

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



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Intitulé de Mémoire

**Etude du comportement dynamique et thermique
de l'écoulement de fluide visqueux dans un
mélangeur statique**

Présenté par :

Kaouan Mohammed Riyadh

Composition du jury :

M.Khatir Tawfik	CU Naama	Président
M.Ameur Houari	MCA CU Naama	Encadreur
M.Benameur Benamor	CU Naama	Examineur

Année universitaire 2016-2017

Remerciement

En premier lieu, je remercie DIEU tout puissant, qui j'ai donné le courage, la force et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Mon encadreur "Mr. Ameer Houari " qui a dirigé ce travail et pour l'encouragement et les nombreux conseils dont nous ont été bénéfiques.

Je tiens également à remercier le président et les membres du jury et Pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.

Je tiens à remercier mes parents car ce travail représente un petit fruit de leur souffrance et qui sans eux je ne peux traverser ces longues années d'études et de travail.

J'adresse mes vifs remerciements à tous les professeurs ayant contribué à notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance, pour leurs conseils, leurs encouragements et leurs qualités humaines.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail

Dédicace

J'ai toujours pensé faire où offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti comme efforts, rien que pour me voir réussir, et voilà, l'occasion est venue

A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance.

- ✓ *A ma très chère mère.*
- ✓ *A mon très cher père.*
- ✓ *A mes frères.*
- ✓ *A mes chères sœurs.*
- ✓ *A toute ma famille.*
- ✓ *A tous mes camarades de la promotion pour les bons moments passés ensemble.*

Kaouan Mohammed Riyadh

Résumé

L'écoulement laminaire d'un fluide Newtonien à travers un mélangeur statique de type Kenics est étudié en utilisant l'outil CFD (Computational Fluid Dynamics).

L'utilité de la présence des éléments hélicoïdaux dans le mélangeur Kenics sur le transfert thermique est examinée. L'eau est utilisée comme un fluide de travail.

Nous nous concentrons sur l'effet du nombre de Reynolds, de l'angle de torsion et de la longueur de la pale hélicoïdale sur les caractéristiques hydrodynamiques et thermiques et le coût énergétique.

Quelques résultats de simulation ont été comparés aux données (expérimentales) disponibles dans la littérature. Les résultats numériques ont été trouvés en bonne concordance avec les valeurs expérimentales.

Mots clés : *Mélangeur statique ; Mélangeur Kenics ; Fluide Newtonien ; Ecoulement laminaire; Transfert de chaleur.*

Abstract

The laminar flow of a Newtonian fluid through a Kenics static mixer is investigated by using the CFD (Computational Fluid Dynamics) tool. The utility of the presence of helical elements in the Kenics mixer on heat transfer is examined. Water is used as a working fluid. We focus on the effect of Reynolds number, twist angle and blade pitch on the flow and thermal characteristics and energy cost. Some predicted results were compared to several experimental correlations and data available in the literature. The numerical results were found in good agreement with the experimental values.

Keywords: *Static mixer; Kenics mixer; Newtonian fluid; Laminar flow; Heat transfer.*

Sommaire

Remerciement.	
Dédicaces.	
Résumé.	
Abstract.	
Sommaire.	
Liste des figures.	
Liste des tableaux.	
Nomenclature.	
Introduction générale	1

Chapitre 1 : généralité sur la mécanique du fluides

1.1. Introduction	2
1.2. Définition d'un fluide.....	2
1.3. Définitions.....	2
1.3.1. Fluide incompressible.....	2
1.3.2. Fluide compressible.....	3
1.3.3. Fluide parfait	3
1.3.4. Fluide réel.....	3
1.3.5. Fluide newtonien	3
1.3.6. Fluide non newtonien :	4
1.4. Principe de la mécanique des fluides.....	6
1.5. La dynamique des fluides	6
1.5.1. Régularité des fluides: écoulement constant ou instable	6
1.5.2. Écoulement rotationnel et irrotationnel	7
1.5.3. Écoulement laminaire ou turbulent	8
1.6. Equations de conservation.....	10
1.6.1. Conservation de la masse	10
1.6.2. Conservation de la quantité de mouvement.....	10
1.6.3. Conservation de l'énergie.....	11
1.7. Le nombre de Reynolds :	12

Chapitre 2 : Notion sur le transfert de chaleur.

2.1. Introduction	14
2.2. Définition.....	14
2.3. Modes de transfert thermique.....	15
2.3.1. Conduction	15

Loi de Fourier :	15
2.3.2. Rayonnement.....	16
Loi de Stefan (1873) :	17
2.3.3. La convection	18
Loi de Newton :	18
2.4. Types de convection.....	19
2.4.1. Convection naturelle.....	19
2.4.2. Convection forcée.....	20
2.5. Situation de l'étude.....	21
2.6. Définition de l'échangeur de chaleur	22
2.7. Critères de classement des échangeurs.....	22
2.7.1. Type de contact	22
2.7.2. La disposition des écoulements dans un échangeur de chaleur... ..	22

chapitre 3 : Simulation Numérique d'un Mélangeur Statique

3.1. Introduction	23
3.2. Présentation du code de calcul	23
3.2.1. ANSYS CFX-16.0.....	23
3.2.2. ANSYS ICEM CFD	24
3.2.3. CFX-Pré.....	25
3.2.4. CFX-Solver	25
3.2.5. CFX-Post.....	26
3.3. Présentation du problème	26
3.4. Test du maillage	27
3.5. Hypothèses du problème	28
3.6. Caractéristiques de la machine	29

Chapitre 4 :resultats et discussion.

4.1. Introduction	30
4.2. Synthèse bibliographique	30
4.3. Objectif du travail.....	32
4.4. Validation	32
4.5. Résultats et Discussion	33
4.5.1. Distribution des vitesses	33

4.5.2. Effet de nombre de Reynolds	35
4.5.3. Effet de la longueur de la pale	41
4.5.4. Effet de l'angle de torsion.....	43
conclusion.....	50
référence bibliographique.....	51

Liste des Figures

Figure 1.1 Loi constitutive $\tau = f(\gamma)$ pour différents types de fluides non

Figure 1.2 newtoniens indépendants du temps

Figure 1.3 Ecoulement uniforme et non uniforme

Figure 1.4 Ecoulement rotationnel et irrotationnel

Figure 1.5 Ecoulement laminaire

Figure 1.6 Ecoulement turbulent

Figure 1.7 Comparaison entre l'écoulement laminaire et turbulent

Figure 2.1 La conduction

Figure 2.2 Transfert de chaleur par rayonnement

Figure 2.3 La convection

Figure 2.4 Convection naturelle

Figure 2.5 Convection forcée

Figure 2.6 Les 3 modes de transfert thermique ensemble

Figure 2.7 Les différents modes de circulation

Figure 3.1 Les principaux blocs de l'ANSYS CFX 16.0

Figure 3.2 Mélangeur statique de type Kenics

Figure 3.3 Maillage tetrahedral du domaine de calcul

Figure 4.1 Chute de pression en fonction du nombre de Reynolds

Figure 4.2 Vitesse axiale et radiale le long du canal, $Re = 10$, $R^* = 2R/D = 0.12$, $l^* = 0.10$, $\alpha = 90^\circ$

Figure 4.3 Lignes de courant pour $Re = 150$, $l^* = 0.10$, $\alpha = 90^\circ$

Figure 4.4 Contours de vitesse pour $\alpha = 90^\circ$, $l^* = 0.10$

Figure 4.5 Contours de vitesse pour $\alpha = 90^\circ$ aux différentes positions sur la pale (a) au début, (b) au milieu, (c) à la fin de la pale

Figure 4.6 Variations de vitesse en fonction du rayon pour $X^* = 0.59$, $l^* = 0.10$, $\alpha = 90^\circ$, (a) composante axiale, (b) composante radiale, (c) composante tangentielle

Figure 4.7 Lignes de courant pour différent Re , $X^* = 0.59$, $\alpha = 90^\circ$

Figure 4.8 Influence du Re sur la distribution de température dans un tube lisse

Figure 4.9 Contours de température pour $\alpha = 90^\circ$ aux différentes positions sur la pale (a) au début, (b) au milieu, (c) à la fin de la pale

Figure 4.10 Champ de vitesse pour différentes longueurs de la pale ($l^* = l/L$), $\alpha = 90^\circ$, $Re = 100$

Figure 4.11 Chute de pression pour différentes longueurs de la pale ($l^* = l/L$), $\alpha = 90^\circ$

Figure 4.12 Contours de vitesse pour $Re = 100$, $l^* = 0.10$

Figure 4.13 Lignes de courant pour $Re = 100$, $l^* = 0.10$, $X^* = 0.59$

Figure 4.14 Variations de vitesse en fonction du rayon pour $X^* = 0.50$, $l^* = 0.10$ (a) composante axiale, (b) composante radiale, (c) composante tangentielle

Figure 4.15 Chute de pression pour différentes valeur du Re et α , $l^* = 0.10$

Figure 4.16 Distribution de température pour $Re = 0.1$

Figure 4.17 Contours de température pour $Re = 0.1$ aux différentes positions sur la pale (a) au début, (b) au milieu, (c) à la fin de la pale

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 Conductivité thermique de certains matériaux

Tableau 3.1 Test du maillage

Nomenclature

x	coordonnées longitudinales cartésiennes	[m]
Y	coordonnée transversale cartésienne	[m]
Z	coordonnée axiale cylindrique	[m]
R	coordonnée radiale cylindrique	[m]
L	dimension caractéristique	[m]
V	Volume	[m ³]
m	masse	[g]
P	Pression	[Pa]
R	rayon de la conduite	[m]
S	Surface	[m ²]
D	diamètre de la conduite	[m]
T	Température	[K]
T_C	température de surface du corps	[K]
T_P	température ambiante	[K]
T_f	température du fluide	[K]
T_a	température de fluide chaud	[K]
T_b	température de fluide froid	[K]
F	force par unité de section	[N.m ⁻²]
H	coefficient d'échange	[W. m ⁻² .k ⁻¹]
Q	densité de flux	[W. m ⁻²]
U	énergie interne	[J]
E_c	énergie cinétique	[J]
W	travail des forces extérieures	[W]

Q	quantité de chaleur échangée	[J]
Re	nombre de Reynolds	[-]
τ	contrainte de cisaillement	[N/m ²]
$\dot{\gamma}$	taux de cisaillement	[s ⁻¹]
μ	viscosité dynamique	[Pa.s]
ν	viscosité cinématique	[m ² /s]
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]
v	vitesse caractéristique	[m/s]
ϕ	Flux de chaleur	[w]
λ	Conductivité thermique du milieu	[W m ⁻¹ °C ⁻¹]
ε	coefficient d'émission de la surface ou facteur d'émissivité	[-]
σ	constante de Stéphan Boltzmann	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
X^*	position axiale	[-]
l^*	position tangentiel	[-]
R^*	position radiale	[-]

Introduction

Dans plusieurs procédés industriels, l'opération du mélange joue un rôle important sur la qualité du produit final. Les cuves mécaniquement agitées sont largement utilisés dans les industries, et ce, pour assurer une large gamme d'opérations tel que comme l'homogénéisation, la dispersion des gaz, la cristallisation et la polymérisation. Mes ces cuves sont connues par leur consommation de puissance assez élevée, et risques de cassure de l'agitateur. Les mélangeurs statiques ont été introduits pour surmener ces problèmes et des bons résultats ont été marqués.

Un mélange inefficace se traduit par une qualité de produit inférieure avec un coût de production accru. Par conséquent, la détermination des caractéristiques de mélange est extrêmement importante, en particulier pour les fluides visqueux, où la probabilité de présence de zones peu mixtes ou isolées est élevée.

Le présent travail est une étude des performances hydrodynamiques et thermiques d'un mélangeur statique du type Kenics. Le mémoire est divisé en quatre chapitres : des généralités sur la mécanique des fluides et le transfert thermique sont présentées en premier et deuxième chapitre, respectivement. Un flash sur le code de calcul et la méthode numérique est présenté en troisième chapitre. L'essentiel de notre travail et qui résume les résultats de simulation numérique est présenté en dernier chapitre. Enfin le manuscrit se termine par une conclusion générale qui synthétise les résultats obtenus.

Généralités sur la Mécanique des Fluides

1.1. Introduction

L'utilisation des milieux fluides est très courante dans plusieurs procédés industriels. Leur transport, dans des réservoirs ou des canalisations, constitue la principale préoccupation lorsque ces corps sont des matières premières comme l'eau, le pétrole, le gaz naturel, etc.

Ils servent également à véhiculer l'énergie qu'ils accumulent sous forme de pression ou de vitesse (centrale hydroélectrique, vérins, moteurs hydrauliques ou pneumatiques).

L'omniprésence des milieux fluides justifie l'étude de leur comportement.

La mécanique des fluides est l'étude du comportement des fluides (liquides et gaz) et des forces internes associées. C'est une branche de la mécanique des milieux continus qui modélise la matière à l'aide des particules assez petites pour relever de l'analyse mathématique mais assez grandes par rapport aux molécules pour être décrites par des fonctions continues. Elle se divise en deux parties :

- Statique des fluides : c'est l'étude des fluides au repos, qui se réduit pour l'essentiel à l'hydrostatique.
- Dynamique des fluides : c'est l'étude des fluides en mouvement avec recherche des causes de ce mouvement (forces appliquées).

1.2. Définition d'un fluide

- Un corps fluide se différencie d'un corps solide par son aptitude à la déformation.
- Dans un milieu fluide, les interactions entre les molécules sont faibles; ce qui autorise une déformation.
- Un corps fluide adopte ainsi la forme du réservoir qui le contient.

1.3. Définitions

1.3.1. Fluide incompressible

Un fluide est dit incompressible lorsque que le volume occupé par une masse donnée ne varie pas en fonction de la pression extérieure.

La masse volumique ρ (kg/m^3) est constante (eau, huile, etc.).

1.3.2. Fluide compressible

Un fluide est dit compressible lorsque que le volume occupé par une masse donnée varie en fonction de la pression extérieure. La masse volumique ρ est variable. Les gaz sont des fluides compressibles.

1.3.3. Fluide parfait

Dans un fluide parfait, les forces de contacts sont perpendiculaires aux éléments de surfaces sur lesquelles elles s'exercent.

1.3.4. Fluide réel

Dans un fluide réel, il existe des forces (tangentielles) élémentaires qui s'opposent au mouvement. C'est ce que l'on appelle la viscosité.

Nota : Un fluide réel au repos, peut être considéré comme fluide parfait.

1.3.5. Fluide newtonien

Soit un fluide incompressible qui s'écoule entre deux plaques parallèles, le régime de l'écoulement est permanent et laminaire, le fluide est soumis à une force de cisaillement F . La force F par unité de section est définie en cisaillement simple comme suit (**Chhabra et Richardson, 1999**) :

$$\frac{F}{A} = \mu \left[-\frac{du}{dy} \right] \quad (1.1)$$

En posant :

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \text{Et} \quad \dot{\gamma} = \left[-\frac{du}{dy} \right] \quad (1.2)$$

On obtient

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1.3)$$

Tel que : τ est la contrainte de cisaillement de dimension $[\text{N/m}^2]$, $\dot{\gamma}$ est le taux de cisaillement de dimension $[\text{s}^{-1}]$.

La grandeur μ qui est définie comme étant le rapport entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement est appelé la viscosité newtonienne ou bien plus communément la viscosité dynamique, et qui est de dimension [kg/m.s].

La viscosité dynamique notée μ est indépendante de la contrainte de cisaillement et du taux de cisaillement, et dépend des propriétés du fluide et/ou de la pression et/ou de la température.

L'équation (1.3) exprime la relation entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement. Cette dernière (équation 1.3) est appelée : loi constitutive du fluide newtonien.

La loi constitutive des fluides newtoniens est la plus simple qui puissent existée, mais l'utilisation de cette loi dans l'étude des écoulements de fluides réels (industriels, biologiques, agroalimentaire, etc.) est impossible, dès lors l'introduction de lois plus complexes s'avère nécessaire.

1.3.6. Fluide non newtonien :

Les fluides non-newtoniens sont l'ensemble des fluides qui ne suivent pas la relation de proportionnalité entre la contrainte de cisaillement et le taux de cisaillement (équation 1.3), le modèle non newtonien décrit l'écoulement des fluides comportant des molécules de tailles importantes, on peut citer à titre d'exemple de fluides non newtoniens : les solutions de polymères, les polymères fondus, les suspensions, les pâtes, les émulsions et les fluides biologiques (**Bird et al., 2002**).

