

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences & Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Option : Énergétique

THÈME

**Simulation numérique d'un écoulement
laminaire autour d'un cylindre avec rainure**

Préparé par : GUELAILIA Batoul Fatima Zohra

MERABET Souad

Devant le jury :

Noms et prénoms	Grade	Lieu d'exercice	Qualité
ABED Belkacem	MCA	UIK-Tiaret	Président
CHAÏB Khaled	MCA	UIK-Tiaret	Examineur
MEKROUSSI Said	MCA	UIK-Tiaret	Encadreur

2018/2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

1420

Sommaire

Introduction générale	01
------------------------------------	----

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1. Introduction	03
-------------------------	----

I.2. Généralités sur la mécanique de fluide :.....	03
--	----

I.2.1. Notion de fluide.....	03
------------------------------	----

I.2.2. Propriétés des fluides	04
-------------------------------------	----

I.2.2.1. Masse volumique	04
--------------------------------	----

I.2.2.2. Densité	04
------------------------	----

I.2.2.3. Viscosité.....	04
-------------------------	----

I.2.2.3.1. Viscosité dynamique	04
--------------------------------------	----

I.2.2.3.2. Viscosité cinématique.....	05
---------------------------------------	----

I.3. Ecoulement de fluides :.....	05
-----------------------------------	----

I.3.1. Différentes types des écoulements :.....	05
---	----

I.3.1.1. Ecoulement incompressibles	05
---	----

I.3.1.2. Ecoulements compressibles	06
--	----

I.3.1.3. Écoulement stable	06
----------------------------------	----

I.3.1.4. Écoulement instable	06
------------------------------------	----

I.3.1.5. Ecoulement stationnaire.....	06
---------------------------------------	----

I.3.1.6. Ecoulement non stationnaire.....	07
---	----

I.3.1.7. Ecoulement visqueux.....	07
-----------------------------------	----

I.3.1.8. Ecoulement non visqueux.....	07
---------------------------------------	----

I.3.2. Les régimes de l'écoulement.....	07
---	----

I.3.2.1. Régime laminaire.....	07
--------------------------------	----

I.3.2.2. Régime turbulent.....	08
I.4. Ecoulement autour des obstacles :.....	09
I.4.1. Ecoulements autour d'un cylindre.....	09
I.4.2. .Ecoulement autour d'un cylindre avec rainure.....	10
I.4.3. L'écoulement de Von karman.....	10
I.4.4. Classification des écoulements autour un cylindre fixe.....	11
I.4.5. Caractéristiques de l'écoulement autour d'un cylindre	12
I.4.5.1. Nombres de Reynolds.....	12
I.4.5.2. Nombre de Strouhal.....	12
I.4.5.3. Coefficient de trainée et de portance.....	12
I.4.5.3.1. Coefficient de trainée (drag coefficient).....	13
I.4.5.3.2. Coefficient de portance (lift coefficient).....	14
I.4.5.4 La couche limite.....	15
I.4.5.5. Profil de vitesse.....	15
I.4.5.6. Point de séparation.....	15
I.4.5.7. Zone de formation tourbillonnaire.....	16
I.4.5.8. Couche de cisaillement.....	16
I.4.5.9. Zone de recirculation.....	17
I.6. Revue des travaux sur les écoulements autour des cylindres.....	18
I.7 Conclusion.....	24

Chapitre II : Résolution numérique et code fluent

II.1. Introduction.....	25
II.2. Formulation mathématique.....	25
II.2.1. Equations de transport.....	25
II.2.1.1. Equation de conservation de masse (continuité).....	25
II.2.1.2. Equation de quantité de mouvement.....	26
II.3. Résolution numérique.....	26
II.3.1. Méthode des différences finie.....	26
II.3.2. Méthode des éléments finie.....	27
II.3.3. Méthode des volumes finie.....	28
II.4. Le maillage.....	29
II.4.1. Nœuds et éléments.....	29
II.4.2. Géométrie et topologie.....	29
II.4.3. Connectivité.....	30
II.5. Présentation de code de calcul.....	31
II.5.1. Le préprocesseur « GAMBIT ».....	32
II.5.2. Le solveur « FLUENT ».....	32
II.5.3. Le post processeur « FLEUNT ».....	33
II.6. Description de problème.....	33
II.6.1. Domaine d'étude.....	33
II.6.1.1 le domaine d' étude pour un cylindre simple.....	33
II.6.1.2. Domaine d'étude pour un cylindre avec rainure.....	34
II.6.1.2.1. Cylindre rainuré avec un angle de 60° et 90°.....	34
II.6.2 Maillage sous Gambit.....	35

II.6.3. Domaine d'étude et Conditions aux limites.....	36
II.6.4. Hypothèses simplificatrice.....	37
II.7.Étapes de résolution du problème.....	37
II.8.Conclusion.....	38

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1.Introduction.....	39
III.2. Validation.....	39
III.3. Le champ de vitesse	39
III.4. Profil de vitesse	41
III.5. les vecteurs de vitesse	42
III.6. Le champ de pression.....	44
III.7. Les lignes de courant	45
III.8. Coefficient de frottement	46
III.9. Coefficient de portance.....	47
III.10. Bilan des résultats.....	48
III.11. Conclusion	49

Conclusion et perspective

Conclusion	51
Perspective.....	52

Remerciement

En premier lieu, nous remercions Dieu, notre créateur, qui nous a donné la force et la persévérance pour réaliser ce travail.

Après un long parcours, nous voilà enfin aux termes d'études pour le cycle master et c'est pour nous l'occasion d'adresser un remerciement à tous ceux qui de près ou de loin ont bien voulu apporter leurs contributions pour l'élaboration de ce mémoire.

Nous tenons à remercier infiniment tout particulièrement à Dr MEKROUSSI SAID notre encadreur qui nous a accordé son confiance et attribué des missions valorisantes et pour tout le bagage scientifique qui nous avons transmis durant la réalisation de ce mémoire, sans oublier son aide indéfectible, sa compréhension, ses conseils, ses observations et surtout sa patience et sa gentillesse sans oublier l'ensemble des enseignants du département de génie mécanique pour leur encadrement technique et moral.

Un grand merci à Dr.GUELAILA AHMED & BEKHADRA MOKHTAR qui nous aidons à bien rédiger ce projet de fin d'étude et à nos collègues BOURABAH NACEUR & BELGABLI KHALED pour leur collaboration.

Nous adressons aussi nos profonds remerciements à l'examineur Dr.CHAIB KHALED qui a accepté d'examiner ce travail, et Mr.ABED qui est le président de jury.

Nous tenons également, à remercier tous mes amis et tous les étudiants de notre promotion.

Merci à tous

Dédicaces

Je dédie ma modeste travail à :

Ma source de bonheur :

Mon père, ma mère pour leur amour, leur bonté, leur
Sacrifice, leur encouragement perpétuels, leur soutien,

Durant tout mon parcours scolaire

Puisse dieu prolonger leur vie dans le bonheur

A la mémoire de ma chère amie BATOUL.

Mes professeurs Que Dieu, miséricorde

Et tout puissant les protège leur donne longue vie.

Mes collègues dans le département génie mécanique

MERABET SOUAD

Dédicaces

Je dédie mon modeste travail à :

Mes chers parents pour leur Sacrifice, leur soutien et leur
encouragement perpétuels.

Mon frère et ma sœur

Mon binôme et ma chère amie SOUAD

Mes meilleurs amis : Hiba, Asma, Leila

Toute la famille GUELAILIA

Toute la famille MOSTEFAI

Mes collègues dans le département génie mécanique

Tous ceux que j'ai connus et que je n'ai pas pu les mentionner

GUELAILIA BATOUL FATIMA ZOHRA

Liste
Des figures

Liste des figures

Figure I.1	Deux différents types de fluide. [2].....	3
Figure I.2	Un régime laminaire [4].....	7
Figure I.3	Régime turbulent [4].....	8
Figure I.4	Écoulement autour un cylindre [8].....	10
Figure I.5	Phénomène de Von Karman - Sillage et nuages [9].....	11
Figure I.6	La variation de nombre de Reynolds pour le cas 2d et 3d et l'écoulement laminaire.....	11
Figure I.7	La variation de nombre de Reynolds pour l'écoulement turbulent ...	12
Figure I.8	Système des forces aérodynamiques s'exercent sur un cylindre.....	13
Figure I.9	la couche limite [11].....	15
Figure I.10	profil de vitesse [12].....	15
Figure I.11	La zone de recirculation d'un fluide laminaire autour un cylindre [14]	17
Figure II.1	Illustration de la notion de maillage.....	29
Figure II.2	Quelques types d'éléments.....	29
Figure II.3	Les différentes structures de maillage par code FLEUNT.....	30
Figure II.4	Domaine d'étude d'un écoulement autour un cylindre lisse.....	32
Figure II.5	Domaine d'étude d'un écoulement autour un cylindre rainuré avec un angle de 60°.....	33
Figure II.6	Dimension de la rainure en 60°.....	33
Figure II.7	Domaine d'étude d'un écoulement autour un cylindre rainuré avec un angle de 90°.....	34
Figure II.8	Maillage non-structuré d'un cylindre simple.....	34

Figure II.9	Maillage tringle d'un cylindre avec rainure en 90°.....	35
Figure II.10	Maillage tringle d'un cylindre avec rainure en 60°.....	35
Figure II.11	Condition aux limites de domaine d'étude.....	35
Figure III.1	Ecoulement laminaire instationnaire pour le cylindre à Re=100.....	38
Figure III.2	Distribution de vitesse des particules de fluides d'écoulement autour un cylindre a) lisse b) avec une rainure en 90° c) avec une rainure en 60°.....	40
Figure III.3	Profil de vitesse autour le cylindre a)lisse b) avec rainure en 60° c) avec rainure en 90°.....	41
Figure III.4	Vecteur de vitesse d'un écoulement autour un cylindre a) lisse b) avec une rainure en 90° c) avec une rainure en 60°.....	42
Figure III.5	Distribution de pression des particules de fluides d'écoulement autour un cylindre a) lisse b) avec une rainure en 90° c) avec une rainure en 60°.....	43
Figure III.6	Distribution des lignes de courant pour cylindre a) lisse b) avec rainure en 60° c) avec rainure en 90°.....	45
Figure III.7	Coefficient de frottement autour un cylindre a) lisse b) avec rainure en 60° c) avec rainure en 90°.....	46
Figure III.8	Coefficient de portance autour un cylindre a) lisse b) avec rainure en 60° c) avec rainure en 90°.....	47
Figure III.9	Coefficient de traînée autour un cylindre a) lisse b) avec rainure en 60° c) avec rainure en 90°.....	48

Tableaux de nomenclature

Symbole	Définition	Unité
m	masse de fluide	[kg]
ρ	masse volumique	[kg/m ³]
t	temps	[s]
d	la densité	-
F _t	La force de frottement	[N/kg]
ν	Viscosité cinématique	[m ² /s]
μ	viscosité dynamique	[Pa.s]
P	pression	[pa]
U	la vitesse de l'écoulement	[m/s]
D	le diamètre de section	[m].
U _∞	vitesse à l'infini amont	[m/s]
Re	nombre de Reynolds	-
St	nombre de Strouhal	-
CD	coefficient de traînée	-
CL	coefficient de portance	-
F _D	Force de traîné	
F _L	Force de portance	
C _f	le coefficient de frottement	-
C _p	le coefficient de pression	-
$\frac{\rho}{2} u_{\infty}^2$	Pression dynamique d'écoulement libre	
A	Section de référence.	
f	la fréquence	[s ⁻¹]
dV	la différence de vitesse des couches	-
$(u_i, u_j) = (u, v)$	champ de vitesse	[m/s]

u_t	vitesse de frottement de paroi	[m/s]
x	Coordonnée spatiale	[m]
y	Ordonnée spatiale	[m]

Nombres adimensionnels

Nombre de Reynolds	$Re = \frac{UD}{\nu}$
Nombre de Strouhal	$S_t = \frac{f_v D}{U}$
Coefficient de traînée	$C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} u_{\infty}^2 A}$
Coefficient de portance	$C_L = \frac{F_L}{\frac{\rho}{2} u_{\infty}^2 A}$

Abréviation

RANS	Navier Stokes en moyenne de Reynolds
MEF	Méthode des éléments finie
MDF	Méthode des différences finie
MVF	Méthode des volumes finie
CFD	Computational Fluid Dynamics
2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel

Liste
Des
Tableaux

Les tableaux

Tableau I.1	les caractéristiques des régimes de l'écoulement	8
Tableau II.1	Les conditions aux limites du domaine de travail	36

Introduction
Générale

Introduction générale

La mécanique des fluides fait partie de notre quotidien, avec ces deux moteurs fortement imbriqués d'une part l'exploitation des fluides à des fins pratiques (fabrication d'embarcations, pompage de puits, adduction d'eau, application énergétiques, propulsion et sustentation des aéronefs, bateaux, sous-marins et les forces de frottement sur les véhicules) et d'autre part l'explication des phénomènes naturels (les vagues, le vent, la force de résistance sur un corps en mouvement dans l'air ou l'eau, l'aspiration d'une cheminée, le mouvement des bulles, la chute d'objets légers et les vibrations provoquées par un écoulement). Son objectif est de fournir les méthodes pour comprendre la diversité et la grande richesse des écoulements réalisés dans la nature qu'ils sont toujours présents dans notre vie et dans le domaine des applications industrielles.

L'étude des mécanismes physiques de l'écoulement autour d'un obstacle occupe une place importante dans la physique des fluides grâce à son grand intérêt, qu'il est devenu un sujet classique dans la recherche fondamentale en dynamique des fluides en raison du nombre différent de paramètres impliqués et de leurs interactions complexes. La description des caractéristiques d'écoulement les plus intéressantes dans un certain régime a été fondée sur des considérations théoriques basées sur des expériences et complétées par FLUENT.

Nombreuses analyses dans la littérature et beaucoup de travaux de recherches ont été réalisés pour modéliser l'écoulement autour d'un cylindre. Pour cela, plusieurs expériences dans le domaine ont été et confrontées aux méthodes numériques. Pour cette dernière, une large gamme de méthodes mathématiques ont été développées afin de s'approcher de la réalité de l'écoulement et de fournir le maximum d'information qui peuvent se produire. Pour notre cas, on a utilisé le code FLUENT, qui représente un outil de simulation numérique fort de grande qualité afin de simuler un écoulement d'air autour d'un cylindre.

