs et examiné des expressions mathématiques pour décrire la durée de Chargement et de déchargement.

Kenneth, D., et al [65]. Ont développé une classification des concepts de mélange et examiné les mécanismes et équipements utilisés dans les procédés de mélange. Ils ont montré que les mélangeurs statiques améliorent l'efficacité du mélange, notamment en ce qui concerne la dispersion uniforme et la réduction de la consommation d'énergie, les rendant adaptés à divers Processus pharmaceutiques impliquant des mélanges de liquides et solides.

Evan, M., et al. [66] ont démontré que les mélangeurs statiques optimisent l'efficacité du transfert de masse et minimisent la chute de pression dans les flux co-courants gaz-liquide.

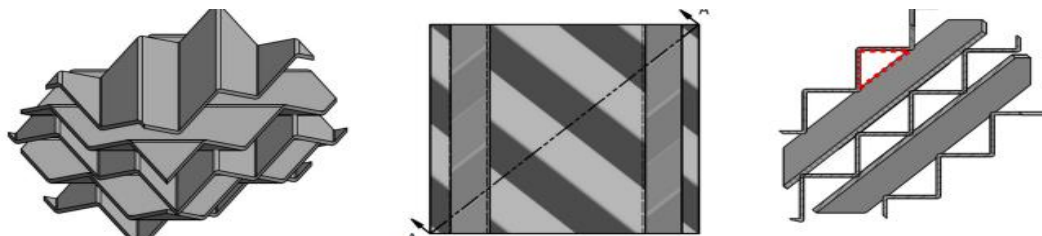


Figure I.26. Projections isométriques de la CAO 3D des mélangeurs ondulés utilisés pour les mesures expérimentales [66].

Cette amélioration a des répercussions significatives sur les performances dans des applications telles que le traitement du gaz naturel et la capture du carbone. L'étude a mesuré les pertes de charge biphasées dans des géométries ondulées et a proposé une extension de la corrélation des pertes de charge monophasées pour les scénarios multi phases.

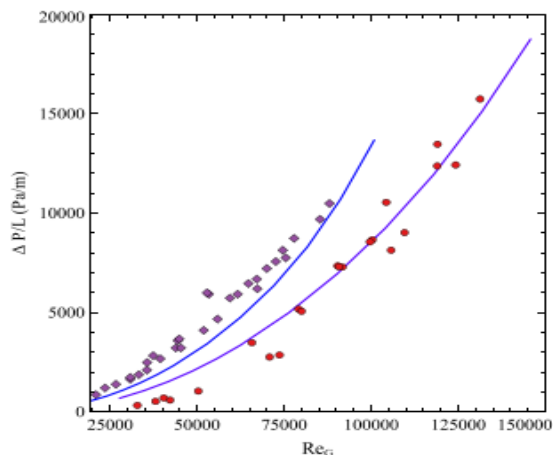


Figure I.27. Données expérimentales pour la perte de pression biphasée dans des mélangeurs ondulés de 2 pouces pour RL = 44 (cercles rouges) et RL = 290 (diamants violets) [66].

KeWei Song et al. [67] ont étudié l'impact d'une nouvelle conception d'échangeur de chaleur tubulaire, intégrant des obstacles hélicoïdaux perforés, sur l'efficacité du transfert thermique. Ils ont examiné l'effet de différents diamètres de perforation, variant de 0 à 12 mm, sur l'écoulement des fluides et le transfert thermique à travers des simulations numériques, dans des conditions d'écoulement turbulent, avec des nombres de Reynolds compris entre 4 000 et 16 000. Les chercheurs ont constaté que le diamètre des perforations influençait de manière significative les performances thermiques. Un diamètre de perforation optimal a été identifié, permettant d'atteindre des performances maximales. Le nombre de Nusselt (Nu) a ainsi augmenté de 20,2 % avec les perforations, tandis que le facteur de friction (f) n'a augmenté que de 11 %, par rapport à une configuration sans perforation. De plus, l'indice de performance thermique (JF) a été amélioré de 16,1 % par rapport à la

Configuration sans perforation, et de 48,6 % comparé à un tube lisse. Des formules de corrélation pour f, Nu, et JF ont également été développées, avec des écarts respectifs de ± 4 %, ± 9 % et ± 5 %. Cette technologie d'amélioration du transfert de chaleur par ailettes perforées peut être appliquée à l'optimisation des conceptions d'échangeurs de chaleur à double tube.

Luis Gutierrez et al., [68] ont effectué des simulations numériques pour analyser le champ d'écoulement interne d'un mélangeur, en étudiant l'impact de divers paramètres structurels sur la performance du mélange.

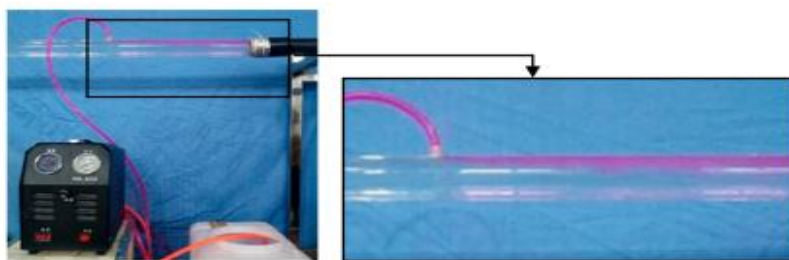


Figure I.28. Schéma de la configuration expérimentale [68].

Ils ont utilisé l'échantillonnage d'hypercube latin pour générer 100 scénarios de test, en se concentrant sur quatre variables principales : le diamètre du tuyau de dérivation, le débit des eaux usées, la hauteur d'installation de la turbine, et L'angle du déflecteur.

L'optimisation des paramètres a conduit à une amélioration significative de l'uniformité du mélange de floculant, avec une réduction du coefficient de variation à 16,02 %, soit une augmentation de 74,94 % de l'uniformité par rapport à la valeur initiale de 63,921 %.

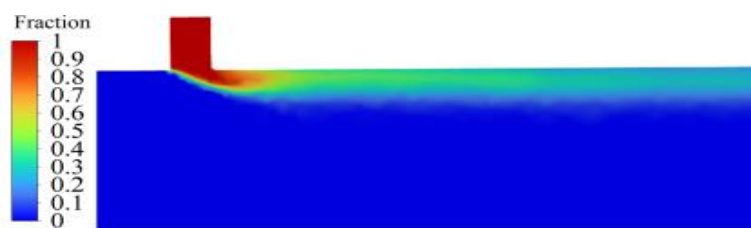


Figure I.29. Résultat du calcul numérique [68].

En outre, la consommation d'énergie du rotor a été réduite de 8,30 %, indiquant une amélioration de l'efficacité énergétique du système

Ezzine Bennour et al. [69] ont mené une étude utilisant des simulations numériques. Cette recherche se concentre sur l'analyse de différentes configurations géométriques de mélangeurs statiques, notamment une conception de tube ondulé équipée d'inserts de chicanes disposés en forme triangulaire.

Les résultats montrent que l'utilisation d'un tube ondulé améliore considérablement l'efficacité du mélange en générant un fort flux de recirculation dans la zone de divergence. Cette configuration permet d'augmenter l'indice de mélange d'un facteur de trois par rapport à un tube droit, prouvant ainsi son efficacité dans des conditions d'écoulement laminaire. De plus, l'ajustement de l'angle d'attaque des déflecteurs à 30° entraîne une augmentation de 22,6 % de l'indice de mélange tout en réduisant la perte de charge par rapport à une configuration avec un angle d'attaque de 0° . Ces résultats suggèrent qu'une conception minutieuse des paramètres géométriques peut optimiser les performances des mélangeurs statiques.

Tamsir Ndiaye et al. [70] ont présenté une analyse numérique de l'effet de la variation du diamètre de la section d'entrée secondaire sur la structure de l'écoulement et la performance du mélange de fluides. Les simulations ont été réalisées à l'aide du logiciel de calcul Fluent, en utilisant le modèle de turbulence k- ϵ . Les résultats obtenus montrent que plus le diamètre du coude est grand, plus les zones de mélange sont efficaces, et plus la température et la vitesse à la sortie sont uniformes, ce qui améliore la qualité du mélange. À la sortie, les vitesses et les températures augmentent, en particulier pour un diamètre allant jusqu'à 0,025 m, favorisant ainsi la turbulence et le taux de transfert de chaleur. Lorsque le diamètre du Coude atteint 0,030 m, les courbes deviennent symétriques et les variations de température et de vitesse sur la section de sortie sont minimales, indiquant un mélange plus homogène, mais avec un taux de transfert de chaleur réduit.

Juan Pablo Valdes et al. [71] ont présenté une discussion générale sur le rôle des mélangeurs statiques dans l'industrie de transformation actuelle, tout en résumant les

développements les plus pertinents ainsi que la littérature disponible sur ces dispositifs, particulièrement pour les systèmes liquides complexes. Ils mettent en évidence les avancées dans la compréhension hydrodynamique des dispersions liquide-liquide non miscibles et de La formation d'émulsions en utilisant des mélangeurs statiques, via des approches expérimentales et numériques.

Les auteurs ont également proposé des modèles et des corrélations élaborés au cours des dernières décennies, en se concentrant sur des paramètres clés tels que la taille moyenne des gouttelettes et la perte de charge. En outre, ils abordent les progrès récents dans la modélisation computationnelle, soutenue par différents cadres de simulation. De plus, une révision succincte des concepts fondamentaux du mélange statique des liquides et de la formation d'émulsions est incluse, enrichissant la discussion sur les innovations récentes dans ce domaine.

Huibo, Meng., et al [72] ont étudié le processus de mélange de deux liquides immiscibles, notamment l'huile de silicone et l'eau, dans un mélangeur statique de type QSM.

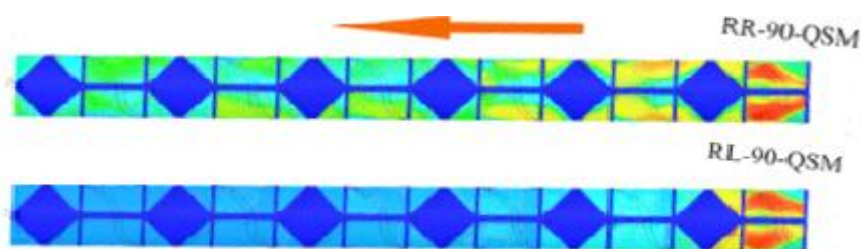


Figure I.30. Mélangeur statique de type QSM [72].

Ce dispositif est conçu pour favoriser une meilleure dispersion des phases liquides et utilisé dans diverses applications industrielles.

L'étude s'appuie sur des simulations de dynamique des fluides computationnelle (CFD) pour analyser le comportement du mélange dans un régime de dispersion turbulente. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de différents paramètres, comme la vitesse d'écoulement et la configuration géométrique du mélangeur, sur l'efficacité du processus de mélange.

Les résultats de cette recherche peuvent guider l'amélioration des conceptions de mélangeurs statiques et des stratégies opérationnelles, permettant une optimisation dans les applications industrielles où le mélange de liquides immiscibles est essentiel.

José-Alejandro, et al [73] ont étudié l'effet cyclone généré par un mélangeur statique KMS, avec un accent particulier sur la réduction de la formation de mousse dans une cuve utilisée comme séparateur horizontal par gravité pour un mélange pétrole-gaz-eau. L'étude visait à tester cet effet dans des conditions spécifiques de vitesse d'écoulement et de pression.

Les résultats expérimentaux ont montré que l'intégration du mélangeur KMS permet de

réduire efficacement la formation de mousse dans le réservoir, ce qui améliore la séparation des phases pétrolières, gazeuses et aqueuses. De plus, cette optimisation réduit la présence de gaz dans le mélange, ce qui est un facteur clé dans le fonctionnement des pompes d'extraction pétrolière. Cette approche est particulièrement pertinente dans les environnements réels d'extraction de pétrole, où l'amélioration de l'efficacité des machines de pompage est essentielle pour maximiser la production tout en minimisant les interruptions liées aux gaz dissous dans le fluide.

Kunpeng He et al. [74] ont étudié les caractéristiques de dispersion liquide-liquide dans des mélangeurs statiques de type écran en utilisant des modèles simplifiés et des mesures PLIF (fluorescence induite par laser planaire). Les chercheurs ont appliqué deux approches de modélisation à zéro dimension (0D) basées sur le modèle de bilan démographique (PBM) pour analyser le mélange des liquides dans ces systèmes sans pièces mobiles.

L'étude met en évidence l'effet de plusieurs facteurs sur l'efficacité de la dispersion dans les mélangeurs statiques, notamment la géométrie des écrans, la fraction volumique d'huile, et les conditions de fonctionnement. En simulant et en mesurant les performances de dispersion, Les résultats offrent des pistes d'optimisation pour améliorer le mélange dans diverses configurations industrielles.

Cette approche permet d'améliorer la compréhension des mécanismes fondamentaux de Dispersion, tout en contribuant à l'optimisation des performances des mélangeurs statiques dans les applications de traitement des fluides.

Zhong Liangjie et al. [75] utilisent l'apprentissage automatique pour améliorer les méthodes d'optimisation des mélangeurs statiques, qui sont souvent inefficaces dans les approches traditionnelles. Les auteurs ont exploité la dynamique des fluides computationnelle (CFD) pour collecter des données sur le champ d'écoulement à l'intérieur du mélangeur statique, Fournissant ainsi une analyse précise du comportement des fluides.

L'évaluation de l'efficacité du mélange repose sur ces simulations, mettant en lumière les liens entre les paramètres structurels et la performance du mélangeur. Ensuite, un réseau de neurones a été développé pour modéliser la corrélation entre ces paramètres et l'efficacité globale du mélange. Cette intégration de l'apprentissage automatique permet une optimisation plus précise et efficace des conceptions de mélangeurs, améliorant ainsi leur rendement dans diverses applications industrielles.

Un réseau de neurones a été utilisé pour créer un modèle qui met en corrélation les paramètres structurels clés du mélangeur avec son efficacité globale de mélange. Cette application de l'apprentissage automatique est importante car elle permet des prédictions et

des optimisations plus précises dans la conception des mélangeurs.

Longyun, Zheng., et al. [76] ont mis en avant le mélangeur statique CBF, qui offre des performances de mélange supérieures, atteignant rapidement une homogénéité totale grâce à un mouvement radial amélioré et à la formation de vortex. Cette étude a utilisé la dynamique des fluides computationnels pour analyser le flux et le mélange, ainsi que la décomposition orthogonale pour la reconstruction des champs de vitesse et de vorticité.

Noureddine, Kaid et al. [77] ont développé une nouvelle conception d'un mélangeur statique en forme de T qui améliore significativement l'efficacité du mélange, atteignant 94 % d'efficacité. Cette innovation optimise les processus de mélange de fluides dans divers secteurs industriels, tels que les domaines chimique et pharmaceutique. Des simulations numériques ont été réalisées Pour évaluer cette efficacité.

Yanfang, Yu, et al. [78] ont démontré que les mélangeurs statiques optimisent les caractéristiques de l'écoulement biphasé gaz-liquide en favorisant la turbulence, ce qui améliore l'efficacité du mélange. L'étude a été réalisée par simulation numérique en régime turbulent, ils ont donné une analyse approfondie des fluctuations de pression et des prévisions des modèles d'écoulement appliqués au mélangeur statique Quatro. Les résultats indiquent que ces dispositifs peuvent jouer un rôle important dans l'optimisation des processus de mélange dans diverses applications industrielles.

Thomas, K. M., et al. [79] ont examiné deux modèles de mélangeurs statiques largement utilisés : les mélangeurs Kenics et les mélangeurs Sulzer. Bien que les deux dispositifs aient été analysés en termes d'efficacité de la chute de pression et des performances de mélange, les auteurs soulignent un manque de recherche concernant leurs performances comparatives dans Les processus d'émulsification.

Les résultats de l'étude montrent que les mélangeurs Sulzer présentent une dissipation d'énergie turbulente plus élevée par rapport aux mélangeurs Kenics. Cette augmentation de la turbulence favorise la formation de gouttelettes plus petites dans les émulsions générées, un élément crucial pour l'efficacité des processus d'émulsification.

I.8. Conclusion

L'étude bibliographique des mélangeurs statiques révèle une compréhension approfondie de ces dispositifs simples mais efficaces, utilisés principalement dans des applications industrielles où une homogénéisation rapide et constante des fluides est essentielle. L'analyse des travaux antérieurs montre que les mélangeurs statiques sont largement employés dans divers secteurs, tels que la chimie, la pharmacie, l'alimentaire et la gestion de l'eau, en raison de leur faible coût, de leur simplicité et de leur fiabilité.

Les recherches passées permettent de mieux appréhender les principes de fonctionnement des mélangeurs statiques, fondés sur des phénomènes de turbulence, de cisaillement et de diffusion, provoqués par des géométries internes spécifiques (éléments de turbulences, cônes, spirales, etc.). Cette diversité de conception permet d'optimiser le mélange selon les besoins spécifiques des processus industriels.

L'étude des performances des mélangeurs statiques montre que leur efficacité dépend de nombreux facteurs, tels que le débit des fluides, leur viscosité, la configuration géométrique du mélangeur et les conditions opératoires. Bien que ces mélangeurs soient adaptés aux applications de mélange continu à faible coût, ils ont parfois des limitations dans des environnements où des mélanges plus complexes ou des régimes de flux particuliers sont requis.

En outre, la comparaison avec les mélangeurs dynamiques met en évidence que, bien que les mélangeurs statiques soient moins performants dans des applications complexes, ils offrent des avantages substantiels, notamment en termes de coûts d'entretien, de durabilité et de simplicité de mise en œuvre.

Nous constatons que la littérature est très riche avec des articles qui traitent le comportement des fluides en géométrie droite et complexe alors que les articles qui traitent le comportement des fluides non-Newtoniens en géométrie complexe sont peu nombreux.

Notre contribution dans ce thème consiste à décrire le comportement des fluides rhéofluidifiants en géométrie complexe avec de faibles nombres de Reynolds. Il faut noter que cette géométrie présente des performances en termes de mélange de deux fluides Newtoniens et non newtoniens à très bas nombre de Reynolds.

CHAPITRE II

Modélisation mathématique et approche Numérique

CHAPITRE II

Modélisation mathématique et approche Numérique

II.1. Introduction

Le processus de mélange dans les mélangeurs statiques, effectué à de faibles nombres de Reynolds tout en maintenant une perte de charge minimale, présente un intérêt notable à la fois pour la recherche académique et pour les applications technologiques. Cette géométrie est largement adoptée dans la simulation des mélanges chaotiques de fluides rhéofluidifiants en raison de son efficacité démontrée avec des fluides newtoniens et non newtoniens, renforçant ainsi son utilité dans divers contextes industriels.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les bases théoriques, la formulation mathématique et les méthodes numériques. Les caractéristiques géométriques des différents mélangeurs adoptés dans cette étude sont toutes d'abord présentées, suivi par les équations gouvernantes et les conditions aux limites associées.

L'utilisation de modèles numériques dans l'étude des mélangeurs permet d'analyser rapidement et efficacement leurs performances sans nécessiter d'expérimentations physiques. Ces modèles facilitent la simulation des différents paramètres de conception, offrant une flexibilité précieuse pour optimiser les configurations. De plus, ils réduisent les coûts associés aux essais en laboratoire, rendant le processus de développement plus économique.

La structure des écoulements engendrés au sein de la géométrie peut être étudiée numériquement, au moyen d'une analyse par CFD utilisant le code de calcul Fluent. La plupart des études expérimentales et numériques utilisant les mélangeurs et qui ont été recensées précédemment dans le premier chapitre s'intéressent aux mélanges des fluides Newtoniens. Cependant, dans la réalité, les fluides utilisés dans les dispositifs fluidiques sont de comportement non-Newtonien, donc un mélange homogène dans un temps de séjour réduit représente l'objet de notre travail à travers la simulation numérique.

Un inconvénient des simulations numériques est qu'elles ne donnent pas automatiquement des résultats corrects : au moins les premières simulations doivent être validées par des expériences. Si les résultats sont corrects, une validation supplémentaire par des expériences peut ne pas être nécessaire pour ce type spécifique de simulation.

Dans ce projet, le code de calcul ANSYS (FLUENT) a été utilisé pour les simulations. Les bases de ces simulations seront abordées dans cette section.

Plusieurs étapes peuvent être reconnues dans la construction d'un modèle numérique dans ANSYS :

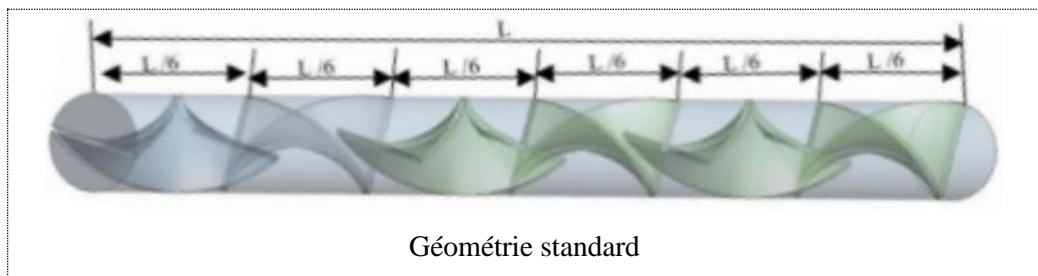
- Génération de la géométrie.
- Étape de discrétisation du domaine de calcul et création du maillage
- Le choix des équations gouvernantes,
- Définition des conditions aux limites appropriées.
- Sélection des schémas de discrétisation numérique utilisés pour résoudre les équations gouvernantes,
- Résoudre itérativement l'ensemble d'équations obtenu pour tous les points de la grille.