La viscosité des fluides non-newtoniens dépend du taux de cisaillement (**Bird et al., 2002**).

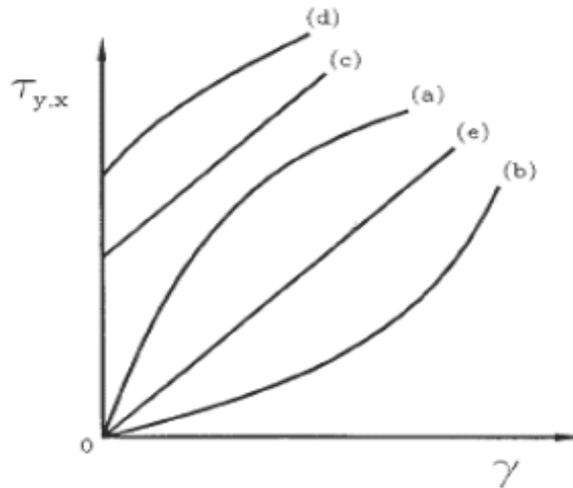


Figure 1.1 : Loi constitutive $\tau = f(\gamma)$ pour différents types de fluides non newtoniens indépendants du temps , courbe(a) comportement pseudoplastique , courbe (b) comportement dilatant , (c) fluide de Bingham ,(d) fluide d’Hershel-Bulckley, (e) fluide Newtonien (Kreith, 1999)

- a) **comportement pseudoplastique** : désigne le fait, pour un fluide, de « devenir plus fluide » lorsque la vitesse d’écoulement augmente. Plus précisément, cela désigne le fait que la viscosité dynamique diminue lorsque le taux de cisaillement augmente (La lave, le ketchup, le sang, la peinture...)
- b) **comportement dilatant** : inverse à la comportement pseudoplastique , est assez rare. La viscosité augmente lorsque le taux de cisaillement augmente (fécule de maïs, empois, ...).
- c) **fluide de Bingham** : est un modèle théorique de milieu viscoplastique qui correspond à un comportement de solide parfait sous faibles contraintes, et à un comportement de fluide visqueux au delà d’une contrainte-seuil. Ce modèle porte le nom d’Eugène Bingham qui en a donné l’expression mathématique.
- d) **fluide d’Hershel-Bulckley** : est un modèle généralisé d’un fluide non newtonien, dans lequel la déformation subie par le fluide est liée à la contrainte d’une manière complexe et non linéaire (Midoux, 1993).
- e) **fluide Newtonien** : un fluide dont la loi contrainte – vitesse de déformation est linéaire. La constante de proportionnalité est appelée viscosité (l’eau...)

1.4. Principe de la mécanique des fluides

La mécanique des fluides est l'application de la mécanique des milieux continus aux fluides c'est à dire aux milieux capable de se déformer en permanence sous la sollicitation d'un effort constante au cours du temps. A l'opposé les solides, ce sont les milieux subissant une déformation finie et constante sous l'effet d'un effort constant.

En un point ' M ' de l'espace repéré par son vecteur position x , le champ d'un fluide en écoulement est décrit à l'échelle macroscopique par six fonctions:

- La masse volumique ρ
- La pression P
- Les trois composantes du vecteur vitesse v
- La température T

La mécanique du fluide est fondée sur les trois principes de physique macroscopique suivants:

- La conservation de la masse
- La conservation de la quantité de mouvement
- La conservation de l'énergie

1.5. La dynamique des fluides

C'est l'étude des mouvements des fluides, qu'ils soient liquides ou gazeux. En physique, l'écoulement du fluide a toutes sortes d'aspects : stable ou instable, compressible ou incompressible, visqueux ou non visqueux, etc. Certains de ces caractéristiques reflètent des propriétés du liquide lui-même, et d'autres se concentrent sur la façon dont le fluide est en mouvement (Faure, 2012).

1.5.1. Régularité des fluides: écoulement constant ou instable

L'écoulement du fluide peut être stable ou instable, en fonction de la vitesse de fluide :

- Écoulement stable : pour ce type, la vitesse de l'écoulement est constante à n'importe point de sa route et durant une période de temps spécifique.
- Écoulement instable : pour ce type, la vitesse du fluide peut différer entre n'importe quels deux points sur sa route.

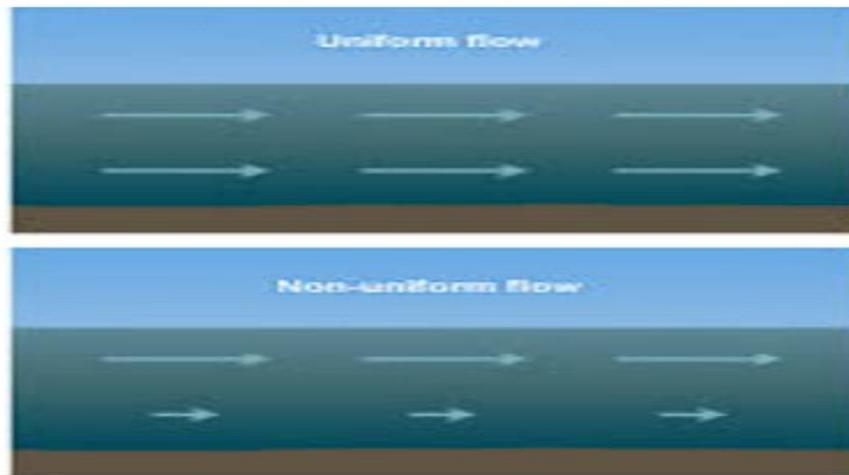


Figure 1.2 : Ecoulement uniforme et non uniforme

Cette figure montre l'écoulement stable et instable. La première planche en haut démontre l'écoulement stable. Les flèches sont de la même longueur et démontrent une vitesse de fluide constante.

La deuxième planche en bas montre des flèches d'une longueur différente qui signifie la présence des fluctuations au vitesse de l'écoulement (les flèches longues sont des particules du fluide à grande vitesse, tandis que les flèches courtes signifient une vitesse moindre).

1.5.2. Écoulement rotationnel et irrotationnel

Pour tester si l'écoulement a un aspect de rotation, vous pouvez mettre un petit objet dans le fluide et laisser l'écoulement le porter. Si le petit objet tourne, l'écoulement est de rotation; si l'objet ne tourne pas, l'écoulement est irrotationnel. Dans l'écoulement rotationnel, chaque particule du fluide tourne autour de son propre axe.

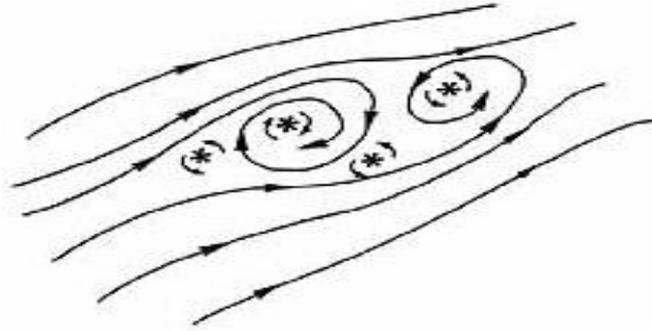


Figure 1.3 : Ecoulement rotationnel et irrotationnel

1.5.3. Écoulement laminaire ou turbulent

La façon dont les fluides s'écoulent autour d'un objet est déterminée par la forme de celui-ci.

a) Écoulement laminaire

- Le flot d'une rivière profonde, vide de tout obstacle, sera rapide et facile. L'eau coule en ligne droite ou presque. Ce phénomène est connu sous le nom d'écoulement laminaire.
- Dans la dynamique des fluides, l'écoulement laminaire (ou les flux) se produit lorsqu'un fluide s'écoule dans des couches parallèles, sans interruption.
- Les lignes de courant associés au flux laminaire ressemblent à un paquet de cartes. Ce profil d'écoulement d'un fluide dans un tuyau montre que le fluide agit comme des couches qui glissent sur une autre.
- L'écoulement d'un fluide se produit lorsque chaque particule du fluide suit une trajectoire lisse, les chemins qui ne gênent ni ne touchent pas les uns des autres.
- Une des conséquences de l'écoulement laminaire est que la vitesse du fluide est constante à n'importe quel point dans le fluide.

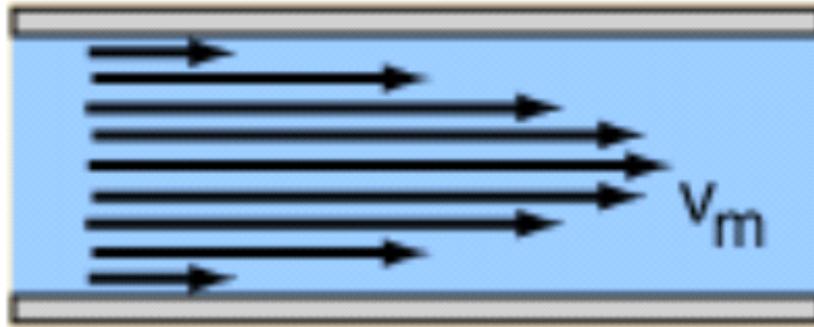


Figure 1.4 : Ecoulement laminaire

b) Écoulement turbulent

- Le flot d'une rivière peu profond et hérissée de rochers serait difficile. L'eau ne coulera pas en ligne droite. Le flot sera irrégulier et agité. C'est un écoulement turbulent.
- L'écoulement irrégulier se caractérise par des minuscules régions spirales et tourbillons.
- La vitesse de ce fluide n'est certainement pas constante à chaque point.

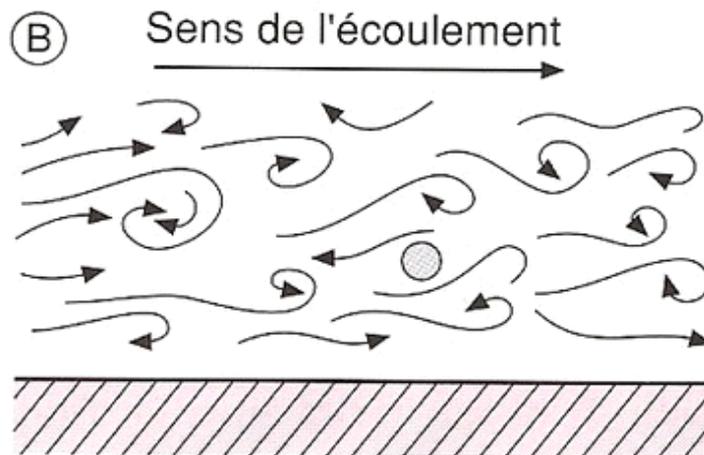


Figure 1.5. Ecoulement turbulent

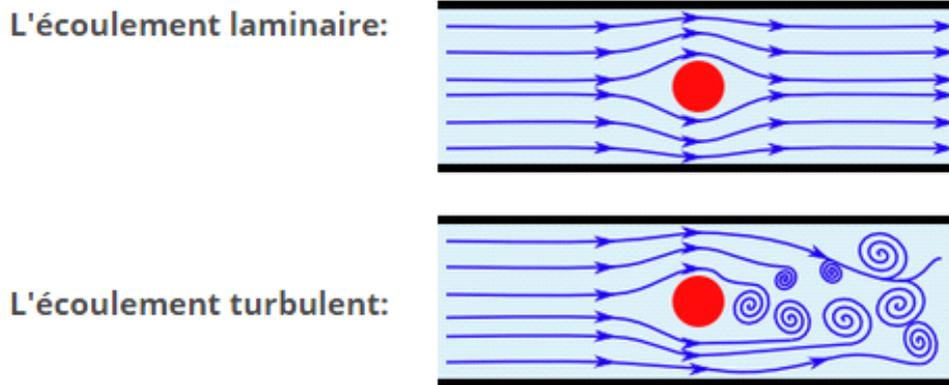


Figure 1.6 : Comparaison entre l'écoulement laminaire et turbulent

1.6. Equations de conservation

1.6.1. Conservation de la masse

Le principe physique stipule que (hormis pour des réactions nucléaires), la masse de matière se conserve. Par conséquent un volume V fixe dans l'espace peut accumuler de la matière ou en échanger avec l'extérieur mais pas en créer ni en détruire. L'équation du bilan de masse d'un fluide ne comporte ni terme source, ni terme puits.

$$Dm = \frac{\partial m}{\partial t} dt = \frac{\partial \rho}{\partial t} dV dt \quad (1.4)$$

1.6.2. Conservation de la quantité de mouvement

a) Notion

On peut questionner la pertinence du terme "conservation". Il convient cependant de se remémorer comment la notion de force est définie en mécanique : une force est associée à l'échange de quantité de mouvement entre deux systèmes. Si ces deux systèmes sont isolés de l'extérieur, la somme de leurs quantités de mouvement reste constante au cours du temps, quelle que soit leur interaction mutuelle. Par exemple un couple de patineurs sur la glace est quasiment isolé de l'extérieur si l'on peut négliger le frottement des patins. S'ils se tiennent par la main, ils interagissent et échangent de la quantité de mouvement, mais la somme des deux reste constante. De même, deux boules de billard qui se choquent échangent de la quantité de mouvement lors du choc, mais la somme des deux reste constante.

C'est dans ce sens qu'il faut comprendre l'expression "conservation de la quantité du mouvement": on peut dire que le fluide subit (ou exerce) une force extérieure, mais aussi qu'il échange de la quantité du mouvement avec l'extérieur, de telle sorte que la somme des quantités de mouvement (fluide + extérieur) reste constante. Il est important de retenir cette notion pour bien comprendre la physique sous-jacente aux équations qui vont suivre.

On retiendra donc : Une force subie par le fluide correspond à un accroissement de sa quantité du mouvement.

b) Equation générale

La quantité de mouvement est conservée lorsque sa variation instantanée est nulle :

$$\frac{d\vec{Q}}{dt} = \vec{0} \quad (1.5)$$

Ce principe est équivalent au principe d'inertie, mais fait intervenir la masse des corps (par définition $\vec{Q} = m \cdot \vec{v}$), ce qui permet d'introduire la notion de force, par

définition :
$$\vec{F} = \frac{d\vec{Q}}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt}$$

1.6.3. Conservation de l'énergie

Le premier principe de la thermodynamique stipule que, pour un système fermé:

$$\Delta(U + E_c) = W + Q \quad (1.6)$$

Avec : U représente l'énergie interne, E_c est l'énergie cinétique, W : le travail des forces extérieures et Q : la quantité de chaleur échangée (comptée positivement si le système reçoit de la chaleur). Toutes ces grandeurs se comptent en Joule. Ecrivons le premier principe pendant un intervalle de temps dt , nous obtenons :

$$\frac{d}{dt}(U + E_c) = \delta W + \delta Q \quad (1.7)$$

Remarque : les expressions δW et δQ , employées pour exprimer les formes différentielles du travail et de l'énergie thermique, signifient que ces grandeurs ne sont pas des variations

de fonctions d'état et donc que leur différentielle n'est pas exacte et que leur part respective dépend du chemin suivi, c'est-à-dire de la manière dont la transformation s'opère.

Nous ne pouvons pas appliquer directement ce principe à autre volume V puisqu'il est traversé continuellement par de la matière différente : c'est un système ouvert. Cette matière entrante et sortante transporte de l'énergie cinétique et interne vers ou hors du volume V . Comment appliquer le premier principe à un système ouvert ? Tout simplement en remarquant que l'énoncé d'un système fermé indique que δW et δQ sont des termes sources/puits pour les variations de la grandeur "énergie interne + énergie cinétique". Pour exprimer le premier principe en système ouvert, il suffit de rajouter les termes de flux convectif dans l'équation de bilan générique avec

$$G = U + Ec, \quad g = \rho \left(u + \frac{v^2}{2} \right) \text{ et } (R^+) - (R^-) = W + Q, \text{ soit:}$$

$$\frac{d}{dt} (U + Ec) = \frac{d}{dt} \int \int \int \rho \left(u + \frac{v^2}{2} \right) dV \quad (1.8)$$

$$G = - \iint \rho \left(u + \frac{v^2}{2} \right) \mathbf{V} \cdot \mathbf{n} \, dS + W + Q \quad (1.9)$$

Ici comme pour la quantité du mouvement, on remarque que si le volume V est un volume matériel qui suit le fluide dans son mouvement (et est donc un système fermé), le terme de flux disparaît, et l'on retrouve l'expression classique du premier principe en système fermé.