C'est dans cette optique que notre présent travail s'inscrit, il se veut une comparaison de l'écoulement laminaire non stationnaire d'un fluide incompressible autour d'un cylindre circulaire lisse avec l'écoulement d'autres cylindres avec rainures en «U» par le code de calcul FLUENT qui est basé sur la méthode des

Introduction générale

volumes finis. L'avantage des expériences numériques est que toutes les quantités physiques liées à l'écoulement (champs de vitesse, de pression, de températureect) sont immédiatement disponibles. Dans une expérience l'obtention de ces quantités en tous les points du champ est souvent impossible ou très difficile en pratique.

Ce mémoire s'échelonne sur trois chapitres :

- ❖ Dans le premier chapitre, nous allons tout d'abord comporté une recherche bibliographique présente la base de phénomène d'un écoulement autour d'un cylindre et les différentes études effectuées sur ce sujet.
- ❖ Le second chapitre est consacré à la formulation mathématique, la résolution numérique et la présentation de code de calcul fluide ainsi que le générateur de géométrie et le maillage gambit. par la suite, on va décrire en détail nos cas d'étude (géométrie, maillage, conditions aux limites.....ect)
- ❖ En ce qui concerne le troisième chapitre est le dernier chapitre nous sommes adressés les interprétations et les résultats obtenus de la simulation numérique pour un modèle à deux dimensions.

Chapitre I

Recherche bibliographique

I.1. Introduction

Dans la vie quotidienne, dans la nature et dans le domaine industriel, les écoulements sont toujours présents. L'écoulement autour d'un cylindre est un problème fondamental de la mécanique des fluides d'une grande importance. Il est très important dans un grand nombre d'applications pratiques. Pour cette raison, on a présenté dans ce chapitre une synthèse bibliographique comporte des plusieurs travaux effectués dans ce domaine.

I.2. Généralités sur la mécanique des fluides

I.2.1. Notion de fluide

Un fluide est un milieu matériel parfaitement déformable. Du point de vue mécanique, la définition d'un matériau est liée à sa déformation en fonction des contraintes : « c'est quelque chose qui coule » sous l'action d'une contrainte donnée et même si la déformation est grande, ceci ne provoque pas la perte de cohésion entre ses molécules. Par contre, un solide (indéformable, élastique ou plastique) ne coule pas sous contrainte et la déformation qui croit avec la contrainte appliquée provoque (si elle est grande) une rupture de solide. Le fluide est défini comme un corps qui peut prendre n'importe quelle forme qui lui est présentée. [1]



a)



b)

Figure I.1 : Deux différents types de fluide a) fluide liquide b) fluide gazeux (gaz des cheminées) [2]

I.2.2. Propriétés des fluides

Tous les fluides possèdent des caractéristiques permettant de décrire leurs conditions physiques dans un état donné. Parmi ces caractéristiques on a :

I.2.2.1. Masse volumique :

La masse volumique ρ d'un fluide est la masse de l'unité de volume. elle est exprimée en (kg/m^3)

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (\text{I.1})$$

m : Masse du fluide (kg)

v : Volume du fluide (m^3)

I.2.2.2. Densité :

La densité elle mesure le rapport de la masse volumique du fluide rapportée à un corps de référence. C'est une grandeur sans unité par :

$$d = \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad (\text{I.2})$$

Pour les gaz, la masse dépend de la température et de pression.

I.2.2.3. Viscosité

La viscosité est la propriété du fluide qui décrit l'interaction entre ses particules en mouvement. Il est la mesure de la résistance à l'écoulement des fluides.

I.2.2.3.1. Viscosité dynamique :

Considérons deux couches de fluide voisin distantes de dz . La force de frottement F_t qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit dV , à leur surface 'S' et inversement proportionnelle à dz , elle est exprimée en kg/m.s .

$$F_t = \mu \cdot S \cdot \frac{dV}{dz} \quad (\text{I.3})$$

μ : Le facteur de proportionnalité est le coefficient de viscosité dynamique du fluide.

I.2.2.3.2 Viscosité cinématique :

Dans de nombreuses formules apparaît le rapport de la viscosité dynamique μ et de la masse volumique ρ . ce rapport est appelé viscosité cinématique son unité est (m^2/s)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (I.4)$$

Les fluides affichent des propriétés telles que :

- Ne pas résister la déformation, ou lui résister légèrement (la viscosité)
- L'aptitude à l'écoulement (également décrit comme la capacité de prendre la forme du récipient). [2]

I.3. Ecoulement de fluides :

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 les autres.

I.3.1. Différentes types des écoulements :

En physique, l'écoulement du fluide à toutes sortes d'aspects a des caractéristiques, soit stables ou instables, compressibles ou incompressibles, visqueux ou non visqueux, et stationnaires et non stationnaires.

Écoulement de fluide en fonction de la masse volumique peut être :

I.3.1.1. Ecoulement incompressibles :

On considère ici que la masse volumique du fluide est constante. Les écoulements incompressibles suivent le principe de Bernoulli, du nom du mathématicien et scientifique suisse Daniel Bernoulli. D'après ce principe, l'énergie mécanique totale d'un écoulement de fluide incompressible et sans frottement est constante le long d'une ligne de courant de cet écoulement. L'écoulement gazeux est considéré comme incompressible si la vitesse de l'écoulement est très petite par rapport à celle du son. Autrement dit, si son nombre de Mach (rapport entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse du son) est très inférieur à 1. Pratiquement, l'hypothèse

d'écoulement incompressible est faite lorsque le nombre de Mach est inférieur à 0.3 en tout point de l'écoulement. Elle est donc très utilisée en aérodynamique pour des véhicules dont la vitesse ne dépasse pas 400 km/h.

I.3.1.2. Ecoulements compressibles :

Vers la fin du XIX^e siècle, Prandtl apporta des contributions considérables à la théorie des fluides compressibles. Celle-ci devint d'une importance considérable pendant la seconde guerre mondiale, avec l'apparition des avions à grande vitesse et des fusées. Lors de l'écoulement compressible d'un gaz, sa densité change lorsqu'il est soumis à des variations importantes de vitesse et de pression. Sa température se modifie également, ce qui complique les phénomènes à étudier. L'écoulement d'un gaz compressible dépend du rapport de la vitesse du gaz sur la vitesse de propagation du son dans le milieu.

Écoulement de fluide en fonction de la vitesse peut être :

I.3.1.3. Écoulement stable :

Dans l'écoulement du fluide stable, la vitesse de l'écoulement du fluide est constante à n'importe quel point de sa route. Un fluide est déterminé avec l'écoulement stable si son écoulement reste inchangé et constant durant une période de temps spécifique.

I.3.1.4. Écoulement instable :

Lorsque l'écoulement est instable, la vitesse du fluide peut différer entre n'importe deux points sur sa route.

Écoulement de fluide en fonction temps peut être :

I.3.1.5. Ecoulement stationnaire :

On dit un écoulement stationnaire si toutes les variables décrivant un mouvement sont indépendantes du temps. Ainsi la pression **P**, la vitesse **V**, la densité **ρ** , l'énergie **E** d'un écoulement.

I.3.1.6. Ecoulement non stationnaire :

On dit un écoulement non stationnaire si les variables décrivant le mouvement dépendent du temps.

Écoulement de fluide en fonction de la viscosité peut être :

I.3.1.7. Ecoulement visqueux :

L'écoulement visqueux est un écoulement plan connu sous le nom d'écoulement de poiseuille plan et un écoulement dans une conduite rectiligne connu sous le nom d'écoulement de poiseuille (poiseuille cylindrique).

I.3.1.8. Ecoulement non visqueux :

L'écoulement non visqueux est un flux non visqueux d'un fluide dans lequel la [viscosité](#) du fluide est égale à zéro.

NB : 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 de rotation, chaque particule du fluide tourne autour de son propre axe. [3]

I.3.2. Les régimes de l'écoulement :

I.3.2.1 Régime 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 nom d'écoulement laminaire. Dans la dynamique des fluides, écoulement laminaire (ou les flux) se produit lorsqu'un fluide s'écoule dans des couches parallèles, sans interruption. Une des conséquences de l'écoulement laminaire est que la vitesse du fluide est constante à n'importe point dans le fluide. Les fluides ayant l'écoulement laminaire ont également souvent l'écoulement constant

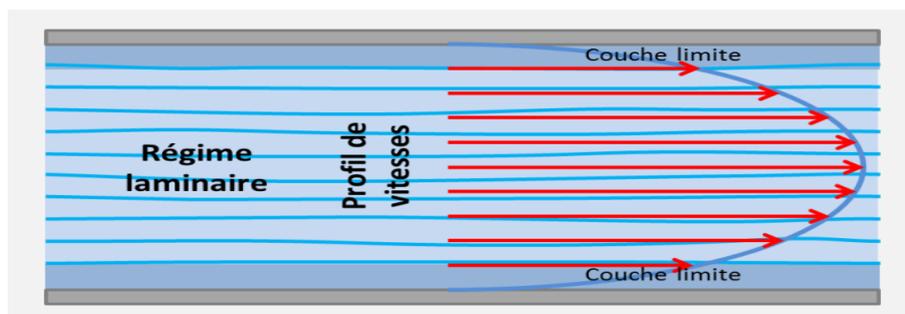


Figure I.2 : Un régime laminaire [4]

I.3.2.2 Régime turbulent :

Le flot d'une rivière peu profond et hérissée de rochers serait difficile. L'eau ne coulera pas en ligne droite. Le flot serait irrégulier et agité. C'est un écoulement turbulent. L'écoulement irrégulier qui se caractérise par de minuscules régions spirales et tourbillons. La vitesse de ce fluide n'est certainement pas constante à chaque point. Pour un écoulement turbulent nous devons considérer aussi une contrainte de cisaillement associée aux effets tourbillonnaires. [4]

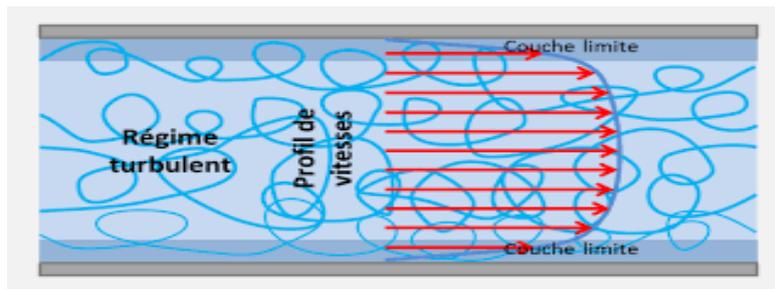


Figure I.3 : Régime turbulent [4]

La différence entre les deux régimes de l'écoulement est abordée dans le tableau suivant :

Régime laminaire	Régime turbulent
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ecoulement dont les filets fluides ne s'entrecroisent pas ▪ Pas de mélange mais interaction visqueuse entre les filets fluides ▪ En stationnaire, les lignes de courant sont confondues avec les trajectoires. 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ L'écoulement devient instable ▪ Il existe un mélange des filets fluides même en écoulement globalement stationnaire ▪ La notion de ligne de courant n'a plus de sens sauf « en moyenne temporelle »

Tableau I.1 : les caractéristiques des régimes de l'écoulement [5]

I.4. Ecoulement autour des obstacles :

L'écoulement autour des obstacles est un phénomène qui se produit fréquemment dans la pratique et sa compréhension est nécessaire pour la conception mécanique et thermique de nombreux systèmes en engineering comme : avions, automobiles, bâtiments, composants électroniques, les profils NACA d'une l'aille d'avion. Les types de refroidissement dans les échangeurs et radiateurs, les aubes

d'une turbine industrielle qui entraînent les bateaux et les obstacles carré et cylindrique. l'identification et l'étude des phénomènes hydro et aérodynamiques qui surgissent dans le sillage d'un obstacle restent un sujet d'intérêt dans divers domaines [6].

On peut classer les obstacles aérodynamiques de forme géométrie simple en trois types :

- ❖ Les obstacles à courbure progressive, pour lesquels le point de décollement de la couche limite est susceptible de se déplacer : le modèle géométrique est la sphère ou la cylindre.
- ❖ Les obstacles à arrête vive, pour lesquels le point de décollement de la couche limite est fixe : le modèle géométrique est la plaque plane inclinée sur la direction de la vitesse v .
- ❖ Les obstacles profilés, pour lesquels il n'y a pas de décollement de la couche limite : le modèle géométrique est la plaque plane parallèle à v [7].

I.4.1. Ecoulements autour d'un cylindre :

L'écoulement autour d'un cylindre fait partie des quelques problèmes classiques de la mécanique des fluides pour lesquels les équations de Navier-Stokes admettent une solution. Ce type d'écoulement revêt un caractère pratique, parce qu'il se rencontre couramment en aérodynamique, en hydrodynamique, etc.

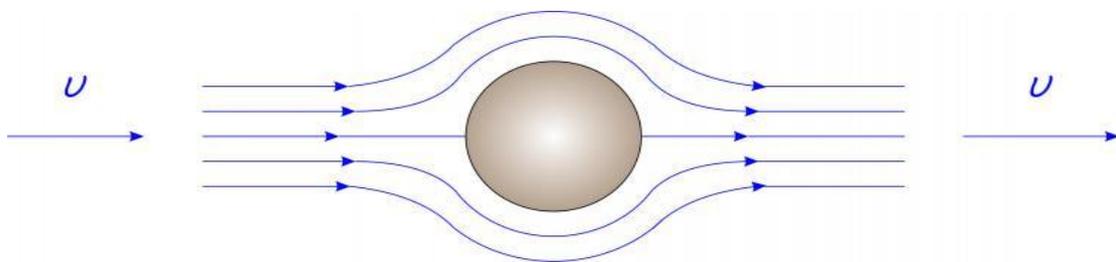


Figure I.4. - Écoulement autour un cylindre [8]

Le profil de l'écoulement, le coefficient de traînée (C_D), le coefficient de frottement (C_f), le coefficient de pression (C_p), sont en fonction du nombre de

Reynolds basé sur le diamètre du cylindre (D), la viscosité dynamique (μ), la masse volumique du fluide (ρ) et la vitesse de l'écoulement.