II.2. Génération de la géométrie

Dans cette étude, la géométrie tridimensionnelle du mélangeur statique a été étudiée à l'aide du code de calcul (FLUENT) 20.0 CFD. La simulation a été réalisée afin d'étudier l'effet des paramètres de transfert de chaleur (Nombre de Nusselt, le coefficient de performance et l'efficacité du mélange thermique) dans un mélangeur statique avec quatre cas modifiés différents. La géométrie du mélangeur statique étudié est composée d'une conduite cylindrique dans laquelle sont placés des obstacles hélicoïdaux, comme indiqué sur la figure II.1. Les dimensions de ce mélangeur comprennent une longueur L , un diamètre D et une épaisseur W . Ces dimensions sont présentées dans le tableau II.1. Le mélangeur KSM est composé de six éléments fixes principaux. De forme hélicoïdale ($L/6$).

Tableau II.1 Dimensions of the Kenics static mixer

Longueur, L (m)	Diametre, D (m)	Épaisseurs, W (m)	Angle α
0.876	0.052	0.0032	90°



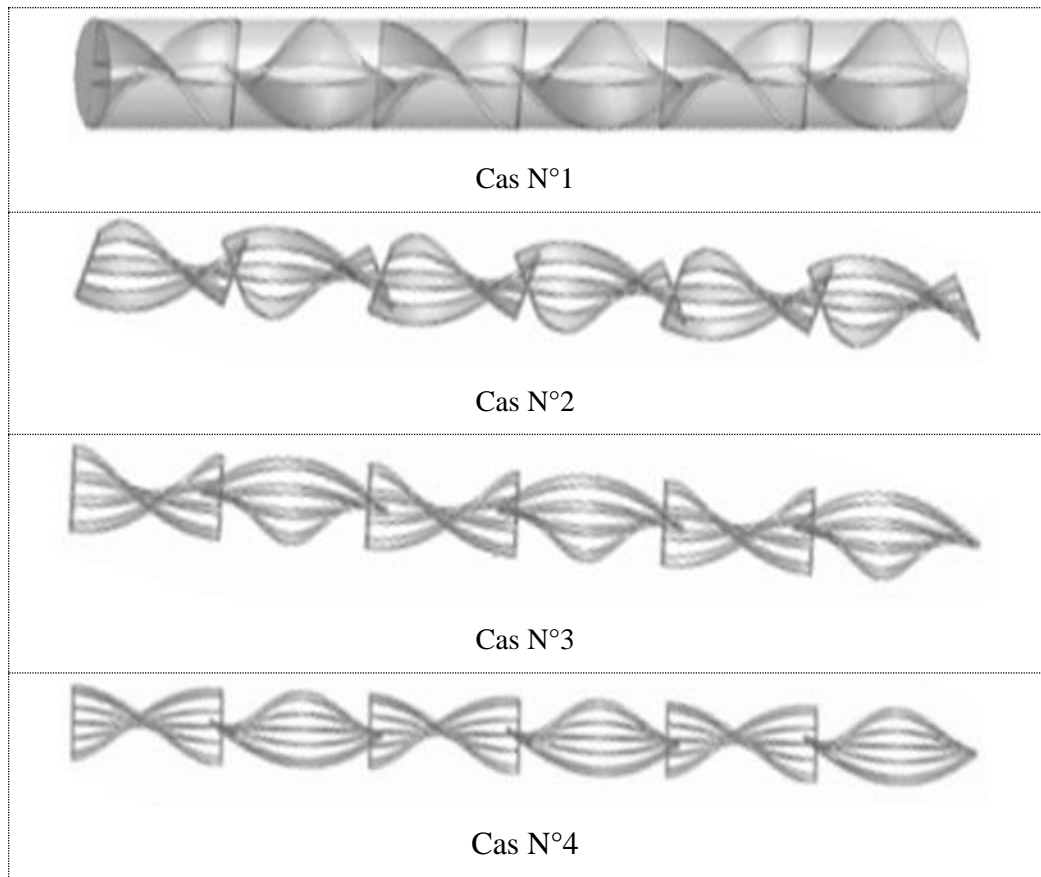


Figure II.1: Géométries des mélangeurs statiques des différents cas étudiés.

II.4. Maillage

Après la création de la géométrie à l'aide du logiciel de calcul ANSYS, la géométrie est discrétisée pour la simulation en utilisant un maillage tétraédrique adapté aux mélangeurs statiques. Ce processus de discrétisation consiste à diviser la géométrie en petites cellules ou éléments, qui forment le maillage. Le choix d'un maillage tétraédrique permet de mieux représenter les formes complexes et les zones irrégulières des mélangeurs statiques.

Ensuite, plusieurs configurations de maillage sont testées pour optimiser la précision des résultats. Ces tests de maillage aident à identifier le maillage le plus équilibré, qui permet de capter les détails de l'écoulement sans entraîner un coût de calcul excessif.

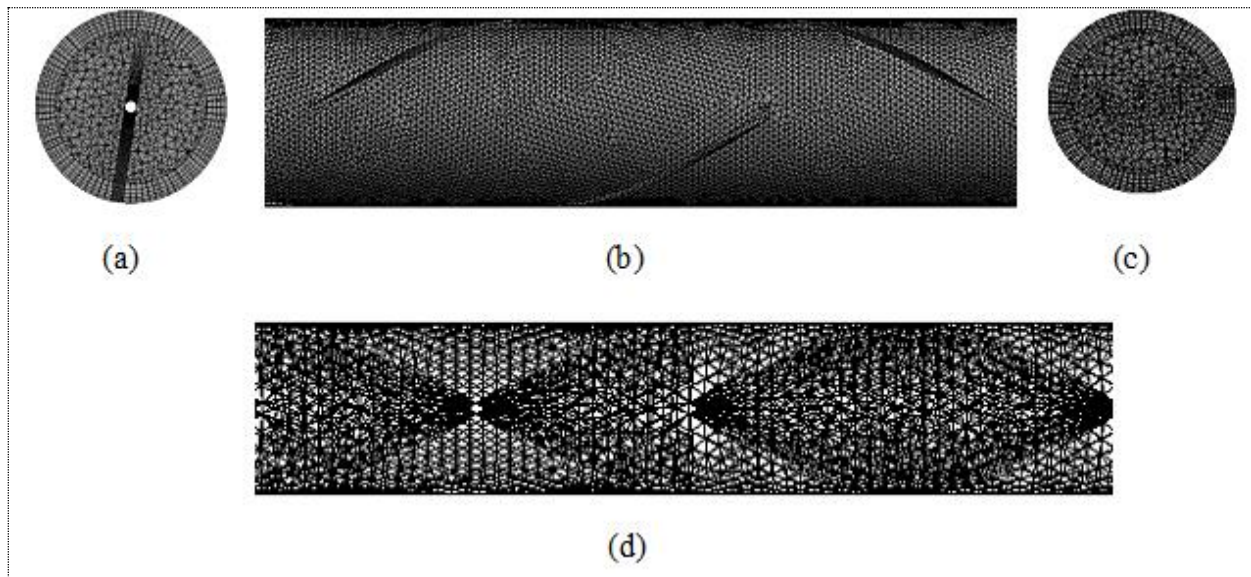


Figure II.2: maillage tétraédrique (a) entrée, (b) conduite, (c) sortie et (d) mélangeur hélicoïdal

Tableau II.2: Comparaison des statistiques de maillage et des paramètres de mélange dispersif pour le mélangeur statique Kenics et les différents cas modifiés.

Case	Élément de nombre	Qualité minimale de l'élément	Qualité moyenne des éléments	Mélange dispersif		
				Chute de pression (Pa)	Nu	Performance
Cas standard	1236514	0.16304	0.79996	6603.32	10.8903	6.3661
Cas N°1	1330878	1.2394×10^{-4}	0.7685	6821.22	11.3839	6.76231
Cas N°2	1336843	1.8732×10^{-4}	0.77004	7042.65	13.299	8.10876
Cas N°3	1251328	1.39972×10^{-4}	0.78875	7224.68	13.7443	8.66821
Cas N°4	1286110	1.8801×10^{-4}	0.78338	7451.59	13.7443	10.7769

Une densité de maillage a été appliquée près des parois de la conduite du mélangeur statique pour capturer les détails de la couche limite d'écoulement. Des tests de maillage ont été effectués Figure III.3 en vérifiant que l'ajout de cellules supplémentaires ne modifiait pas les valeurs de Δp de plus de 2,5 %.

Pour vérifier l'indépendance de la grille, le nombre de cellules a été doublé. Le maillage 3D initial du modèle comprenait $37,5 \cdot 10^4$ cellules de calcul. Ce nombre a été porté de $37,5 \cdot 10^4$ à $75 \cdot 10^4$ Cellules. Les cellules supplémentaires ont modifié les valeurs de Δp de plus de 1.69 %. Le nombre de cellules a donc été augmenté de $75 \cdot 10^4$ à $123 \cdot 10^4$ cellules. Les cellules supplémentaires n'ont alors pas modifié les valeurs de Δp de plus de 2,5 %. Par conséquent, $123 \cdot 10^4$ cellules ont été utilisées pour les calculs suivants.

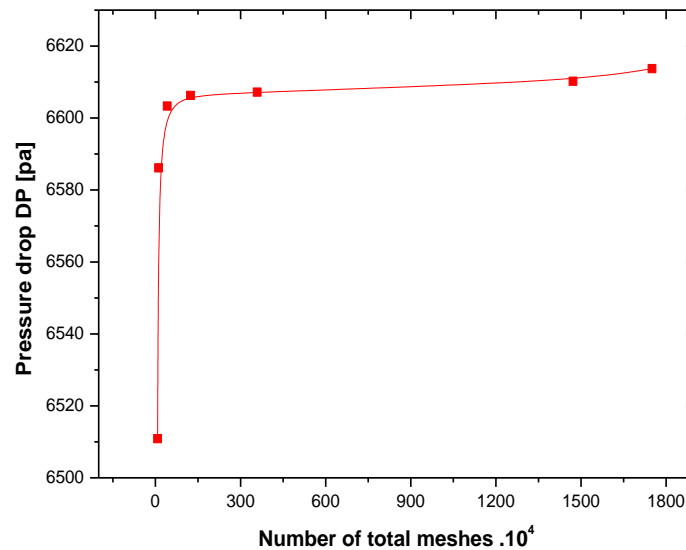


Figure II.3 Test de de maillage

II.5. Caractérisation de l'efficacité du mélange thermique

II.5.1. Grandeurs physiques pour caractériser l'efficacité de mélange des mélangeurs statiques

Afin de mettre en évidence La performance du mélange hydrodynamique et thermique dans mélangeurs considérés dans cette étude, nous intéresserons à l'indice de mélange (MI), le degré De mélange (TMI). Ces grandeurs nous permettront de quantifier l'amélioration des performances de mélange ainsi que la pénalité engendrée en termes de pertes de charge des mélangeurs étudiés.

II.5.2. Indice de mélange (MI) : analyse numérique de l'efficacité du mélange

Mesurer la qualité du mélange est essentiel pour comparer l'efficacité de mélange des différents mélangeurs étudiés. Un indice d'efficacité de mélange (MI) est introduit, basé sur l'écart type de la fraction massique de la concentration moyenne d'une section transversale : Dans cette approche, la section transversale est divisée en plusieurs cellules (dans notre cas, les éléments de la grille de chaque section transversale), et ainsi la concentration est calculée dans chaque cellule. Les deux fluides à mélanger étant injectés avec la même vitesse, le mélange parfait correspond donc à une répartition homogène et en proportion égale des particules issues des deux branches en tout point du mélange dans une section transversale. Les particules fluides sont affectées d'une fraction massique 1 lorsqu'elles proviennent d'un des deux fluides à mélanger et sont affectées d'une fraction massique 0 lorsqu'elles proviennent de l'autre fluide. Le mélange parfait doit donc se traduire par une équipartition des particules d'indices 0 et 1.

L'indice de mélange MI, dans chaque section transversale du mélangeur est calculé par la relation suivante :

$$MI = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0} \tag{II.1}$$

Où σ représente l'écart type de la fraction massique du mélange dans une section transversale calculée à l'aide de la fonction intégrée dans le post-Processing du code (ANSYS-CFD) :

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c_i - \bar{c})^2 \tag{II.2}$$

Où N est le nombre de cellules à l'intérieur du plan de section transversale, (\bar{c}) est la fraction massique moyenne.

$$\sigma_0^2 = \bar{c}(1 - \bar{c}) \tag{II.3}$$

Où σ_0 l'écart type maximal. La plage de degrés de mélange (MI) est (0-1). Lorsque le degré de mélange est 1, cela indique que les deux fluides sont complètement mélangés. Lorsque le degré de mélange est 0, cela signifie que les fluides diphasiques sont séparés. Cela signifie que plus la valeur du degré de mélange élevée, plus les performances de mélange est meilleures.

II.5.3. Fonction de densité de probabilité Pdf (T)

La fonction de densité de probabilité PDF (T) est la probabilité (en %) pour que la température scalaire T soit présente entre deux valeurs ; la PDF (T) dans un intervalle [Ta, Tb] a la sortie est égale au nombre de mailles dans lesquelles les valeurs de T sont comprises dans [Ta, Tb] divisé par le nombre total de mailles de la section transversale de sortie.

II.5.4. Indice thermique de mélange (TMI)

L'indice de mélange thermique (TMI) des deux fluides, est un paramètre approprié pour quantifier le mélange thermique, il est défini par l'expression suivante :

$$TMI = 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (T_i - \bar{T})^2}}{\sigma_0} \tag{II.4}$$

Où N est le nombre de points dans une section, T_i est la température au nœud, \bar{T} est la température moyenne à la section et σ_0 est l'écart type à la section d'entrée. Les TMI valeurs vont de zéro (pas de mélange) à un (mélange complet).

II.6. Equations de conservation

De nombreux processus tels que ceux qui sont impliqués dans la description du mouvement généralisé des fluides sont décrits par un ensemble d'équations de conservation ou de transport. Ces équations suivent, au fil du temps, les changements dans le fluide qui résultent de la convection, de la diffusion et des sources ou puits de la quantité conservée ou transportée. De plus, ces équations sont couplées, ce qui signifie que les changements d'une variable (par exemple, la température) peuvent entraîner des changements dans d'autres variables (par exemple, la pression). Les équations de conservation sont :

II.6.1. Equation de continuité

Pour dériver l'équation de conservation de la masse, l'objectif est d'établir un équilibre de masse pour un composant de masse discret : Taux d'augmentation de la masse à l'intérieur du composant de fluide = Taux net d'entrée de masse - Taux net de sortie de masse En appliquant le principe énoncé ci-dessus, l'équation de continuité peut être formulée comme suit :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{II.5}$$

Où ρ représente la densité du fluide, et \vec{u} désigne la vectrice vitesse, qui peut être représenté en

coordonnées cartésiennes en fonction à la fois des coordonnées x , y et z et du temps, de la manière suivante :

$$\vec{u} = \vec{u}(x, y, z, t) = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

u : la vitesse le long de l'axe x , définie comme $u(x, y, z, t)$.

v : la vitesse le long de l'axe y , définie comme $v(x, y, z, t)$.

w : la vitesse le long de l'axe z , définie comme $w(x, y, z, t)$.

II.6.2. Equation de conservation de la quantité de mouvement

Le concept fondamental derrière la conservation de la quantité de mouvement est qu'elle ne subit ni destruction ni création ; au lieu de cela, elle subit une transformation d'une forme de quantité de mouvement à une autre. Essentiellement, il s'agit d'une application de la deuxième loi de Newton à un fluide :

$$\vec{F} = m.\vec{a}$$

F : représente la force ; m : désigne la masse ; a : indique l'accélération.

Les forces agissant sur les particules de fluide peuvent être classées en deux groupes distincts : les forces volumiques et les forces de surface. Les forces volumiques concernent celles qui exercent leur influence de manière uniforme sur l'ensemble de la masse contenue dans le volume, par exemple la gravité et les forces électromagnétiques. En revanche, les forces de surface font référence à celles qui opèrent exclusivement à la surface du volume. Ces forces de surface comprennent deux classifications principales : la pression résultant des interactions avec le fluide environnant et les contraintes visqueuses de cisaillement/pression normale résultant des forces de frottement.

En tenant compte des forces volumiques ainsi que des forces de surface, l'équation de la quantité de mouvement peut être exprimée comme suit :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u.\nabla u \right) = (-\nabla p) + \nabla.\tau + (F) \quad (\text{II.7})$$

Avec : P est la Pression, τ est le tenseur de contrainte visqueux, F est le vecteur de force volumique.

Le comportement des fluides peut être représenté une fois qu'une fonction de cisaillement newtonienne ou non newtonienne est spécifiée. Dans le cas des fluides newtoniens, la pression présente une relation linéaire avec les gradients de vitesse :

$$\tau_{ij} = \begin{pmatrix} \tau_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \tau_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \tau_{zz} \end{pmatrix} = 2\mu S_{ij} - \frac{2}{3}(\vec{\nabla} \cdot \vec{u}) \delta_{ij} \quad (\text{II.8})$$

Où : S_{ij} est le cisaillement laminaire.

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{II.9})$$

II.6.3. Equation de conservation de l'énergie

Tout comme les principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement, la loi de conservation de l'énergie affirme que l'altération du taux d'énergie au sein d'un système spécifique équivaut à la somme des flux de chaleur, ainsi que la vitesse du travail effectué sur le système en raison des forces internes et de surface.

$$\dot{E} = \sum_i \dot{Q}_i - \sum_i \dot{W}_i \quad (\text{II.10})$$

La forme générale de l'équation de l'énergie peut être exprimée comme suit :

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho E \vec{V}) = \rho \dot{Q} + \vec{\nabla} \cdot (k \nabla T) - \left[\frac{\partial(uP)}{\partial x} + \frac{\partial(vP)}{\partial y} + \frac{\partial(wP)}{\partial z} \right] + \left[\begin{array}{l} \left(\frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} \right) \\ \left(\frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} \right) \\ \left(\frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} \right) \end{array} \right] + \frac{\rho \vec{F} \cdot \vec{V}}{\quad} \quad (\text{II.11})$$

Où :

- (1) - Changement du taux d'énergie totale dans le fluide ;
- (2) - Changement d'énergie totale dû à la convection du fluide ;
- (3) - Source de chaleur volumétrique ;
- (4) - Taux de changement d'énergie dû à la conduction ;
- (5) - Travail effectué sur le fluide par les forces de pression ;
- (6) - Taux de travail effectué sur le fluide par les forces visqueuses ;
- (7) - Taux de travail effectué sur le fluide par les forces internes.

II.7. Propriétés physiques des fluides

II.7.1. Fluide newtonienne

Dans cette étude, l'eau a été utilisée comme fluide newtonien pour cette simulation, la densité de l'eau utilisée dans ce travail était de 1000 kg/m³. Le mécanisme le plus dominant dans le mélange est l'advection chaotique donc le mélange est régi principalement par l'advection chaotique.

Tableau II.3 : Propriétés thermodynamiques de fluide Newtonien

λ (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	C(J/kg · k)	μ (P a · s-1)
0,7	1000	4100	0.00088

II.7.1.1. Nombre de Reynolds

L'équation suivante représente le nombre de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho u D_h}{\mu} \tag{II.12}$$

II.7.2. Fluide non-newtonienne

Dans cette partie du travail, nous avons également simulé des écoulements de fluides non newtoniens. Dans cette étude, la solution de CMC (carboxyméthylcellulose) est utilisée comme fluide non newtonien. La densité des solutions de CMC est de 1000 kg/m³. Ces fluides obéissent à la loi de puissance et présentent un comportement pseudoplastique. Le tableau II.4 regroupe quelques-unes des principales propriétés physiques de ces fluides.

Tableau II.4 : Propriétés thermodynamiques de fluide non Newtonien - Fellouah et al. ; Pinho et al. [80-81].

CMC (%)	n (-)	m (pa.s ⁿ)
0.7	0.49	2.75
0.25	0.75	0.097
0.1	0.93	0.0066

L'équation suivante présente un nombre de Reynolds généralisé pour les fluides non newtoniens, Dont la viscosité dépend de la contrainte ou de la vitesse de cisaillement. Pour cette raison, le nombre de Reynolds généralisé est adapté en utilisant une viscosité apparente, qui intègre la loi de comportement spécifique du fluide.

$$Re_g = \frac{\rho u^{2-n} D_h^n}{\frac{k}{8} \left(\frac{6n+2}{2} \right)^n} \tag{II.13}$$

II.7.3 Conditions aux limites

Le régime d'écoulement est laminaire, compressible et stationnaire.

La vitesse uniforme imposée aux entrées.