1.7. Le nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds (Re) est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides. Il a été mis en évidence en 1883 par Osborne Reynolds. Il caractérise un écoulement, en particulier la nature de son régime (laminaire, transitoire, turbulent).

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses.

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (1.10)$$

v : vitesse caractéristique du fluide [m/s]

D : diamètre hydraulique [m]

ν : viscosité cinématique du fluide [m^2/s]

Avec : $\nu = \frac{\mu}{\rho}$

μ : viscosité dynamique du fluide [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]

ρ : Masse volumique du fluide [kg/m^3]

D'où la formulation classique : $Re = \frac{\rho \nu D}{\mu}$ **(1.11)**

Si $Re < 2000$ l'écoulement est laminaire.

Si $Re > 2000$ l'écoulement est turbulent.

Notion sur le transfert de chaleur

2.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons un certain nombre de définitions et théories relatives aux différents modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement).

Un transfert de chaleur au sein d'un système ne se produit que s'il existe des gradients de température entre les différentes parties du système, ce qui implique que celui-ci n'est alors pas à l'équilibre thermodynamique (la température n'est pas uniforme dans tout le système). Au cours de la transformation du système vers un état d'équilibre final, la température va évoluer à la fois en temps et en espace. Le but de l'analyse des transferts de chaleur est d'identifier quels sont les modes de transfert mis en jeu au cours de la transformation et de déterminer quantitativement comment varie la température en chaque point du système au cours du temps.

2.2. Définition

La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

Cet échange peut se faire de trois façons différentes :

- Par conduction.
- Par rayonnement.
- Par convection.

Il faut ajouter que, dans la pratique, il est rare qu'une situation particulière ne concerne qu'un seul mode; le plus souvent, deux sinon trois modes entrent en jeu. En réalité tout échange thermique s'effectue simultanément sous ces trois formes.

2.3. Modes de transfert thermique

2.3.1. Conduction

La conduction thermique est un transfert de chaleur qui se réalise sans déplacement de matière. Ce transfert de chaleur est rencontré le plus souvent dans des matériaux solides, mais il peut aussi être étudié dans des fluides; liquide ou gaz. Elle se fait par interaction directe des particules voisines et agitation (transfert de mouvement de molécule à molécule), C'est un transfert lent. (La conduction se fait dans les solides et les fluides fixes (au repos))

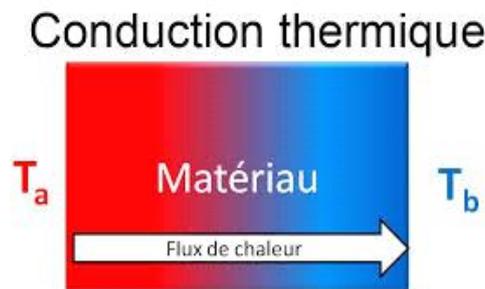


Figure 2.1 : La conduction

T_a : température de fluide chaud ($^{\circ}\text{K}$)

T_b : température de fluide froid ($^{\circ}\text{K}$)

Loi de Fourier :

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier (1822) : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\phi} = -\lambda S \text{ grad } (T) \quad (2.1)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.2)$$

Avec :

Φ : Flux de chaleur transmis par conduction (W),

λ : Conductivité thermique du milieu ($\text{W m}^{-1} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

x : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2)

T : Température ($^{\circ}K$).

On trouvera dans le Tableau 2.1 les valeurs de la conductivité thermique λ de certains matériaux parmi les plus courants.

Tableau 2.1 : Conductivité thermique de certains matériaux

Matériau	λ ($W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$)
Argent	419
Aluminium	204
Béton	1,4
Brique terre cuite	1,1
Verre	1,0
Eau	0,6
Polystyrène expansé	0,036 - 0,047
Air	0,026
Benzène	0,1411
Diamant	1000

2.3.2. Rayonnement

C'est l'échange de chaleur entre deux parois séparées par un milieu transparent ou semi transparent. Les matériaux ont la propriété d'absorber ou d'émettre des photons (ou des quantités d'énergie). L'énergie emportée par le photon est prélevée sur l'état d'énergie du corps et réciproquement l'énergie d'un photon absorbé est souvent transformée en chaleur. Cette propriété d'émission dépend donc de la température du milieu. Il s'agit d'un transfert à distance quasi-instantané sans nécessité de support matériel.

Donc : dans la transmission de chaleur par rayonnement, le transfert thermique s'effectue par des vibrations électromagnétiques entre deux surfaces (même dans le Vide). Sans aucun contact entre eux, par le déplacement d'ondes dans l'espace qui se propagent en ligne droite

sans aucun support de matière. Finalement, on distingue dans ce mode de transfert trois phénomènes :

- Emission
- Propagation
- Absorption



Figure 2.2 : Transfert de chaleur par rayonnement

Loi de Stefan (1873) :

Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps à des températures différentes séparés par du vide ou un milieu semi-transparent se produit par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, donc sans support matériel. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Stefan.

$$\mathbf{M} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (2.3)$$

ε : coefficient d'émission de la surface ou facteur d'émissivité ($\varepsilon = 1$ pour un corps noir, $\varepsilon \ll 1$ pour les corps brillants).

σ : constante de Stéphan Boltzmann $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°K}^{-4}$

S : surface d'échange (m^2).

T_C : température de surface du corps (°K).

T_P : température ambiante (°K).

2.3.3. La convection

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important du transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes.

D'abord, la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux particules fluides adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces particules.

Ensuite, ces dernières vont se mélanger avec d'autres particules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie, celle-ci est à présent emmagasinée dans les particules fluides et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement.

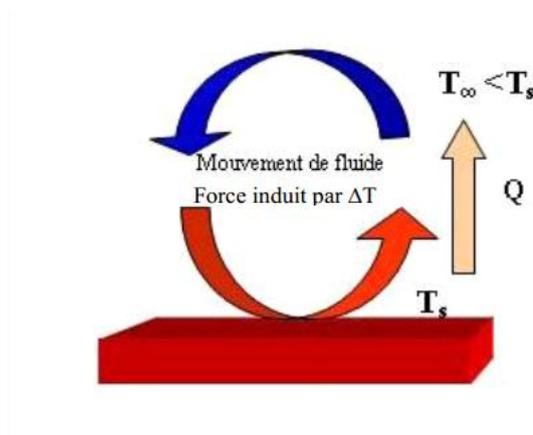


Figure 2.3 : La convection

Loi de Newton :

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton :

$$\phi = hS (T_s - T_\infty) \quad (2.4)$$

ϕ : Le flux échangé par convection (W).

h : Coefficient de convection (W/m^2)

s : Surface de la paroi en contact avec le fluide (m^2)

T_p : Température de la paroi solide ($^{\circ}K$)

T_f : Température du fluide ($^{\circ}K$)

2.4. Types de convection

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement, Aux différences de densité résultant des gradients de température, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée.

Si les deux causes existent simultanément, sans que l'une soit négligeable par rapport à l'autre, la convection est dite mixte.

2.4.1. Convection naturelle

En convection naturelle, les mouvements du fluide sont provoqués par des gradients de densité due au non uniformité du champ de température. Les couches chaudes, donc de poids spécifique plus faible, sont soumises à des forces dirigées vers le haut, suivant un mécanisme analogue à celui de la poussée d'Archimède. Dans les régions a température élevée, le fluide prend donc un mouvement ascendant. Le phénomène inverse de courants descendants se produits pour les parties du fluide dont la température est inférieure à celle du fluide chaud.

Les effets de convection naturelle sont familiers. On peut les observer quotidiennement dans l'eau que l'on chauffe dans un récipient, dans les panaches de certaines cheminées d'usines, la circulation atmosphérique, les vents, les tempêtes sont aussi des effets de la convection naturelle.

Les courants de convection naturelle sont alors dus à des différences de poids spécifique et par conséquent le phénomène se produit en raison de l'existence du champ de pesanteur terrestre.

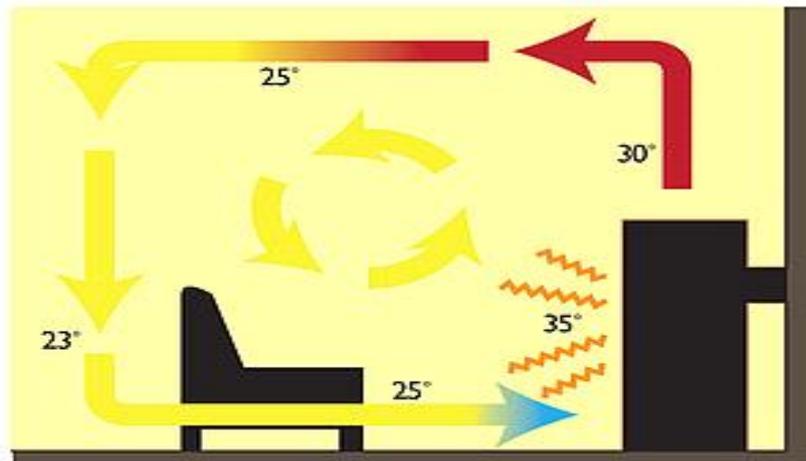


Figure 2.4 : Convection naturelle

Domaines d'applications de la convection naturelle

Les applications du transfert thermique sont variées, dans lesquelles la convection naturelle est le phénomène le plus dominant. La meilleure compréhension de ce phénomène augmente le nombre d'applications et mène à un certain nombre de conceptions industrielles et environnementales sophistiquées.

En outre, les problèmes océanographiques et atmosphériques tels que les effets de serre, les changements extrêmes du climat, ainsi que les problèmes technologiques, à savoir les équipements électriques et les réacteurs nucléaires, les appareils ménagers, les réfrigérateurs et les échangeurs de chaleur sont tous des problèmes, qui ont donné un intérêt particulier à cette science.

2.4.2. Convection forcée

Le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...).

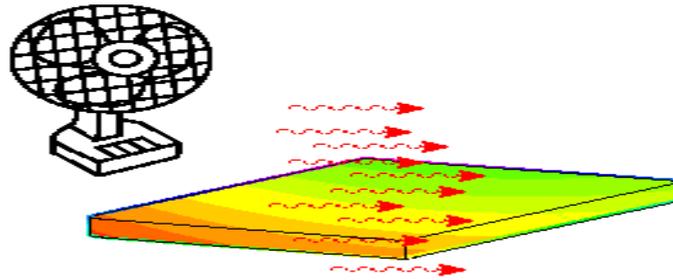


Figure 2.5 : Convection forcée

Exemple: les 3 modes de transfert thermique ensemble :

Cette figure représente les trois modes de transfert de chaleur dans un phénomène quotidien.

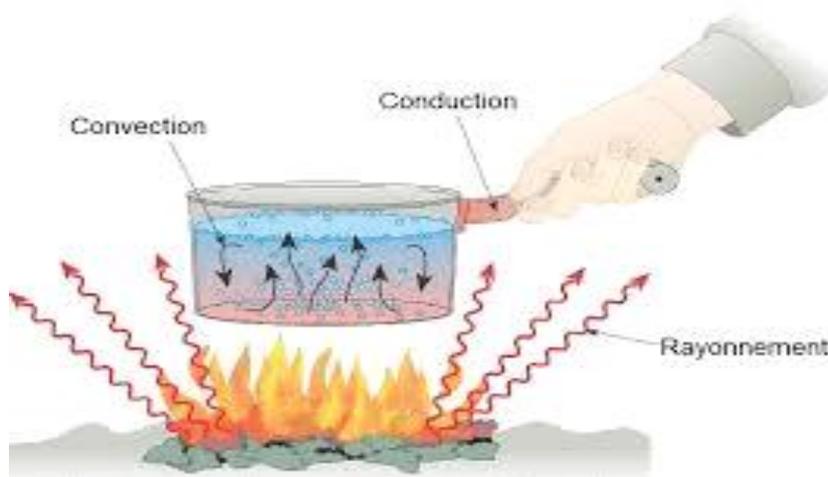


Figure 2.6 : Les 3 modes de transfert thermique ensemble

2.5. Situation de l'étude

L'échangeur de chaleur est un équipement qui permet d'assurer un transfert de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid sans contact direct entre les deux. Le même fluide peut conserver son état physique liquide ou gazeux.

Le souci technologique majeur des échangeurs de chaleur est l'amélioration de l'échange thermique entre les deux fluides tout en générant le moins de pertes de charges ou de leur réduire à leur plus bas niveau possible.

2.6. Définition de l'échangeur de chaleur

Un échangeur de chaleur est un système qui permet d'échanger la chaleur entre deux fluides ou plus. Dans un échangeur thermique, le fluide chaud et le fluide froid sont séparés par une paroi bien adaptée et par principe la transmission de la chaleur se fait du fluide chaud vers le fluide froid.

2.7. Critères de classement des échangeurs

Il existe plusieurs critères de classement des différents types d'échangeurs. Énumérons les principaux.

2.7.1. Type de contact

- **Échangeurs à contact direct** : Le type le plus simple comprend un récipient ou canalisation dans lequel les deux fluides sont directement mélangés et atteignent la même température finale.
- **Échangeurs à contact indirect** : les deux fluides s'écoulent dans des espaces séparés par une paroi.

2.7.2. La disposition des écoulements dans un échangeur de chaleur

Dans les échangeurs à fluide séparés, les modes de circulation des fluides peuvent se ranger en deux catégories :

- Même sens « Co-courants ».
- Sens contraire « contre-courant ».

Ou bien les vecteurs vitesses sont perpendiculaire l'un à l'autre ; il s'agit cette fois de «courant croisés »

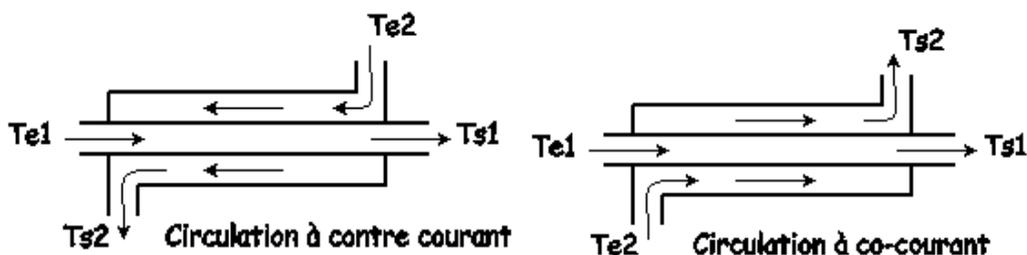


Figure 2.7 : Les différents modes de circulation

Simulation Numérique d'un Mélangeur Statique

3.1. Introduction

La compréhension du comportement des fluides est bien souvent un facteur important dans le développement de produit. Grâce à la capacité de calcul disponible toujours plus grande, l'analyse des écoulements a de plus en plus tendance à quitter le laboratoire pour entrer dans le monde de la simulation numérique. Des interfaces conviviales et intuitives ainsi que son intégration dans le processus de développement élargissent continuellement la palette d'utilisateurs de calcul fluide. Le rôle central pour ce type de calcul est détenu comme auparavant par l'ingénieur calcul spécialiste en CFD, mais les environnements de nouvelle génération comme ANSYS ICEM CFD donnent un accès à certaines applications aux ingénieurs sans connaissance détaillée de la CFD. Avec l'importance croissante des calculs couplés (interaction fluide/structure), cet aspect déjà très implanté dans la palette de produits ANSYS prend toute son importance.

Les applications fluides interviennent sous différentes formes dans de nombreux domaines : depuis la climatisation de grands bâtiments jusqu'à la simulation d'essais en soufflerie pour l'industrie automobile, en passant par l'optimisation de turbines, de pompes et par les calculs d'écoulements dans les domaines micro.