Lorsque l'écoulement est perturbé par cet obstacle, on observe un détachement tourbillonnaire autour de cet obstacle dont le détachement de ces tourbillons est de sens alternés. Ce détachement se traduit par une modification de la distribution de pression autour de l'obstacle.

I.4.2. Ecoulement autour d'un cylindre avec rainure :

Notre étude traite le phénomène de l'écoulement d'un cylindre avec rainure dans une configuration ont suscité un intérêt considérable ces dernières années. Cet intérêt découle de la variété d'applications dans le domaine de l'ingénierie faisant appel à des formes cylindriques.

I.4.3. L'écoulement de Von Karman :

Le phénomène d'instabilité de Bénard-Von Karman est l'un des problèmes les plus classiques de mécanique des fluides. C'est le modèle le plus simpliste permettant une approche concrète des phénomènes de turbulence générés par la présence d'un obstacle sur le trajet d'un écoulement laminaire (voir la figure au-dessous). Son étude connaît depuis quelques années un nouvel engouement lié à la possibilité de modifier l'écoulement en faisant osciller l'obstacle.

Revenons tous d'abord sur le problème classique : on place un obstacle cylindrique sur le trajet d'un écoulement parallèle. Selon le nombre de Reynolds (Re) de l'écoulement on observe des comportements distincts. Pour les valeurs de Re faibles, de l'ordre de l'unité, l'écoulement est laminaire et approximativement linéaire. Pour les valeurs de Re de quelques dizaines il apparaît des tourbillons stables derrière le cylindre, l'écoulement est toujours symétrique. A partir d'une valeur critique de Re , environ $Re_c=46$, les tourbillons se détachent périodiquement du cylindre. On obtient ce que l'on appelle une allée tourbillonnaire alternée de **Bénard-Von Karman**. Notons que tant que $Re \leq 150$, les effets tridimensionnels sont négligeable. Il est d'autre part important de savoir que le nombre de Strouhal $st = f \cdot d/u$ est constant pour le montage donné, ou f est la fréquence d'émission des tourbillons, d est le diamètre de l'obstacle. On peut aussi écrire $f = St \cdot u/d$, et donc

la fréquence d'émission de vortex est proportionnelle à u , donc au nombre de Reynolds de l'écoulement. Ceci reste valable pour les très grandes valeurs [9].



Figure I.5. Phénomène de Von Karman - Sillage et nuages [9]

I.4.4. Classification des écoulements autour un cylindre circulaire fixe :

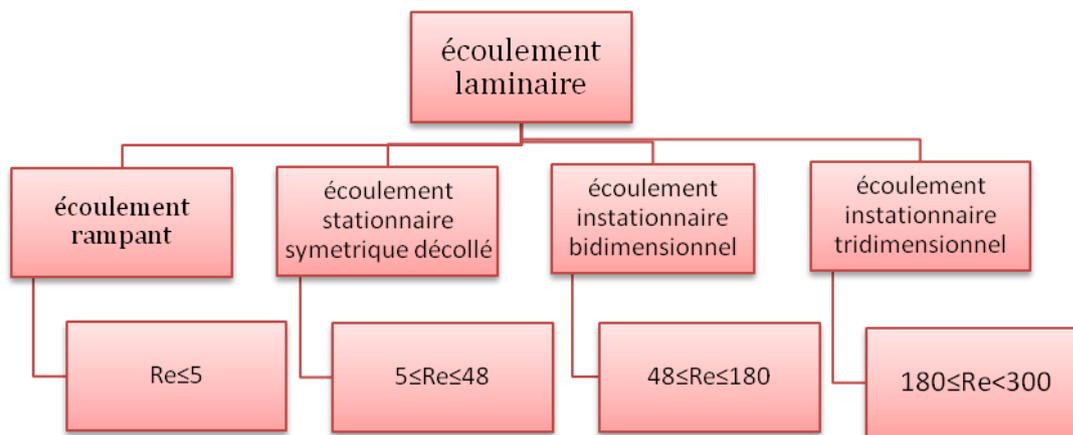


Figure I.6 : La variation de nombre de Reynolds pour le cas 2d et 3d et l'écoulement laminaire.

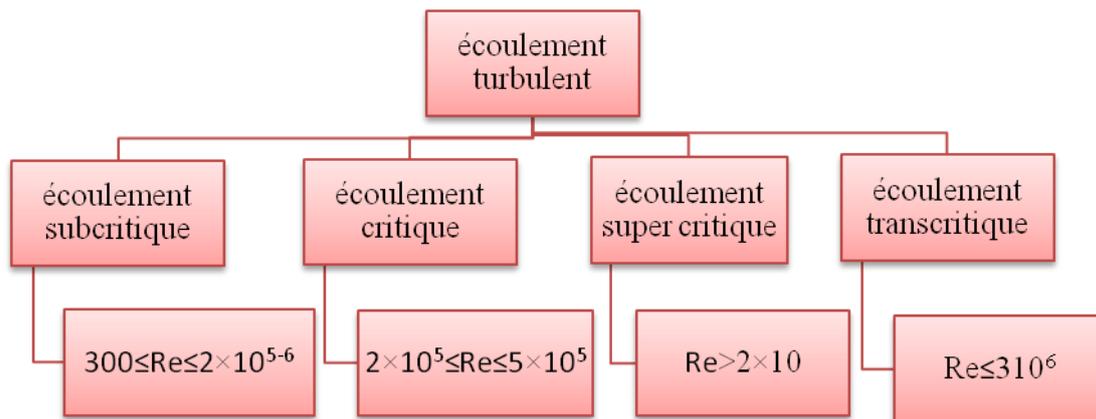


Figure I.7 : La variation de nombre de Reynolds pour l'écoulement turbulent.

I.4.5. Caractéristiques de l'écoulement autour d'un cylindre circulaire :

I.4.5.1. Nombres de Reynolds :

Le nombre de Reynolds 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). Suivant la valeur du nombre de Reynolds l'écoulement adopte des comportements radicalement. Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ce nombre sans dimension apparaît naturellement en dimensionnant les [équations de Navier-Stokes](#). On le définit par :

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (I.5)$$

U : la vitesse de l'écoulement [m/s].

D : le diamètre de section [m].

ν : La viscosité cinématique.

I.4.5.2. Nombre de Strouhal :

Nombre de Strouhal est un paramètre fondamental car il représente le rapport de la longueur de référence avec la longueur parcourue par une particule fluide à la vitesse de référence de l'écoulement.

Pour les cylindres circulaires à $Re > 47$, le sillage est caractérisé par l'effusion suppléant de tourbillons qui sont versé à la fréquence f_v . Cette fréquence peut être exprimée par ce nombre adimensionnel :

$$S_t = \frac{f_v D}{U} \quad (I.6)$$

$$f_v = \frac{1}{T} \quad (I.7)$$

I.4.5.3. Coefficient de trainée et de portance :

Du point de vue phénoménologique, quand un corps se déplace dans un fluide au repos ou, de façon équivalente, lorsqu'un fluide s'écoule autour d'un corps solide, il en résulte une force sur le corps. Comme le montre la figure 1.2.2, la projection de cette force dans le sens perpendiculaire à l'écoulement est appelé le support (F_L), et comme une composante parallèle à l'écoulement libre est appelée trainée (F_D).

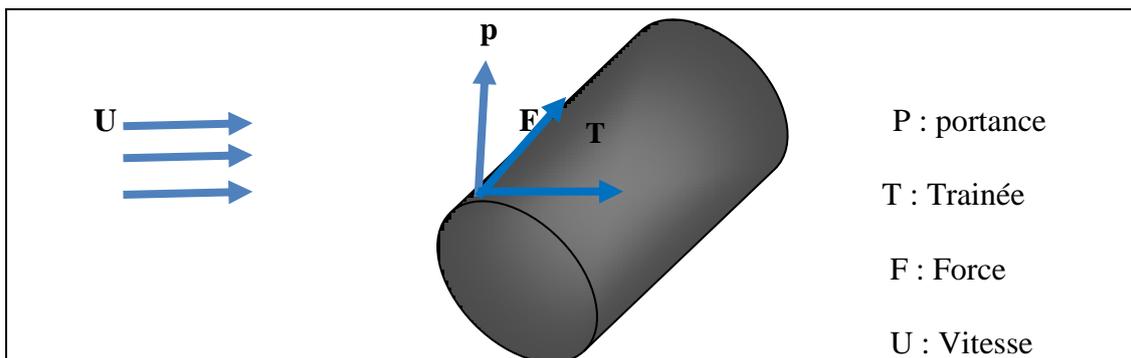


Figure I.8 : système des forces aérodynamiques s'exercent sur un cylindre

Les coefficients qui expriment respectivement la composante longitudinale et transversale de la force exercé par le fluide sur le cylindre sont :

I.4.5.3.1. Coefficient de trainée (drag coefficient) :

Considérons par exemple, une sphère en mouvement uniforme dans un fluide. Il faut tout d'abord préciser que la viscosité est essentielle pour justifier l'existence d'une force de frottement. Si le fluide est parfait il n'y a pas de trainée car les couches de fluide glissent sur l'obstacle.

$$c_D = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 A} \quad (\text{I.8})$$

F_D : Force de trainée

$\frac{\rho}{2} u_\infty^2$: Pression dynamique d'écoulement libre

A : Section de référence.

I.4.5.3.2. Coefficient de portance (lift coefficient) :

C'est un nombre adimensionnel, une composante des forces aérodynamiques qui s'exercent sur l'objet lorsqu'il se déplace dans l'air (ou dans un autre milieu). La valeur de ce nombre dépend de la forme et de la position d'un objet par rapport au fluide elle est illustrée par l'équation suivante :

$$c_L = \frac{F_L}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 A} \quad (\text{I.9})$$

F_L : Force de portance

$\frac{\rho}{2} u_\infty^2$: Pression dynamique d'écoulement libre

A : Section de référence

I.4.5.4. La couche limite :

On sait que au voisinage d'une paroi il existe une zone de gradients de vitesse et de température ou la viscosité d un fluide joue un rôle très important et ce d'autant plus que le nombre de Reynolds est grand .cette zone est appelée couche limite c'est la zone d'interface entre un corps et le fluide environnant lors d'un mouvement relatif entre les deux, conséquence de la viscosité du fluide. Elle est un élément important en mécanique des fluides, (aérodynamique, hydrodynamique), en météorologie, en océanographie, etc. Elle résulte d'échanges de quantité de mouvement et de chaleur entre le fluide et la paroi .en dehors de cette zone .le fluide peut être considéré comme parfait (sans viscosité) obéissant ainsi aux équations d'Euler.

Dans le cas d'un écoulement interne les couches limites visqueuses s'accroissent de part et d'autre des parois, pour se rejoindront après une certaine distance parcourue dite la longueur d'établissement a partir de ce point, l'écoulement sera totalement visqueux et entièrement développé. Donc, il est important que le maillage près de la paroi soit bien traité. En effet, un maillage grossier près de la paroi ne pourra pas capturer le développement de la couche limite et peut conduire à une sous estimation de la longueur d'établissement de l'écoulement.

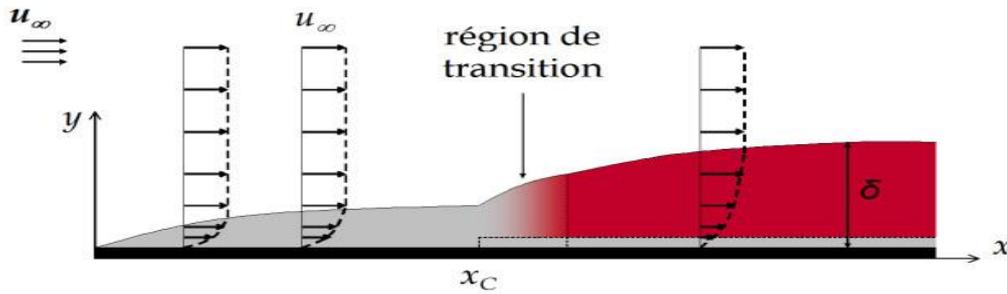


Figure I.9 : la couche limite [11]

I.4.5.5. Profil de vitesse :

Sous l'effet des forces d'interaction entre les molécules de fluide et des forces d'interaction entre les molécules de fluide et celles de la paroi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse. On dit qu'il existe un profil de vitesse. Des profils de vitesse à la notion de couche limite. La viscosité engendre un gradient de vitesse dans une section droite de conduite : à la paroi, la vitesse du fluide est nulle (c'est la condition d'adhérence); la vitesse est maximale au centre de la conduite.

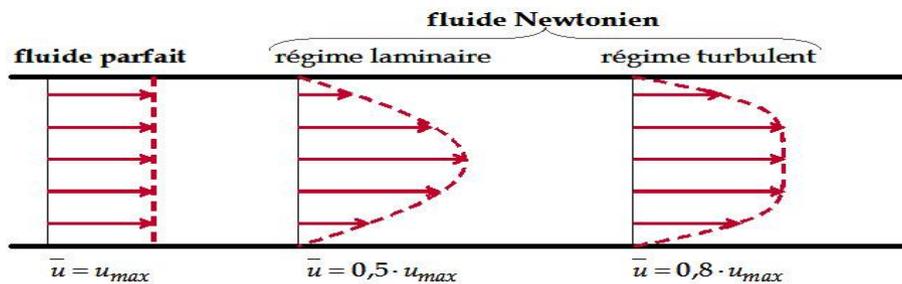


Figure I.10. : Profil de vitesse [12]

I.4.5.6. Point de séparation :

Point de séparation a partir duquel la couche limite décolle de la paroi et définit comme le point où le frottement s'annule. Contrairement à certain géométrie comme celle de cylindre carré, le décollement dans le cas de cylindre circulaire n'est pas dû à une singularité dans la géométrie mais au fait que la couche limite se développe en présence d'un gradient de pression adverse (gradient de pression tel que la pression augmente dans les sens d'écoulement). Lorsque ce gradient de pression adverse est suffisamment important, la vitesse de particules fluides va diminuer jusqu'à devenir nulle puis négative, c'est le processus de décollement de la couche limite.