La fraction massique du fluide à l'entrée (1) est égale à 1 et celle de l'entrée (2) est égale à 0,

La pression atmosphérique à la sortie.

Pour le cas du mélange thermique, les températures des deux fluides Sont respectivement : 450 K et 400 K.

Toutes les parois sont supposées adiabatiques.

La valeur de nombre de Reynolds pour newtonien et non-newtonien fluide :

Tableau II.5 : Nombre de Reynolds : (a) pour newtonien fluide (b) pour non-newtonien fluide.

(a)		(b)			
Re	V	Re	n=0.93	n=0.75	n=0.49
0.2	0,00000352	0.2	1,97211E-05	0,00039402	0,0062065
01	0,0000176	01	8,87512E-05	0,00142789	0,01801943
05	0,000088	05	0,000399408	0,00517451	0,05231606
10	0,000176	10	0,000763402	0,00900935	0,08279282
20	0,000352	20	0,001459117	0,01568619	0,13102382
30	0,000528	30	0,002131382	0,02169654	0,17138271
40	0,000704	40	0,002788858	0,02731124	0,20735183
50	0,00088	50	0,003435552	0,03264896	0,24037356
60	0,001056	60	0,004073781	0,03777586	0,27122181
70	0,001232	70	0,004705056	0,04273383	0,30037254
80	0,001408	80	0,005330438	0,04755163	0,32814478

II.8. Conclusion

Les modèles géométriques primaires, le formalisme choisi et la technique numérique pour simuler l'hydrodynamique et thermique ont tous été abordés dans ce chapitre. Des différentes géométries chaotiques proposées, en utilisant le code commercial Fluent. De plus, nous avons discuté de l'évolution de la sensibilité du maillage pour le mélange hydrodynamique. L'indice de mélange *MI* et aussi le mélange thermique à l'aide du degré de mélange *TMI*. La taille du maillage optimal est utilisée pour générer le maillage des autres géométries utilisées dans les études comparatives, tous les paramètres de contrôle hydrodynamique et thermique étant exprimés et présentés.

Chapitre III

Résultats et discussion

Partie 1

Effet de la géométrie sur la structure de l'écoulement

III.1. Résultats et discussion

Dans cette section, nous avons évalué l'influence des paramètres géométriques sur l'amélioration de l'efficacité thermique et l'écoulement d'un fluide dans un mélangeur statique de type Kenics (KMS). Pour ce faire, nous avons modifié la conception du mélangeur en apportant des changements à l'élément hélicoïdal. Dans la première configuration (Cas N°1), une ouverture vide prenant la forme de l'élément a été ajoutée le long de celui-ci, tandis que les deuxième (Cas N°2), troisième (Cas N°3) et quatrième configurations (Cas N°4) comportent respectivement deux, trois et quatre ouvertures successives. Ces modifications pour améliorer l'efficacité du mélange et à réduire les pertes de pression en favorisant une meilleure répartition du flux et en augmentant les interactions entre les différentes parties du fluide. Le fluide utilisé pour ces simulations est un fluide newtonien, caractérisé par une viscosité de 0,004 Pa·s et une masse volumique de 998 kg/m³.

III.1.2. Effet de la configuration géométrique sur la performance de mélange

La figure III.3.1 présente les configurations géométriques utilisées. L'objectif est de comparer l'effet d'une géométrie modifiée sur l'amélioration des performances thermiques. Cette modification a pour objectif de réduire les pertes de pression par rapport à la géométrie standard du mélangeur statique de type Kenics. Pour atteindre cet objectif, nous avons également étudié l'impact du nombre de Reynolds, du nombre de Nusselt, du flux thermique, ainsi que du coefficient d'échange thermique h .

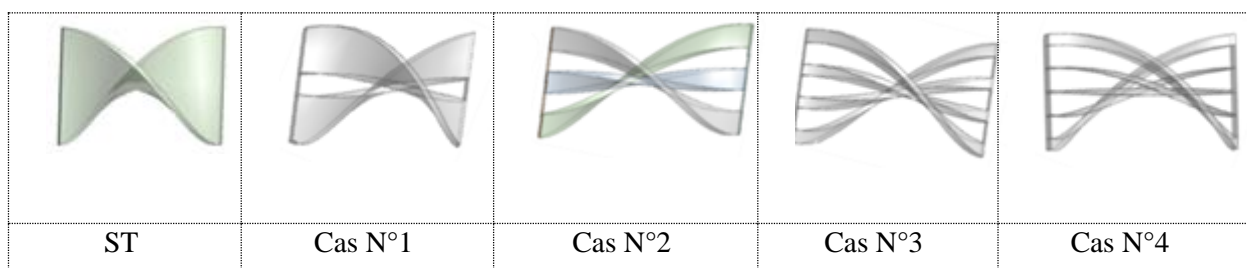


Figure III.3.1: Forme des différents éléments hélicoïdaux des différents mélangeurs statiques étudiés.

III.1.2.1. Effet du nombre de Reynolds

Les figures III.3.2 jusqu'à III.3.11 illustrent l'effet du nombre de Reynolds en régime laminaire, avec des valeurs de $Re = 10, 30$ et 50 , sur la structure de l'écoulement pour la configuration standard ainsi que pour les autres configurations étudiées (Cas N°1, Cas N°2, Cas N°3 et Cas N°4). On observe, dans toutes les figures et pour toutes les configurations géométriques, la formation de quatre zones d'écoulement intense dans la section de sortie de mélangeur et à la sortie du mélangeur statique, dans milieu de mélangeur. Cela s'explique par le fait que l'élément hélicoïdal divise le flux d'écoulement, réduisant ainsi la section de passage du fluide et générant une intensité plus élevée dans ces zones. Ces quatre zones favorisent un mélange plus efficace en augmentant la turbulence locale, ce qui homogénéise davantage le fluide. Par ailleurs, plus le nombre de Reynolds augmente, plus l'intensité de l'écoulement s'accroît également.

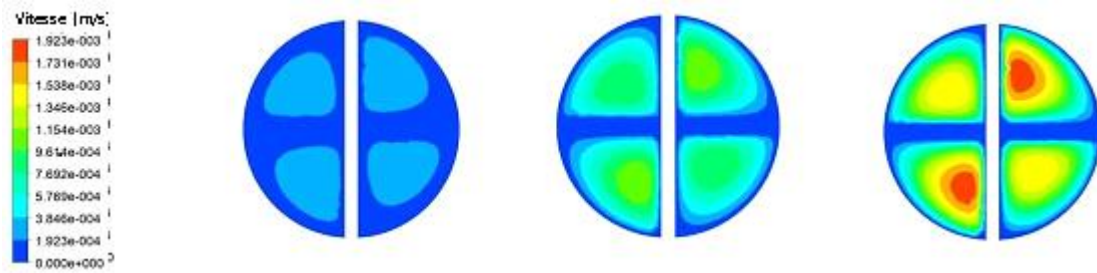


Figure III.3.2: Champs de vitesse pour le cas l'origine dans la section de sortie de mélangeur, (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$.

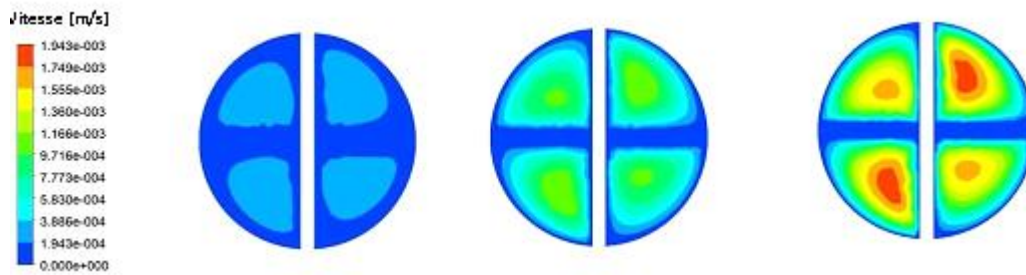


Figure III.3.3: Champs de vitesse pour le cas N°1 dans la section de sortie de mélangeur, (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$.

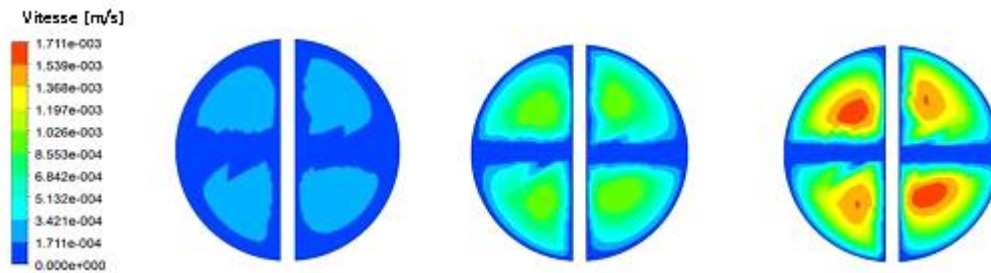


Figure III.3.4 : Champs de vitesse pour le cas N°2 dans la section de sortie de mélangeur, (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$.

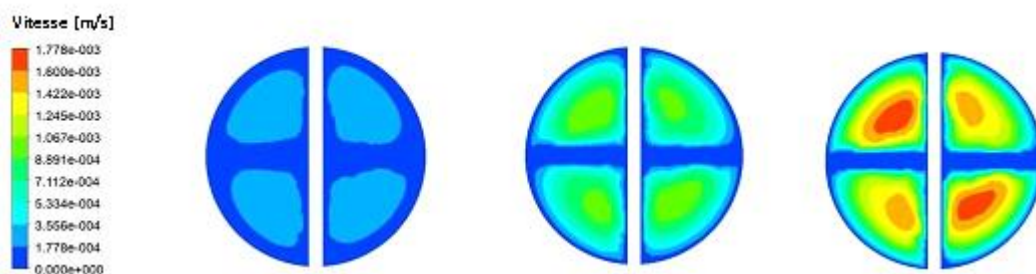


Figure III.3.5: Champs de vitesse pour le cas N°3 dans la section de sortie de mélangeur (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$.

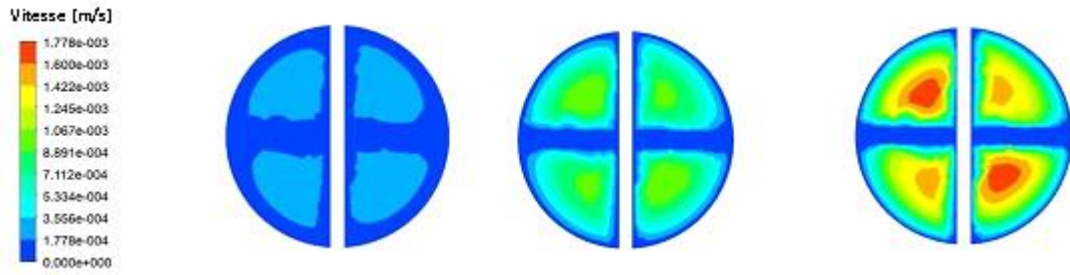


Figure III.3.6: Champs de vitesse pour le cas N°4 dans la section de sortie de mélangeur, (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$.

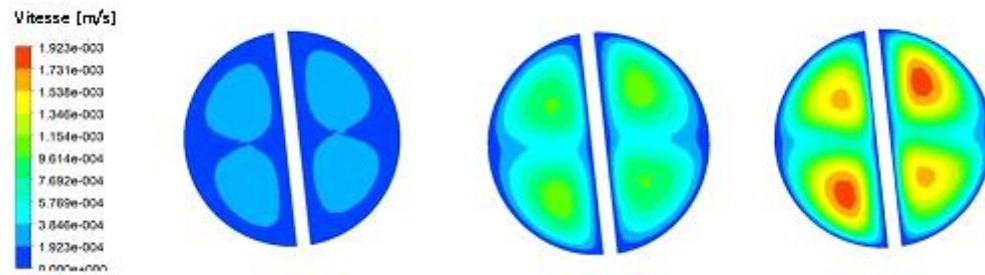


Figure III.3.7: Champs de vitesse pour le cas standard dans milieu de mélangeur, (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$

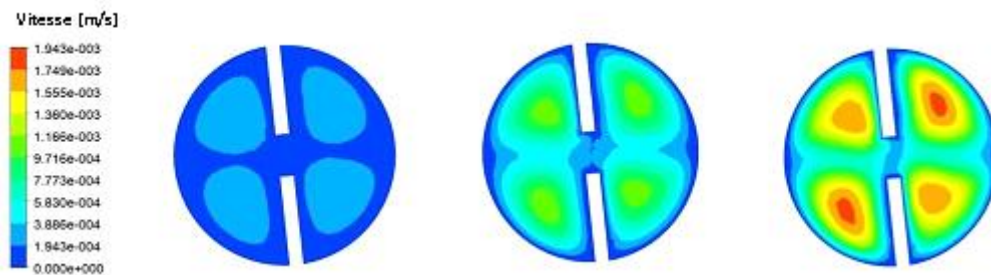


Figure III.3.8: Champs de vitesse pour le cas N°1 dans milieu de mélangeur, (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$

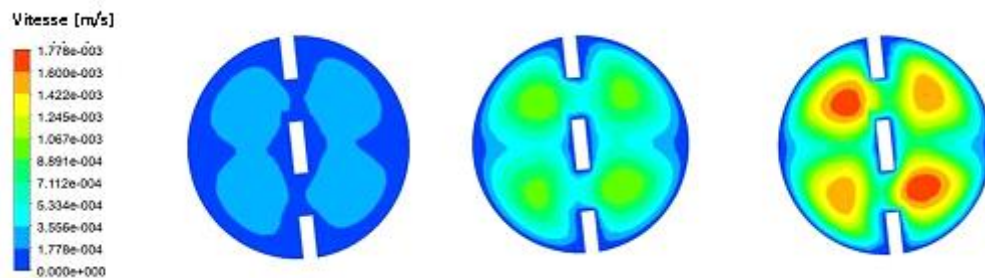


Figure III.3.9: Champs de vitesse pour le cas N°2 dans milieu de mélangeur, (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$

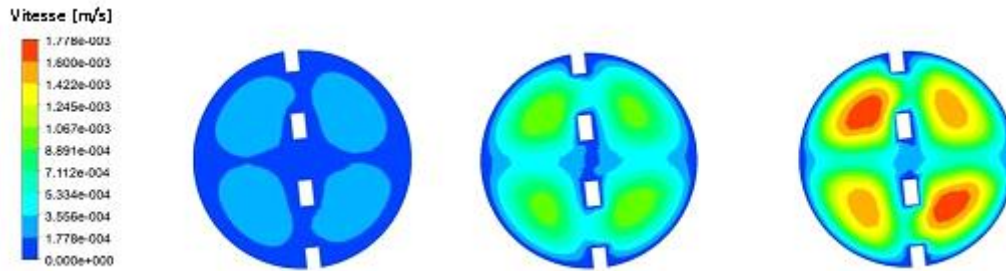


Figure III.3.10: Champs de vitesse pour le Cas N°3 dans milieu de mélangeur, (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$

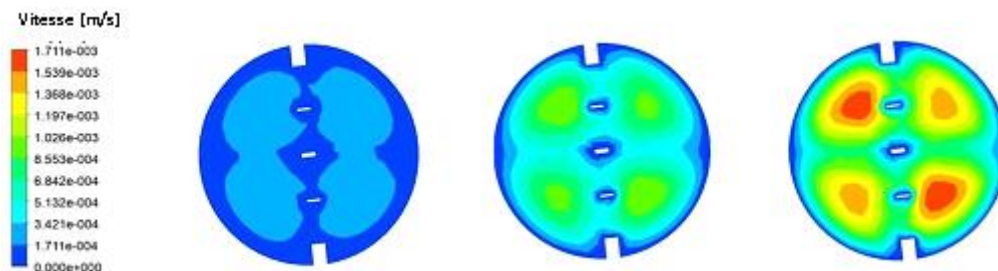


Figure III.3.11: Champs de vitesse pour le cas N°4 dans milieu de mélangeur, (a) $Re = 10$, (b) $Re = 30$, et (c) $Re = 50$

III.1.3. Vitesse tangentielle

Les figures III.12 et 13 illustrent les vitesses tangentielles pour la configuration standard ainsi que pour les cas N°2 et N°4 a dans la section de la sortie Il est observé que, pour toutes les configurations, la vitesse tangentielle diminue à mesure que le nombre de Reynolds (Re) augmente. Ce phénomène peut s'expliquer par le fait que la composante axiale de la vitesse devient de plus en plus dominante avec l'augmentation de Re .

En effet, à des valeurs plus Élevées de Re , le fluide est principalement dirigé dans le sens de l'écoulement axial, ce qui réduit l'influence des vitesses tangentielles qui sont liées aux perturbations locales générées par la géométrie hélicoïdale.

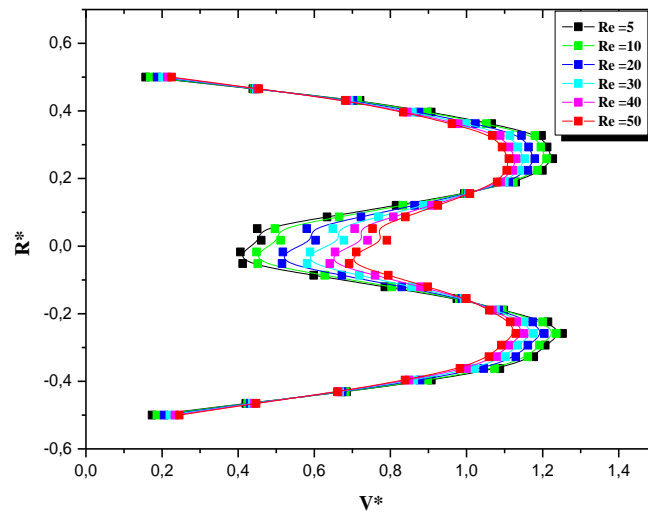


Figure III.3.12: Vitesse tangentielle pour la géométrie standard dans la section de sortie.

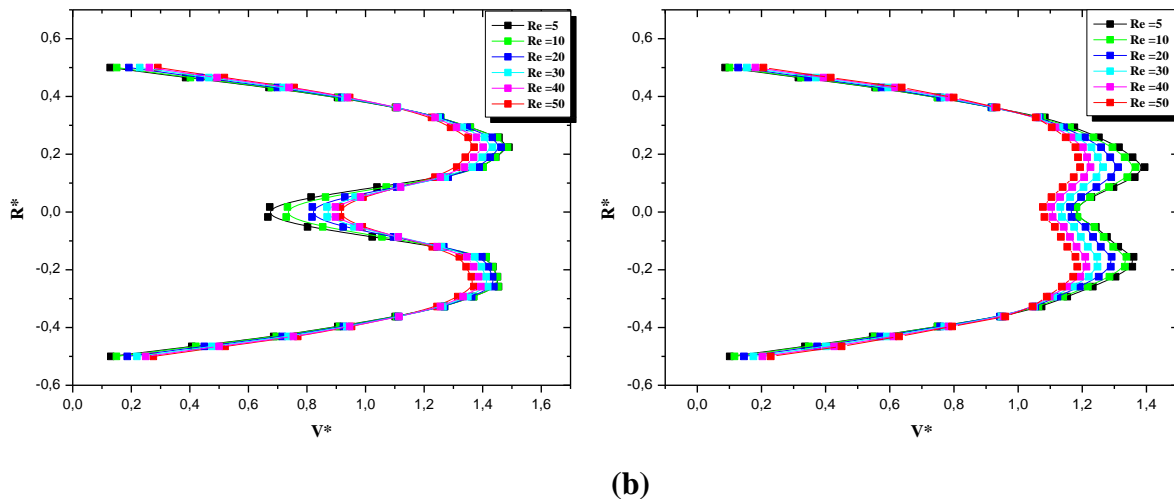


Figure III.3.13: Vitesse tangentielle pour différentes valeurs du nombre de Reynolds dans la section de sortie. (a) cas n° 2, et (b) cas n° 4.

Les figures III.3. 14 et III.3. 15 illustrent les vitesses axiales dans pour différentes configurations géométriques du mélangeurs statiques étudiées. Nous observons que la géométrie standard génère la vitesse axiale maximale comparativement aux autres configurations. Cette performance s'explique par la surface de l'élément hélicoïdal, qui crée une intensité de flux plus importante lorsque sa Conception est pleine. De plus, la présence de pics de vitesses axiales, à la fois positifs et négatifs, indique la formation de zones de recirculation dans les mélangeurs statiques. Ces recirculations jouent un rôle important en améliorant la qualité du mélange du fluide.