3.2. Présentation du code de calcul

3.2.1. ANSYS CFX-16.0

Il est présenté comme l'un des codes les plus puissants du marché dédié au calcul d'écoulements. Le logiciel ANSYS CFX 16.0 propose un nombre assez important d'options qui déterminent la forme des équations de Navier-Stokes et des équations de transport. L'utilisateur a le choix entre un écoulement tridimensionnel, monophasique ou multiphasique, turbulent ou laminaire, stationnaire ou instationnaire, incompressible ou compressible, avec ou sans transfert de chaleur, avec ou sans introduction de substances chimiquement réactives ou non réactives. Pour les écoulements turbulents, ANSYS CFX 16.0 permet d'utiliser les catégories classiques des modèles de turbulence.

3.2.2. ANSYS ICEM CFD

C'est un logiciel de génération de maillage dédié à la mécanique des fluides, mais également aux applications de mécanique de structures. Solution de calcul complète en CFD. Le logiciel de calcul CFX est utilisé dans le développement de produits ou l'analyse de processus de fabrication quand un écoulement, un transfert de chaleur ou une réaction chimique joue un rôle important.

CFX est un outil de simulation 3D efficace permettant de répondre rapidement à des problèmes d'écoulements et de trouver des solutions adéquates. Il en découle un nombre plus restreint de prototypes et donc un gain de productivité.

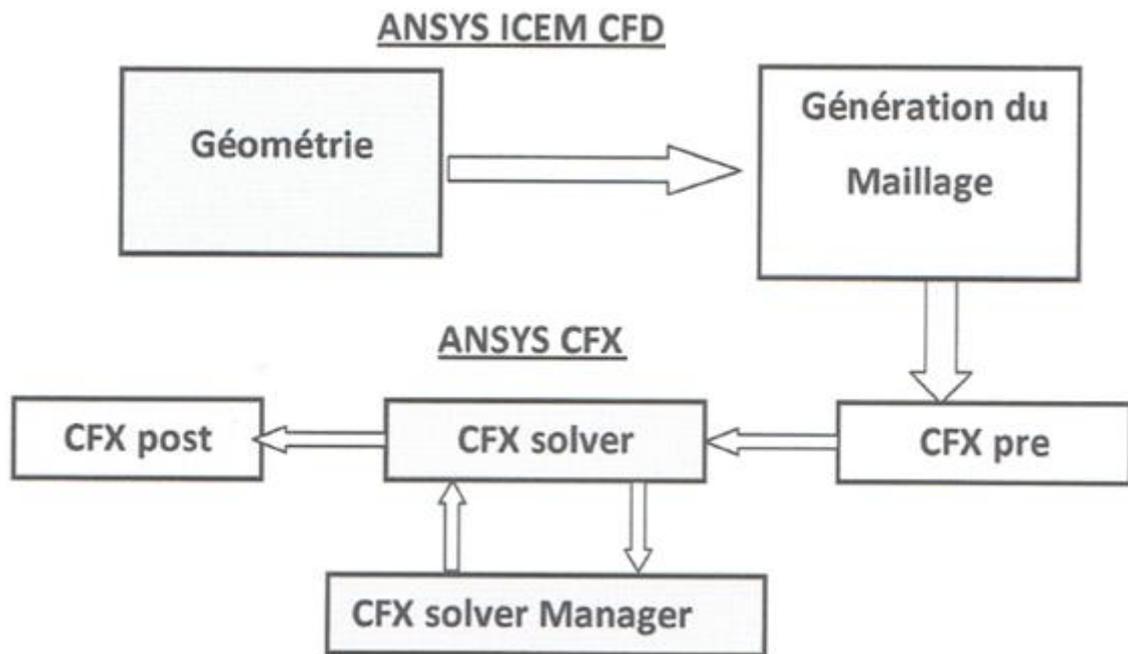


Figure 3.1 : Les principaux blocs de l'ANSYS CFX 16.0

Le module ICEM permet d'établir la géométrie est utilisé comme un logiciel de CAO traditionnel. La géométrie est construite à partir de points, de courbes, de surfaces et de volume.

3.2.3. CFX-Pré

Le module CFX-pre permet quant à lui de définir les conditions aux limites et initiales du système, ainsi que les équations à résoudre, le type de résolution (régime permanent ou impermanent), les paramètres du solver, parmi lesquels : le pas de temps, le nombre d'itérations, le critère de convergence ainsi que la nature des fluides (ou solides) en présence.

Les conditions aux limites sont de 5 types : *inlet*, *outlet*, *opening*, *wall* et *symmetry* :

- ✓ Les conditions de type *inlet* sont utilisées dans le cas d'un écoulement entrant à l'intérieur du domaine.
- ✓ Les conditions de type *outlet* sont quant à elles utilisées dans le cas d'un écoulement sortant à l'extérieur du domaine.
- ✓ La condition *opening* est utilisée dans le cas d'une méconnaissance de la nature entrante ou sortante de l'écoulement.
- ✓ La condition aux limites de type *Wall* est attribuée aux parois imperméables à l'écoulement.

Une fois tous les paramètres définis, CFX-pre génère un fichier « .def » qui contient toutes les informations relatives au maillage, aux conditions aux limites et initiales, ainsi que tous les autres paramètres introduits dans CFX-pre. C'est ce fichier qui va être la base de travail du Solver.

3.2.4. CFX-Solver

Le module CFX-solver est le module qui effectue les calculs. Il est basé sur l'intégration des équations de Navier Stokes dans chaque maille et dispose de modèles additionnels pour prendre en compte la turbulence, le rayonnement thermique....

Dans le cas d'une résolution en régime permanent, le calcul se poursuit jusqu'à ce que, soit le nombre maximal d'itération demandé par l'utilisateur est atteint, soit la solution satisfait au critère de convergence. A la fin de son calcul, CFX-solver génère deux types de fichiers :

- ✓ Un fichier « .out » lisible par un éditeur de texte. Ce fichier résume le déroulement du calcul. Il contient, entre autres, les informations du « .def », ainsi que le bilan du système.

- ✓ Un fichier «.res » qui contient l'ensemble des résultats. Ce fichier est directement exploitable par CFX-post.

3.2.5. CFX-Post

Le module CFX-post est un outil graphique permettant le traitement et la visualisation des résultats. Il permet d'appliquer des textures sur la géométrie, de visualiser des contours, des iso-surfaces, des lignes de courant, des champs de vitesses.... Il permet également l'exportation des résultats sous forme numérique, comme par exemple la valeur des différentes variables sur chaque nœud, sous forme photographique et même sous forme d'animation.

3.3. Présentation du problème

La conception du mélangeur se compose d'un tuyau cylindrique équipé d'un nombre d'éléments de forme hélicoïdale. Chaque lame est positionnée perpendiculairement à la précédente, est tordue à droite ou à gauche par un degré de rotation de 180° . Le mélange est assuré par l'étirement et la réorientation du fluide lors de son passage à travers la lame: la torsion et la coupe perpendiculaire délivre une séquence de pliage et d'empilement (**Rafiee et al., 2013**).

Les différents paramètres géométriques indiqués sur la **Figure 3.2** sont résumés comme suit :

- ✓ $D = 10$ mm,
- ✓ $L = 120$ mm,
- ✓ $d = 8$ mm.
- ✓ L'épaisseur de l'élément : $t = 1$ mm.
- ✓ L'angle de torsion de la pale est variée, les cas étudiés sont : $\alpha = 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ et 90° .
- ✓ Le 1er élément est placé à une distance de 15 mm (par rapport à l'entrée).
- ✓ La longueur de l'élément est varié : $l^* = l/L = 0.1, 0.15$ et 0.20 .

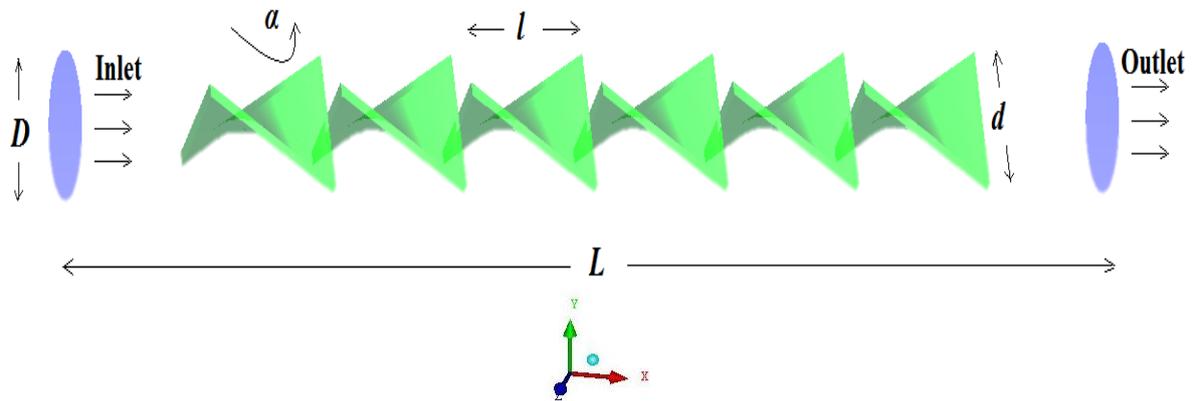


Figure 3.2. Mélangeur statique de type Kenics

3.4. Test du maillage

Dans cet article, la géométrie du problème étudié a été créée par l'outil informatique Ansys ICEM CFD (version 16.0). Le domaine de calcul a ensuite été divisé en mailles tétraédriques par le même logiciel (**Figure 3.3**). Le maillage raffiné a été créé près de la paroi du tube et des éléments hélicoïdaux pour capturer les détails de la couche limite. Les tests de maillage ont été effectués en vérifiant que les cellules supplémentaires n'ont pas changé la vitesse dans les régions à haute intensité de plus de 2.5%, comme l'ont réalisé d'autres auteurs (**Ameur, 2016**). Après les tests de maillage (**Tableau 3.1**), le cas avec le nombre total d'éléments de 544 817 a été choisi comme le meilleur, puisqu'il combine entre la haute précision des résultats et le temps de convergence inférieur. Le maillage sélectionné (c'est-à-dire le domaine de calcul) a ensuite été exporté vers l'outil informatique Ansys CFX (version 16.0). Les conditions aux limites (entrée, sortie et murs) sont définies dans le CFX-Pre. Toutes les limites solides ont été définies comme des parois fixes. Différents nombres de Reynolds pour l'écoulement à l'intérieur du tuyau ont été obtenus en faisant varier le débit massique à l'entrée du canal.

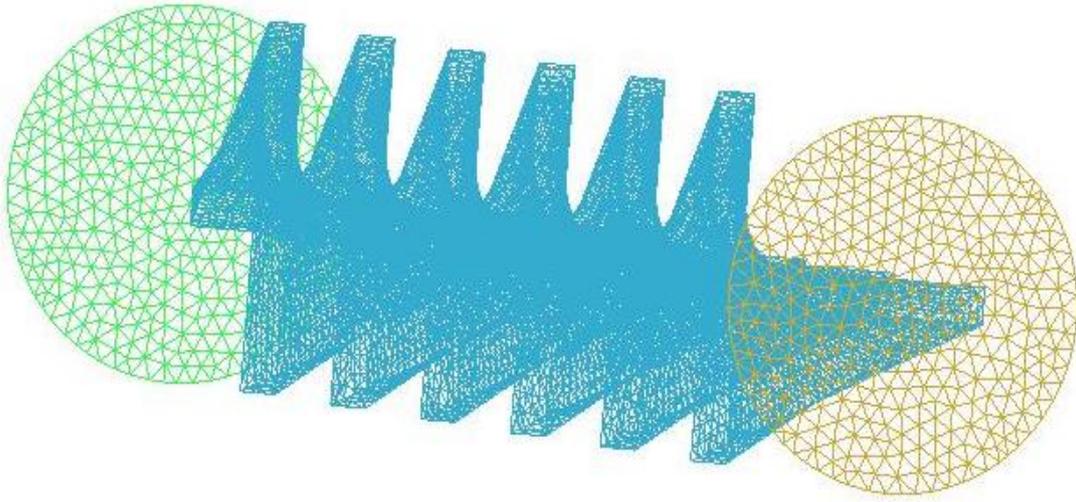


Figure 3.3 : Maillage tetrahedral du domaine de calcul

Tableau 3.1 : Test du maillage

	M1	M2	M3
Nombre des éléments	325 569	544 817	856 892
Chute de pression [Pa]	$8.7161 \cdot 10^4$	$8.7167 \cdot 10^4$	$8.7169 \cdot 10^4$
Temps CPU [seconde]	15 589	25 847	33 512

3.5. Hypothèses du problème

- ✓ Le régime d'écoulement est laminaire, le nombre de Reynolds varie entre 0.1 et 150.
- ✓ Le processus est stationnaire,
- ✓ Le problème est tridimensionnel,
- ✓ Le fluide est Newtonien et incompressible (eau),
- ✓ L'effet du champ gravitationnel est négligeable,
- ✓ Les éléments hélicoïdaux sont supposés adiabatiques.

Condition aux limites :

- ✓ La température de la paroi du tube : -6°C ,
- ✓ La température du fluide à l'entrée : 70°C ,

3.6. Caractéristiques de la machine

Les calculs ont été effectués sur une machine avec un CPU Pentium (R) i3 Core 2,20 GHz avec 2,0 Go de RAM. Les simulations ont été considérées comme convergentes lorsque la cible résiduelle des vitesses moyennes et la chute de pression sont inférieures à 10^{-5} . La convergence a été obtenue après environ 200 à 500 itérations et environ 2 à 3 h.

Résultats et discussion

4.1. Introduction

Dans presque tous les procédés chimiques industriels, comme l'homogénéisation, la dispersion des gaz, la cristallisation et la polymérisation, le mélange joue un rôle important sur la qualité du produit final. Un mélange inefficace se traduit par une qualité de produit inférieure avec un coût de production accru. Par conséquent, la détermination des caractéristiques de mélange est extrêmement importante, en particulier pour les fluides visqueux, où la probabilité de présence de zones peu mixtes ou isolées est élevée.

4.2. Synthèse bibliographique

Jusqu'à présent, de nombreux chercheurs continuent d'étudier l'efficacité de différents systèmes de mélange (**Ameur, 2015, 2016, Khapre et Munshi, 2015, Kazemzadeh et al., 2016**).

Les mélangeurs statiques de type Kenics, également connus sous le nom de mélangeurs immobiles (**Thakur et al., 2003**), sont largement rencontrés dans de nombreuses industries, comme les industries du pétrole, l'industrie pharmaceutique, de la peinture et de l'alimentation, pour réaliser une large gamme d'opérations telles que les réactions chimiques, le raffinage, la climatisation et le traitement des gaz (**Bi et al., 2013; Li et al., 2011; Kroon et Hartmann, 2008**).

Cependant, au lieu de réaliser de nombreuses opérations dans des cuves agitées, il est plus intéressant d'obtenir un mélange dans les tubes par des mélangeurs statiques, car la réduction du coût et de l'espace d'équipement est nécessaire. Un autre avantage intéressant est la consommation d'énergie, la puissance requise vient directement de la pompe qui entraîne l'écoulement en ligne et aucun moteur supplémentaire n'est nécessaire. En outre, les mélangeurs statiques sont préférés pour leur bonne qualité de mélange à faible taux de cisaillement, faible coût d'équipement, petites exigences d'espace, distributions du temps de séjour nettes, capacité d'auto-nettoyage et production de surface interfaciale élevée (**Thakur et al. 2003; Etchells et Meyer, 2004; Ghanem et al., 2014**). Les mélangeurs statiques sont

également de bonnes solutions de rechange pour le traitement des milieux agressifs et corrosifs et pour des opérations à haute pression (**Rabha et al. 2015**). Les mélangeurs statiques sont également utilisés pour améliorer les taux de transfert de masse du gaz au liquide (**Goto et Gaspillo, 1992; Heyouni et al. 2002; Martin et Galey, 1994; Munter, 2010**).

Parmi toutes sortes de mélangeurs statiques, les mélangeurs Kenics conçus par Sulzer Ltd, sont largement utilisés dans le mélange des fluides visqueux avec une viscosité extrêmement diverse, en particulier dans le traitement des polymères.