I.4.5.7. Zone de formation tourbillonnaire :

Pour le cas de cylindre circulaire le phénomène de détachement tourbillonnaire est dû à l'effet visqueux et constitue une caractéristique commune pour tous les écoulements dont le nombre de Reynolds est supérieur à 49. Pour ces nombres de Reynolds, la couche limite subit un cisaillement sur la surface du cylindre circulaire en raison d'un gradient de pression adverse.

Le fluide de la couche limite parvient à la couche de décollement autour de $\pm \frac{\pi}{2}$ et lorsque son énergie cinétique est insuffisante pour passer plus en aval de cylindre où la pression est plus forte, le fluide a tendance à décoller engendrant ainsi un tourbillon et la recirculation. Ce tourbillon après avoir atteint une certaine taille se détache sous la couche limite et est connecté dans le sillage. L'écoulement en aval prend alors l'allure d'une allée tourbillonnaire et la couche limite se décolle de la paroi de cylindre.

I.4.5.8. Couche de cisaillement :

Les couches de cisaillement sont les régions de fluides où il existe un gradient de vitesse élevé de cette différence au sein du fluide entraîne des contraintes de cisaillement importantes. Les particules fluides se déplaçant rapidement sont freinées par les particules fluides moins rapides.

Dans le cas de l'écoulement autour du cylindre, deux couches de cisaillement libres se développent, de part et d'autre du cylindre, entre la zone d'écoulement libre et la zone de vitesse quasi nulle existant le sillage.

I.4.5.9. Zone de recirculation :

Le champ proche du sillage est marqué par la zone de recirculation qui a une forte influence sur la prédiction des forces agissant sur le cylindre et sur la fréquence du lâcher tourbillonnaire. Cette région est sensible aux conditions extérieures amont telles que le nombre de Reynolds, le taux de turbulence, la dimension du cylindre et ses conditions aux extrémités [13].



Figure I.11 : La zone de recirculation d'un fluide laminaire autour un cylindre [13]

I.6. Revue des travaux sur les écoulements autour des cylindres :

La recherche est liée directement à l'évolution de la technologie ;et c'est ce qui pousse les chercheurs à avancer dans des cas très compliqués et d'actualité susceptibles d'être traités à l'aide d'un outil informatique très puissant et avec des moyens expérimentaux les plus sophistiqués et les plus performants .afin d'élargir nos connaissances dans ce domaine ,nous avons fait une lecture des auteurs qui se résumant comme suit :

Guojon-Durand et al [14] ont étudié l'écoulement d'un fluide autour d'un cylindre animé d'un mouvement de rotation oscillante autour de son axe. Ils ont confirmé que pour certaines valeurs de la fréquence d'oscillation, il ya lieu d'une réduction de l'instabilité hydrodynamique. Et par la suite, ils ont modifié l'écoulement moyen en fonction de certains paramètres mécaniques de structure du corps.

D.Calluad et al [15] ont mené une étude expérimentale et numérique de l'écoulement laminaire d'un fluide autour d'un obstacle de section carrée disposé sur une plaque plane.la mesure de l'écoulement est faite par PIV (Particle Image Velocimetry). La confrontation des deux méthodes on données les mêmes résultats qui se manifestent par la topologie de l'écoulement, les lignes de séparation, le lâchage tourbillonnaire. A part, une légère formation de tourbillons verticaux lâchés au dessus du cube s'avère un peu plus grand que celle faite par l'expérience.

Madani et abidat [3] ont proposé un algorithme pour la résolution des équations de Navier –stokes, qui utilise une combinaison de deux schémas aux différences finies d'ordre $O(h^2)$ et $O(h^4)$, afin d'étudier les écoulements instationnaires autour des corps profilés .les avantages en temps de calcul et en précision de la méthode proposée ont été mis en évidence .

S.C Liu et al [16] les travaux expérimentaux sur les obstacles carrés, employant comme méthode de mesure un colorant fluorescent et la visualisation laser, ont permis de déterminer le nombre Reynolds critique de transition à 160 pour le mode A et à 200 pour le mode B. il a été observé qu'au fur et à mesure que le nombre de Reynolds augmente jusqu'à 160,le caractère onduleux de sillage augmente .ce qu'implique le mode A. A partir d'un nombre de Reynolds égale à 200, le sillage

derrière l'obstacle devient complètement déformé, et les longueurs d'ondes sont de plus en plus faibles ; ce qui caractérise le mode B.

N. Roquet et al [17] ont travaillé sur l'écoulement d'un fluide stationnaire autour d'un cylindre en utilisant la modélisation numérique pour étudier et expliquer la variation de l'effort de fléchissement sur le sillage d'un cylindre. Les résultats portent sur la détermination du comportement asymptotique du fluide.

Jong-Yeon Wang, Kyung-Soo Yang [18] ont effectué une étude numérique des structures tourbillonnaires autour d'un cube dans un canal. L'objectif de ce travail est d'étudier les caractéristiques des structures tourbillonnaires cohérents produites par la présence de l'obstacle, y compris les systèmes de vortex en fer à cheval en amont de l'obstacle, ainsi que les tourbillons latéraux au voisinage des deux faces latérales du cube. Ils ont constaté dans ce projet que l'approchement de l'écoulement vers l'obstacle empêche le gradient de pression adverse qui produit une séparation tridimensionnelle de la couche limite, ce qui entraîne la formation des tourbillons en fer à cheval. Ils ont trouvé aussi qu'avec l'augmentation du nombre de Reynolds, la structure de vortex en fer à cheval devient complexe et le nombre de tourbillons augmente par paires.

D'Allessio et S.kocabiyik [19] ont étudié avec la simulation numérique d'un fluide incompressible visqueux autour d'un cylindre elliptique incliné. Le cylindre effectue des oscillations transversales. L'étude est basée sur la méthode des différences finies pour résoudre les équations de N S. Le nombre de Reynolds et le rapport des axes sont fixés respectivement à $Re=102$ et $AR=2$. Ils examinent l'effet de l'augmentation du rapport de vitesse sur la structure du sillage aussi bien que les forces hydrodynamiques agissant sur le cylindre.

QIE-Rong et al [20] ont mené une étude expérimentale de l'écoulement de l'eau un peu profonde transitoire autour d'un cylindre circulaire horizontal avec un rapport d'espace G . À l'aide d'une méthode PIV image vélocimétrie de particule, ILS ont présenté la distribution de champ de vitesse, champ de pression et le développement du vortex pour divers rapports- espace G .

Norberg [21] il est connue depuis 1913 qu'en modifiant les conditions des bouts d'un cylindre, on influe sur l'écoulement autour de ce cylindre et aussi sur toute

sa longueur. En 1922 on a réalisé qu'un cylindre relativement long avec des extrémités exposées au fluide ne représentait pas un cylindre de longueur "infini" (le cas 2D). Depuis les essais ont généralement été effectués sur les cylindres dont les extrémités passent, soit à travers les parois de la veine d'essais, soit à travers les plaques de bouts.

P.F.ZHANG et al [22] ont effectué une étude numérique de l'écoulement laminaire bidimensionnel autour d'une tige ascendante et d'un cylindre circulaire. Les résultats obtenus à l'aide du logiciel de simulation fluent démontrent que le coefficient de trainée moyenne et le coefficient de fluctuation de portance du cylindre peuvent être réduits par une tige ascendante.

Mathieu Boirlaud, Couton [23] ont mené une étude sur la modélisation directe d'un écoulement de convection mixte autour d'un cylindre circulaire horizontale pour $Re=1091$. Ils ont retrouvé certains résultats connus pour l'écoulement laminaire, $Re < 200$, l'accélération du fluide en dessous du cylindre, l'étirement de la rangée tourbillonnaire inférieur ainsi que des niveaux de température plus important au niveau de la rangée tourbillonnaire supérieur.

R.Belakroum et al [24] ont étudié par la méthode des éléments finis, le modèle les (Large Eddy Simulation) pour simuler l'écoulement instationnaire et turbulent d'un fluide incompressible autour d'un cylindre . Ils sont trouvés que le phénomène d'éclatement tourbillonnaire est nettement mis en évidence.

F.Meddane et al [25] ont étudié l'écoulement de fluide autour d'un obstacle, telle une aile de profil naca 0021.ils ont montré que l'utilisation du volet a une la fluence directe sur la distribution de pression et donc sur les forces aérodynamiques du profil.

S.Pascal –Ribot et Y.Blanchet [26] ont réalisé une étude expérimentale et numérique de l'écoulement de fluide autour d'un cylindre rigide en deux phases l'air et eau .la résolution numérique du problème a été faite à l'aide d'une méthode d'analyse dimensionnelle standard.

Ils ont présenté une exploration de base pour évaluer les forces de portance de vibration exercées sur le cylindre.

Bhattacharyya, A.KSingh. [27] ont montrés que pour $100 < Re < 200$ et $Ri > 1$, la fréquence du détachement tourbillonnaire augmentait avec le nombre de Richardson jusqu'à une valeur critique au-delà de laquelle, l'écoulement autour du cylindre s'organise plutôt sous la forme d'un panache thermique.

I.Khabbouchi et M.S. Guellouz [28] ont effectué des mesures par PIV dans la zone du sillage proche derrière un cylindre placé près d'une paroi au niveau de son bord d'attaque. La configuration géométrique a permis d'isoler l'effet de l'écoulement type jet qui s'installe dans l'espace entre la paroi et le cylindre. Le nombre de Reynolds, basé sur le diamètre du cylindre et la vitesse de l'écoulement libre est $Re = 8667$. Ils ont montré l'existence de trois régions différentes d'écoulement type jet se manifeste dans les faibles rapports –espace ($G/D < 0.3$) en détruisant la couche de cisaillement inférieur et empêchant, par la suite l'allée de Von Karman de s'installer dans le sillage.

Shuyang Cao_Yukio Tamura [29] ont étudié numériquement et expérimentalement l'écoulement autour d'un cylindre circulaire pour un nombre de Reynolds sous-critique. On constate que le nombre de Reynolds sous critique. On constate que le nombre de Strouhal ne montre aucune variation par rapport au paramètre de cisaillement, et que le point d'arrêt à haute vitesse a une grande influence sur la force aérodynamique.

M.S.Dhouieb et al [30] une étude expérimentale et numérique menée dans une conduite horizontale rectangulaire au milieu de laquelle est placé un cylindre carré de hauteur $h = 0.01\text{m}$ et de largeur $l = 0.02\text{m}$ l'écoulement en amont de celui –ci laminaire. Des mesures PIV ont été effectuées afin de caractériser expérimentalement les structures tourbillonnaires. Parallèlement une simulation numérique 2D est réalisée pour faire la comparaison avec les résultats numériques. D'autres mesures PIV complémentaires ont été menées par le dessus du canal en aval du cylindre afin de détecter une éventuelle tridimensionnalisation de l'écoulement. Lors des mesures, ils ont constaté l'apparition des tourbillons de Von Karman dans le cas d'un écoulement derrière un cylindre dans un milieu confiné. Les résultats expérimentaux sont en bonnes concordances avec les simulations numériques 2D, $Re = 90$.

Pour des $Re=180$ les instabilités deviennent très importantes. Les résultats de la simulation numérique 2D sont en concordance avec les résultats expérimentaux. L'erreur est inférieure à 15%.

K.Lam-L. Zou [31] ont étudié numériquement et expérimentalement les écoulements turbulents autour de quatre cylindres dans une configuration carrée intégrée avec différents rapports d'espacement choisis. Les résultats obtenus de la fluctuation de vitesse sont avérés similaires aux résultats numériques.

Johnson J.P [32] ont étudié l'écoulement bidimensionnel et tridimensionnel autour d'un cylindre carré placé près d'un mur plat avec un rapport d'espace G/D varié et pour de nombreux nombres de Reynolds aussi variables, en utilisant une méthode entièrement implicite, de différence finie des équations Navier-Stokes. Ils ont constaté que la simulation numérique de l'écoulement tridimensionnel prévoit les coefficients de trainée et la racine carrée des coefficients de portance inférieurs que ceux de l'écoulement bidimensionnel. Ils ont conclu que le coefficient de trainée et la racine carrée des coefficients de portance diminuent légèrement aux grands rapports d'espace G/D .

Goujon-Durand, S.Jenffer, P. and Wesfreid, JE et al [33] donnent une simple méthode pour obtenir le coefficient de pression au coin frontal au vent d'un obstacle carré. La simulation est effectuée par RANS (Reynolds averaged Navier Stocks). Des travaux précédents dans ce domaine sont discutés. Des investigations détaillées sur ce problème sont effectuées et une méthode simple pour les améliorations est proposée en changeant les filets près du coin frontal au vent. Ils ont constaté que les modifications des filets devraient être apportées pour limiter l'augmentation de la contrainte de cisaillement sur la surface proche de paroi du canal. En outre, l'énergie cinétique turbulente ne sera pas élevée à cet endroit, et la séparation de l'écoulement près du coin sera produite au dessus du cube.

L.Bruno et al [34] ont contribué par l'étude à l'analyse tridimensionnelle, de l'écoulement de fluide turbulent, pour un nombre de Reynolds élevé autour d'un cylindre rectangulaire avec un rapport de corde-à-profondeur G . Ils ont réalisé que les paramètres aérodynamiques principaux obtenus par la modélisation numérique sont semblables aux résultats proposés dans la littérature.

H.A.Ardakani, N.S.Vaghefi *al* [35] se sont intéressés à la simulation par les différentes formulations de la fonction –vorticité pour résoudre l'équation de Navier-stokes .étudié l'écoulement de fluides réguliers et transitoires autour d'un obstacle carré. Ils ont conclue que cette formulation a plusieurs avantages, puisque la limite de pression est éliminée des équations de gouvernement et satisfait automatiquement l'équation de continuité.

Bensdira et al [36] ont étudié le comportement aérodynamique de l'écoulement autour d'un obstacle cylindrique proche d'une paroi. L'écoulement en 2d en régime laminaire pour un fluide incompressible sans transfert de chaleur a été simulé. Ils ont utilisé la méthode des éléments finis avec le logiciel ANSYS CFX pour résoudre le système d'équation régissant l'écoulement. L'analyse est faite pour différentes nombre de Reynolds ($Re=10,20,\dots,700$) et différentes distances entre le cylindre et la paroi(10d,15d et 20d).