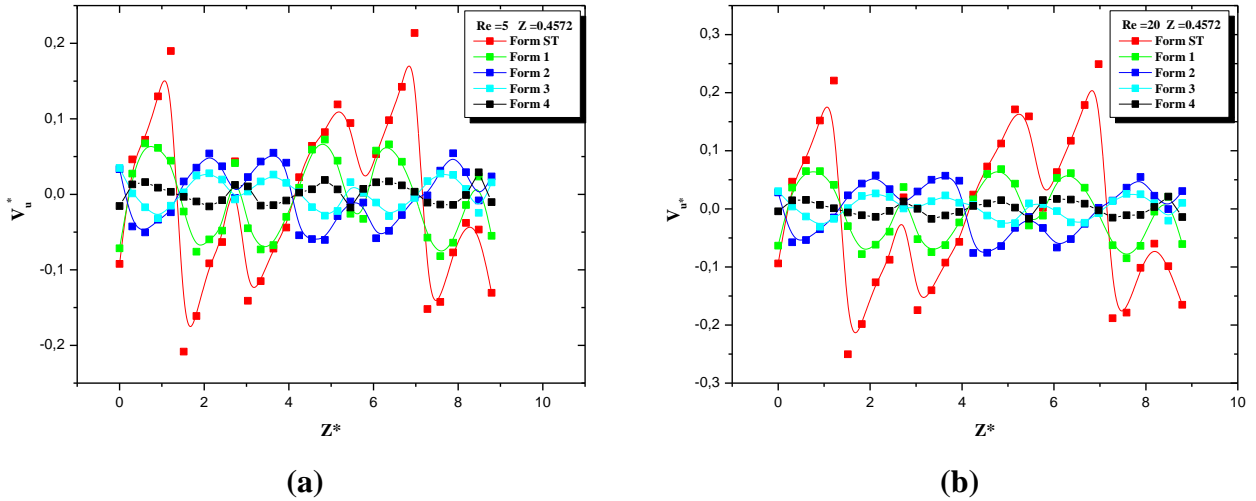


Figure III.3.14 : Vitesse axiale pour les géométries originales et modifiées dans milieu de mélangeur (a) Re = 5, et (b) Re = 20.

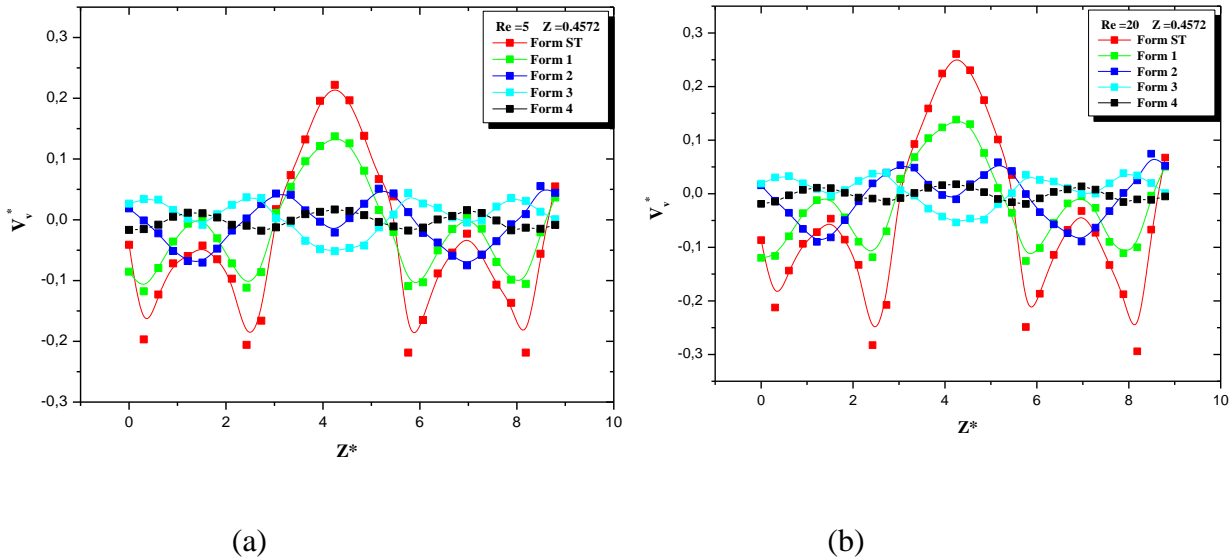


Figure III.3.15: Vitesse tangentielle pour les géométries originales et modifiées aux mailleaux à (Z = dans milieu de mélangeur) (a) Re = 5, et (b) Re = 20.

III.1.4. Perte de charge

La pression d'écoulement représente en effet l'énergie cinétique du fluide à une section donnée. Comme nous savons qu'il peut y avoir des vitesses différentes à l'autre point d'une section transversale, chaque point de la section transversale aura donc une pression de vitesse différente. Ainsi, la pression de vitesse totale d'une section transversale doit être la moyenne surfacique des pressions de vitesse en tous les points, qui peuvent être différentes pour les différentes sections transversales.

La formule suivante relie le facteur de perte de charge pour un fluide incompressible et

$$\text{isotherme : } \Delta P = \frac{2f\rho U^2}{D} L \quad \text{(III.2)}$$

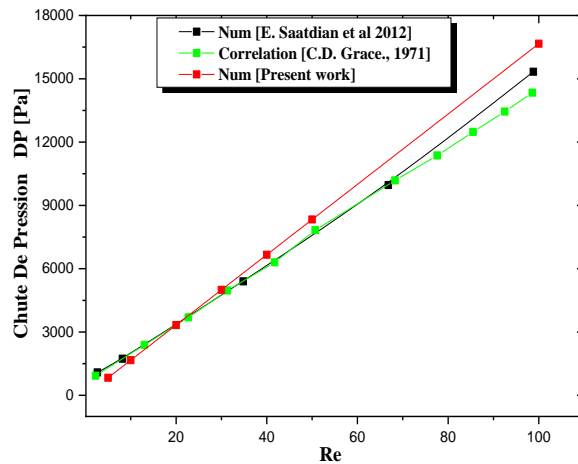


Figure III.3.16: Chute de pression pour différentes valeurs de Re

Les résultats obtenus concernant la chute de pression dans les différents cas étudiés, ainsi que pour la géométrie standard, sont présentés dans la figure III.3.17. Nous observons que, dans tous les cas, les pertes de pression augmentent de manière linéaire avec l'augmentation du nombre de Reynolds. Par ailleurs, les pertes de pression sont les plus faibles dans le cas de la géométrie standard. Dans le cas 4, les pertes augmentent de 13 % par rapport à la géométrie standard pour un nombre de Reynolds égale à 100. Cela s'explique par le fait que, lorsque le fluide traverse les vides présents dans chaque élément (perforations), il subit des changements brusques de direction et de vitesse, ce qui génère des tourbillons supplémentaires et accroît la dissipation d'énergie dans le système.

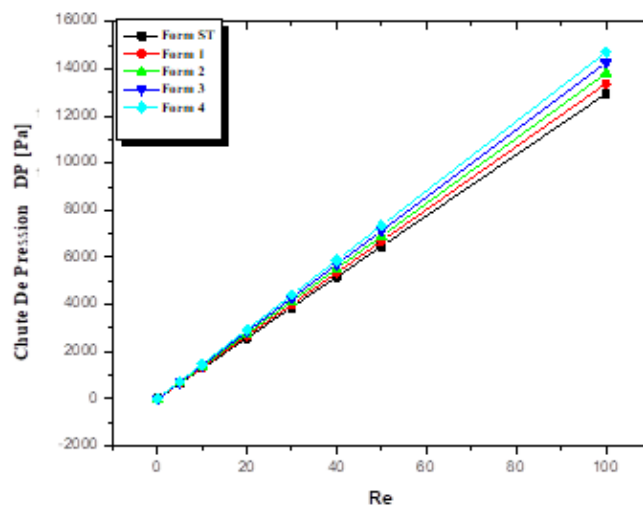


Figure III.3.17: Chute de pression pour différents cas

III.1.5. Effet de la géométrie sur les Performance thermique

La figure III.3.18 (a) et (b) présente respectivement le nombre de Nusselt et le coefficient de performance pour différentes configurations géométriques.

Le nombre de Nusselt est calculé en utilisant le rapport entre le coefficient de transfert de chaleur par convection (h) à travers la conduite et la conductivité thermique (k) du fluide dans les mêmes conditions.

$$Nu = \frac{hD}{k} \quad (\text{III.2})$$

Où h le coefficient de transfert de chaleur par convection, h , est exprimé par l'équation suivante :

$$h = m C_p (T_0 - T_i) \quad (\text{III.3})$$

Toutefois, le rapport de performance est calculé en utilisant le nombre de Nusselt et le facteur de frottement pour un tube plat et un tube muni d'un insert comme suit :

$$Cop = \frac{Nu}{f^{(1/3)}} \quad (\text{III.4})$$

Concernant la figure III.4.18 (a), on observe que les configurations géométriques des mélangeurs statiques étudiées dans ce travail ont un effet positif sur l'amélioration du transfert thermique entre les parois du mélangeur statique et le fluide. D'autre part, la figure III.4.18 (b) montre que le cas N°4 est le meilleur choix parmi les autres configurations étudiées, offrant une performance thermique élevée. Dans ce cas, les éléments hélicoïdaux sont caractérisés par des perforations qui génèrent des écoulements secondaires et des turbulences locales lorsque le fluide traverse ces ouvertures. Ces turbulences intensifient les échanges thermiques en favorisant le mélange des couches de fluide à différentes Températures. En perturbant les couches limites thermiques près des parois, les perforations permettent un meilleur contact entre les zones de fluide chaud et froid, ce qui améliore le transfert de chaleur. Ainsi, le coefficient de performance thermique augmente de 58 % pour la configuration géométrique N° 4 par rapport à la géométrie standard.

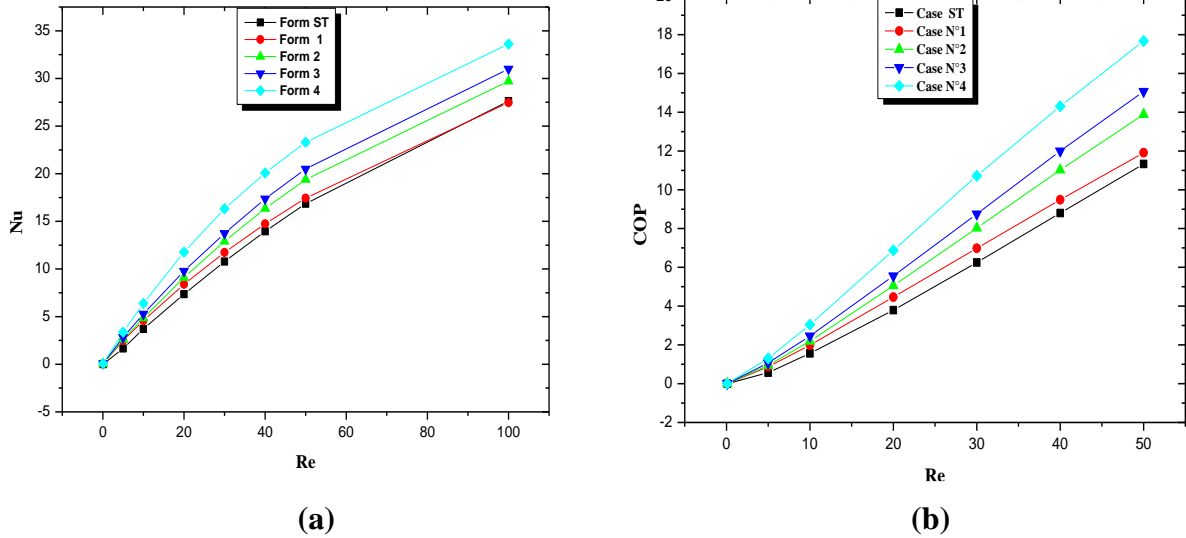


Figure III.3.18 : (a) Nombre de Nusselt pour différentes cas (b) Coefficient de performance pour différentes cas.

La figure III.3.19 (a) et (b) présente respectivement le flux thermique et le coefficient d'échange thermique pour différentes configurations. Nous constatons que, pour les cas N°1, 2, 3 et 4, le coefficient d'échange thermique et le flux thermique sont plus élevés comparativement à la géométrie standard. Cela s'explique par le fait que, dans un mélangeur statique hélicoïdal contenant des perforations dans les éléments, des zones se forment où la vitesse et la température du fluide varient plus rapidement que dans un écoulement laminaire non perturbé. Ces gradients favorisent une diffusion thermique plus efficace, ce qui améliore considérablement le transfert de chaleur. En revanche, dans un mélangeur statique standard, les gradients de température sont plus faibles, car le fluide s'écoule de manière plus régulière, ce qui limite la capacité de transfert thermique.

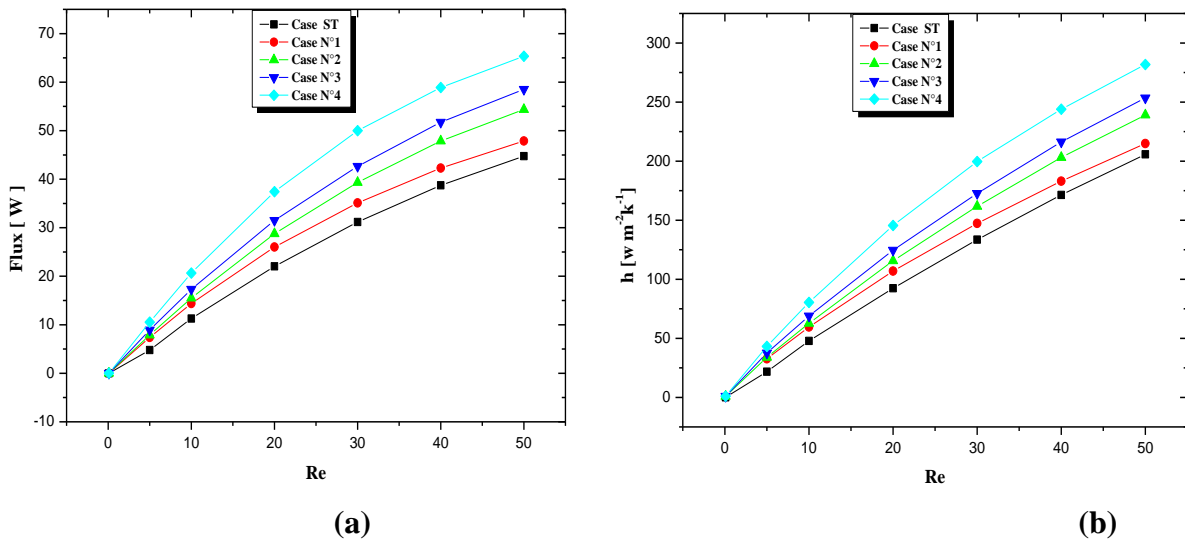


Figure III.3.19 : Flux thermiques pour différentes valeurs de Re (a) coefficient d'échange global pour différentes configurations géométriques (b).

III.1.6. Conclusion

Pour caractériser l'écoulement et les performances de mélange dans les mélangeurs statiques, il est essentiel de prendre en compte plusieurs paramètres, tels que les pertes de charge, la qualité du mélange et l'impact de la géométrie. Dans cette perspective, nous avons élaboré différentes configurations géométriques utilisant des éléments hélicoïdaux perforés afin d'examiner leur influence sur le transfert thermique dans un mélangeur statique de type KENICS. Nous avons également analysé l'effet du nombre de Reynolds et de la forme géométrique des éléments hélicoïdaux fixés à l'intérieur du mélangeur.

Il convient de noter que les cinq mélangeurs statiques n'affichent pas des performances équivalentes. La configuration géométrique N° 4 se démarque par un meilleur taux de transfert thermique, atteignant une augmentation de 18 %, tout en présentant une perte de pression de 13 % par rapport à la géométrie standard.

Partie 2

Effet de la géométrie sur le Mélange des Fluides Newtoniens

III.2. Introduction

Dans cette partie du travail, des simulations numériques sont réalisées pour étudier l'effet de la géométrie que nous avons déjà présentée précédemment et du nombre de Reynolds sur l'efficacité du mélange et le transfert thermique de deux fluides newtoniens similaires, mais avec des températures d'entrée différentes ($n = 1$, $T_1 = 400$ k pour l'entrée du premier fluide et $T_2 = 450$ k pour l'entrée du second fluide). La température de la paroi du mélangeur reste constante à -6.5°C dans toutes les simulations, La figure suivante III.4.1 présente un schéma descriptif de l'entrée de ces fluides dans le mélangeur statique.

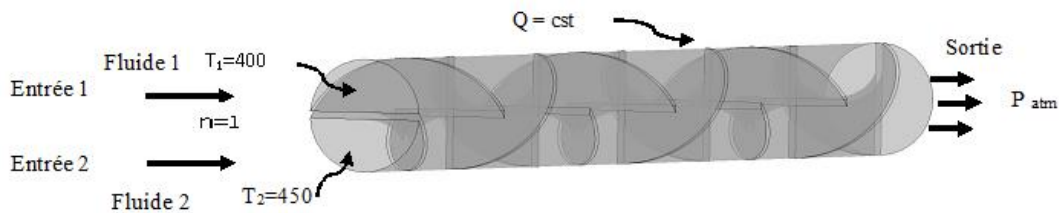


Figure III.4.1 : Présente un schéma descriptif de l'entrée de ces fluides dans le mélangeur statique.

III.2.1. Effet de la géométrie du mélangeur statique sur le mélange de fluides

Pour évaluer les performances de mélange des différents mélangeurs statiques (Cas N°1, Cas N°2, Cas N°3, Cas N°4), nous présentons les résultats en termes d'indice de mélange et de fraction massique.

La Figure III.4.2 illustre l'évolution de l'indice de mélange dans le plan de sortie en fonction du nombre de Reynolds, variant entre 10 et 80 pour les géométries Considérées.0

À partir des résultats obtenus, toutes les géométries affichent des performances de mélange élevées, allant de 87,1 % à 99,9 % (figure III.4.4). D'après ces résultats, il

apparaît que le meilleur mélangeur, en termes de performance de mélange, est le mélangeur Cas N°4. À des nombres de Reynolds très bas (de 10 à 30), sa performance varie entre 93,6 % et 95,7 %. Bien que cela ne soit pas le niveau le plus élevé, nous ne pouvons pas conclure qu'il est inefficace. En revanche, à des nombres de Reynolds bas (de 50 à 80), il démontre une performance de mélange remarquable, atteignant jusqu'à 99,9 % comme il est montré sur la figure III.4.5.

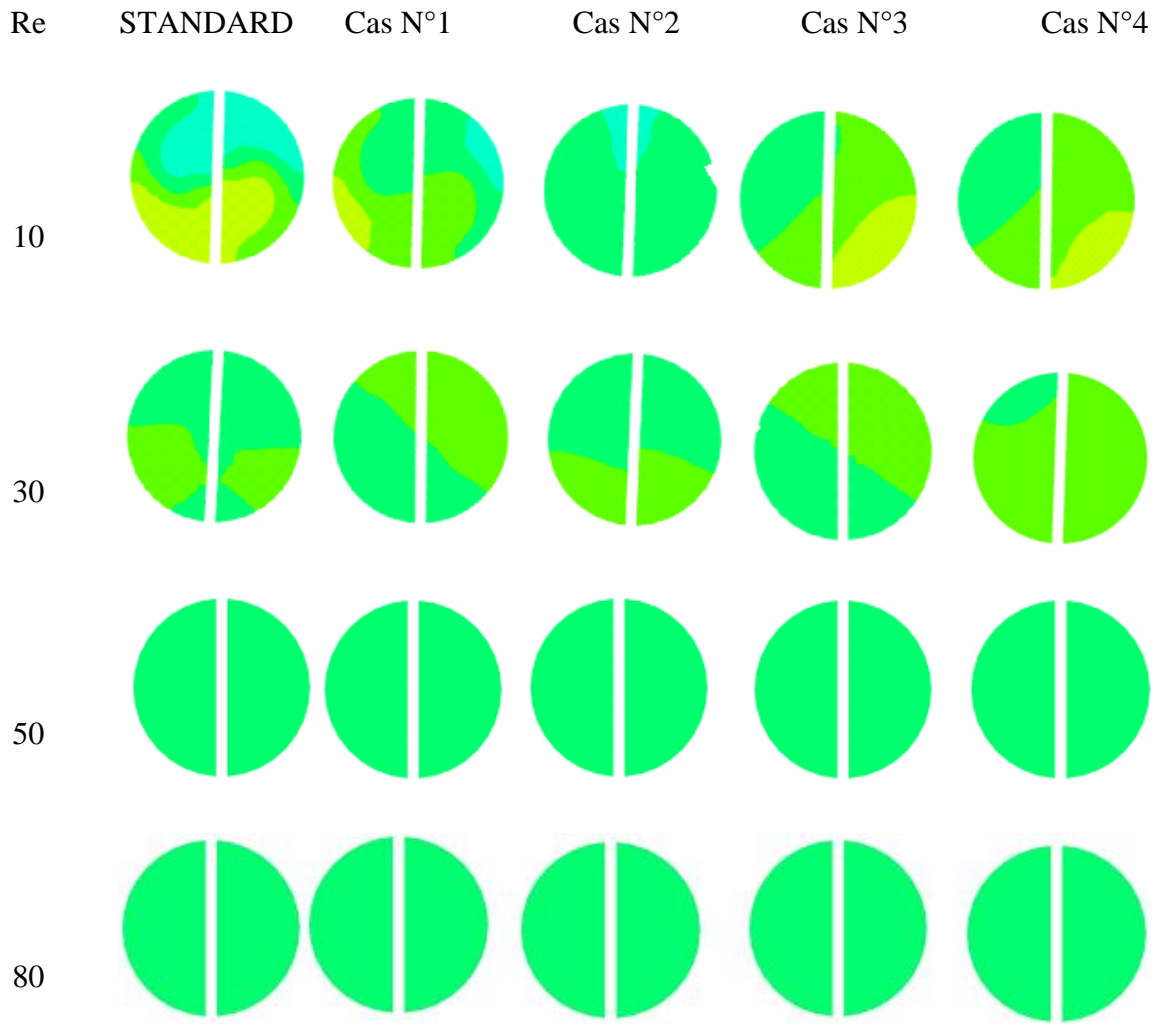


Figure III.4.2: Distribution de fraction massique à la sortie pour différents mélangeurs

La figure III.4.3 illustre la variation de la fraction massique pour le cas N°4 à travers différents plans horizontaux ($Z^* = 2, 4, 8, \text{ et } 14$) et pour des valeurs de Reynolds allant de 0,2 à 80. On observe que la qualité du mélange augmente avec l'accroissement du nombre de Reynolds, atteignant un maximum à $Re = 80$. Dans ce cas, l'augmentation du nombre de Reynolds favorise une amélioration du mélange et, par conséquent, une augmentation de la fraction massique.