Meng et al. (2014) a étudié numériquement les caractéristiques du mélange dans les mélangeurs statiques avec des éléments à torsion multiple comme le mélangeur Kenics. **Meijer et al. (2012)** ont obtenu une comparaison quantitative des mélangeurs statiques. **Zhang et al. (2015)** ont combiné des mélangeurs Kenics et SMX pour mélanger des solutions de polyacrylamide, et ils ont constaté que cette combinaison a une bonne performance. **Olmiccia et al. (2011)** ont étudié la répartition du temps de résidence dans un mélangeur statique Kenics. D'autres chercheurs ont utilisé des méthodes numériques pour caractériser les champs d'écoulement en deux et trois dimensions (**Hobbs et al., 1998; Hobbs et Muzzio, 1998; Galaktionov et al., 2003; Kumar et al., 2008**). **Rafiee et al. (2013)** ont utilisé la technique Positron Empart Particle Tracking (PEPT) pour visualiser l'écoulement dans un mélangeur Kenics pour les fluides Newtoniens et non Newtoniens dans le régime laminaire. Ils ont signalé que l'écoulement de fluide non-Newtonien nécessite une longueur plus courte à se développer par rapport au fluide Newtonien. Les travaux mentionnés ci-dessus et autres (**Barega et al., 2013, Jin et Cheng, 2011**) confirment que le mélangeur statique, par rapport à une turbine conventionnelle, peut générer une bonne homogénéisation et avec un temps de séjour et une consommation énergétique minimale.

Pour un mélangeur Kenics, **Saadjian et al. (2012)** a signalé que l'emplacement initial d'une goutte de teinture est important pour son étalement sur la section transversale du tube uniquement dans les premiers éléments de mélange, son influence diminue ensuite. La position excentrique des éléments hélicoïdaux peut améliorer légèrement l'efficacité du

mélange en augmentant l'efficacité extensionnelle du mélange et en donnant une répartition plus homogène des taux d'étirement dans le mélangeur Kenics (Saatdjian et al., 2012).

4.3. Objectif du travail

L'objectif de la présente étude est d'étudier l'effet de certains paramètres sur les performances hydrodynamique et thermique d'un mélangeur statique (Kenics). Dans le but d'obtenir un mélangeur avec un taux de dégradation plus petit, une consommation d'énergie et une chute de pression plus faibles et avec une bonne qualité de mélange, trois paramètres sont étudiés, à savoir: le débit d'écoulement, l'angle de torsion de la pale et sa longueur.

4.4. Validation

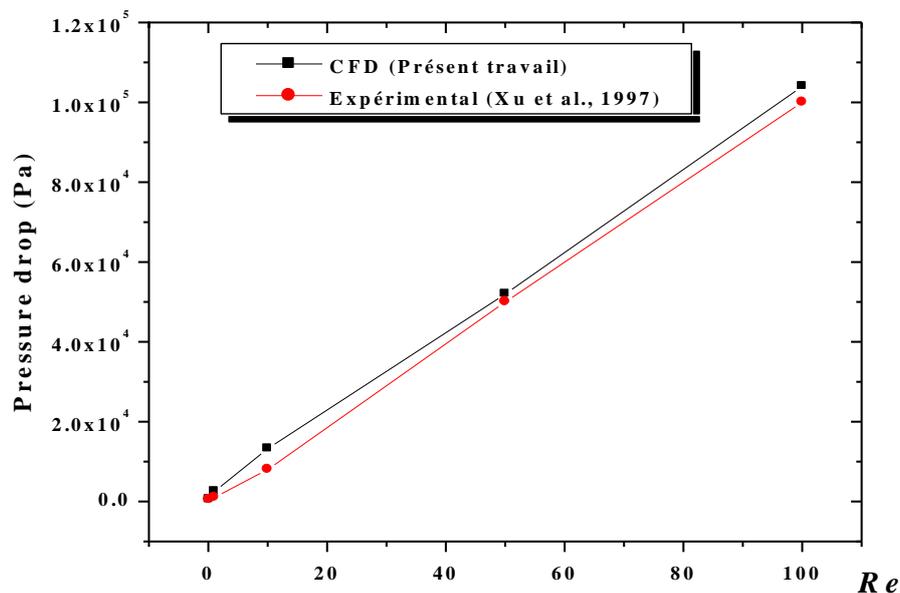


Figure 4.1 : Chute de pression en fonction du nombre de Reynolds

Pour l'écoulement laminaire, la chute de pression obtenue à partir des simulations CFD a été comparée avec les données expérimentales de **Xu et al. (1997)** est présentée sur la **Figure 4.1**. Comme remarqué, la confrontation des deux résultats montre un bon accord.

4.5. Résultats et Discussion

4.5.1. Distribution des vitesses

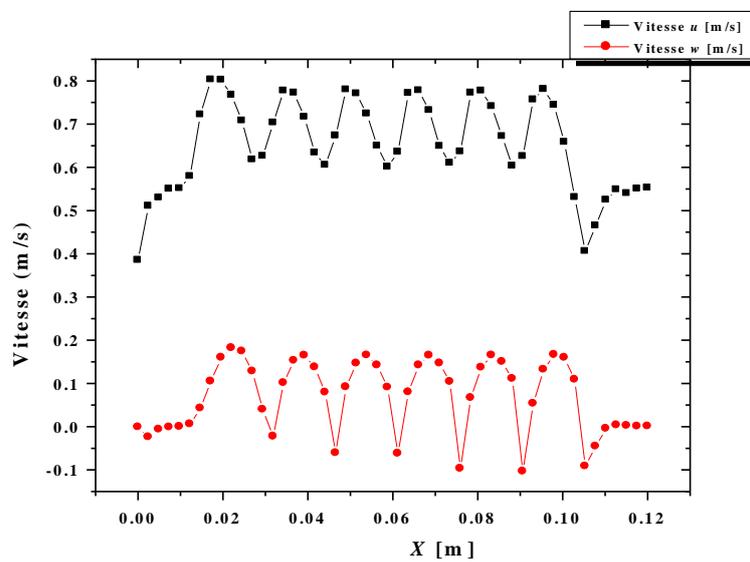
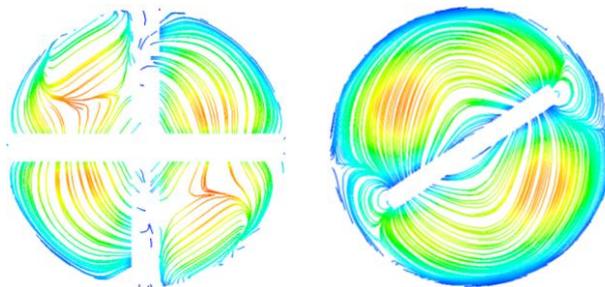


Figure 4.2 : Vitesse axiale et radiale le long du canal, $Re = 10$, $R^* = 2R/D = 0.12$, $l^* = 0.10$, $\alpha = 90^\circ$



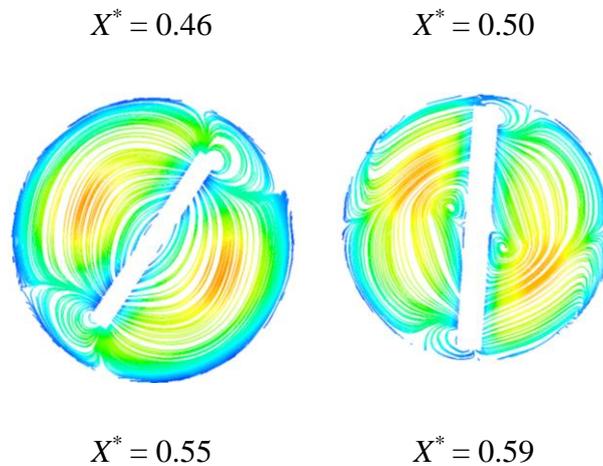


Figure 4.3 : Lignes de courant pour $Re = 150$, $l^* = 0.10$, $\alpha = 90^\circ$

Dans la première partie de notre travail, nous présentons la répartition des champs d'écoulement dans différents endroits du mélangeur (**Figures 4.2 et 4.3**). Nous notons que les résultats présentés dans cette section sont obtenus pour un mélangeur Kenics avec six éléments, la longueur de chaque élément ($l^* = l / L$) est égale à 0,1 et chaque élément est tordu d'un angle $\alpha = 90^\circ$.

Pour une position radiale $R^* = 2R / D = 0,12$, les vitesses axiales et radiales sont présentées le long de la longueur du mélangeur (**Figure 4.2**). Tout d'abord, nous remarquons que les deux composantes de vitesse augmentent continuellement jusqu'à ce qu'ils atteignent leur maximum au milieu de l'élément de longueur, puis elles diminuent jusqu'à leur valeur minimale à l'intersection de deux éléments voisins. Ensuite, le même profil de vitesse sera répété pour tous les éléments du mélangeur. En outre, il convient de mentionner que la composante de vitesse axiale est dominante (par rapport à la composante radiale).

Étant donné que l'écoulement est périodique, nous avons choisi un élément (le troisième) pour la présentation des rationalisations (**Figure 4.3**). Sur la **Figure 4.3**, X^* est la position axiale sans dimension (X/L). Nous notons que la coordonnée axiale (X^*) du troisième élément est limitée entre 0.45 et 0.65.

Dans la **Figure 4.3**, nous remarquons que la forme de torsion de l'élément crée une advection plus chaotique des particules de fluide et un vortex est formé dans l'espace entre l'élément et la paroi du tuyau. Ce vortex augmente de taille avec l'augmentation de l'angle de torsion (c'est-à-dire lorsque nous avançons avec la longueur de l'élément). En outre, un autre vortex est formé de chaque côté de l'élément pour une position très proche de l'élément suivant (c'est-à-dire près du point d'intersection de deux éléments voisins). Ceci est dû à la forte modification de la géométrie, puisque l'angle entre la fin de chaque élément et le début de l'autre est de 90° . Les deux facteurs: la torsion de l'élément et le changement brusque de l'angle entre les éléments sont responsables du mouvement intense des particules de fluide et du bon mélange.

4.5.2. Effet de nombre de Reynolds

Dans un tube simple et à des valeurs faibles du nombre de Reynolds, les trajectoires de particules de fluide sont parallèles à la paroi du mélangeur, la pression par unité de longueur est faible et le mélange dans une section transversale est médiocre par rapport au régime turbulent. Avec l'augmentation du nombre de Reynolds, les flux de fluide sont plus intensifiés et le mélange dans une section transversale sera amélioré, mais avec une pénalité supplémentaire dans la chute de pression. Une solution efficace pour ce problème est l'utilisation des mélangeurs statiques, qui sont des éléments tordus insérés à l'intérieur du canal pour couper, tordre, replier et combiner de nouveau les particules fluides (**Hobbs et Muzzio, 1998**). Cette conception peut créer dans les conditions d'écoulement laminaire une agitation chaotique comme dans les flux turbulents (**Hobbs et Muzzio, 1997; Saadjan et al., 2012**).

Une comparaison des contours de vitesse pour différentes valeurs du nombre de Reynolds dans le mélangeur Kenics révèle l'impact du nombre de Reynolds (**Figures 4.4 et 4.5**).

L'écoulement dans un mélangeur statique à six éléments a été analysé par des vitesses sans dimension (vitesse axiale, radiale et tangentielle) par rapport au rayon du mélangeur. On remarque que la vitesse axiale augmente lorsque le nombre de Reynolds augmente. À l'inverse, les valeurs des composantes de vitesse sans dimension adjacentes à la paroi du tube

sont plus petites avec la diminution du nombre de Reynolds (**Figure 4.6**). Le signe moins des vitesses radiales et tangentielles (**Figure 4.6b, 4.6c**, respectivement) indique l'existence de contre courant. L'augmentation de Re entraîne une augmentation des tourbillons.

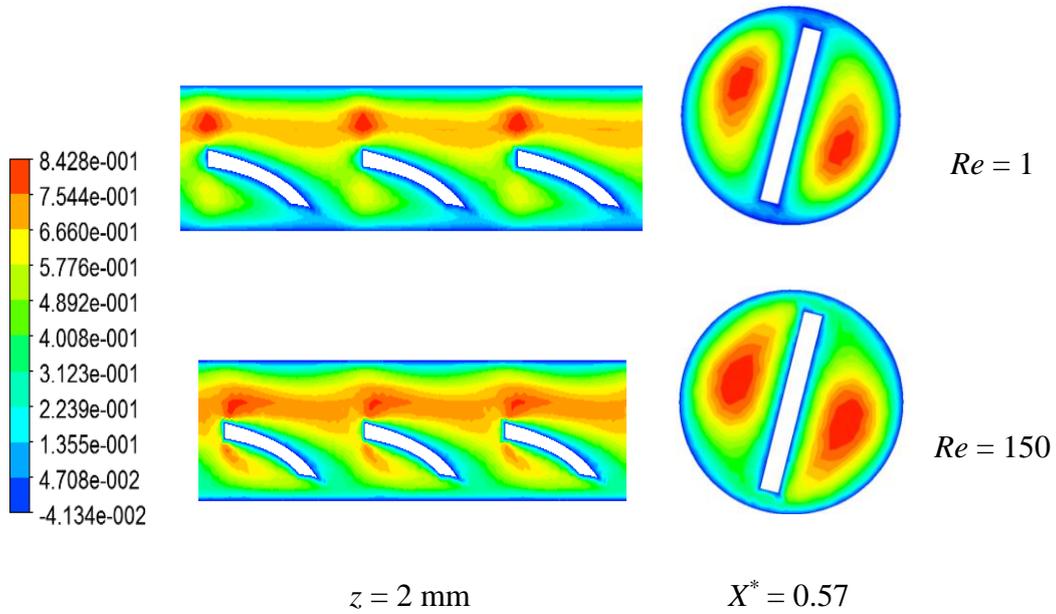
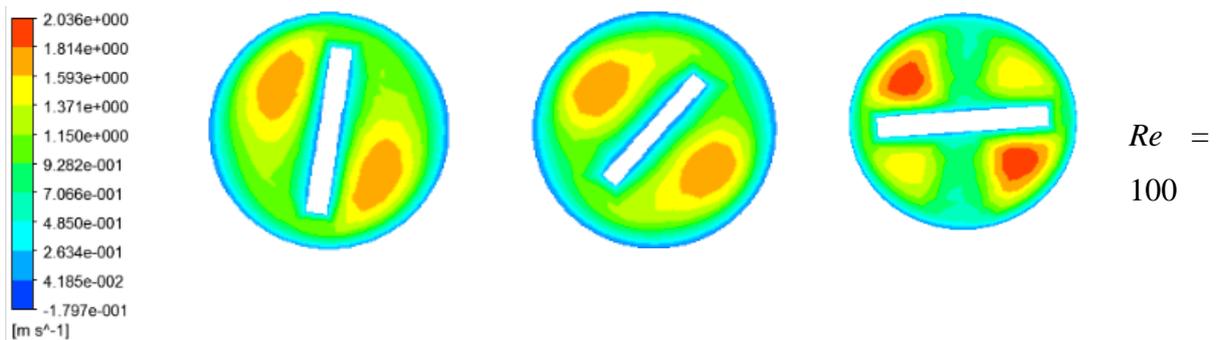