Cetin Canpolat , Besir Sahin et al [37] ont étudiés le mécanisme de contrôle d'écoulement d'un seul sillon sur une surface de cylindre circulaire et présentés expérimentalement en utilisant la vélocimétrie par image de particules (PIV).Un sillon de forme carrée est gravé longitudinalement sur la surface du cylindre avec un diamètre de 50 mm. Les caractéristiques d'écoulement sont étudiées en fonction de la position angulaire de la gorge à partir du point de stagnation avant du cylindre dans les limites de $0^\circ \leq \theta \leq 150^\circ$. Dans les travaux en cours, des données de flux instantanées et moyennées dans le temps, telles que le tourbillon.

Alejandro Alonzo-García et al [38] ont fait une comparaison entre la simulation numérique d'un écoulement turbulent ($Re=140.000$) autour deux cylindres avec rainure de deux différentes formes en « V » et « U ». La simulation par ANSYS FLUENT V.12.0 dans un temps instationnaire donne des résultats satisfaites pour les modèles LES RANS de turbulence.

Jessica Sjah, Eric Vincens, Francis Leboeuf, Marie Chaze et al [39] ont fait une simulation numérique de l'écoulement visqueux autour un obstacle cylindrique, carré et triangulaire fixe pour trois différentes valeurs des nombre de Reynolds $Re=40, 100$ et 1000 par un code SPH-ALE en mode eulérien qui nécessite d'être validé pour une utilisation dans ce contexte particulier. Leurs objectif est l'étude préliminaire permettant de fixer les paramètres numériques et les lois de

comportement et d'étudier l'écoulement autour d'obstacles fixes et leur éventuel arrachage Etude des caractéristiques de l'écoulement d'un fluide visqueux autour d'un cylindre fixe en 2D.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous présentons les notions de base théoriques sur les écoulements des fluides autour des obstacles de type carrée, cylindrique et triangulaire ainsi que les travaux numériques et expérimentaux sur le phénomène. Dans le chapitre suivant, nous allons voir une formulation mathématique et une présentation de code de calcul utilisé pour résoudre notre problème.

Chapitre II
Résolution numérique
&
Code FLUENT

II.1. Introduction

Ce chapitre constitue une formulation mathématique et une modélisation numérique des écoulements des fluides autour d'un cylindre. Il s'attache surtout à en présenter le code "FLUENT" qui est basé sur « la méthode des volumes finis », la description de problème et les hypothèses simplificatrices.

II.2. Formulation mathématique

La modélisation mathématique d'un écoulement est fondée sur les lois de **Navier Stokes ; loi de** conservation de la masse (aussi appelée équation de continuité), de la quantité de mouvement et d'énergie (plus connue sous le nom de second loi de Newton) et aussi la loi de conservation d'énergie. Dans le cas des fluides incompressibles et de densité constante.

En mécanique des fluides, les équations de Navier- Stokes sont des équations aux dérivées partielles non- linéaires qui décrivent le mouvement des fluides. Elles gouvernent par exemple les mouvements de l'air de l'atmosphère, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau de l'eau dans un tuyau, et de nombreux autres phénomènes d'écoulements de fluide [10, 14,15]. Ces équations, lorsqu'elles ne sont pas simplifiées n'ont pas de solutions analytiques et ne sont donc utiles que pour des simulations numériques. Ces équations peuvent être simplifiées de diverses manières ce qui rend ces équations plus faciles à résoudre. Certaines simplifications permettent de trouver des solutions analytiques à des problèmes de dynamique des fluides. De plus, des résultats récents en recherche à résoudre le problème du millénium qui sont associés indiquent que les équations de Navier-Stokes seraient mal posées.

II.2.1. Equations de transport

Les équations qui régissent l'écoulement bidimensionnel d'un fluide incompressible sont :

II.2.1.1. Equation de conservation de masse (continuité)

Équation de continuité C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de masse aux cours de l'écoulement. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \tag{II.1}$$

Ou ρ la masse volumique et \vec{v} le vecteur vitesse.

D'après les hypothèses simplificatrices (la masse volumique ρ est constante) :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \tag{II.2}$$

II.2.1.2. Equation de quantité de mouvement :

La loi de conservation de quantité de mouvement traduite par les équations de Navier stockes exprime tout simplement la loi fondamentale de la dynamique à une fluide Newtonien.

L'équation écrit comme suit :

$$\underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t}}_{(3)} + \underbrace{u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}}_{(4)} = - \underbrace{\frac{\partial P}{\partial x_i}}_{(5)} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)}_{(6)} \tag{II.3}$$

D'où les termes (1) (2) (3) (4) (5) (6) représentent :

$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$: la forces d'inertie.

$-\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$: la forces appliqué.

$\frac{\partial u_i}{\partial t}$: le terme instationnaire.

$u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$: le terme convectif.

$-\frac{\partial P}{\partial x_i}$: l'effet de pression.

$\frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j})$: le terme visqueux.

Dans notre cas (bidimensionnel) les équations de quantité de mouvement écrites suivantes x et y sont [36] :

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.4})$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{II.5})$$

II .3. Résolution numérique

Le passage d'un problème aux dérivées partielles continu à un problème discret s'appuie sur les méthodes classiques d'analyse numériques .on distingue trois grandes méthodes pour formuler un problème continu sous la forme discrète : la méthode des différences finies, des éléments finis et des volumes finis.

II.3.1. Méthode des différences finie

En analyse numérique, la **méthode des différences finies** est une technique courante de recherche de solutions approchées d'équations aux dérivées partielles qui consiste à résoudre un système de relations (schéma numérique) liant les valeurs des fonctions inconnues en certains points suffisamment proches les uns des autres. Cette méthode apparaît comme étant la plus simple à mettre en œuvre car elle procède en deux étapes : d'une part la discrétisation par différences finies des opérateurs de dérivation/différentiation, d'autre part la convergence du schéma numérique ainsi obtenu lorsque la distance entre les points diminue.

Le principe fondamental de cette méthode consiste au maillage du domaine d'étude en nœuds dont la finesse permet de donner une approximation des contours du domaine. Ensuite, en appliquant le développement dans chaque nœud du maillage,

ce qui permet d'obtenir un nombre d'équation algébrique égale au nombre des valeurs d'inconnues des grandeurs étudiée.

II .3.2 Méthode des éléments finie

En analyse numérique, la méthode des éléments finis (MEF, ou FEM pour finite élément méthode en anglais) est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. La méthode consiste à mailler l'espace en régions élémentaires dans lesquelles on représente la grandeur recherchée par une approximation polynomiale. Le maillage peut être constitué de triangles ou de rectangles aux sommets desquels on recherche des volumes de coordonnées. une telle méthode nécessite donc de mailler tout l'espace étudié. Elle conduit à des tailles importantes en mémoire des calculateurs et à des temps de calcul longs qui nécessitent souvent des stations de travail pour la résolution des problèmes industriels.

Concrètement, cela permet par exemple de calculer numériquement le comportement d'objets même très complexes, à condition qu'ils soient continus et décrits par une équation aux dérivées partielles linéaire : mouvement d'une corde secouée par l'un de ses bouts, comportement d'un fluide arrivant à grande vitesse sur un obstacle, déformation d'une structure métallique, etc.

II.3.3. Méthode des volumes finie

En analyse numérique, la méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles, comme la méthode des différences finies et celle des éléments finis.

L'équation aux dérivées partielles est résolue de manière approchée à l'aide d'un maillage constitué de volumes finis qui sont des petits volumes disjoints en 3D (des surfaces en 2D, des segments en 1D) dont la réunion constitue le domaine d'étude. Les volumes finis peuvent être construits autour de points d'un maillage initial, mais ce n'est pas une nécessité. Les méthodes de volumes finis ont été initialement mises au point pour des lois de conservation hyperbolique, mais des développements récents permettent à présent de les utiliser pour des équations elliptiques et paraboliques.

Un autre avantage de la méthode des volumes finis est qu'elle est facilement utilisable avec des maillages non structurés car, en matière de discrétisation des lois de conservation, sa formulation ne tient aucun compte de la complexité du maillage.

En revanche, les caractéristiques géométriques du maillage peuvent jouer un rôle prépondérant lorsque des flux diffusifs entrent en jeu.

II .4. Le maillage

Avoir une meilleure précision des résultats par le solveur FLUENT nécessite un maillage suffisamment raffiné de sorte que la solution soit indépendante du maillage. Un test de l'effet du maillage sur la solution a été effectué en utilisant différents nombres de cellules. Le maillage comprend également des nœuds situés sur la frontière du domaine (ou au moins « proches » de cette frontière) afin de pouvoir imposer les conditions aux limites et/ou la condition initiale avec une précision suffisante.

Le code de calcul "FLUENT" dans sa version 6.3.26 traite plusieurs types de maillages structurés, non-structurés ou hybrides. Un maillage structuré est généralement composé de mailles quadrilatérales en deux dimensions (2D ou maillage surfacique) et hexaédriques en trois dimensions (3D ou maillage volumique), tandis qu'un maillage non-structuré va être composé de mailles quadrilatérales ou triangulaires en 2D et hexaédriques ou tétraédriques en 3D. Dans un maillage hybride les mailles proches des parois sont des quadrilatères en 2D et des hexaèdres en 3D et les mailles du reste du domaine sont des triangles en 2D et des tétraèdres en 3D. En proche paroi, il est nécessaire d'avoir des mailles les plus petites possibles pour bien modéliser les écoulements à cet endroit, cette particularité est d'autant plus importante en régime turbulent, on l'appelle (l'inflation). En 3D, les mailles qui font les liaisons entre les hexaèdres et les tétraèdres sont des prismes ou des pyramides.

II .4.1. Nœuds et éléments

La modélisation numérique repose sur la reformulation des équations de conservation sur des volumes élémentaires ou discrets, appelés éléments ou mailles .a ces éléments, sont associés les nœuds de discrétisation, c'est-à-dire les points de résolution des équations discrètes. Ceux –ci peuvent être aussi bien placés aux sommets des éléments qu'en leur centre ou encore sur les faces, selon la méthode de discrétisation utilisée. Les éléments et les nœuds associés composent le maillage, qui se fait par un découpage géométrique du domaine de calcul.

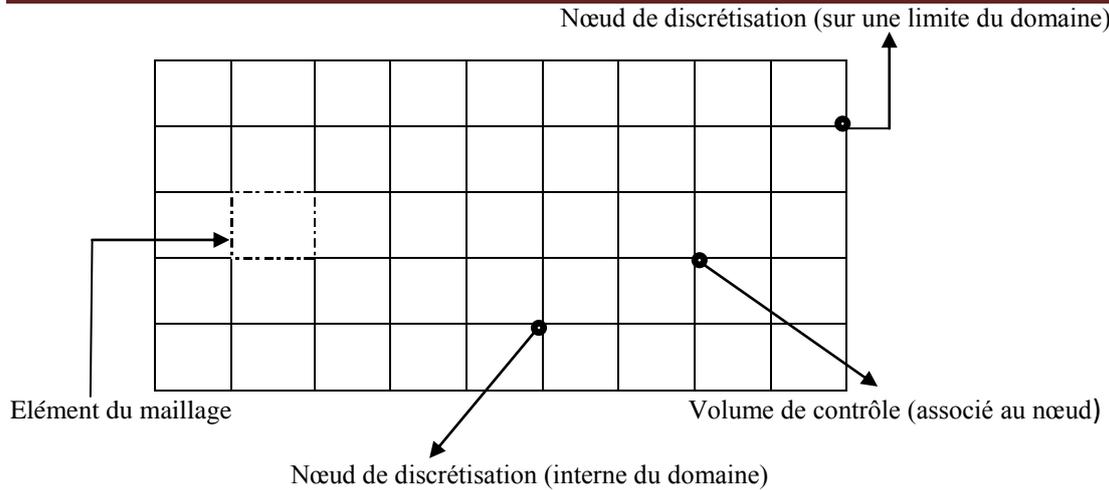


Figure II.1 : illustration de la notion de maillage.

II .4.2. Géométrie et topologie

Nous faisons la différence entre la géométrie qui caractérise la forme du domaine et la topologie qui est le résultat du découpage spatial du domaine sur lequel s’appuie le maillage. La topologie est donc une classification des objets de type segments, faces, etc. Nous distinguons plusieurs types de maillages, définis par le nombre de nœuds associés à chaque élément et par le nombre de liaisons pour chaque nœud.

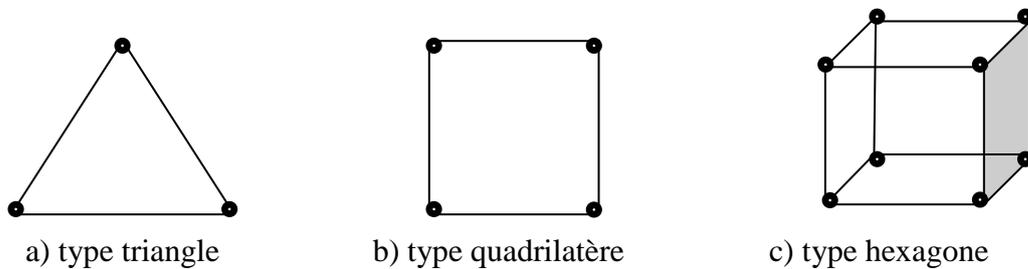


Figure II .2 : Quelques types d’éléments.

II .4.3. Connectivité

La connectivité décrit les liaisons entre les sommets des éléments. On parle de maillage structuré si les nœuds de même type (dans le domaine, sur une limite ou sur un coin) ont toujours le même nombre de nœuds voisins, ou sont associés au même nombre d’éléments. La connectivité associée à ces nœuds est alors toujours de même type. Dans le cas d’un maillage non-structuré, la connectivité est de type quelconque, et le nombre de nœuds voisins de chaque nœud diffère localement.