Cette amélioration s'explique par plusieurs facteurs liés aux caractéristiques de l'écoulement et à l'influence de la géométrie du mélangeur. En effet, même en régime laminaire, une Augmentation du nombre de Reynolds entraîne des forces de cisaillement plus élevées dans le fluide, intensifiant ainsi le contact entre les différentes couches de fluide. Cela permet une meilleure distribution des composants dans l'écoulement, contribuant à une homogénéisation plus efficace.

De plus, lorsque le fluide est contraint de suivre les perturbations géométriques, comme les éléments hélicoïdaux perforés du mélangeur Kenics, il suivie des chemins plus complexes. Cette configuration améliore le mélange transversal (à la fois radial et axial), augmentant ainsi la fraction massique et la qualité du mélange global.

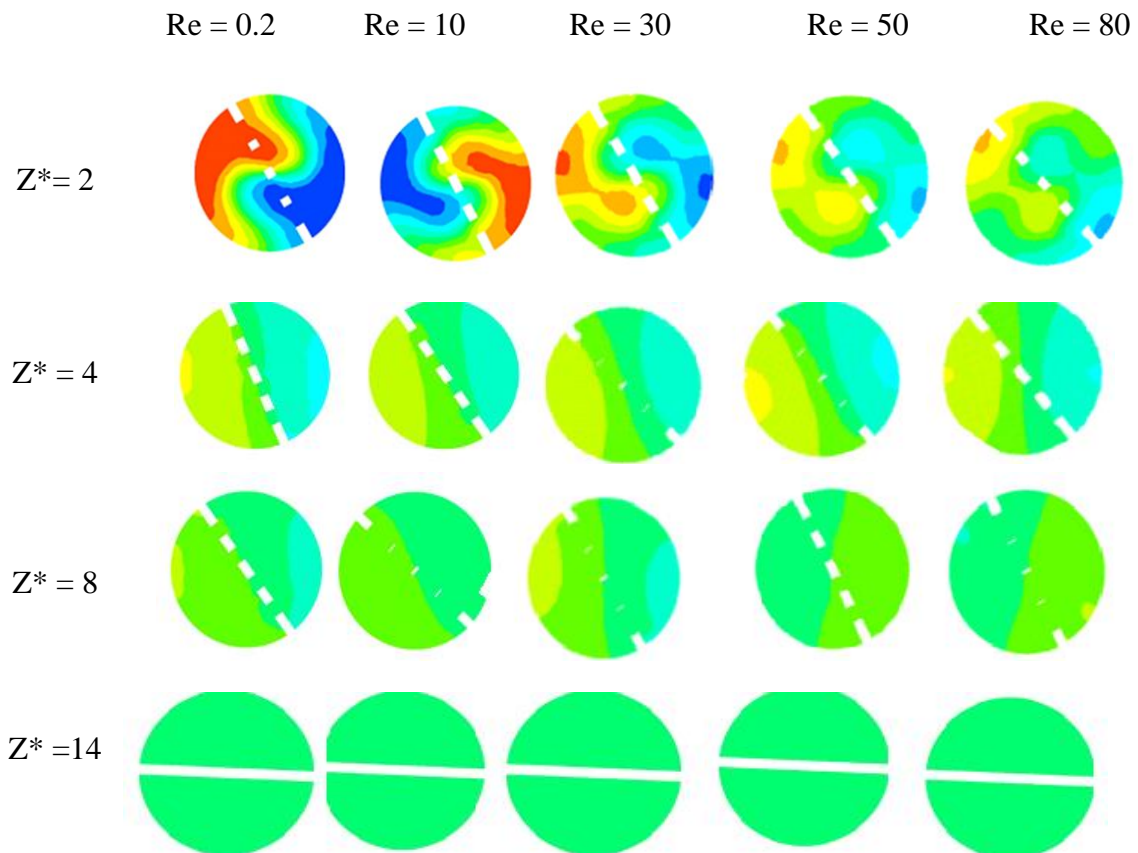


Figure III.4. 3 : Distribution de fraction massique dans différents plans à différentes valeurs de nombre de Reynolds pour la géométrie (Cas N°4)

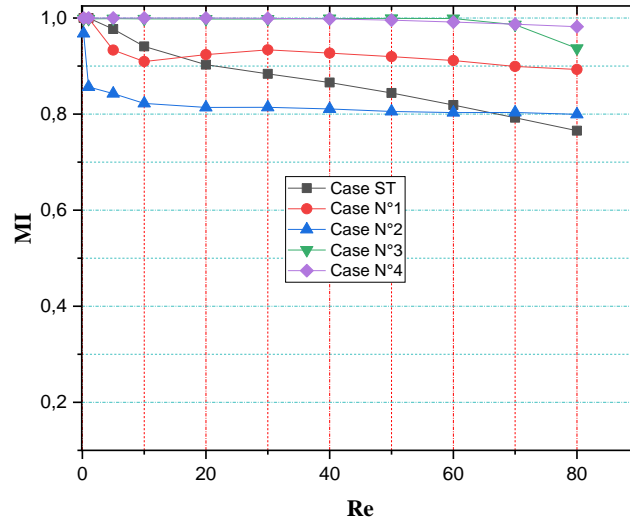


Figure III.4.4: Variation de l'indice de mélange à la sortie avec des nombres de Reynolds pour toutes les géométries

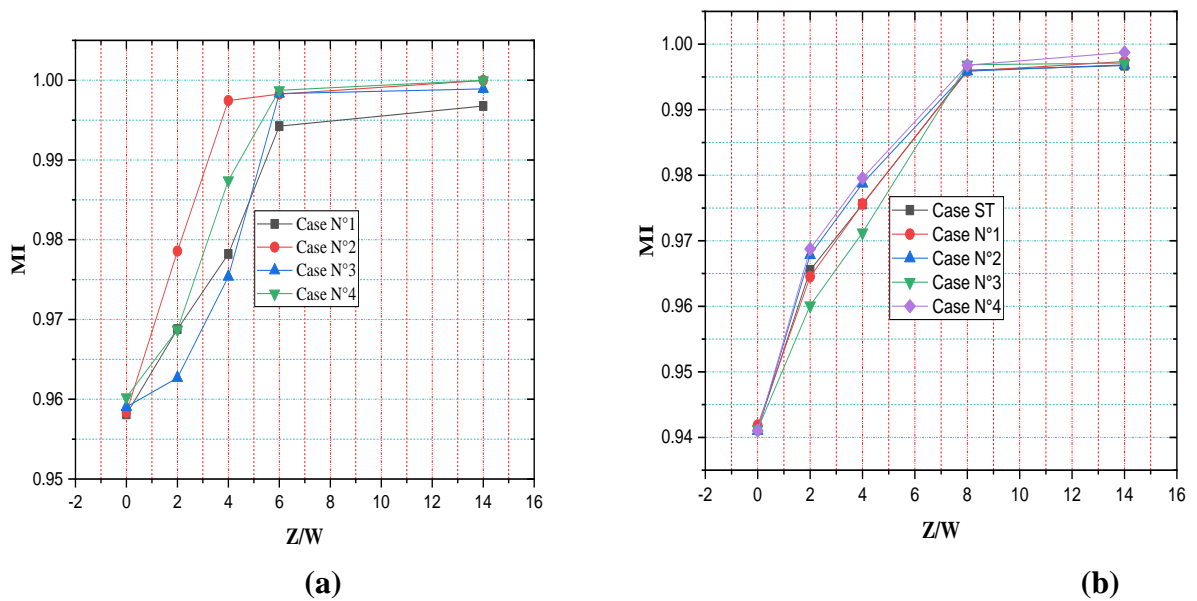


Figure III.4.5 : Evolution de l'indice de mélange au plan de sortie de la toux géométriques (a = Re 50 ; b = 80) Différentes en fonction de la distance parcourue.

III.2.1.2. Structure de l'écoulement dans les différentes configurations géométriques étudiées

Les figures III.4.6 et III.4.7 illustrent les vitesses axiales pour différentes valeurs de Reynolds (Re) et pour diverses configurations géométriques à $X = 0,5$. Nous observons que la vitesse axiale augmente proportionnellement avec l'augmentation du nombre de Reynolds, ce qui confirme la relation directe entre la vitesse d'écoulement et l'augmentation de Re dans les différentes configurations étudiées.

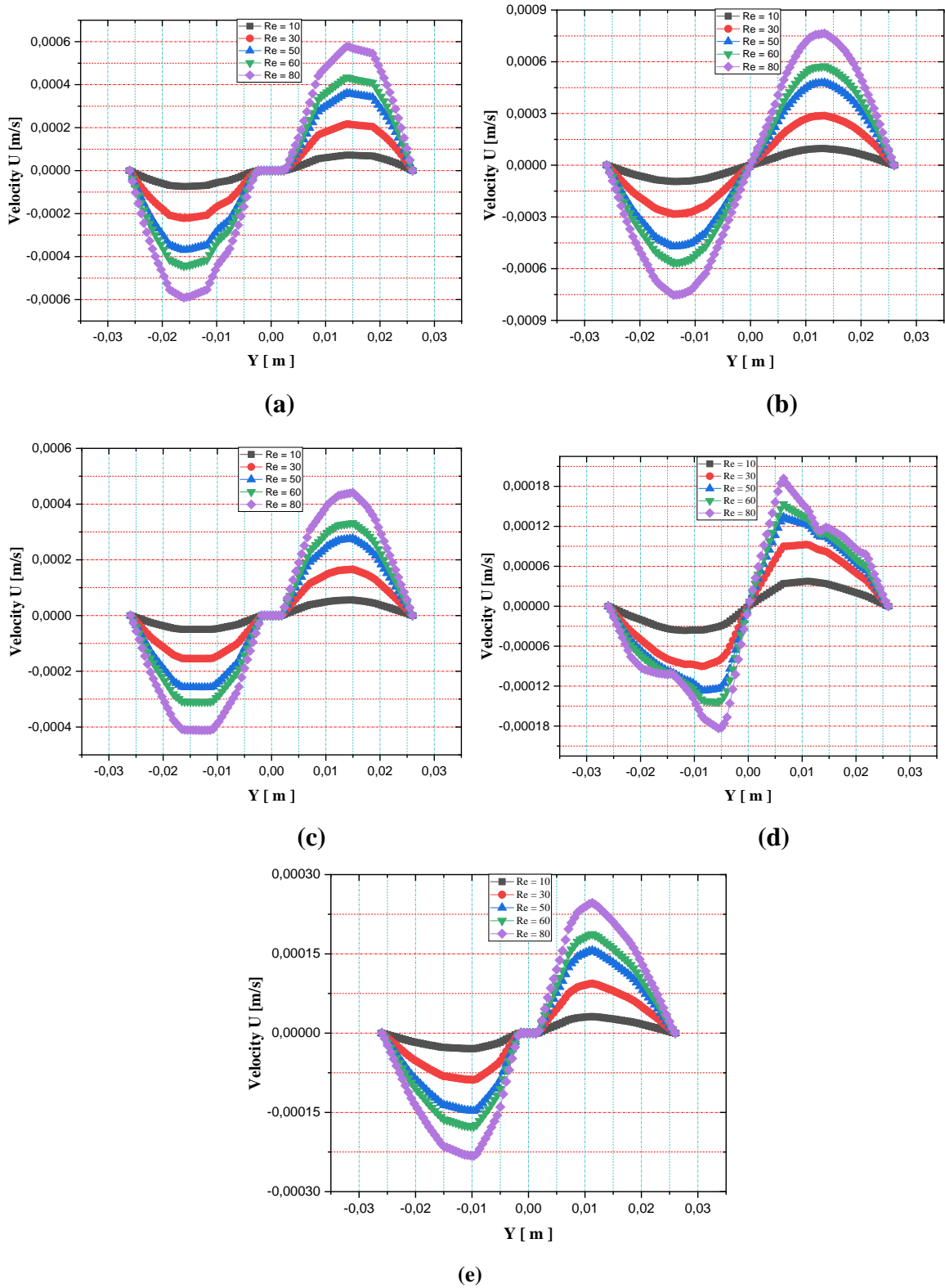


Figure III.4.6: Vitesse axiales pour différentes Re (a = géométrie Standard, b = Cas N° 1, c = Cas N° 2, d = Cas N° 3, e = Cas N° 4)

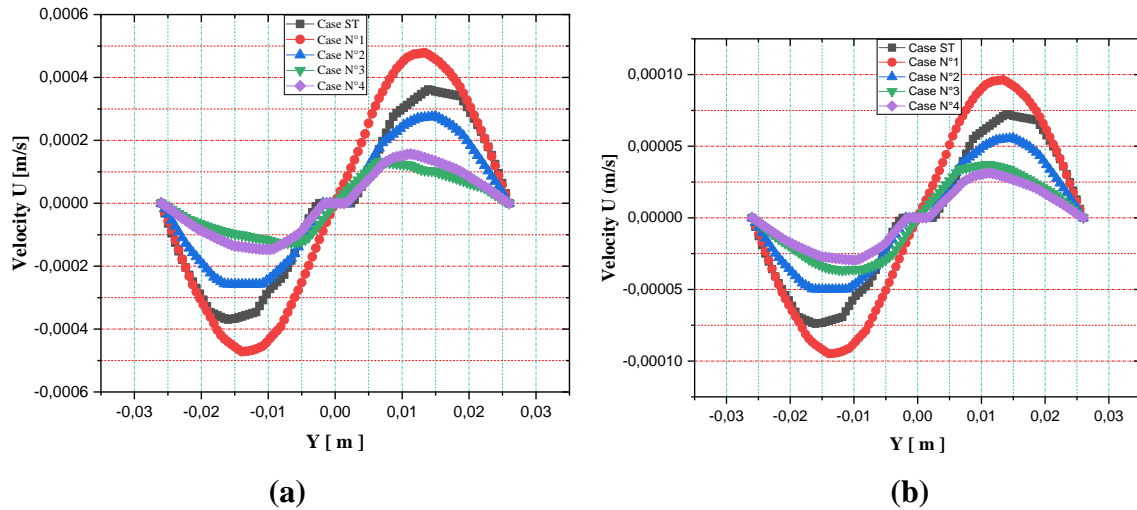
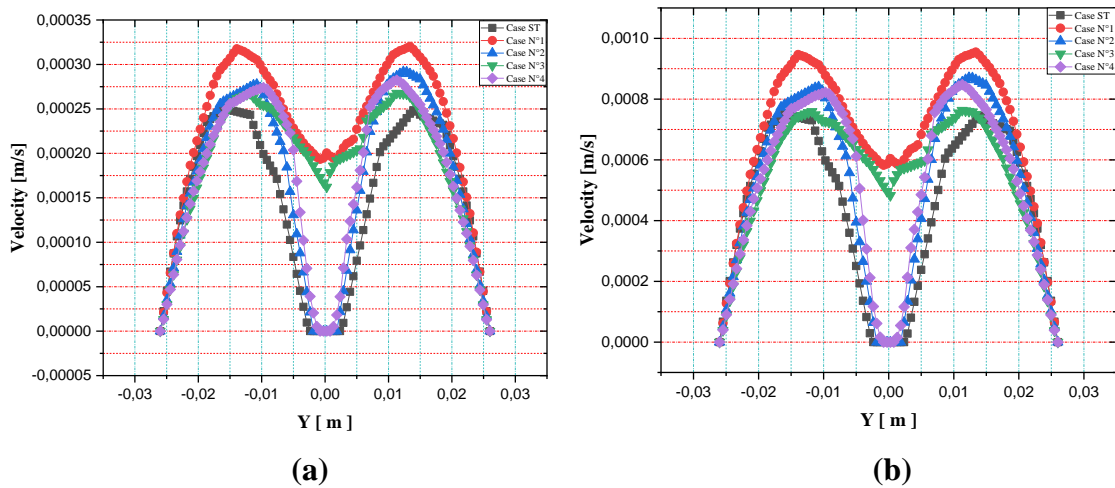


Figure III.4.7: Vitesse axiales pour différentes Cas (a : Re= 50, b : Re = 10)

La figure III.4.8 présente les vitesses tangentielles pour différents cas avec des valeurs de Re variant de 10 à 80. Nous observons que le cas N°1 génère une intensité élevée de l'écoulement tangentiel par rapport à la géométrie standard et aux autres configurations. Cela s'explique par le fait que, dans cette configuration, les frottements entre les parois et le fluide sont réduits en raison des vides créés dans chaque élément hélicoïdal du mélangeur statique, ce qui diminue les interactions entre le fluide et les parois.



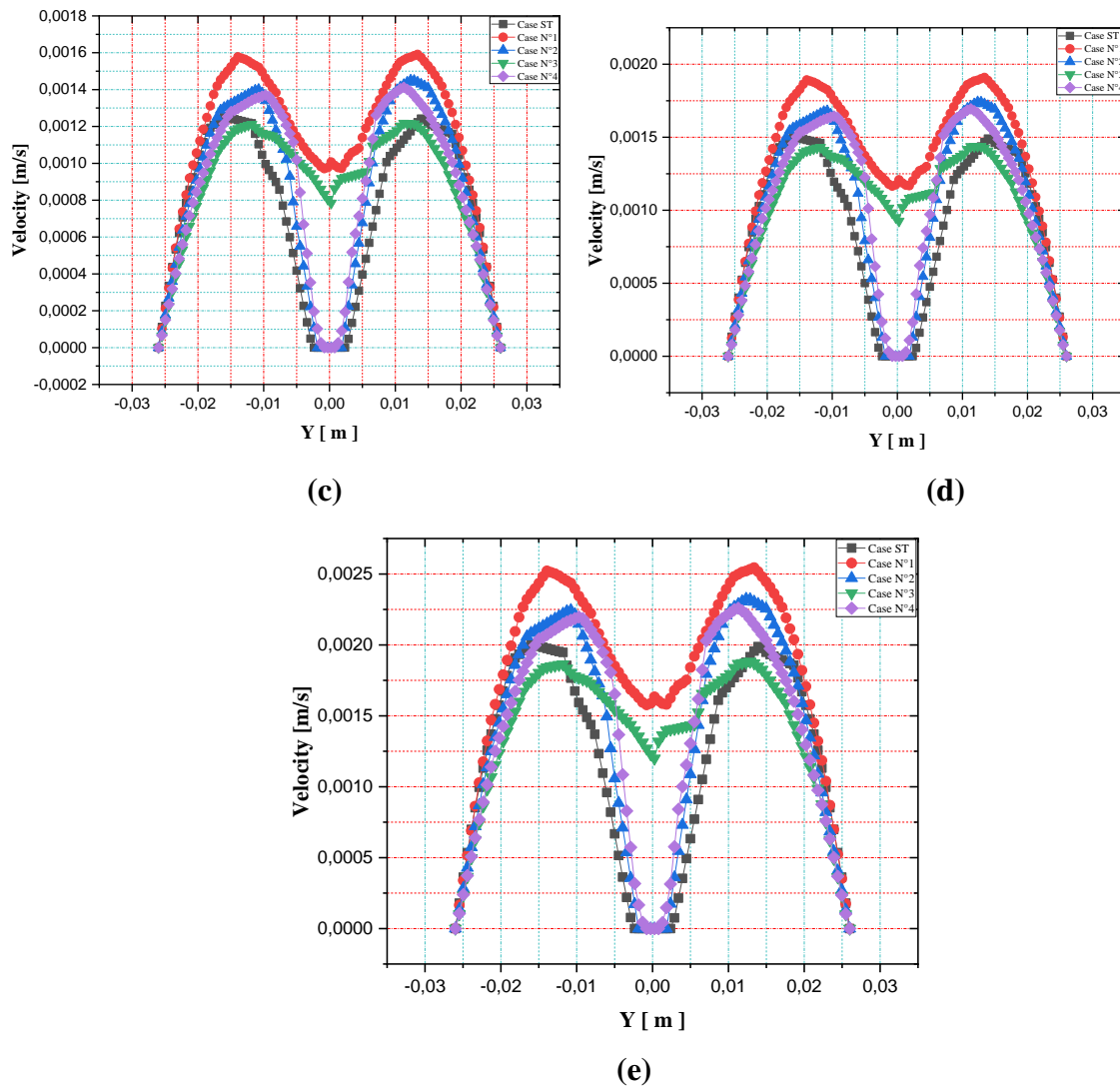


Figure III.4.8: Vitesse tangentielles pour différentes Cas ((a)Re= 10, (b)Re= 30, (c)Re= 50, (d)Re= 60, (e)Re = 80)

III.2.2. Effet de la géométrie sur l'efficacité thermique

III.2.2.1. Indice de mélange thermique

La figure III.5.9 présente l'indice de mélange thermique pour deux fluides similaires avec un indice de $n = 1$, introduits dans le mélangeur à des températures différentes : l'un de ces fluides entre à $T = 400$ K et l'autre à $T = 450$ K, et ce pour diverses valeurs du nombre de Reynolds. Nous avons mené une analyse thermique détaillée du mélangeur sélectionné, accompagnée d'une comparaison visant à évaluer son efficacité. Dans cette étude, l'indice de mélange thermique (TMI) a été utilisé comme critère d'évaluation des performances thermiques des différents mélangeurs.