Figure 4.4 : Contours de vitesse pour $\alpha = 90^\circ$, $l^* = 0.10$



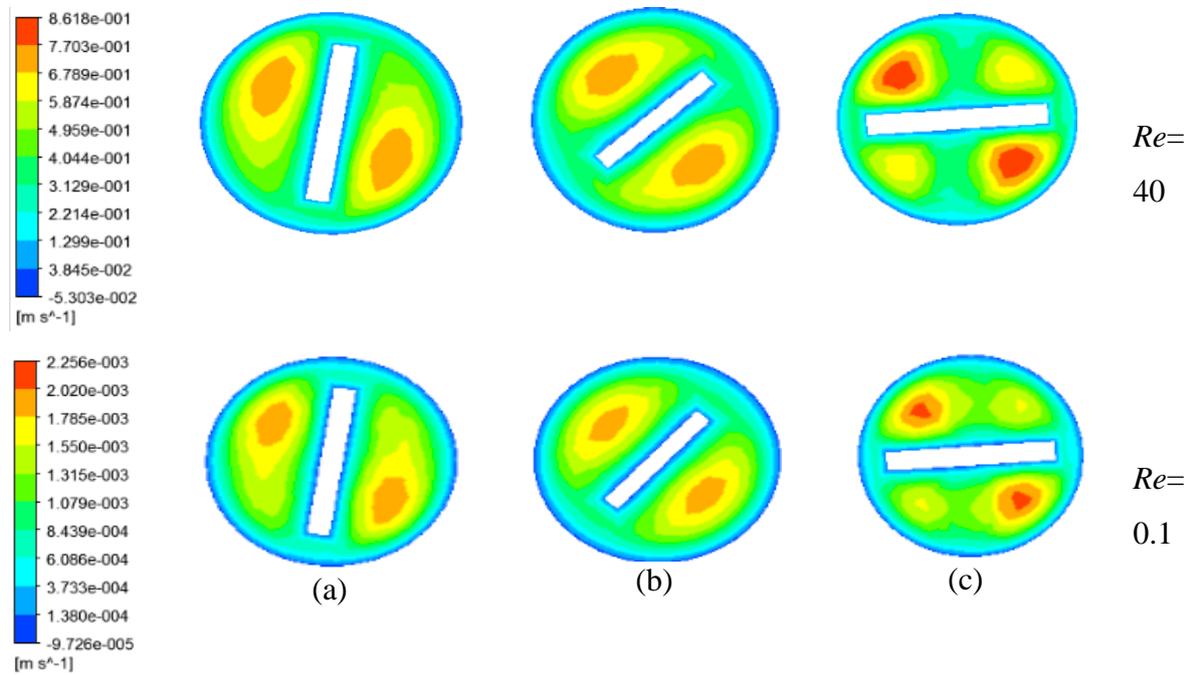
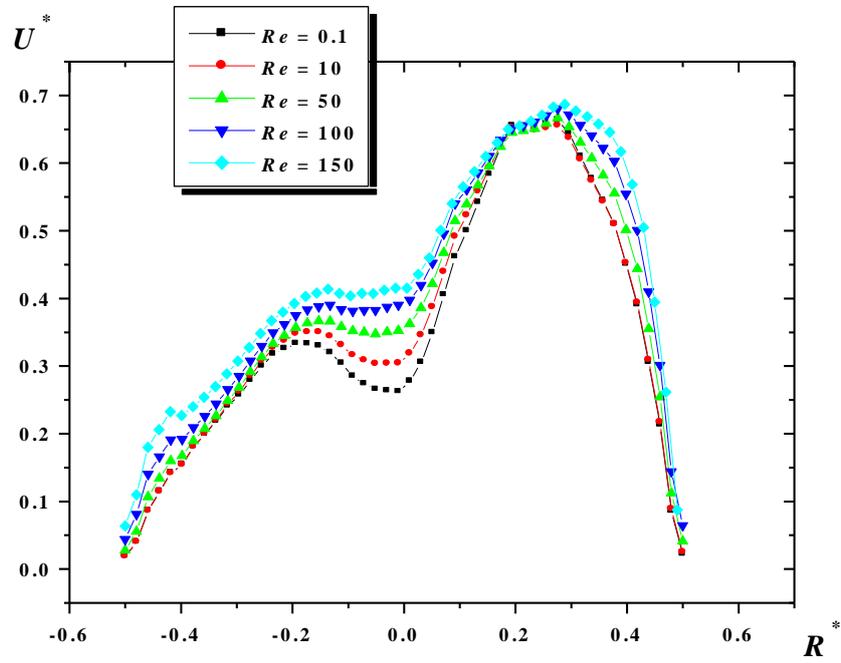
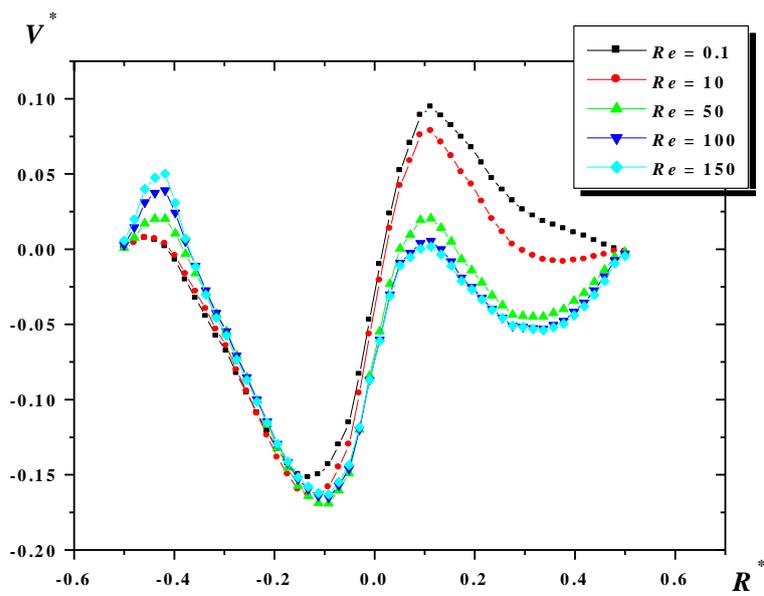


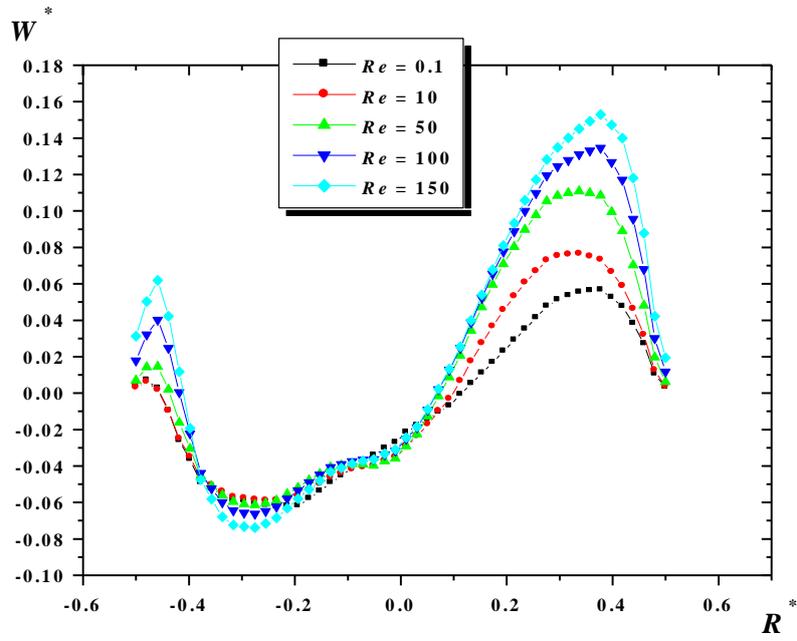
Figure 4.5 : Contours de vitesse pour $\alpha = 90^\circ$ aux différentes positions sur la pale (a) au début, (b) au milieu, (c) à la fin de la pale



(a)



(b)



(c)

Figure 4.6 : Variations de vitesse en fonction du rayon pour $X^* = 0.59, l^* = 0.10, \alpha = 90^\circ$, (a) composante axiale, (b) composante radiale, (c) composante tangentielle

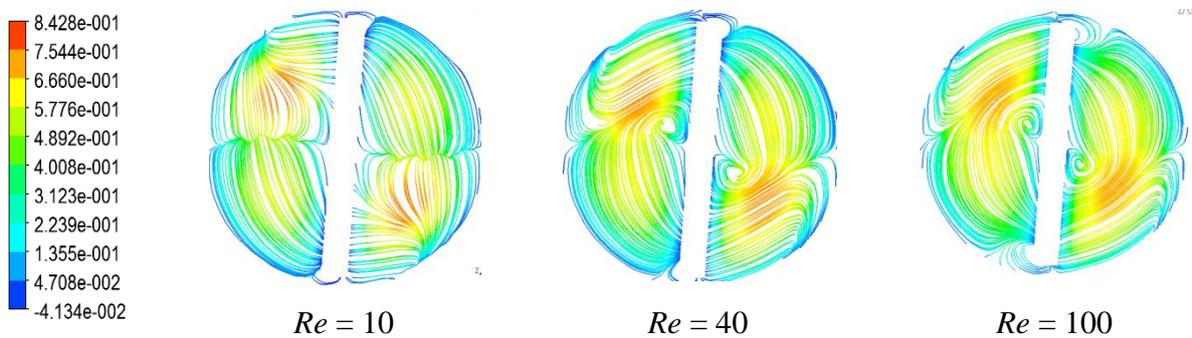


Figure 4.7 : Lignes de courant pour différent $Re, X^* = 0.59, \alpha = 90^\circ$

La **Figure 4.7** montre les courbes de vitesse pour différents nombres de Reynolds ($Re = 10, 50$ et 150). Pour le régime laminaire profond ($Re = 10$), aucun vortex n'est formé près du côté de l'élément. Cependant et pour Re ($Re = 50$) supérieur, les vortex primaire et secondaire sont clairement observés sur les deux côtés de l'élément Kenics. Ces tourbillons sont plus intensifiés avec l'augmentation du Re . En outre, le petit vortex formé dans l'espace entre l'élément et la paroi du mélangeur à $Re = 50$ augmente lorsque $Re = 150$.

Comme repris dans cette section, l'augmentation du débit (c'est-à-dire le nombre de Reynolds) est avantageuse pour intensifier les mouvements des fluides et pour améliorer le mélange. Cependant, qu'en est-il de la consommation d'énergie ? Ce problème est étudié dans les sections suivantes.

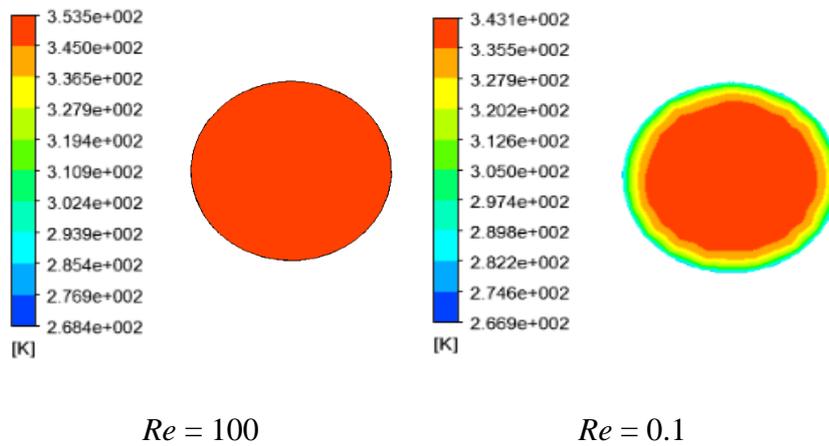
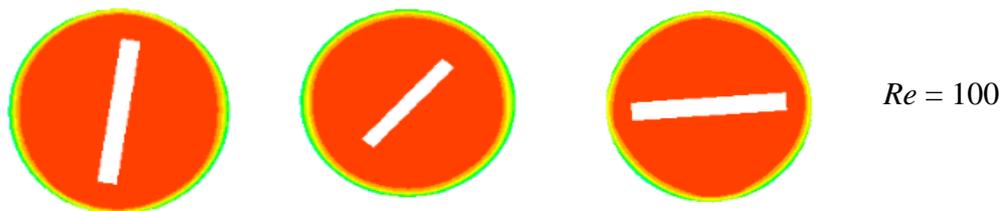


Figure 4.8 : Influence du Re sur la distribution de température dans un tube lisse



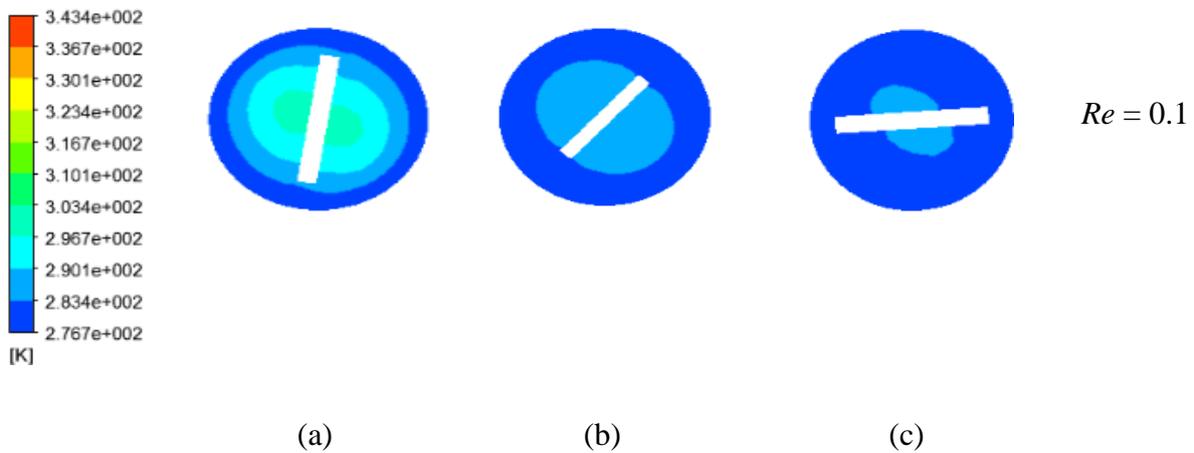


Figure 4.9 : Contours de température pour $\alpha = 90^\circ$ aux différentes positions sur la pale (a) au début, (b) au milieu, (c) à la fin de la pale

Les **Figures 4.8 et 4.9** montrent la distribution de température pour un tube lisse et un mélangeur Kenics, respectivement. Il est clairement illustré que l'augmentation du débit d'écoulement (Re) fait diminuer le temps de séjour des particules fluide dans le dispositif, ce qui nécessite une distance plus longue pour refroidir le fluide chaud.

4.5.3. Effet de la longueur de la pale

Le design de la pale joue un rôle important sur la consommation d'énergie et les caractéristiques globales du mélange. Dans cette section, nous explorons l'effet de la longueur de la pale (l) exprimée sous forme adimensionnelle $l^* = l / L$. Les débits plus rapides sont obtenus avec les grandes valeurs du rapport de hauteur (**Figure 4.10**).

Pour trois valeurs différentes du rapport de longueur de pale ($l^* = l / L = 0.1, 0.15$ et 0.20), la comparaison des pertes de pression dans le mélangeur statique hélicoïdal (**Figure 4.11**) montre une augmentation significative de la chute de pression avec l'augmentation du nombre de Reynolds et la diminution de la longueur de la pale. Ceci est dû à l'augmentation du nombre d'éléments.