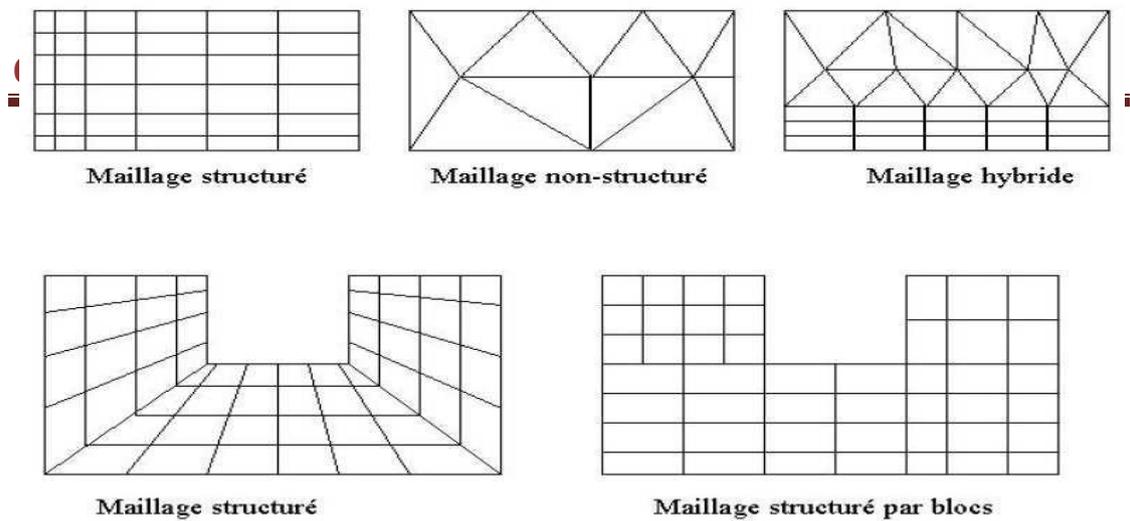


Figure II .3 : les différentes structures de maillage par code

FLEUNT

II .5. Présentation de code de calcul

Il existe un certain nombre de codes industriels, aux meilleurs performants, permettant la prédiction d'écoulements de fluides (FLUENT, CFX, PHOENICS, STAR-CD, TRIO, FEMLAB, CFD-ACE, FLOTRAN, N3S, CFDS-FLOW3D ...).

Le code de calcul "FLUENT" est commercialisé par le groupe FLUENT. Ce groupe est actuellement l'un des pôles de compétence en mécanique des fluides numérique les plus importants. Il développe et commercialise une solution complète sous forme de logiciels de CFD (Computational Fluid Dynamics) généralistes qui simule tous les écoulements fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques pour toute l'industrie. Les produits et services proposés par le groupe "FLUENT" aident les ingénieurs à développer leurs produits, à optimiser leur conception et à réduire leurs risques.

Ce code est largement utilisé dans l'industrie aéronautique, automobile et offre une interface sophistiquée qui facilite son utilisation. Le logiciel "FLUENT" modélise par la méthode des volumes finis des écoulements très variés dans des configurations plus ou moins complexes. Il est composé, comme tout logiciel de type CFD, de trois éléments clés qui sont : le préprocesseur, le solveur et le post-processeur. Nous détaillons ci-dessous ces trois éléments. [40]

II .5.1. Le préprocesseur « GAMBIT »

Il permet à l'utilisateur de construire la géométrie du domaine de calcul et de subdiviser ce dernier en petits volumes de contrôle ou cellules de calcul. L'ensemble de ces volumes élémentaires constitue le maillage. La définition des conditions aux limites appropriées, au niveau des cellules qui coïncident ou touchent la frontière du domaine de calcul, se fait également à ce niveau. Les options de génération de maillage de GAMBIT offrent une flexibilité de choix. La géométrie peut être décomposée en plusieurs parties pour générer un maillage structuré, sinon GAMBIT génère automatiquement un maillage non structuré adapté au type de géométrie construite. Les défauts sont détectés à l'aide de son interface comportant plusieurs fenêtres d'outils de création, génération, vérification du maillage du modèle étudié et l'incorporation des conditions aux limites.

Dans le présent travail, GAMBIT offre cette possibilité de définir des obstacles cylindriques avec des rainures en U, créer un volume représentant le domaine d'étude et générer son maillage.

II .5.2 Le solveur « FLUENT »

Pour des fluides incompressibles, les calculs se font en pression relative. La méthode utilisée est la méthode des volumes finis. Cette méthode a l'avantage d'être conservatrice, c'est-à-dire que tout le flux sortant d'un volume de contrôle entre dans les volumes voisins. Les étapes de calcul dans le solveur sont les suivantes :

- Intégration des équations continues sur chaque volume de contrôle.
- Discrétisation en espace et en temps (pour les écoulements non permanents) des équations : substitution des dérivées partielles par des approximations en différences finies ; transformation du système d'équations en système algébrique.
- Résolution du système algébrique par un processus itératif ; utilisation d'un algorithme pour corriger la pression et les composantes de la vitesse afin d'assurer la conservation de la masse.

II .5.3. Le post processeur « FLEUNT »

Le Post-processeur permet de visualiser les différents résultats à l'écran (champs de vitesse, champs de température, ligne de courant ...etc.).

II.6. Description de problème

Pour décrire la construction de la géométrie de notre ca d'étude la génération de son maillage ainsi que l'incorporation des conditions aux limites telles qu'elles ont été élaborées dans Gambit et code Fluent.

II.6. 1. Domaine d'étude

La géométrie du problème considéré est schématisée dans la figure (II.4).Elle décrit une conduite rectangulaire de dimensions (50m×40m), et d'un obstacle cylindrique de diamètre 2m placé sur une distance de 20m par rapport a l'entrée de la conduite, et 20m par la hauteur. Les dimensions géométriques sont celles utilisées par [36].

L'objectif de cette étude est basé sur l'effet de la rainure sur l'écoulement, a cet effet nous avons testé notre code fluent 6.3 pour valider les résultats des travaux de [36]. On garde le même domaine d'étude et les mêmes conditions aux limites mais avec la présence d'une rainure de forme U situé dans le cylindre et positionnée par un angle de 60° et 90°.

II.6. 1.1 La géométrie pour un cylindre simple

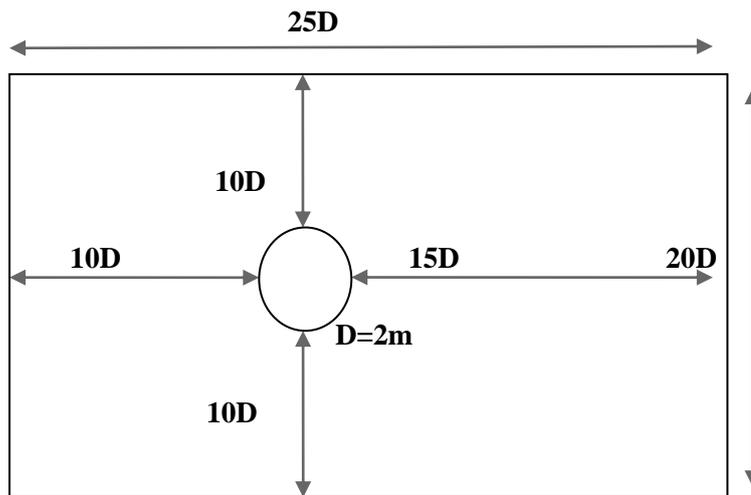


Figure II.4 : Domaine d'étude d'un écoulement autour un cylindre lisse.

II.6.1.2. Domaine d'étude pour un cylindre avec rainure

II.6.1.2.1. Cylindre rainuré avec un angle de 60° et 90°

Les figures II.5 II.6 II.7 représentent les dimensions de la géométrie de cylindre avec rainure qui sont les mêmes avec celle de cylindre simple, le choix de dimensionnement de la rainure en « U » est basée sur l'étude des travaux de [41] où ils ont trouvé que la longueur de la rainure égale à deux fois la hauteur ($l = 2H$) .

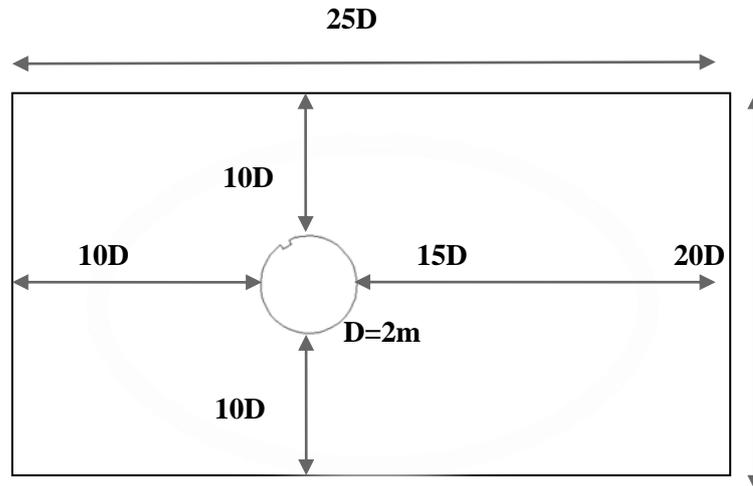


Figure II.5 : Domaine d'étude d'un écoulement autour un cylindre rainuré avec un angle de 60°

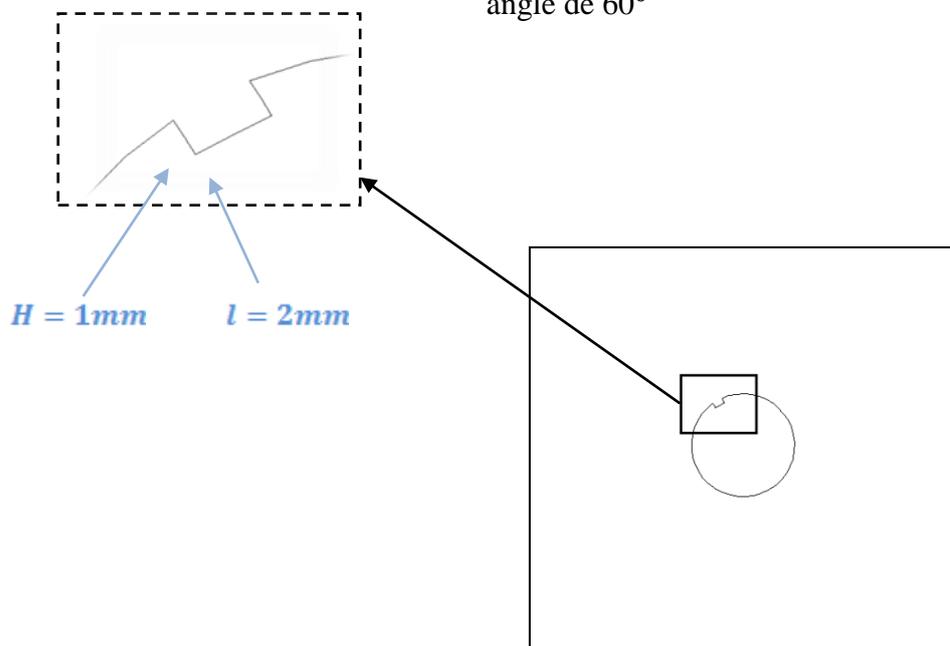


Figure II.6 : dimension de la rainure en 60°

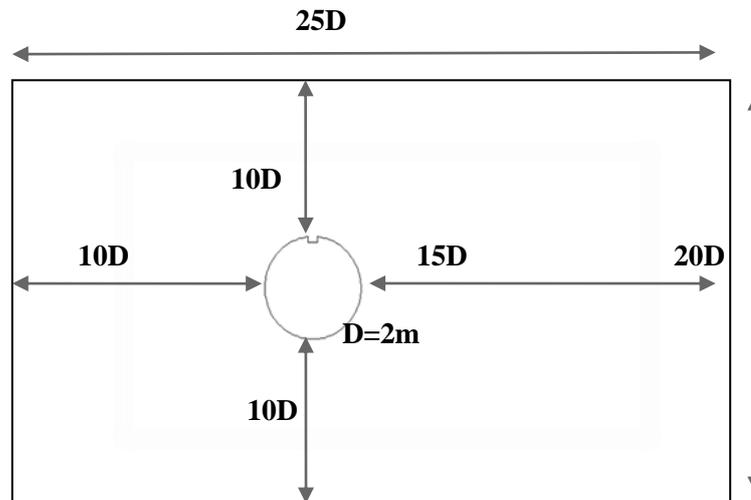


Figure II.7 : Domaine d'étude d'un écoulement autour un cylindre rainuré avec un angle de 60° .

II.6.2. Maillage sous GAMBIT

Un maillage non- structuré est généralement composé des mailles en deux dimensions (2D). Pour notre domaine d'étude, au front de l'obstacle cylindrique quelque soit simple ou rainuré ; la méthode des volumes finis nécessite un maillage raffiné pour avoir une meilleur précision des résultats. Les figures (**Figure II.8**), **Figure II.9**) et (**Figure II.10**) représente le maillage utilisé pour un cylindre lisse et rainuré qui adopte la forme des rainures.

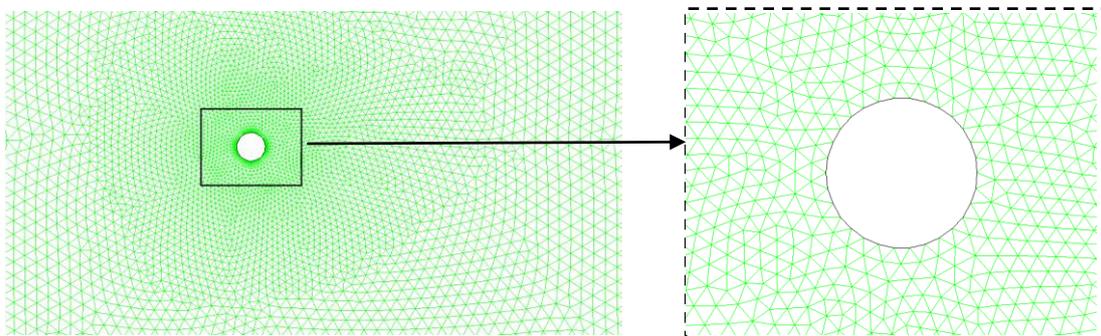


Figure II.8 : Maillage hybride d'un cylindre simple.