Les figures montrent l'évolution des performances thermiques en fonction du nombre de Reynolds, avec des valeurs allant de 96 % à 99 %. D'après ces résultats, il est évident que le

mélangeur le plus performant est le Cas N°4.

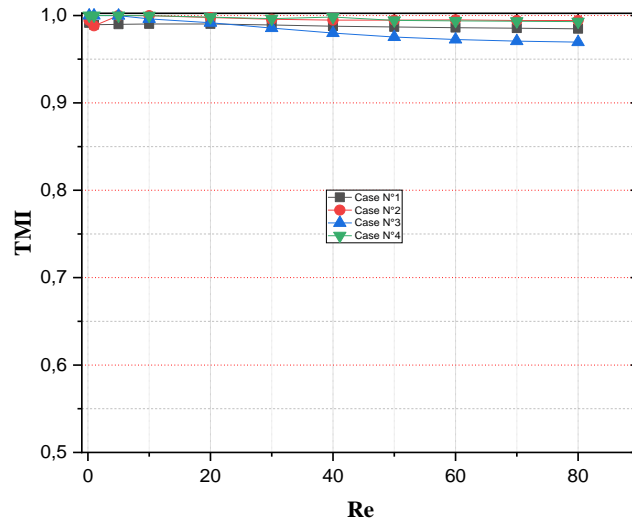
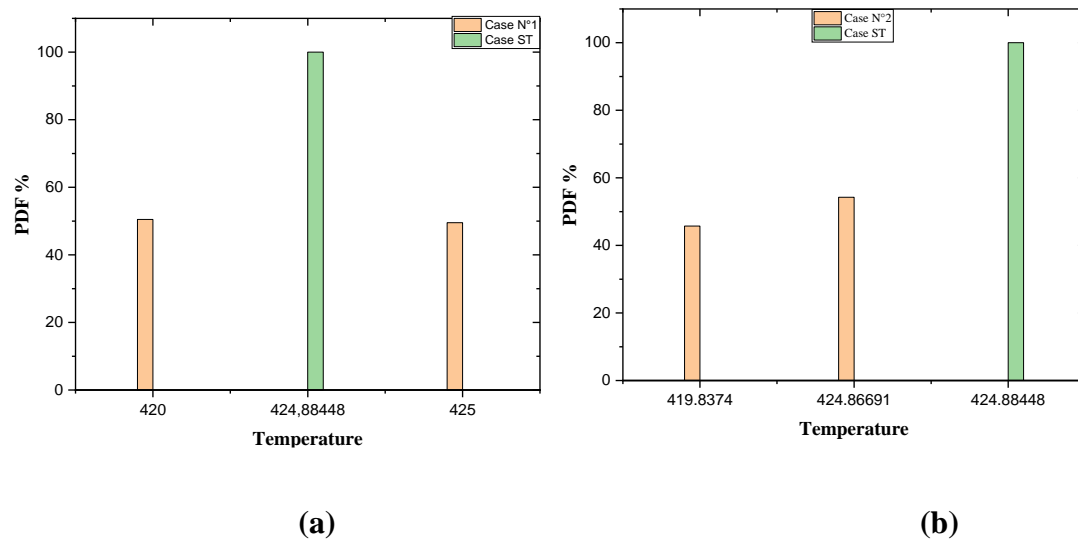


Figure III.4.9: Indice thermique de mélange pour différentes Re

III.2.2.2. Fonction de densité de probabilité

Les histogrammes de la fonction de densité de probabilité présentés dans la figure III.4.10 montrent que, pour les configurations Cas N°1, Cas N°2 et Cas N°3, les valeurs de température à la sortie sont dispersées entre deux niveaux, ce qui indique une bonne qualité de mélange. En revanche, un mélange thermique homogène des fluides est obtenu grâce au mélangeur Cas N°4.



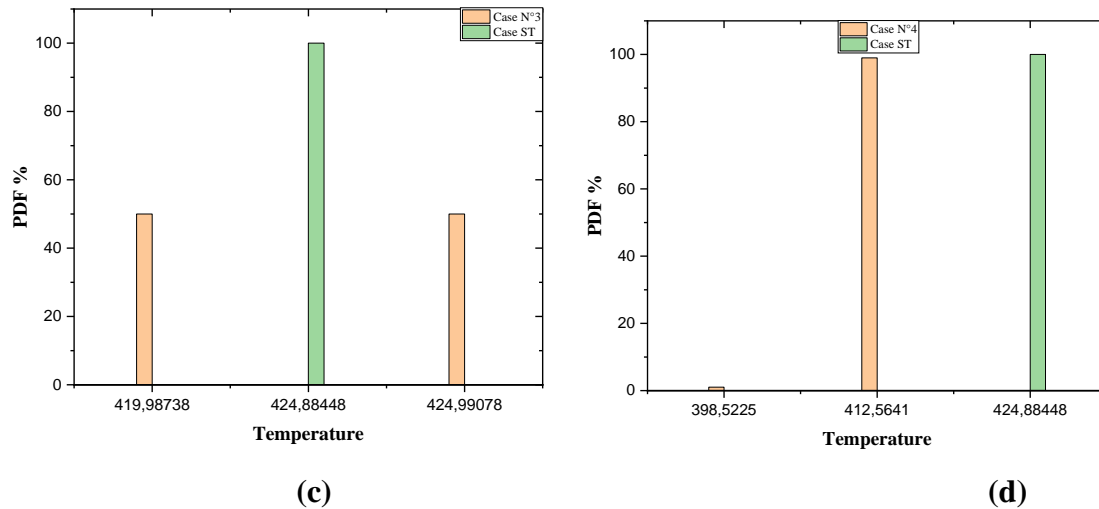


Figure III.4.10 : La fonction de densité de probabilité PDF (%) à la sortie des géométries considérées (a = Cas N° 1, b = Cas N° 2, c = Cas N° 3, d = Cas N° 4) avec la géométrie standard pour (Re = 80)

III.2.3. Conclusion

Dans cette partie du travail, nous avons étudié l'effet de la géométrie sur l'homogénéité thermique. Nous avons simulé plusieurs cas d'entrée de deux fluides similaires, l'un chaud à $T = 450 \text{ °K}$ et l'autre froid à $T = 266 \text{ °K}$, afin d'analyser l'impact de la géométrie sur l'efficacité du mélange thermique. Nous avons constaté que toutes les configurations atteignent l'objectif, mais que la configuration du Cas N°4 est le meilleur choix, atteignant un indice de mélange (IM) de 99 %.

Partie 3 :

Effet de la géométrie sur les performances de mélange des fluides non Newtonien

III.3. Introduction

Dans cette section, nous avons étudié l'effet de la géométrie d'un mélangeur statique sur l'amélioration de la qualité du mélange et l'efficacité de l'échange thermique entre deux fluides non newtoniens similaires, avec des indices structuraux de $n = 0,49, 0,75$ et $0,93$, en régime laminaire. Chaque fluide pseudoplastique pénètre dans le mélangeur à des températures différentes : l'un à 450 K et l'autre à 400 K. De plus, nous avons supposé que la température de la paroi du mélangeur reste constante. La figure suivante III.5.1 présente un schéma descriptif de l'entrée de ces fluides dans le mélangeur statique.

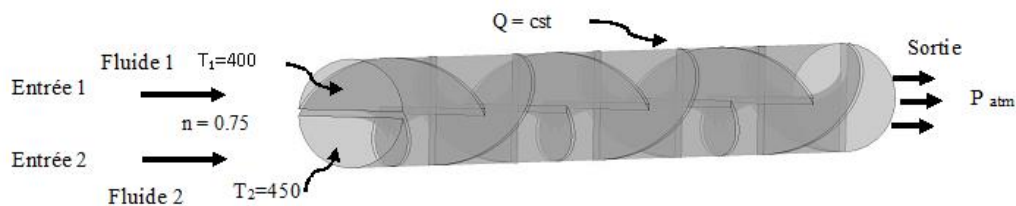


Figure III.5.1 : présente un schéma descriptif de l'entrée de ces fluides dans le mélangeur statique.

III.3.1. Performances de mélange

Effet du nombre de Reynolds et de l'indice de comportement sur le mécanisme, Le mélange chaotique a été analysé dans un mélangeur. Il montre les propriétés de réfraction de la masse, Dans les plans de chaque mélangeur dans différents nombres de Reynolds et différents indicateurs de comportement. Comme le montrent les Figure III.5.2 ; III.5.3; III.5.4, le fluide qui s'écoule se divise progressivement en plusieurs couches plus minces au fur et à mesure que l'écoulement se poursuit. Le mélange est nettement amélioré. Ainsi, un mélange homogène est obtenu au niveau de la sortie dans chaque mélangeur pour toutes les valeurs d'indice de mélange et quelle que soit la valeur du nombre de Reynolds qui indique l'efficacité de ce mélangeur.

III.3.2. Evolution de l'indice de mélange dans les mélangeurs

La figure III.5.2 présente la distribution de la fraction massique dans différents plans pour diverses configurations géométriques, à un nombre de Reynolds de 50. L'analyse des résultats montre que la géométrie du cas N°4 favorise une meilleure homogénéisation entre les deux fluides. Cette configuration semble optimiser le mélange en permettant une dispersion plus uniforme des fractions massiques dans le domaine de l'écoulement, contrairement aux autres géométries, où des zones de séparation ou des gradients de concentration restent marqués.

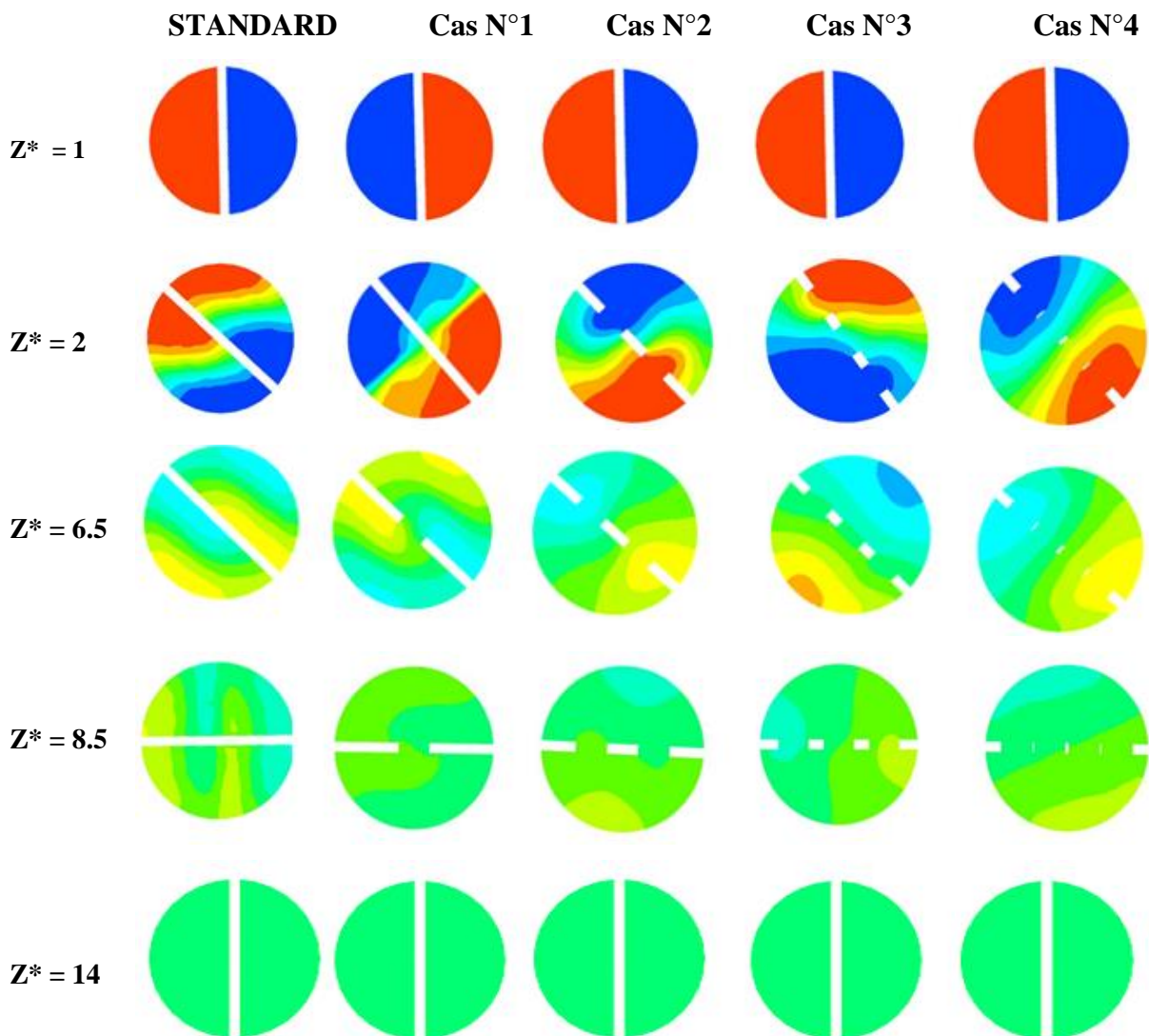


Figure III.5.2 : Distribution de fraction massique dans différents plans à différentes géométries de nombre de Reynolds = 50 $n = 75$.

La figure III.5.3 illustre la variation de l'indice de mélange pour différents cas, avec un nombre de Reynolds (Re) variant de 0.2 à 80 pour des fluides pseudoplastiques ($n = 0,49$, $n = 0,75$ et $n = 0,93$). On remarque que, lorsque l'indice structurel est proche de 1, l'efficacité du mélange augmente. En effet, dans le cas des fluides non newtoniens avec une indice structurelle $n=0.93$, la constance de la viscosité les rend plus sensibles aux mécanismes de mélange dans un mélangeur statique Kenics, favorisant une répartition uniforme du cisaillement. À l'inverse, la viscosité variable des fluides pseudoplastiques peut créer des zones de mélange inégal, réduisant l'homogénéité du mélange.

Par ailleurs, la configuration géométrique du cas N°4 semble offrir une meilleure homogénéisation.

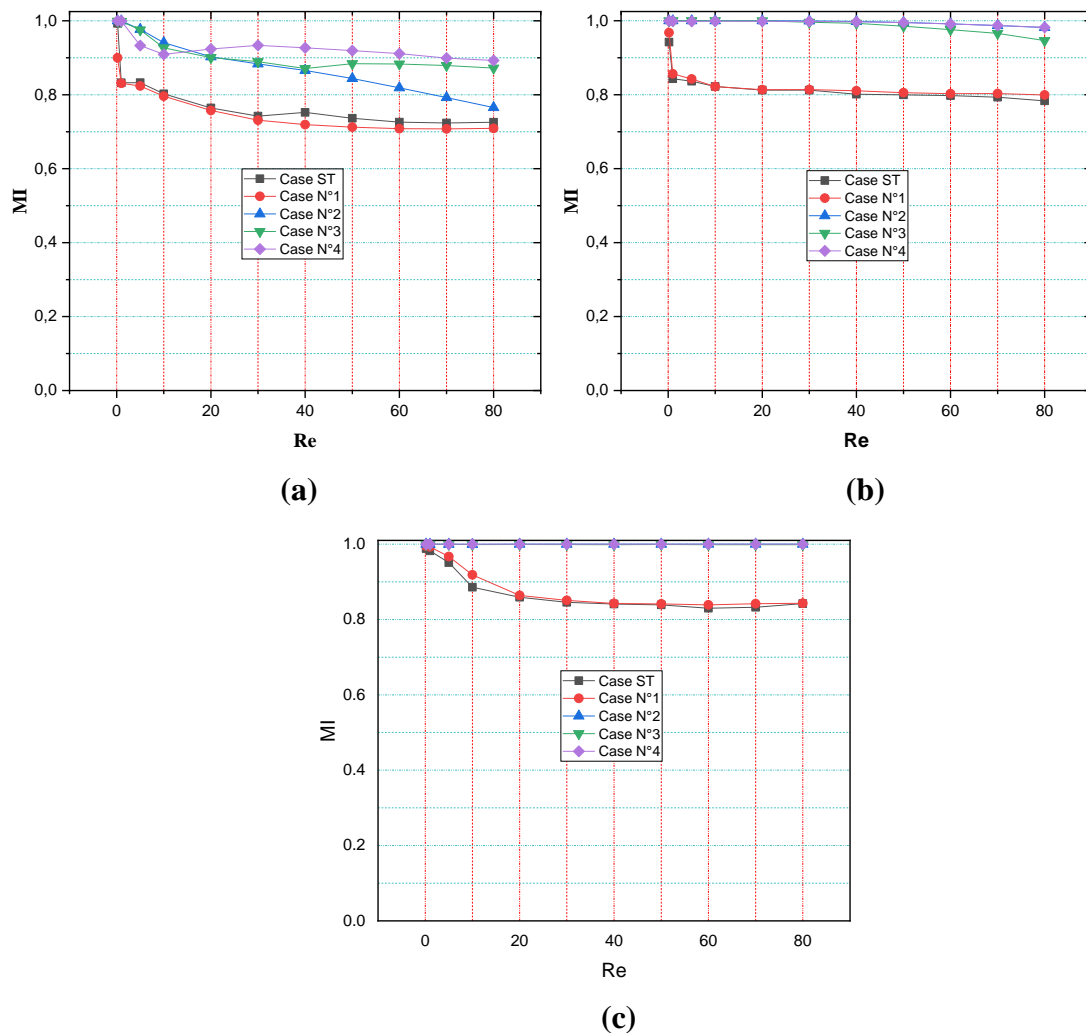


Figure III.5.3 : Variation de l'indice de mélange pour différents cas dans le plan à la sortie ((a) $n = 0.49$, (b) $n = 0.75$, (c) $n = 0.93$)

La figure III.5.4 présente l'évolution de l'indice de mélange en fonction de la position le long de la géométrie pour $Re = 80$ et pour les différentes configurations géométriques étudiées dans ce travail.

Les résultats montrent que la géométrie du cas N°4 donne une meilleure homogénéité des fluides par rapport aux autres cas étudiés, avec une efficacité optimale atteinte à $Z/W = 10$ pour un fluide non newtonien avec $n=0.93$. Pour les autres fluides, où $n=0.49$ et $n=0.75$, l'indice de mélange atteint sa valeur maximale de 0,99 à $Z/W = 12$ pour le cas N°4, tandis qu'il reste à 0,9 pour cette position dans les autres configurations.