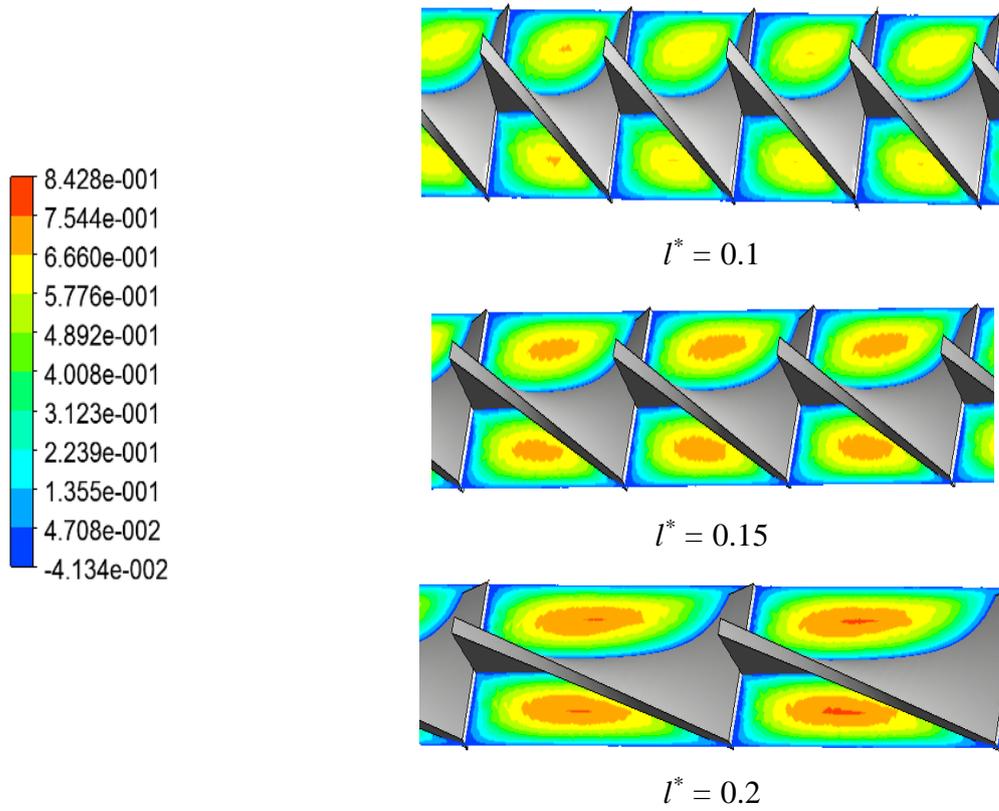


Figure 4.10 : Champ de vitesse pour différentes longueurs de la pale ($l^* = l/L$), $\alpha = 90^\circ$, $Re =$

100

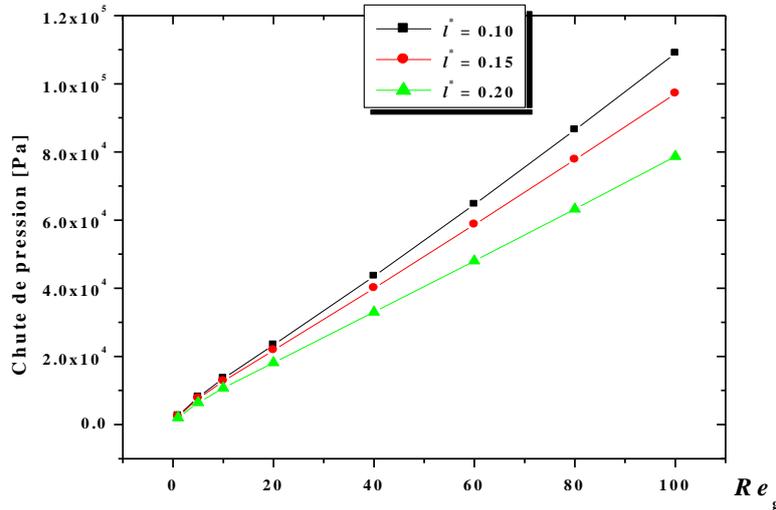


Figure 4.11 : Chute de pression pour différentes longueurs de la pale ($l^* = l/L$), $\alpha = 90^\circ$

4.5.4. Effet de l'angle de torsion

Pour un tube équipé de six éléments ($l^* = 0,1$) et pour différentes valeurs de l'angle de torsion ($\alpha = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ et 90°), la distribution de vitesse est présentée sous diverses formes (un plan horizontal sur la **Figure 4.12** et un plan vertical sur la **Figure 4.13**). La vitesse axiale se développe rapidement selon un profil parabolique et les valeurs supérieures sont observées dans le centre du tube (**Figures 4.12, 4.13, 4.14a**). L'augmentation de l'angle de torsion génère une augmentation des vitesses radiales et tangentielles et une diminution de la vitesse axiale. Cela s'explique par la formation de vortex sur les deux côtés de la pale pour le cas $\alpha = 90^\circ$ seulement. La présence de tels tourbillons nécessite une puissance supplémentaire en termes de chute de pression (comme on l'a observé à la **Figure 4.15**) : la chute de pression augmente avec l'augmentation de l'angle de torsion de 30° à 90° sur la gamme du nombre de Reynolds ($1 \leq Re \leq 100$).

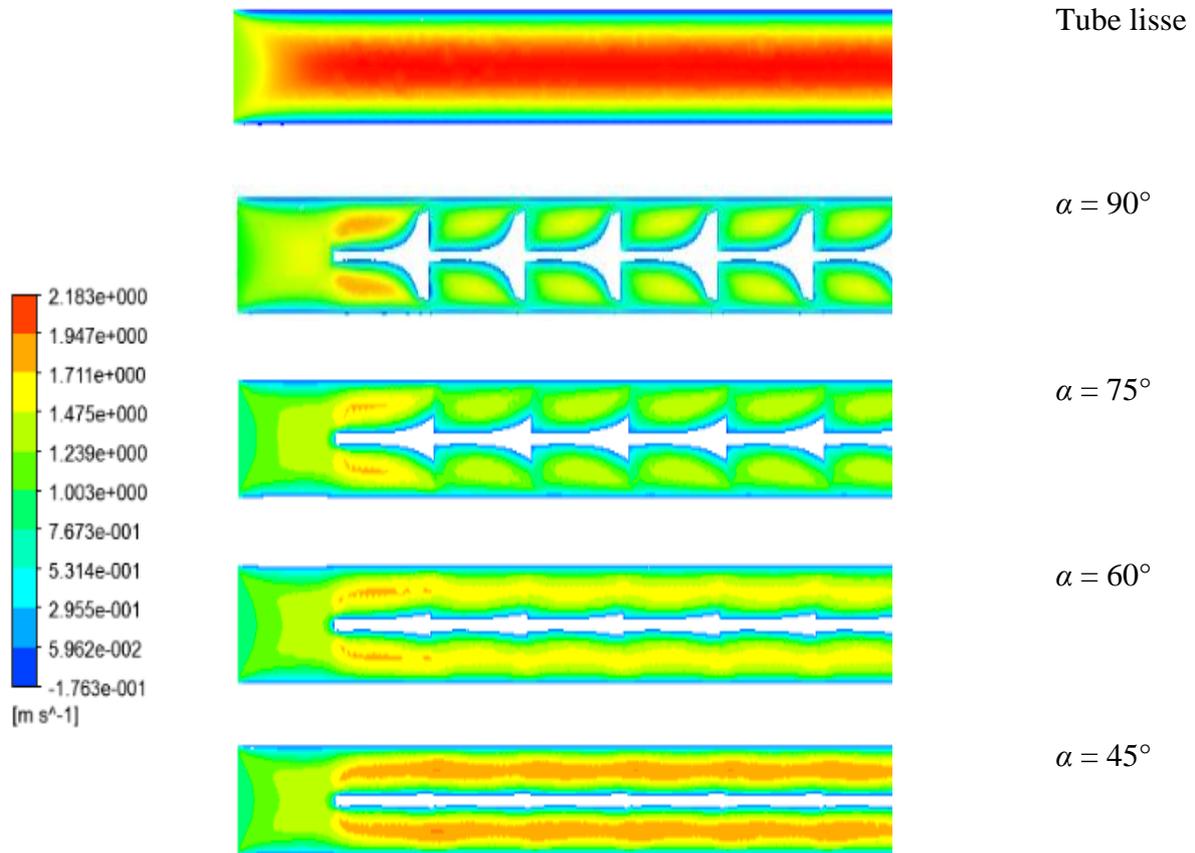


Figure 4.12 : Contours de vitesse pour $Re = 100$, $l^* = 0.10$

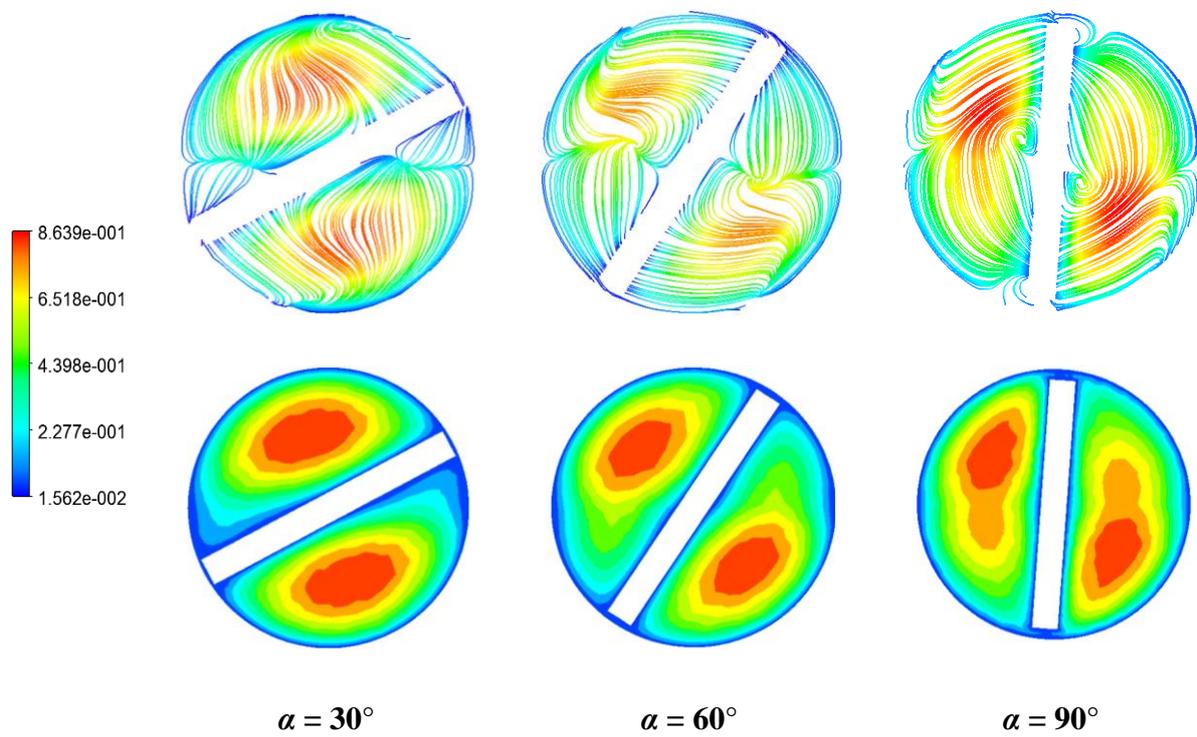
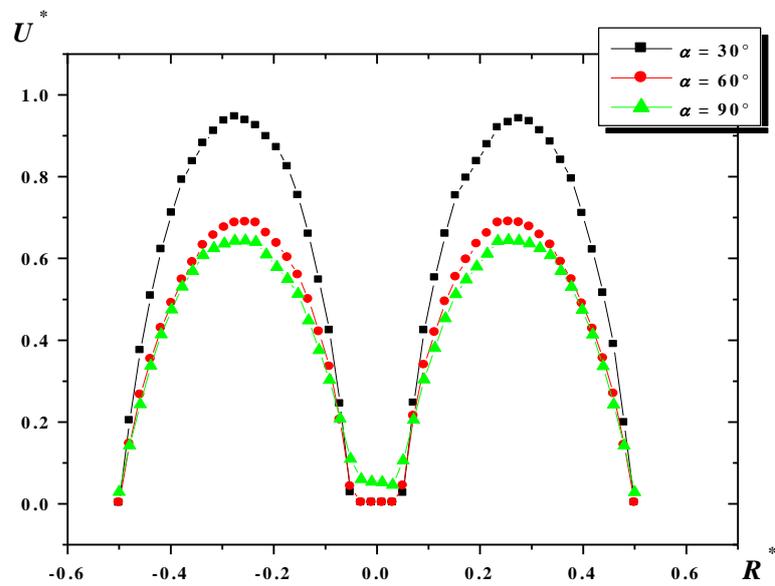
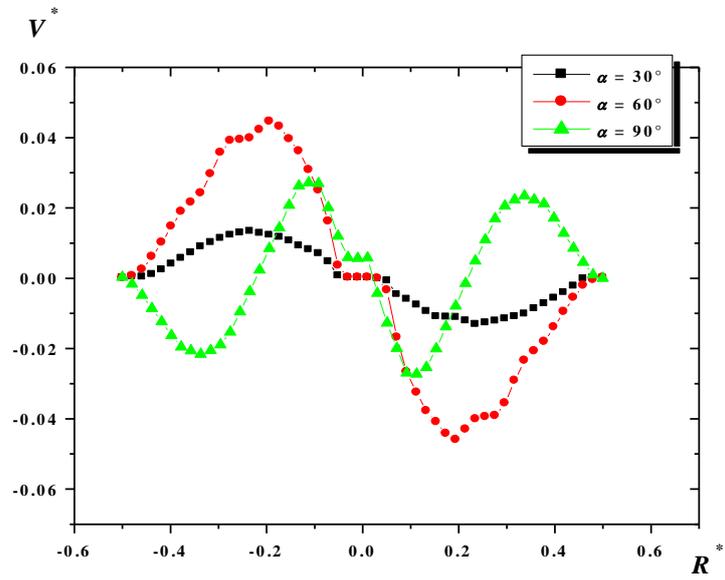


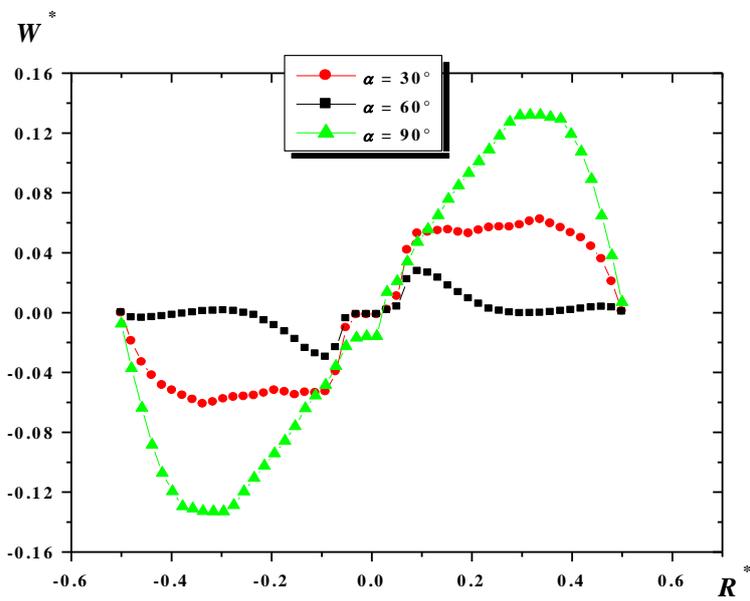
Figure 4.13 : Lignes de courant pour $Re = 100$, $l^* = 0.10$, $X^* = 0.59$



(a)



(b)



(c)

Figure 4.14 : Variations de vitesse en fonction du rayon pour $X^* = 0.50, l^* = 0.10$ (a) composante axiale, (b) composante radiale, (c) composante tangentielle

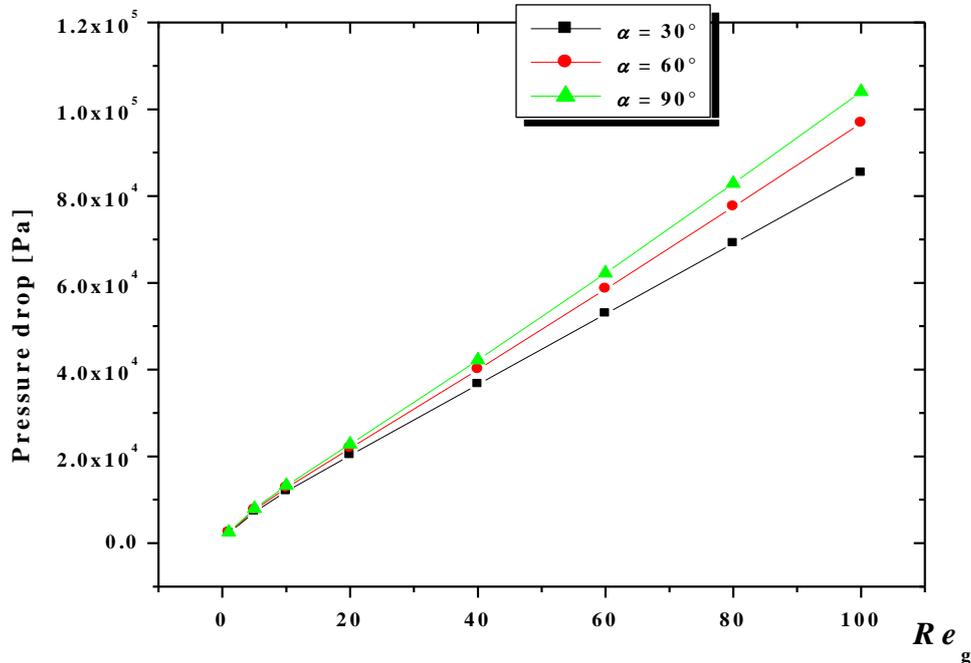


Figure 4.15 : Chute de pression pour différentes valeurs de Re et α , $l^* = 0.10$

L'effet de la présence des chicanes (éléments hélicoïdaux) ainsi que leur angle de torsion, sur le transfert de chaleur est présenté sur les **Figures 4.16 et 4.17**. Parmi toutes les configurations examinées, le mélangeur Kenics avec un angle $\alpha = 90^\circ$ semble comme une meilleure configuration en terme d'accélération du refroidissement du fluide industriel. Cette géométrie favorise plus de turbulence par rapport aux autres cas étudiés.