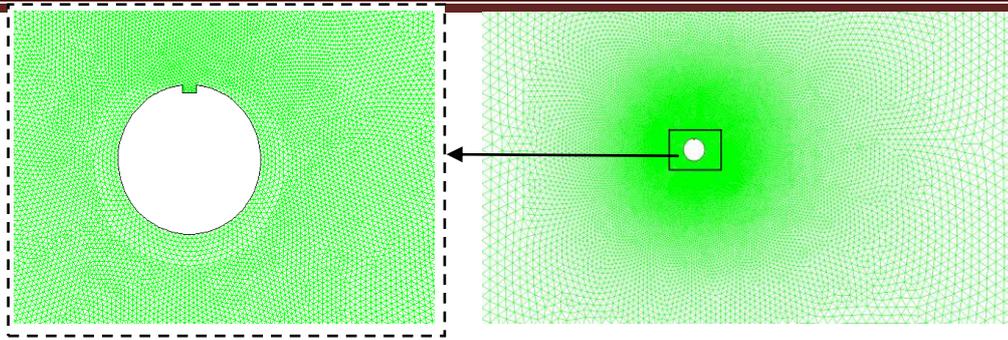


Figure II.9 : Maillage triangle d'un cylindre avec rainure en 90°

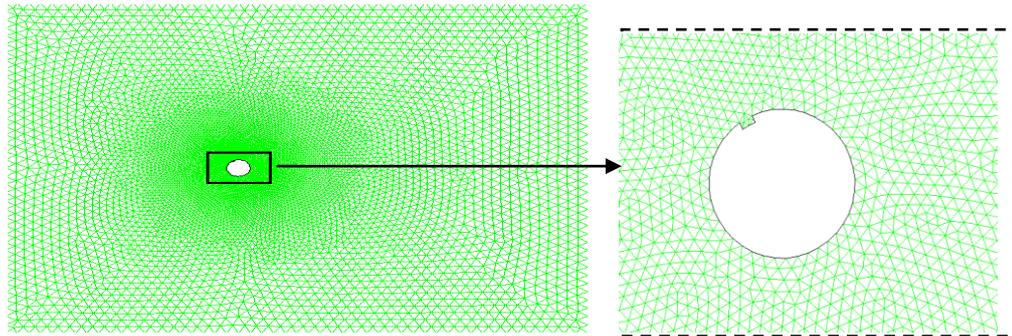


Figure II.10 : Maillage triangle d'un cylindre avec rainure en 60°

II.6.3. Domaine d'étude et Conditions aux limites

Pour les domaines d'étude précédente nous avons indiqué plusieurs conditions aux limites, de vitesse, pression, condition d'obstacle et des parois de conduite.

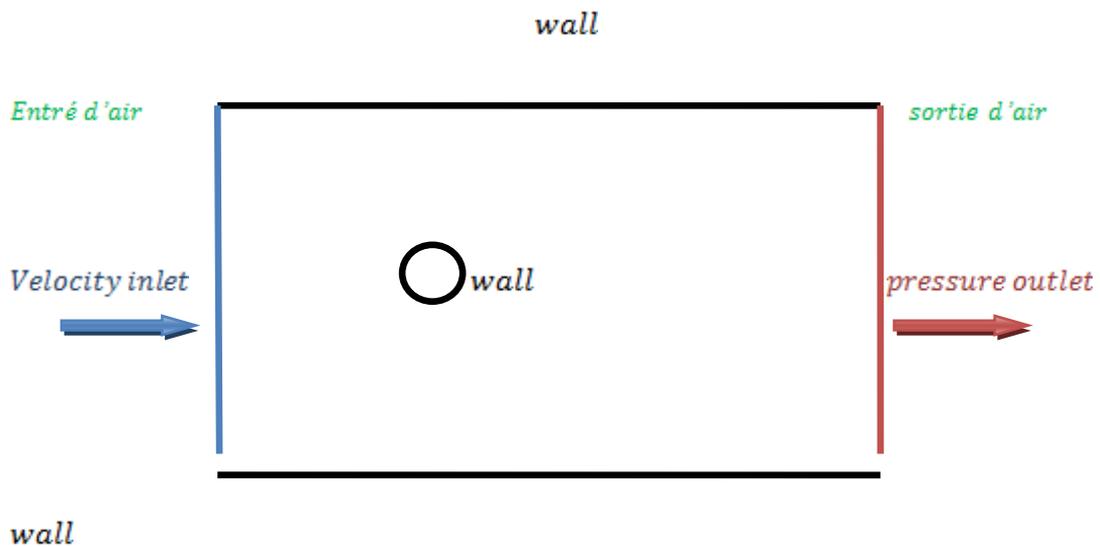


Figure II.11 : condition aux limites de domaine d'étude.

- La condition de vitesse « velocity inlet » à l’entrée de conduite la vitesse est considéré constante où le fluide utilisée est l’air.
- Pour les deux parois en parallèle et l’obstacle cylindrique la condition « wall » est utilisée.
- La sortie de la conduite la condition de pression « pressure outlet » est prise égale à zéro.
- Le régime de l’écoulement de fluides est laminaire.
- La masse volumique et la viscosité dynamique sont respectivement 1 kg/m^3 ; 0.01 kg/(m.s) .

Vitesse (m/s)	Pression (bar)	Reynolds	masse volumique (kg/m3)	viscosité dynamique (kg/(m.s))
1	0	100	1	0,01

Tableau II.1 : Les conditions aux limites du domaine de travail.

II.6.2. Hypothèses simplificatrices

Afin de rendre le modèle de calcul plus détaillé et plus précis, il faut introduire certaines hypothèses simplificatrices, qui se sont réparties comme suit :

- 1) L’écoulement est non stationnaire.
- 2) Le fluide est incompressible et visqueux (l’air)
- 3) Ecoulement bidimensionnel sans transfert de chaleur.
- 4) Le profil de vitesse à l’entrée est constant.

II.7.Étapes de résolution du problème :

Les principales étapes utilisées dans notre simulation sont les suivantes :

- 1) Détermination du domaine de calcul (construction de la géométrie).
- 2) Discrétisation du domaine de calcul (maillage).
- 3) Identification des conditions aux limites.
- 4) Choix du modèle mathématique.
- 5) Choix de l’algorithme de solution.
- 6) Solution du modèle mathématique.
- 7) Visualisation et interprétation des résultats.

II.8. Conclusion

Ce chapitre a permis de définir les méthodes numériques d'une part, et de présenter le code de calcul d'autre part. Aussi a élaboré les hypothèses considérées dans notre travail. Pour le chapitre suivant, on va indiquer une visualisation, une interprétation et une discussion des résultats obtenue par notre simulation numérique.

Chapitre III

Résultats et Discussions

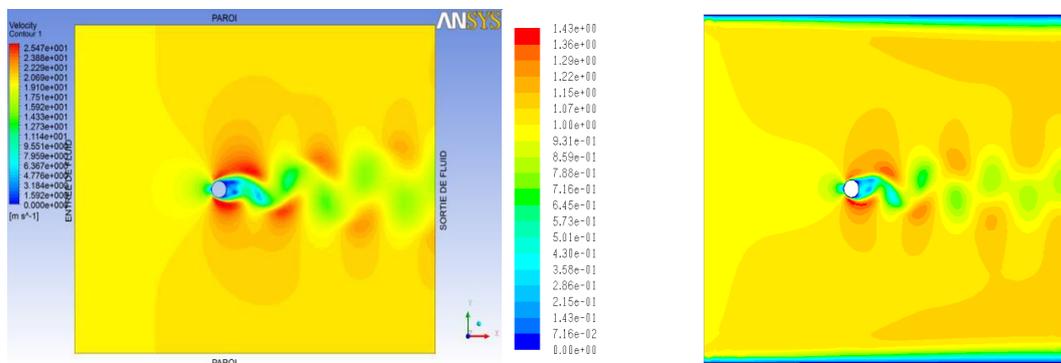
III.1.Introduction :

Dans ce dernier chapitre, on va présenter les résultats obtenus de notre cas d'étude bidimensionnel et montrer la capacité du code de calcul « FLUENT ». On l'a utilisée pour modéliser un écoulement laminaire instationnaire d'un fluide incompressible qui s'écoule dans une paroi rectangulaire en présence d'un obstacle cylindrique avec rainure en U pour deux différents angles (60° et 90°).

Donc, notre objet est de faire une visualisation et interprétation des résultats obtenus par cette simulation en comparant ces résultats avec celle d'un cylindre lisse.

III.2. Validation :

La figure III.1 (a, b) montre le champ de vitesse moyenne autour d'un cylindre lisse pour un écoulement laminaire d'un nombre de Reynolds $Re=100$. On remarque une bonne concordance entre notre résultat et résultat de [36], et que le champ de vitesse est presque le même pour les deux résultats obtenu pour un régime instationnaire.



a)travail de [36]

b) notre travail

Figure III.1 : écoulement laminaire instationnaire pour le cylindre à $Re=100$

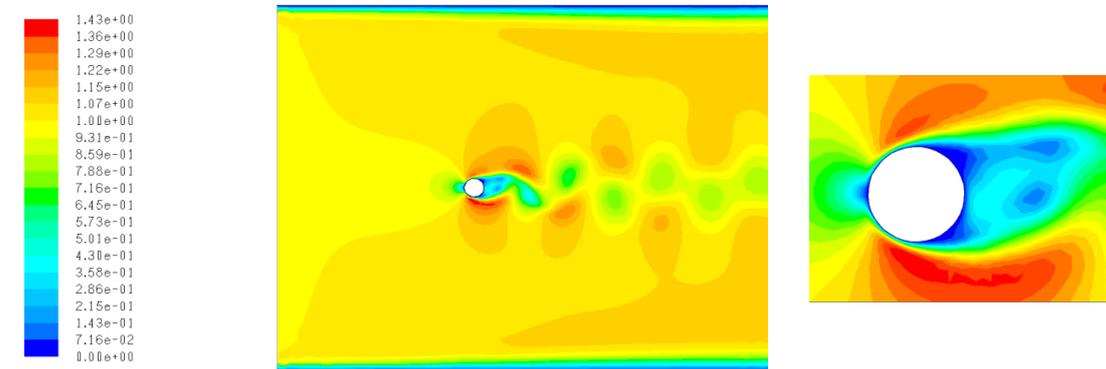
III.3. Le champ de vitesse :

La figure (III.2 ; a ; b ; c)représente respectivement les contours de vitesse autour un cylindre dans les différentes cas étudié. On compare les résultats obtenu pour le premier cas (cylindre lisse) avec celles des autres cas (cylindre rainuré en 90° et 60°).

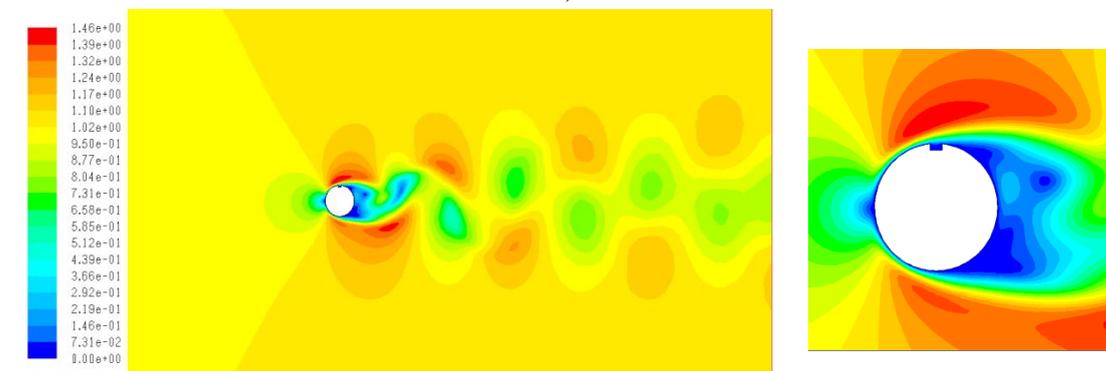
On observe pour toutes les figures suivantes que la vitesse s'annule juste en amont de l'obstacle, cette annulation est due à la zone de stagnation, mais s'accélère sur la moitié supérieure et inférieure du cylindre :

- Pour un cylindre lisse la vitesse moyenne maximale à une valeur de $V=1.43 \text{ m/s}$.
- pour un cylindre rainuré en 90° la vitesse moyenne maximale à une valeur de $V=1.46 \text{ m/s}$.
- pour un cylindre rainuré en 60° la vitesse moyenne maximale à une valeur de $V=1.41 \text{ m/s}$.

Cela s'explique par l'accélération relativement importante sur l'obstacle ; et la rainure en 90° donne une bonne influence sur le champ de vitesse par rapport aux celle de la rainure en 60° . puis en aval du cylindre apparaisse un écoulement particulier et entrainant en chaque cas un nouveau point de décollement du fluide avec évidence de changement de la zone de sillage.



a)



b)

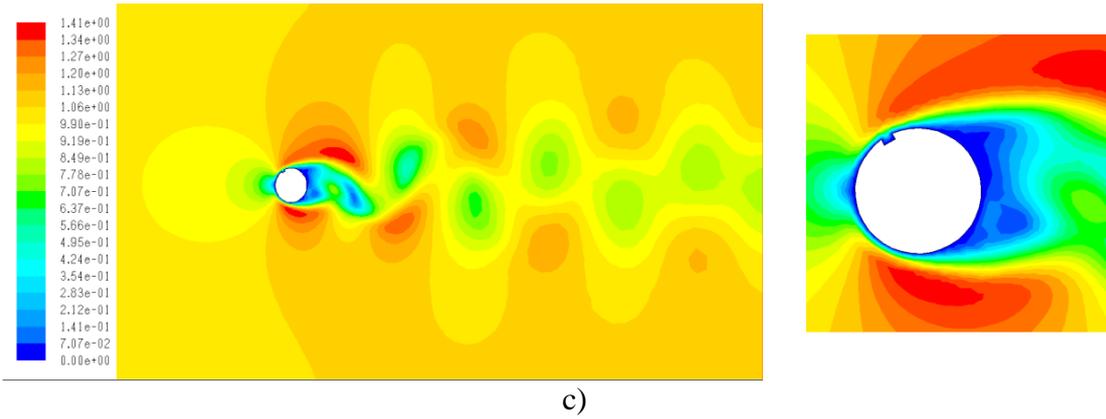
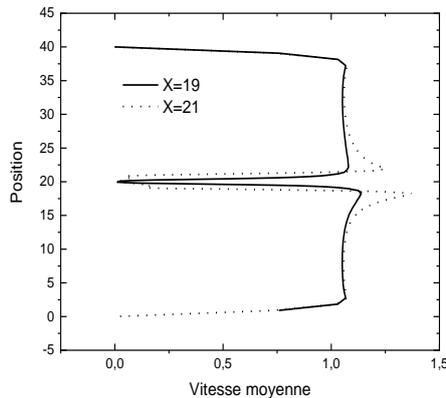


Figure III.2 : Distribution de vitesse des particules de fluides d'écoulement autour un cylindre a) lisse b) avec une rainure en 90° c) avec une rainure en 60°

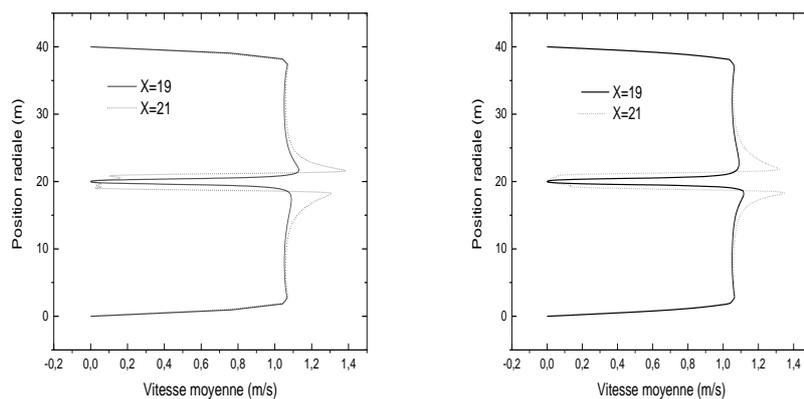
III.4. Profil de vitesse

La figure (III.3) montre la variation de la vitesse moyenne autour de cylindre en fonction de la position radiale. On remarque que la vitesse en amont de cylindre $X=19$ est nulle qui justifier la stagnation de fluide au-delà de cette valeur $X=21$ on trouve une augmentation progressive de vitesse qui atteint la valeur maximale juste en aval de cylindre ; cette augmentation due à la zone de recirculation provoqué par l'écoulement.