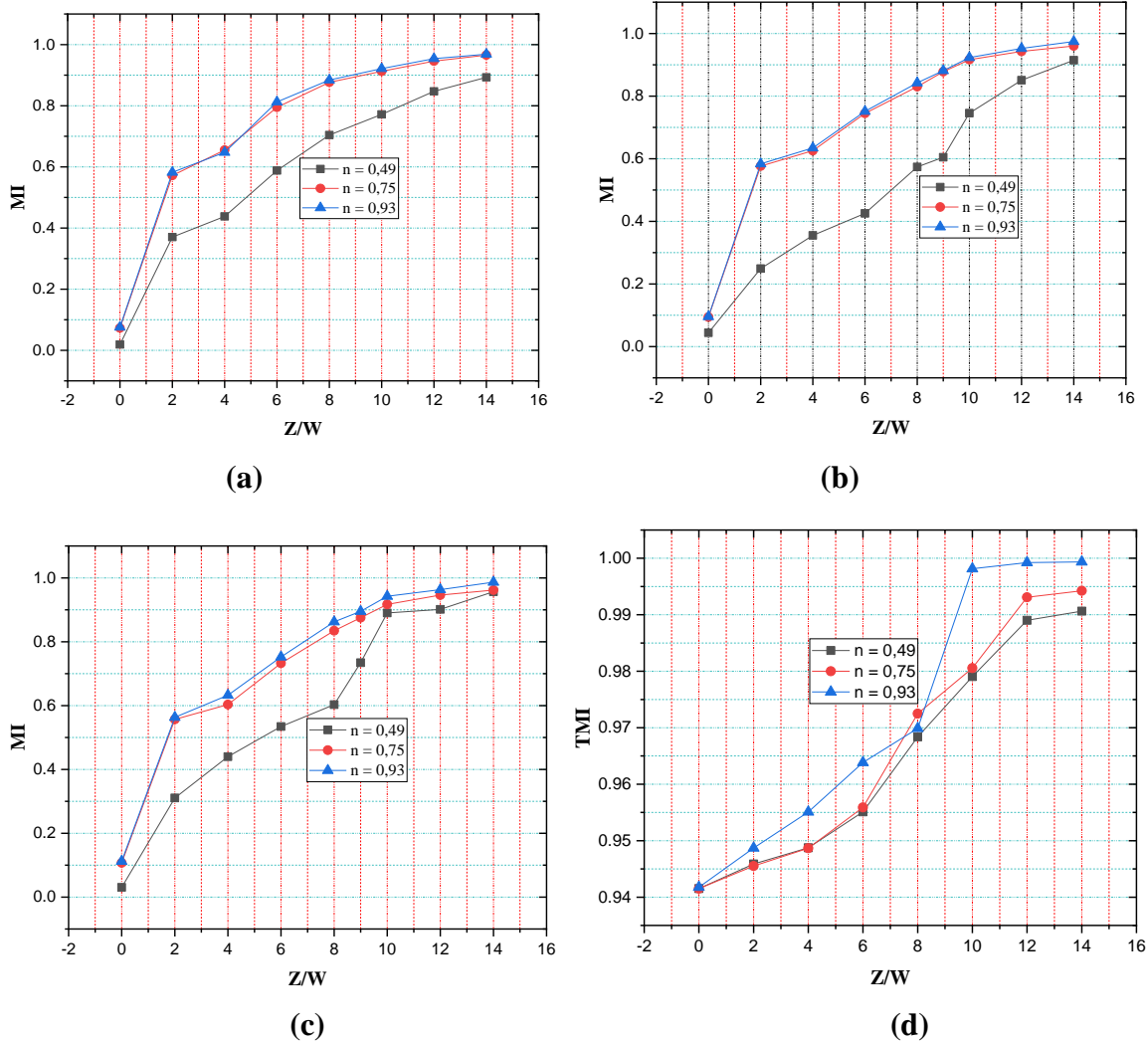


Figure III.5.4 : Évolution du degré de mélange en fonction de la position le long de la géométrie pour $Re = 80$ (a : Cas n°1, b : Cas n°2, c : Cas n°3, d : Cas n°4)

III.3.3. Evolution de l'indice de mélange thermique :

Les figures III.5.5 présentent le degré de mélange pour différentes configurations géométriques. Les valeurs de mélange thermique atteignent leurs valeurs maximales de TMI, quel que soit l'indice de comportement ou le nombre de Reynolds. La géométrie du cas N°4 c'est la configuration optimale, offrant une efficacité thermique supérieure par rapport aux autres cas.

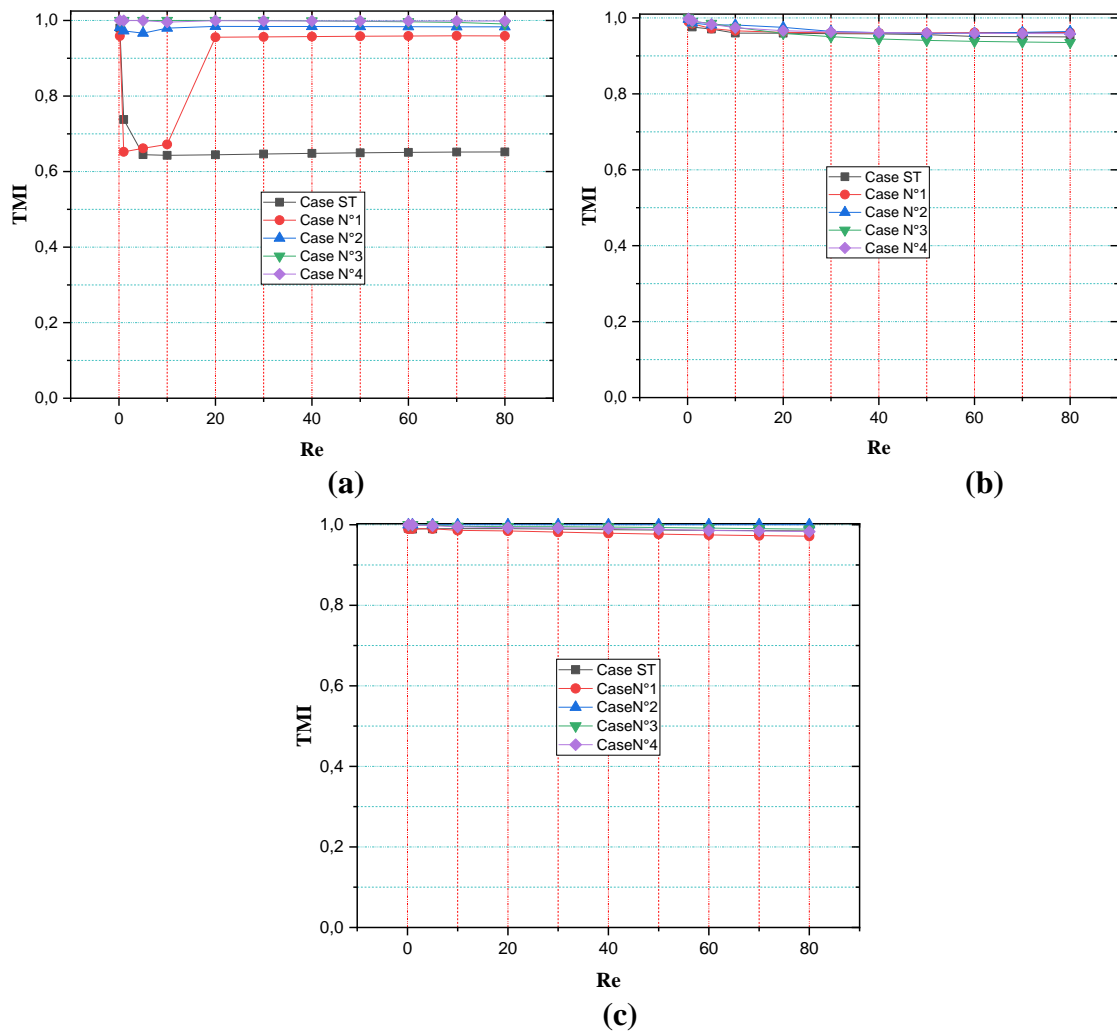


Figure III.5.5 : le degré de mélange thermique pour différents nombres de Reynolds ((a) $n = 49$, (b) $n = 0.75$, (c) $n = 0.93$)

Les figures III.5.6 a III.5.7 présentent les vitesses axiales pour différentes configurations géométriques. Les résultats montrent que la vitesse axiale augmente avec l'augmentation de Re. En effet, lorsque Re augmente, la résistance visqueuse diminue, permettant au fluide de se déplacer plus rapidement dans le sens axial. Par ailleurs, la forme hélicoïdale des éléments du mélangeur statique entraîne une accélération du fluide le long de l'axe principal.

Et On remarque que la vitesse axiale est maximale pour le cas N°1 et la géométrie standard, tandis que la vitesse axiale pour les autres cas est moins élevée. Cela s'explique par le fait que les modifications apportées aux géométries des cas N°2, N°3 et N°4 influencent le sens de circulation de l'écoulement, ce qui le rend le sens de l'écoulement des fluides mélangés tri directionnel. Ces configurations géométriques à un impact positif sur le mélange des fluides.

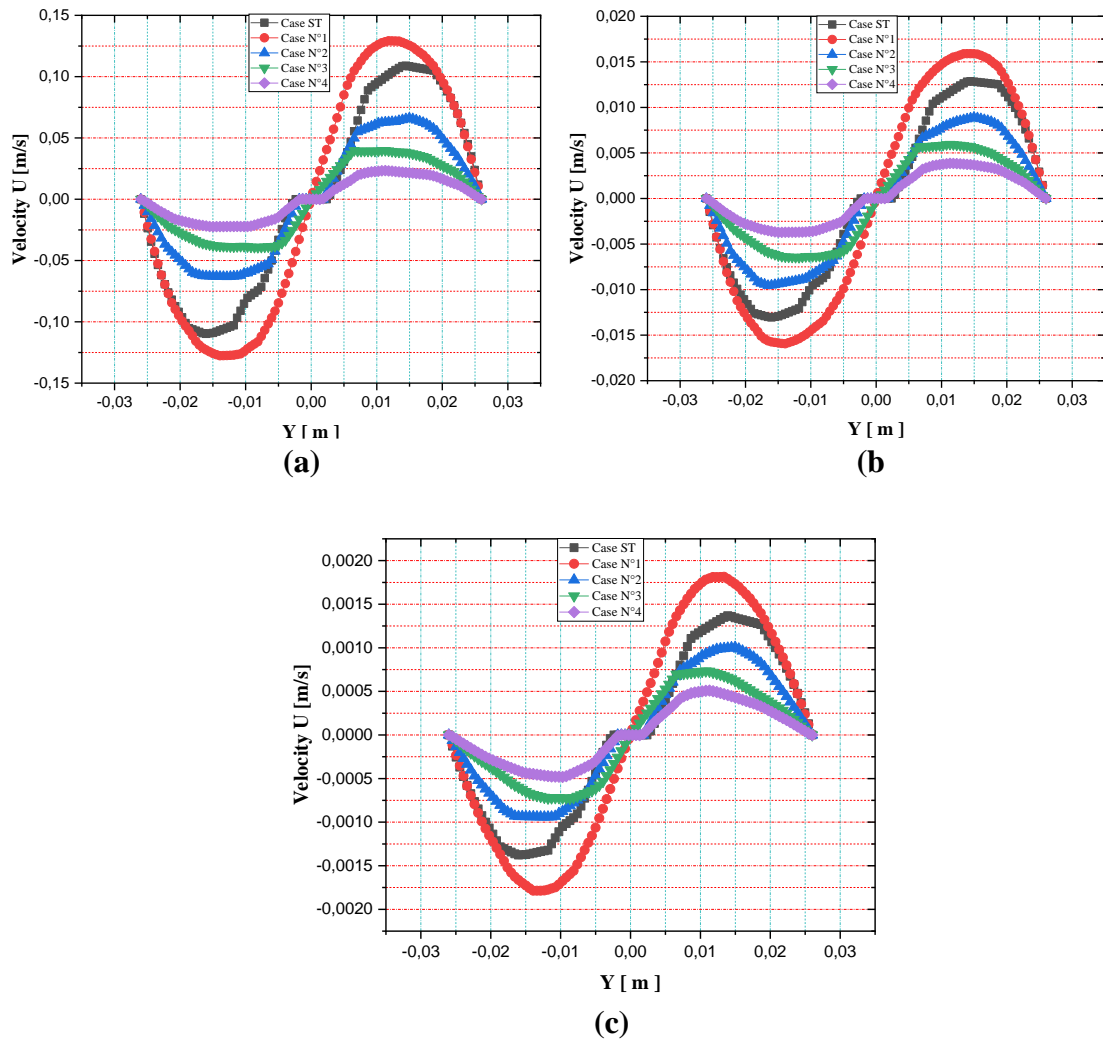


Figure III.5.6 : vitesses axiales pour différents cas, $Re = 50$ ((a) $n = 0.49$; (b) $n = 0.75$; (c) $n = 0.93$)

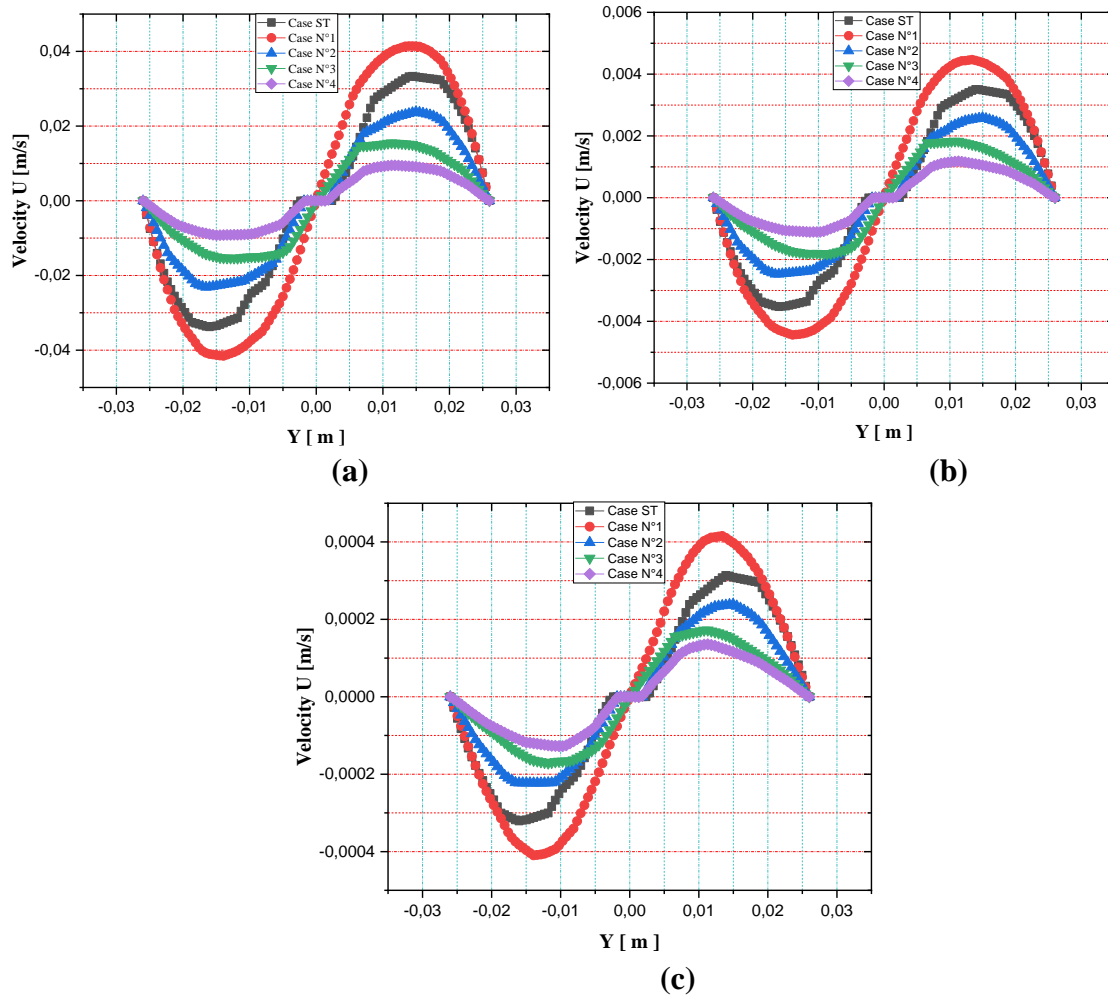


Figure III.5.7 : vitesses axiales pour différents cas, $Re = 10$ ((a) $n = 0.49$; (b) $n = 0.75$; (c) $n = 0.93$)

III.3.4. Fonction de densité de probabilité

Un autre critère essentiel pour évaluer l'homogénéisation de la distribution de température dans les mélangeurs étudiés est la fonction de densité de probabilité (PDF). Les figures III.5.8 illustrent la PDF (%) à la section de sortie de chaque géométrie pour différentes valeurs de l'indice de comportement (de 0,75 à 1) et un nombre de Reynolds généralisé égal à 80.

La cartographie de la température montre clairement que, pour les géométries Cas N°1, Cas N°2 et Cas N°3, la distribution de température à la sortie reste dispersée sur plusieurs plages de températures, notamment pour le Cas N°3, qui présente la moins bonne qualité de mélange. Cela suggère que l'utilisation de la géométrie Cas N°3 pour des écoulements à faible nombre de Reynolds n'est pas optimale pour le mélange des fluides.

En revanche, la géométrie du mélangeur Cas N°4 présente une distribution de température

totallement différente. Les fluides qui traversent cette géométrie sont bien mélangés et tendent à s'homogénéiser en raison du comportement chaotique de l'écoulement à l'intérieur du mélangeur. Par conséquent, la température à la sortie est concentrée dans une plage étroite, avec un pic correspondant à la température souhaitée de 420 K, quelle que soit la valeur de l'indice de comportement.

Cette analyse démontre que la géométrie Cas N°4 est plus efficace pour obtenir une homogénéisation thermique optimale dans les conditions étudiées.

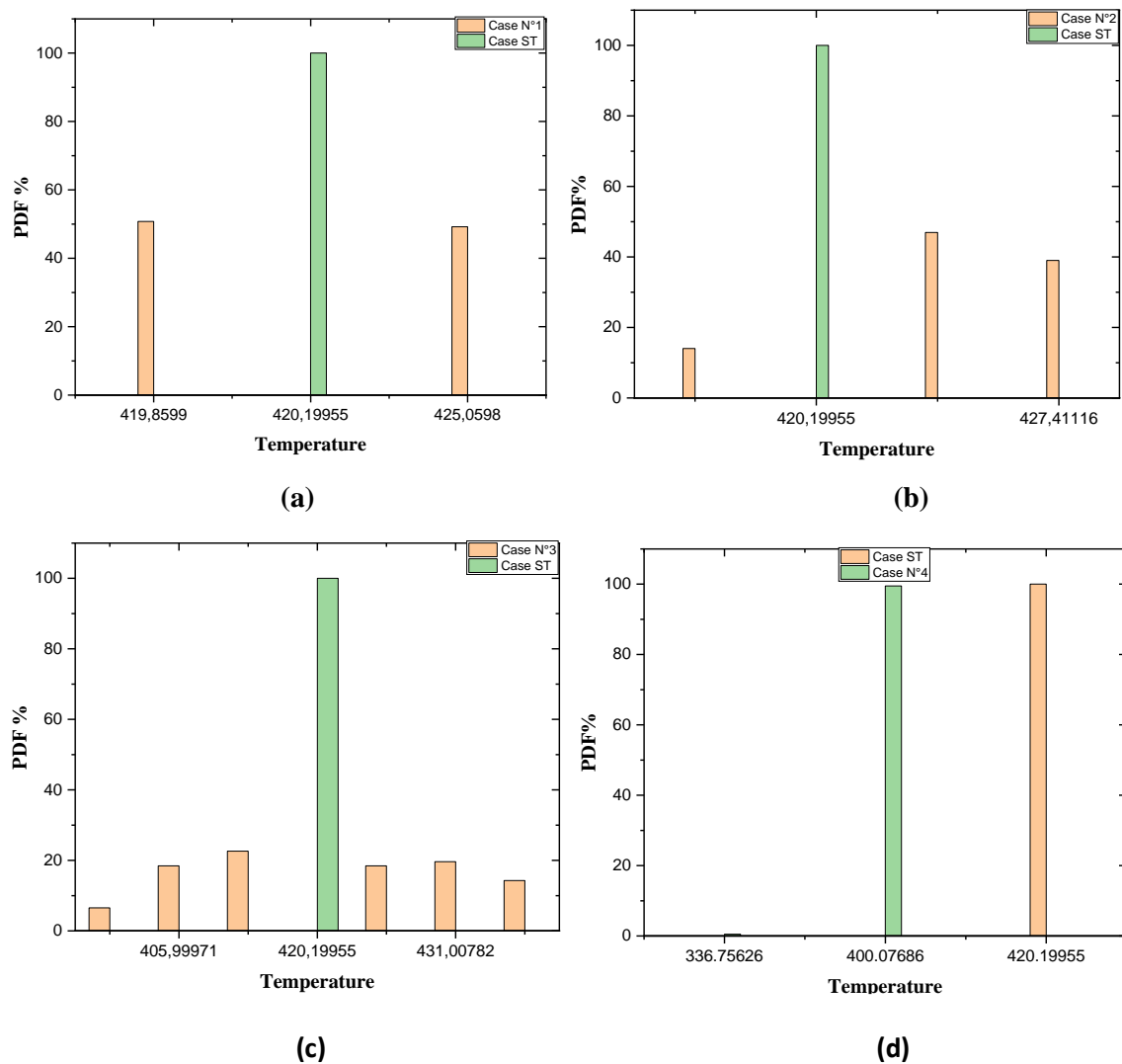


Figure III.5.8 : La fonction de densité de probabilité PDF (%) à la sortie des géométries considérées n=0.75 pour différents géométrie ((a) Cas N°1; (b) Cas N°2; (c) Cas N°3 ;(d) Cas N°4) (Reg = 80)

III.3.5. Conclusion

Une étude numérique a été réalisée pour examiner l'effet de la géométrie sur l'intensité des écoulements et l'homogénéité thermique des fluides newtoniens et non newtoniens pour différentes valeurs de Reynolds comprises entre 1 et 80. La configuration des mélangeurs statiques se caractérise par des pertes de charge plus élevées par rapport à une conduite lisse, dues à la présence de ces éléments, qui jouent le rôle d'obstacles perturbant la direction de l'écoulement. Cela provoque des perturbations et une désorientation de la trajectoire de l'écoulement, ce qui influence positivement sur l'efficacité de mélange dans ces mécanismes de mélange.