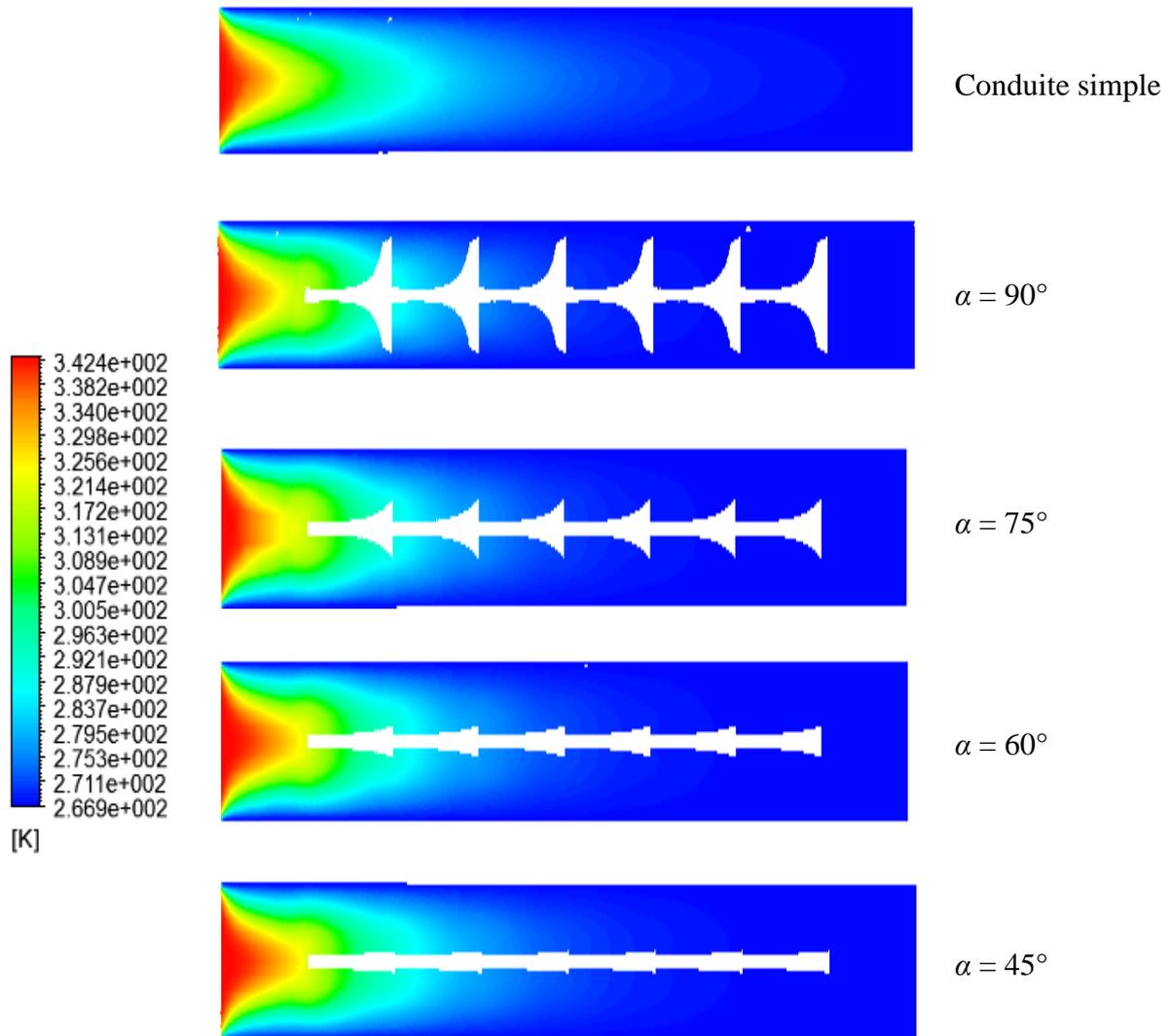


Figure 4.16 : Distribution de température pour $Re = 0.1$

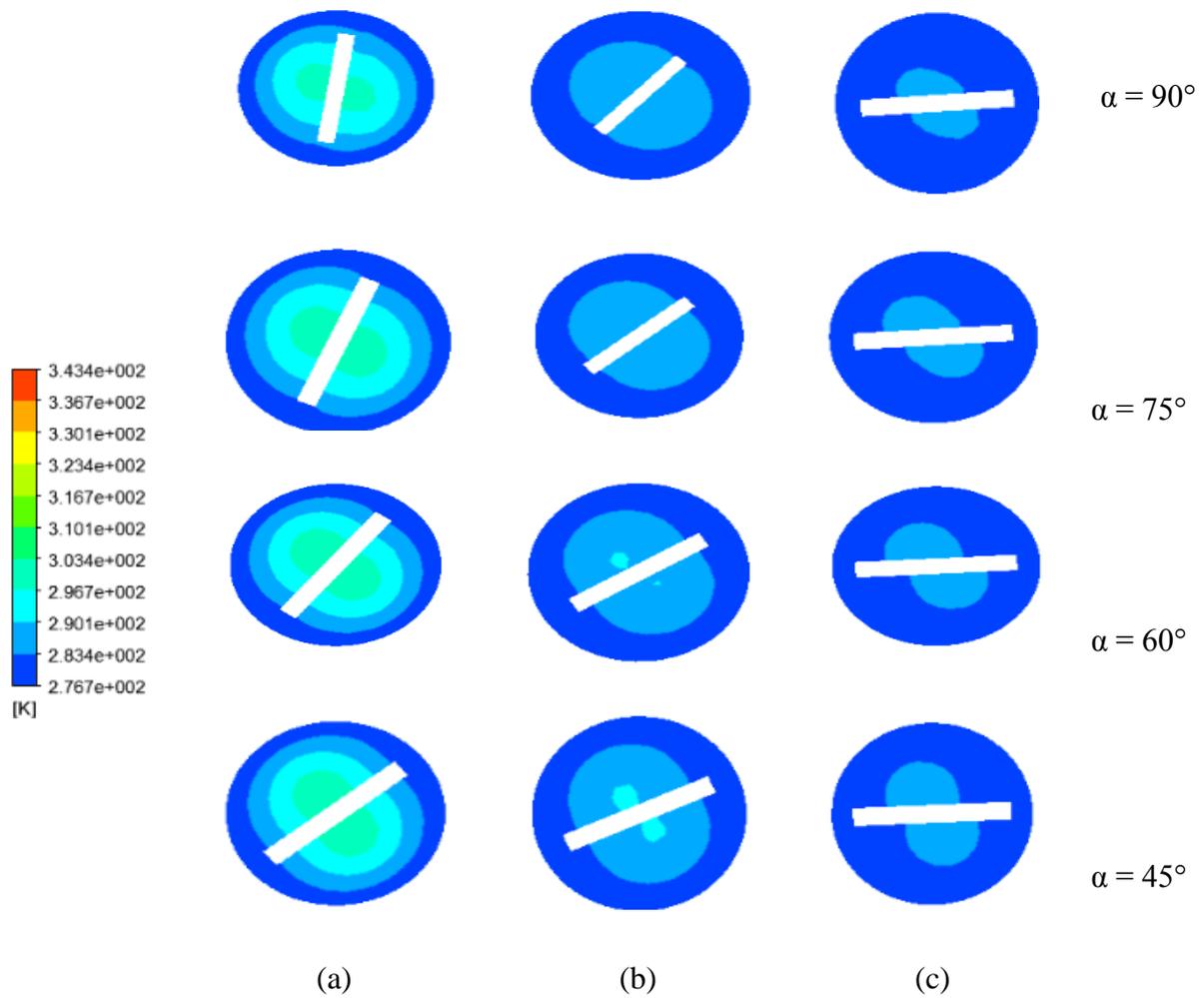


Figure 4.17 : Contours de température pour $Re = 0.1$ aux différentes positions sur la pale (a) au début, (b) au milieu, (c) à la fin de la pale

Conclusion

En utilisant l'outil CFD, les caractéristiques hydrodynamiques, thermiques et énergétiques dans un mélangeur statique ont été déterminées pour différents paramètres : débit volumique, angle de torsion de la pale et longueur de pale.

Les champs d'écoulement sont susceptibles d'être très différents avec différentes géométries. Les principales conclusions peuvent être résumées comme suit:

- L'augmentation du nombre de Reynolds peut intensifier le mouvement chaotique des particules de fluide et améliorer la qualité du mélange, mais avec une chute de pression élevée (qui est dû aux frottements avec les parois).
- La diminution du temps de séjour des particules fluide dans le dispositif nécessite une distance plus longue pour atteindre le refroidissement souhaité.
- La diminution de la longueur de la pale peut être considérée comme un obstacle devant l'écoulement.
- L'augmentation de l'angle de torsion intensifie les vitesses radiales et tangentielles et fait diminuer la vitesse axiale.
- Un mélange axial plus rapide peut être obtenu avec l'angle de torsion plus grand (le meilleur est pour $\alpha = 90^\circ$).
- Le meilleur mélange près des parois du tube est obtenu lorsque des vortex sont formés sur les deux côtés de la pale, c'est-à-dire dans le cas de l'angle de torsion $\alpha = 90^\circ$.
- La chute de pression augmente avec l'augmentation du Re , angle de torsion et la diminution de la longueur de la pale.
- Le transfert de chaleur est amélioré par la présence des éléments hélicoïdaux, et le cas de $\alpha = 90^\circ$ donne les meilleurs performances.

References Bibliographiques

- Ameur, H. (2015). Energy efficiency of different impellers in stirred tank reactors. *Energy* 93, 1980-1988.
- Ameur, H. (2016). Effect of some parameters on the performance of anchor impellers for stirring shear-thinning fluids in a cylindrical vessel. *Journal of Hydrodynamics* 28, 669-675.
- Barega, E.W., Zondervan, E. and A.B. Haan (2013). Influence of physical properties and process conditions on entrainment behavior in a static-mixer settler setup. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 52, 2958-2968.
- Barletta A. (1997). Fully developed laminar forced convection in circular ducts for power-law fluids with viscous dissipation. *Int. J. Heat Mass Transfer* 40, 15-26.
- Bi, R., Yang, X., Tan, T. and S. Zheng (2013). A method to predict phosgenation reaction performance to produce toluene diisocyanate in jet reactors. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 52, 15353-15358.
- Bouvenot, A. (2010). Transferts de chaleur, Masson
- Chhabra, R.P., Richardson, J.F. (1999). Non-Newtonien flow in process industries " Butterworth Heineman".
- Etchells, A.W. and C.F. Meyer (2004). Mixing in pipelines, in: E.L. Paul, V.A. Atiemo-Obeng, S.M. Kresta (Eds.), Handbook of Industrial Mixing, John Wiley & Sons Inc., Hoboken, NJ, pp. 391-475.
- Faure, T. (2012). Dynamique du fluide appliqué, application à l'aérodynamique.
- Fourier, J. (1822). Transfert thermique "théorie analytique de la Chaleur", IUP Génie civil.

- Galaktionov, O.S., Anderson P.D., Peters G.W.M. and H.E.H. Meijer (2003). Mixing and compounding-analysis and optimization of Kenics static mixers. *International Polymer Processing* 18, 138-150.
- Ghanem, A., Lemenand, T., Valle, D.D. and H. Peerhossaini (2014). Static mixers: Mechanisms, applications, and characterization methods – A review. *Chemical Engineering Research and Design* 92, 205-228.
- Goto, S. and P.D. Gaspillo (1992). The effect of static mixer on mass transfer in draft tube bubble column and in external loop column. *Chemical Engineering Science* 47, 3533-3539.
- Gray, D., Giorgini, A. (1976). The validity of the Boussinesq approximation for liquids and gases. *International journal Heat Mass transfert*, 19: 545-551.
- Heyouni, A., Roustan, M. and Z. Do-Quang (2002). Hydrodynamics and mass transfer in gas-liquid flow through static mixers. *Chemical Engineering Science* 57, 3325-3333.
- Hobbs, D.M. and F.J. Muzzio (1997). The Kenics static mixer: a three dimensional chaotic flow. *Chemical Engineering Journal* 67, 153-166.
- Hobbs, D.M., Swanson, P.D. and F.J. Muzzio (1998). Numerical characterization of low Reynolds number flow in the Kenics static mixer. *Chemical Engineering Science* 53, 1565-1584.
- Jin, Y. and Y. Cheng (2011). Chemical engineering in china: past, present and future. *AIChE Journal* 57, 552-560.
- Kazemzadeh, A., Ein-Mozaffari, F., Lohi, A. and L. Pakzad (2016). Investigation of hydrodynamic performances of coaxial mixers in agitation of yield-pseudoplastic fluids: Single and double central impellers in combination with the anchor. *Chemical Engineering Journal* 294, 417-430.
- Khapre, A. and B. Munshi (2015). Numerical investigation of hydrodynamic behavior of shear thinning fluids in stirred tank. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineering* 56, 16-27.

- Kreith F. (1999). Mechanical Engineering Handbook. *CRC press LLC*.
- Kroon, M.C. and D. Hartmann (2008). Toward a sustainable chemical industry: cyclic innovation applied to ionic liquid-based technology. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 47, 8517-8525.
- Kumar, V., Shirke, V. and K.D.P. Nigam (2008). Performance of Kenics static mixer over a wide range of Reynolds number. *Chemical Engineering Journal* 139, 284-295.
- Leleu, R. (2005). Transfert de chaleur, technique de l'ingénieur, traité des procédés J.1080
- Li, J. and I.A. Karimi (2011). Scheduling gasoline blending operations from recipe determination to shipping using unit slots. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 50, 9156-9174.
- Martin, N. and C. Galey (1994). Use of static mixer for oxidation and disinfection by ozone. *Ozone – Science Engineering* 16, 455-473.
- Meijer, H.E.H., Singh, M.K. and P.D. Anderson (2012). On the performance of static mixers: a quantitative comparison. *Progress in Polymer Science* 37, 1333-1349.
- Meng, H., Wang, F. and Y. Yu (2014). A numerical study of mixing performance of high-viscosity fluid in novel static mixers with multitwisted leaves. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 53, 4084-4095.
- Metzner, B. and R.E. Otto (1957). Agitation of non-Newtonian fluids. *AIChE Journal* 3, 3-11.
- Midoux, N. (1993). Mécanique et rhéologie des fluides en génie chimique. *Lavoisier*.
- Munter, R. (2010). Comparison of mass transfer efficiency and energy consumption in static mixers. *Ozone – Science Engineering* 32, 399-407.
- Olmiccia, J., Heniche, M. and F. Bertrand (2011). A particulate method for determining residence time in viscous flow processes. *Macromolecular and Material Engineering* 296, 362-372.

- Rabha, S., Schubert, M., Grugel, F., Banowski, M. and U. Hampel (2015). Visualization and quantitative analysis of dispersive mixing by a helical static mixer in upward co-current gas–liquid flow. *Chemical Engineering Journal* 262, 527-540.
- Rafiee, M., Simmons, M.J.H. and A. Ingram (2013). Development of positron emission particle tracking for studying laminar mixing in Kenics static mixer. *Chemical Engineering Research and Design* 91, 2106-2113.
- Rudman, M., Blackburn, H.M., Graham, L.J.W. and L. Pullum (2004). Turbulent pipe flow of shear-thinning fluids. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics* 118, 33-48
- Saatdjian, E., Rodrigo, A.J.S. and J.P.B. Mota (2012). On chaotic advection in a static mixer. *Chemical Engineering Journal* 187, 289-298.
- Saccadura, J. F. (1993). *Initiation aux transferts thermiques*, Paris 4^{ème} tirage.
- Thakur, R. K., Vial, C., Nigam, K. D. P., Nauman, E.B., and G. Djelveh (2003). Static mixers in the process industries – a review. *Chemical Engineering Research and Design* 81, 787-826.
- Xu, G., Feng, L., Li, Y. and K. Wang (1997). Pressure drop of pseudo-plastic fluids in static mixers. *Chinese Journal of Chemical Engineering* 5, 93-96.
- Zhang, L., Dong, J., Jiang, B., Sun, Y., Zhang, F. and L. Hao (2015). A study of mixing performance of polyacrylamide solutions in a new-type static mixer combination. *Chemical Engineering and Processing* 88, 19-28.