Pour cette raison, plusieurs configurations ont été réalisées avec des perforations ajoutées le long des parois de ces éléments hélicoïdaux dans les mélangeurs statiques. Les résultats obtenus montrent que le cas N°4 donne la meilleure efficacité de mélange pour tous les types de fluides considérés dans cette étude, ainsi qu'une homogénéité thermique optimale par rapport aux cas standards et les autres cas. Cependant, cette amélioration de l'efficacité des mélangeurs statiques s'accompagne d'une augmentation des pertes de charge, atteignant jusqu'à 14 % par rapport au cas standard.

Conclusion Générale

Dans cette partie du travail, nous avons examiné l'effet de la configuration géométrique sur l'amélioration de l'efficacité de mélange et du transfert thermique dans un mélangeur statique de type Kenics.

La première partie de l'étude évalue l'impact de la géométrie sur la structure de l'écoulement et l'efficacité du transfert thermique pour quatre configurations géométriques, ainsi que pour une configuration standard. Les résultats montrent que le cas N°4 donne un échange thermique plus efficace entre le fluide et les parois du mélangeur statique, caractérisé par un nombre de Nusselt plus élevé et le meilleur coefficient de performance parmi les configurations testées.

La deuxième partie du travail examine l'importance de la configuration géométrique pour les fluides newtoniens en régime laminaire. Les résultats montrent également que la configuration du cas N°4 procure une efficacité de mélange nettement supérieure par rapport à la configuration standard. L'homogénéité thermique entre deux fluides similaires, entrant avec des températures de 400°C et 450°C respectivement, est également meilleure avec la configuration du cas N°4. Cette amélioration est due au design, qui crée des zones de cisaillement et de recirculation, favorisant un meilleur transfert thermique entre les différentes couches de fluide.

La troisième partie concerne le mélange de deux fluides non newtoniens ayant des températures d'entrée différentes. La configuration N°4 montre, ici encore, une efficacité de mélange très élevée, atteignant 100 %, et une homogénéité thermique supérieure par rapport à toutes les autres configurations testées. En revanche, cette amélioration s'accompagne d'une augmentation notable des pertes de charge, atteignant 13 %, ce qui nécessite un système de pompage légèrement plus puissant.

En conclusion, l'étude démontre que la conception du mélangeur statique Kenics améliore significativement l'efficacité de mélange et le transfert thermique, le positionnant comme une alternative supérieure aux mélangeurs statiques traditionnels.

Références Bibliographiques

*Références
Bibliographiques*

- [1] Mayer-Laigle, C., Gatumel, C., & Berthiaux, H. (2015). Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula® mixer. *Chemical Engineering Research and Design*, 95, 248-261.
- [2] Tayeb, N. T., Amar, K., Sofiane, K., Lakhdar, L., & Yahia, L. (2020). Thermal mixing performances of shear-thinning non-Newtonian fluids inside Two-Layer Crossing Channels Micromixer using entropy generation method: Comparative study. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 156, 108096.
- [3] Shah, N. F., & Kale, D. D. (1991). Pressure drops for laminar flow of non-Newtonian fluids in static mixers. *Chemical Engineering Science;(UK)*, 46(8).
- [4] Matsumura, K. (1981). SOME PERFORMANCES DATA OF THE HI-MIXER-AN IN-LINE MIXER.
- [5] Thakur, R. K., Vial, C., Nigam, K. D. P., Nauman, E. B., & Djelveh, G. (2003). Static mixers in the process industries—a review. *Chemical engineering research and design*, 81(7), 787-826.
- [6] Byrde, O., & Sawley, M. L. (1999). Optimization of a Kenics static mixer for non-creeping flow conditions. *Chemical engineering journal*, 72(2), 163-169.
- [7] Heniche, M., Tanguy, P. A., Reeder, M. F., & Fasano, J. B. (2005). Numerical investigation of blade shape in static mixing. *AIChE journal*, 51(1), 44-58.
- [8] Al-Atabi, M. (2011). Design and assessment of a novel static mixer. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89(3), 550-554.
- [9] Soman, S.S. and Madhuranthakam, C.M.R., 2017. Effects of internal geometry modifications on the dispersive and distributive mixing in static mixers. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 122, pp.31-43.
- [10] Al-Atabi, M., & Abakr, Y. A. (2007). Laminar mixing in SMX static mixers. *Journal of Engineering Science and Technology*, 2(1), 95-101.
- [11] Hobbs, D. M., Swanson, P. D., & Muzzio, F. J. (1998). Numerical characterization of low Reynolds number flow in the Kenics static mixer. *Chemical engineering science*, 53(8), 1565-1584.
- [12] Galaktionov, O.S., Anderson, P.D., Peters, G.W.M. and Meijer, H.E.H., 2003. Analysis and optimization of Kenics static mixers. *International Polymer Processing*, 18(2), pp.138-150.

- [13] Haddadi, M., S. Hosseini, D. Rashtchian and M. Olazar (2020). Comparative analysis of different static mixers performance by cfd technique: An innovative mixer. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 28(3), 672– 684.
- [14] Jiang, X., Xiao, Z., Jiang, J., Yang, X. and Wang, R., 2021. Effect of element thickness on the pressure drop in the Kenics static mixer. *Chemical Engineering Journal*, 424, p.130399.
- [15] Jiang, X., Yang, N. and Wang, R., 2021. Effect of Aspect Ratio on the Mixing Performance in the Kenics Static Mixer. *Processes*, 9(3), p.464.
- [16] Rahmani, R.K., Ayasoufi, A. and Keith, T.G., 2007. A numerical study of the global performance of two static mixers. *Journal of Fluids Engineering*, 129(3), pp.338-349.
- [17] Talhaoui, A., Draoui, B. and Youcefi, A., 2021. Effect of Geometry Design on Mixing Performance of Newtonian Fluids using Helical Overlapped Mixer Elements in Kenics Static Mixer. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 14(6), pp.1643-1656.
- [18] Kumar, V., Shirke, V., & Nigam, K. D. P. (2008). Performance of Kenics static mixer over a wide range of Reynolds number. *Chemical Engineering Journal*, 139(2), 284-295.
- [19] Thomas, K. M., Nyande, B. W., & Lakerveld, R. (2022). Design and characterization of Kenics static mixer crystallizers. *Chemical Engineering Research and Design*, 179, 549-563.
- [20] Valdés, J. P., Kahouadji, L., & Matar, O. K. (2022). Current advances in liquid–liquid mixing in static mixers: A review. *Chemical Engineering Research and Design*, 177, 694-731.
- [21] Rauline, D., Le Blévec, J. M., Bousquet, J., & Tanguy, P. A. (2000). A comparative assessment of the performance of the Kenics and SMX static mixers. *Chemical Engineering Research and Design*, 78(3), 389-396.
- [22] Meng, H. B., Song, M. Y., Yu, Y. F., Jiang, X. H., Wang, Z. Y., & Wu, J. H. (2017). Enhancement of laminar flow and mixing performance in a lightning static mixer. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 15(3), 20160112.
- [23] Shahbazi, A., Ashtiani, H. A. D., Afshar, H., & Jafarkazemi, F. (2021). Optimization of the SMX static mixer types thermal and hydraulic performance by coupling CFD-Genetic Algorithm. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 126, 105388.
- [24] Zalc, J. M., Szalai, E. S., Muzzio, F. J., & Jaffer, S. (2002). Characterization of flow and mixing in an SMX static mixer. *AIChE Journal*, 48(3), 427-436.
- [25] Michael, V., Dawson, M., Prosser, R., & Kowalski, A. (2022). Laminar flow and pressure drop of complex fluids in a Sulzer SMX+ TM static mixer. *Chemical Engineering Research and Design*, 182, 157-171.

- [26] Mihailova, O., Lim, V., McCarthy, M. J., McCarthy, K. L., & Bakalis, S. (2015). Laminar mixing in a SMX static mixer evaluated by positron emission particle tracking (PEPT) and magnetic resonance imaging (MRI). *Chemical Engineering Science*, 137, 1014-1023.
- [27] Jegatheeswaran, S., Ein-Mozaffari, F., & Wu, J. (2018). Process intensification in a chaotic SMX static mixer to achieve an energy-efficient mixing operation of non-newtonian fluids. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 124, 1-10.
- [28] Chandra, K. G., & Kale, D. D. (1995). Pressure drop for two-phase air-non-newtonian liquid flow in static mixers. *The Chemical Engineering Journal and The Biochemical Engineering Journal*, 59(3), 277-280.
- [29] Li, H. Z., Fasol, C., & Choplin, L. (1997). Pressure drop of Newtonian and non-Newtonian fluids across a Sulzer SMX static mixer. *Chemical Engineering Research and Design*, 75(8), 792-796.
- [30] Madhuranthakam, C. M. R., Pan, Q., & Rempel, G. L. (2009). Residence time distribution and liquid holdup in Kenics KMX static mixer with hydrogenated nitrile butadiene rubber solution and hydrogen gas system. *Chemical engineering science*, 64(14), 3320-3328.
- [31] Jegatheeswaran, S., Ein-Mozaffari, F., & Wu, J. (2020). Laminar mixing of non-Newtonian fluids in static mixers: process intensification perspective. *Reviews in Chemical Engineering*, 36(3), 423-436.
- [32] Nyande, B. W., Mathew Thomas, K., & Lakerveld, R. (2021). CFD analysis of a kenics static mixer with a low pressure drop under laminar flow conditions. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(14), 5264-5277.
- [33] Towoju, O. A., & Ishola, F. A. (2021). Performance Characterization of a Kenics Static Mixer Using Slotted Elements. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1107, No. 1, p. 012119). IOP Publishing.
- [34] Jones, S. C., Sotiropoulos, F., & Amirtharajah, A. (2002). Numerical modeling of helical static mixers for water treatment. *Journal of Environmental Engineering*, 128(5), 431-440.
- [35] Liu, M. (2012). Age distribution in the Kenics static micromixer with convection and diffusion. *Industrial & engineering chemistry research*, 51(20), 7081-7094.
- [36] Shi, H., Wang, Y., Ge, W., Fang, B., Huggins, J. T., Huber, T. R., & Zakin, J. L. (2011). Enhancing heat transfer of drag-reducing surfactant solution by an HEV static mixer with low pressure drop. *Advances in Mechanical Engineering*, 3, 315943.
- [37] Hosseini, S. M., Razzaghi, K., & Shahraki, F. (2019). Design and characterization of a

- Low-pressure-drop static mixer. *AICHE Journal*, 65(3), 1126-1133.
- [38] Hirschberg, S., Koubek, R., Moser, F., & Schöck, J. (2009). An improvement of the Sulzer SMX™ static mixer significantly reducing the pressure drop. *Chemical Engineering Research and Design*, 87(4), 524-532.
- [39] Liu, S., Hrymak, A. N., & Wood, P. E. (2006). Design modifications to SMX static mixer for improving mixing. *AICHE journal*, 52(1), 150-157.
- [40] Soman, S. S., & Madhuranthakam, C. M. R. (2017). Effects of internal geometry modifications on the dispersive and distributive mixing in static mixers. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 122, 31-43.
- [41] Soman, S. (2016). Study of Effects of Design Modification in Static Mixer Geometry and its Applications (Master's thesis, University of Waterloo).
- [42] Mahmoodi, H., Razzaghi, K., & Shahraki, F. (2020). Improving mixing performance by curved-blade static mixer. *AICHE Journal*, 66(11), e17034.
- [43] Meng, H., Zhu, G., Yu, Y., Wang, Z., & Wu, J. (2016). The effect of symmetrical perforated holes on the turbulent heat transfer in the static mixer with modified Kenics segments. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 99, 647-659.
- [44] Meng, H., Han, M., Yu, Y., Wang, Z., & Wu, J. (2020). Numerical evaluations on the characteristics of turbulent flow and heat transfer in the Lightning static mixer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 156, 119788.
- [45] Meng, H., Meng, T., Yu, Y., Wang, Z., & Wu, J. (2022). Experimental and numerical investigation of turbulent flow and heat transfer characteristics in the Komax static mixer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 194, 123006.
- [46] Thomas, K. M., Nyande, B. W., & Lakerveld, R. (2022). Design and characterization of Kenics static mixer crystallizers. *Chemical Engineering Research and Design*, 179, 549-563.
- [47] Meng, H. (2017). "Performance Evaluation of Kenics Static Mixers under Laminar Flow Conditions." *Journal of Fluid Mechanics*, 830, 79-97.
- [48] Zhang, Y. (2018). "Numerical Simulation of Heat Transfer in Kenics Static Mixers." *Chemical Engineering Science*, 179, 25-34.
- [49] Ahmed, M. (2020). "Effects of Mixing Speed on Heat Transfer in Non-Newtonian Fluids within Kenics Mixers." *Applied Thermal Engineering*, 166, 114778.
- [50] Li, Q., Lu, H. (2019). "Comparative Study of Kenics and Other Static Mixers for Non-Newtonian Fluids." *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 58(12), 5334-5341.
- [51] Wang, X. (2020). "Enhancement of Thermal Performance in Kenics Static Mixers with

- Modified Insert Designs." *International Journal of Thermal Sciences*, 150, 106185.
- [52] Xu, L. (2021). "Application of Kenics Static Mixers in Water Treatment Processes." *Water Research*, 188, 116486.
- [53] Nouredine, Kaid., Mohammed, Bensafi., Sultan, Alqahtani., Sultan, Alshehery., Younes, Menni. (2023). Investigating Hydrothermal Mass Transfer in an Extremely Low-Pressure Drop Passive Mixer: A Three-Dimensional Simulation Study. *Process Safety and Environmental Protection*,
- [54] Jiaheng, Zhao., Zedong, Lu., Wenjun, Chi., Zhibin, Wang., Yawei, Chen. (2024). Enhanced fluid mixing using a novel multi-stage static pipeline mixer: Numerical simulation and mechanism analysis. *Journal of water process engineering*,
- [55] Jiefeng, Zhou., Yu, Qian., SiYu, Yang. (2023). Three-Dimensional Model on Liquid–Liquid Mass Transfer of the Kenics Static Mixer: Considering Dynamic Droplet Size Distribution. *Industrial & Engineering Chemistry Research*,
- [56] Prashant, Patil., Gaurav, G., Dastane., Aniruddha, B., Pandit. (2023). Numerical investigation of turbulent flow and heat transfer characteristics in the improved Kenics static mixer. *Heat Transfer - Japanese Research*, 53(1):44-72.
- [57] Zheng, N.B., Nianben Zheng., Peng Liu., Xinting Wang. , Wei Liu (2017). "Simulation and Optimization of Heat Transfer Enhancement in Tube Heat Exchanger Equipped with Vortex Rod Inserts". *Journal of Heat Transfer*, 139(9), 091704. DOI: 10.1115/1.4037796.
- [58] Wang, Y.F., Peng Liu, Feng Shan, Zhichun Liu. (2019). "Effect of Longitudinal Vortex Generators on Heat Transfer in Circular Tubes". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 139, 120-132. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.067.
- [59] Liu, X.X., Juan Du , Yuxiang Hong, Si-Min Huang , Wei-Biao Ye , Shuangfeng Wang. (2020). "Heat Transfer and Flow Characteristics in Laminar Flow in Tubes with Conical Corrugated Tape Inserts". *Journal of Engineering Thermophysics*, 41(1), 55-67. DOI: 10.1007/s10891-020-02146-0.
- [60] Ruengpayungsak, K., Pouyan Talebizadehsardari. (2019). "Thermal-Hydraulic Performance of Heat Exchanger with Perforated Twisted Tape Inserts". *Applied Thermal Engineering*, 153, 178-188. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.02.004.
- [61] Yingying, Nie., Shuangfei, Zhao., Pengjie, Yu., Yimin, Wei., Runze, Hu., Wei, He., Ning, Zhu., Yuguang, Li., Dong, Ji., Kai, Guo. (2023). Improvement of mass and heat transfer

efficiency in a scale-up microfluidic mixer designed by CFD simulation. *Canadian Journal of Chemical Engineering*,

[62] José-Alejandro, Vasquez-Santacruz., Rogelio, de, Jesus, Portillo-Velez., P.J., García-Ramírez., L.F., Marin-Urias., Diego, Sánchez-Montero., L., H., Porrágas-Beltrán. (2022). 12. An Experimental Analysis of Gas Reduction in Multiphase Flow with a KMS Helical Static Mixer. *Applied Sciences*.

[63] Li, Y., Wu, S., Liu, Y., Wang, N., Dai, P., Yang, Q., & Lu, H. (2022). The coupled mixing action of the jet mixer and swirl mixer: An novel static micromixer. *Chemical Engineering Research and Design*, 177, 283-290.

[64] E., Agaev., B., M., Bagirov. (2023). 14. Improvement of the design of the feed mixer and analysis of its performance. *Traktory i sel'hozmašiny*,

[65] Kenneth, D., Roth. (2022). 17. Mixing. *AAPS advances in the pharmaceutical sciences series*,

[66] Evan, M., Lowry., Gautham, Krishnamoorthy. (2023). 20. Two-Phase Pressure Loss Correlation for Co-Current Flow in Corrugated Plate Static Mixers and Structured Packing. *Chemical engineering research & design*,

[67] KeWei, Song., YiTan, He., Qiang, Zhang., Xiang, Wu., AiLing, He., QingZhi, Hou. (2024). Thermal performance promotion of a novel double-tube heat exchanger by helical fin with perforations. *International Communications in Heat and Mass Transfer*.

[68] Luis, Gutierrez. (2023). Optimization of Liquid–Liquid Mixing in a Novel Mixer Based on Hybrid SVR-DE Model. *Energies*, 16(4):1808-1808.

[69] Ezzine, Bennour., Cheikh, Kezrane., Noureddine, Kaid., Sultan, Alqahtani., Sultan, Alshehery., Younes, Menni. (2023). Improving Mixing Efficiency in Laminar-Flow Static Mixers with Baffle Inserts and Vortex Generators: A Three-Dimensional Numerical Investigation using Corrugated Tubes. *Chemical Engineering and Processing*.

[70] Tamsir, Ndiaye., Omar, Ngor, Thiam. (2023). Computational Fluid Dynamics Analysis of the Influence of Diameter at Inlet 2 on Heat Transfer and Fluid Flow in the Mixing Elbow. *Journal of applied physical science international*, 15(2):61-70.

[71] Juan, Pablo, Valdes., Jia, Han., Lyes, Kahouadji., Omar, Matar. (2021). Current advances in liquid-liquid mixing in static mixers: A review. *Chemical Engineering Research & Design*,

[72] Huibo, Meng., Jianbao, Wang., Yanfang, Yu., Zongyong, Wang., Jianhua, Wu. (2021). CFD–PBM Numerical Study on Liquid–Liquid Dispersion in the Q-Type Static Mixer. *Industrial & Engineering Chemistry Research*,

- [73] José-Alejandro, Vasquez-Santacruz., Rogelio, de, Jesus, Portillo-Velez., P.J., García-Ramírez., L.F., Marin-Urias., Diego, Sánchez-Montero., L., H., Porrágas-Beltrán. (2022). An Experimental Analysis of Gas Reduction in Multiphase Flow with a KMS Helical Static Mixer. *Applied Sciences*, 12(16):7988-7988.
- [74] Kunpeng, He., Xiaoyang, Chen., Kehai, Chen., Xian, Ping, Qiu., Peicheng, Luo., Zhaoyang, Zhu. (2023). Numerical Simulation of Liquid–Liquid Dispersion Characteristics in Screen-Type Static Mixers by Two Simplified Zero-Dimensional Models. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(20):8085-8097.
- [75] Zhong, Liangjie., Gan, Xianfu., Liang, Kaide., Dend, Rizhao., Liang, Songjian., Cong, Yang., Dan, Wang. (2023). Research on mixing efficiency model of static mixer based on machine learning and flow field simulation.
- [76] Longyun, Zheng., Kai, Guo., Hui, Liu., Bao, Zhang., Wei, Li., Xiang, Guo., Chunjiang, Liu. (2024). 32. Numerical Study of Flow Field and Mixing Performance of a New Curved-Sheet Blade-Folded Static Mixer.
- [77] Noureddine, Kaid., Mustafa, Bayram., Jihad, H., Asad., Muhammad, Atif., Muataz, Alhassan., Houari, Ameer., Hijaz, Ahmad., Younes, Menni. 36. Simulation of newly designed vortex generators for optimizing fluid mixing efficiency in compact static mixers with single-exit configuration. *Thermal Science*,
- [78] Yanfang, Yu., Bohao, Li., Huibo, Meng., Jiawei, Zhang., Kexin, Xiang., Peng, Yang. (2024). 38. Multiscale Turbulence Characteristics of Gas–Liquid Pressure Fluctuations in an Industrial Quatro Static Mixer.
- [79] Thomas, K. M., Nyande, B. W., & Lakerveld, R. (2022). Design and characterization of Kenics static mixer crystallizers. *Chemical Engineering Research and Design*, 179, 549-563.
- [80] Fellouah, H., Castelain, C., Ould-El-Moctar, A., & Peerhossaini, H. (2010). The Dean instability in power-law and Bingham fluids in a curved rectangular duct. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 165(3-4), 163-173.
- [81] Pinho, F. T., & Whitelaw, J. H. (1990). Flow of non-Newtonian fluids in a pipe. *Journal of non-newtonian fluid mechanics*, 34(2), 129-144.