La rainure à l'angle 60° et 90° n'influe pas au profil de vitesse moyenne pour une position de $X=19$ et $X=21$; la vitesse reste nulle en amont de cylindre et augmente au niveau supérieur et inférieur de cylindre.



a) cylindre lisse



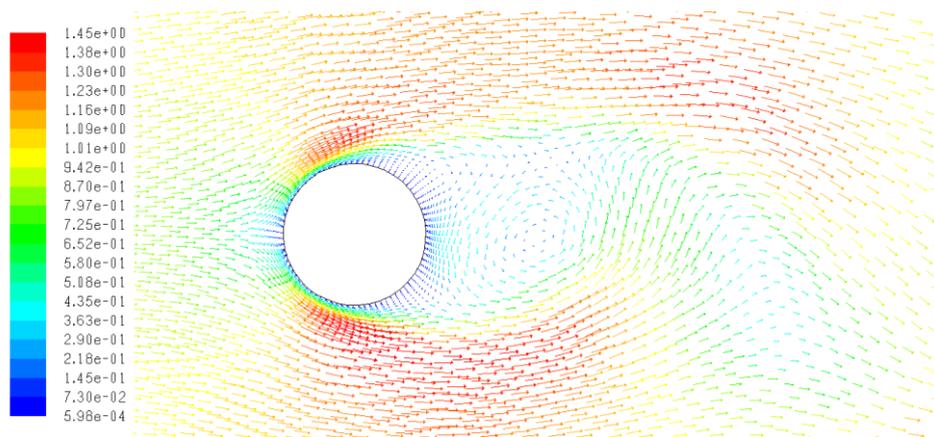
b) cylindre avec rainure à 90° c) cylindre avec rainure à 60°

Figure III.3. Profil de vitesse autour le cylindre a) lisse b) avec rainure en 60° c) avec rainure en 90°

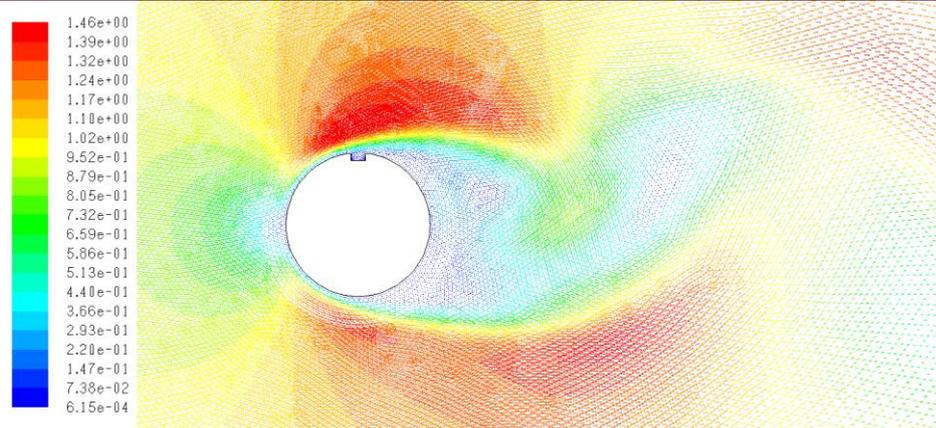
III.5. les vecteurs de vitesse

La figure III.4 montre les vecteurs de vitesse pour chaque domaine d'étude ; lisse et rainuré avec un de l'angle 60° et 90°.

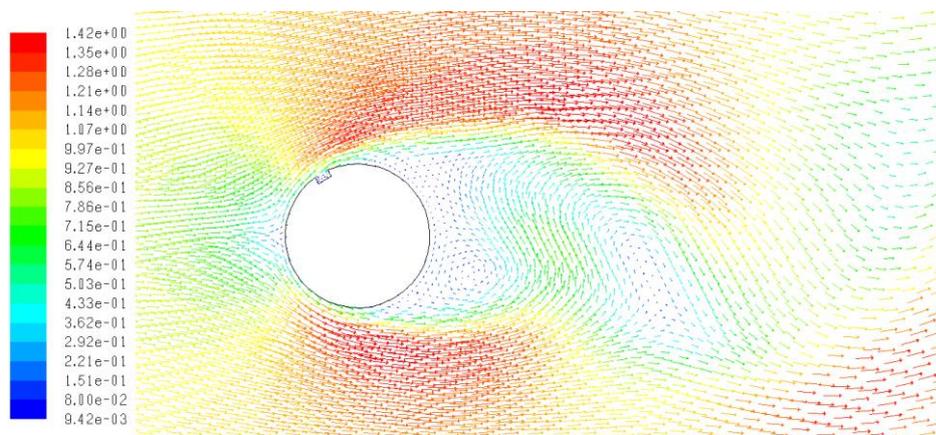
Ces vecteurs nous permettent de déterminer la direction de l'écoulement autour de cylindre. On remarque que pour le cylindre lisse ou avec rainure quelque soit l'angle utilisé ; les vecteur de vitesse ont le même sens de l'écoulement de fluide utilisé où la valeur de vitesse et l'existence de l'obstacle n'influe pas sur la direction des vecteur.



a)



b)



c)

Figure III.4 : Vecteur de vitesse d'un écoulement autour un cylindre a) lisse b) avec une rainure en 90° c) avec une rainure en 60°

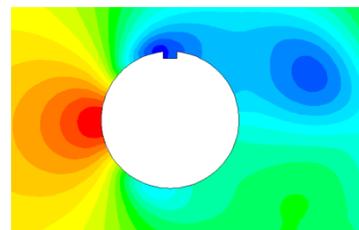
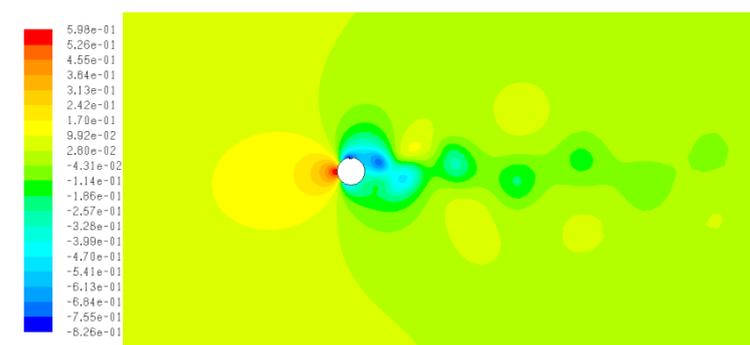
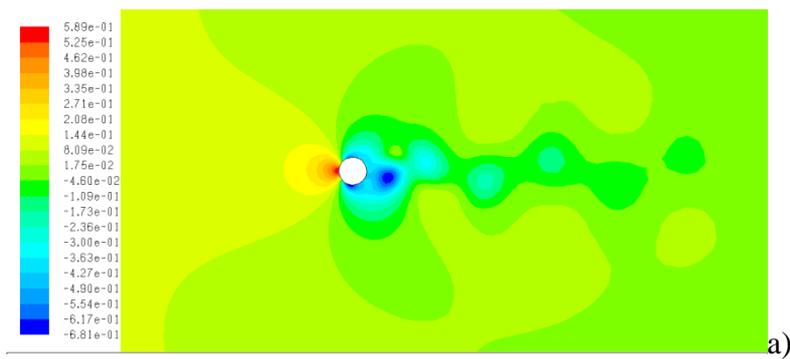
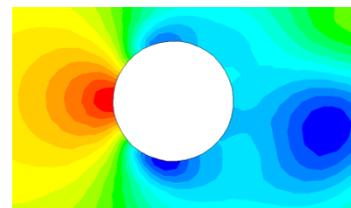
III.6. Le champ de pression

La (Figure III.5) comme suite représentent les contours de pression statique autour un cylindre. La chute de pression autour le cylindre (lisse ; rainurée) due au frottement du fluide utilisé avec les parois de l'obstacle et de domaine est mise en évidence.

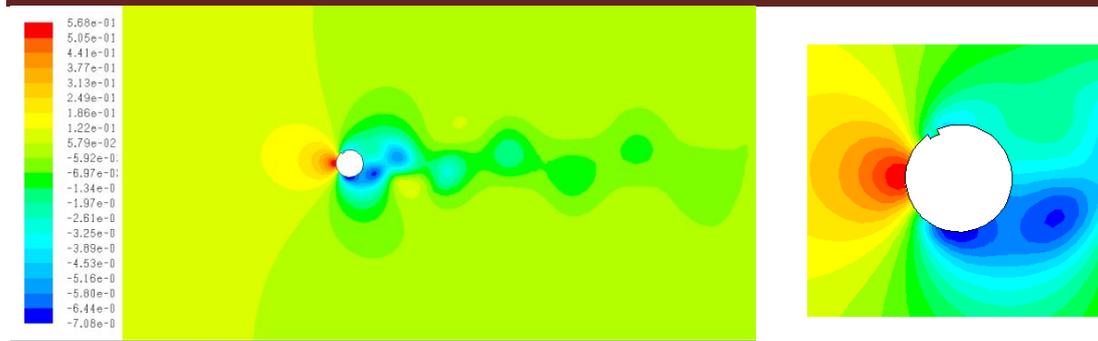
- La pression atteint sa valeur maximale avant le cylindre pour une valeur $P=5.98 \times 10^{-1}$ pour le cas rainuré en 90° et sa valeur minimale $P=-6.81 \times 10^{-1}$ au niveau de la rainure.

- Pour le cas lisse la pression autour le cylindre est très petit par rapport au front de l'obstacle
- Pour la rainure en 90° en observant que la pression au front de la rainure est plus faible que l'avant de cylindre ; par contre, elle n'influe pas sur la rainure pour 60° où la pression est faible au-dessous de cylindre et reste maximale à l'avant de cylindre.

On remarque que le gradient de pression est moins important dans la position à l'angle 60° que pour l'autre position à l'angle 90° .



b)



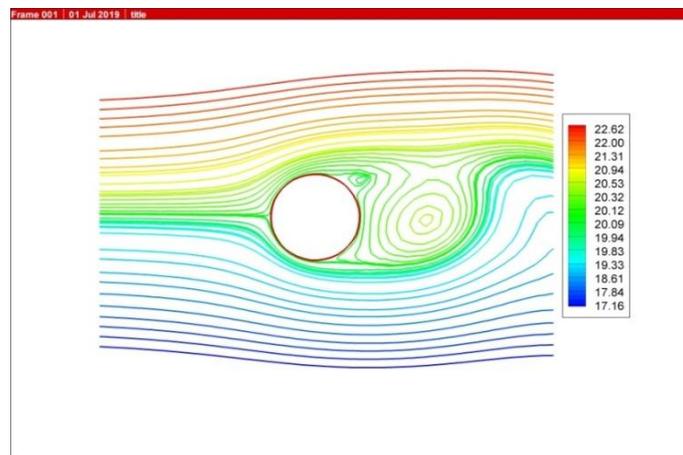
c)

Figure III.5 : Distribution de pression des particules de fluides d'écoulement autour un cylindre a) lisse b) avec une rainure en 90° c) avec une rainure en 60°

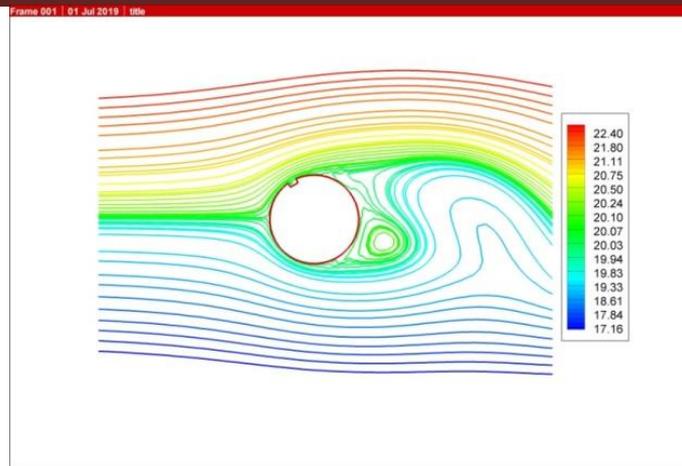
III.7. Les lignes de courant

La figure (III.6 ;a ;b ;c) montre respectivement la distribution des lignes de courant pour un cylindre lisse et avec rainure en deux angles différents 60° et 90°.

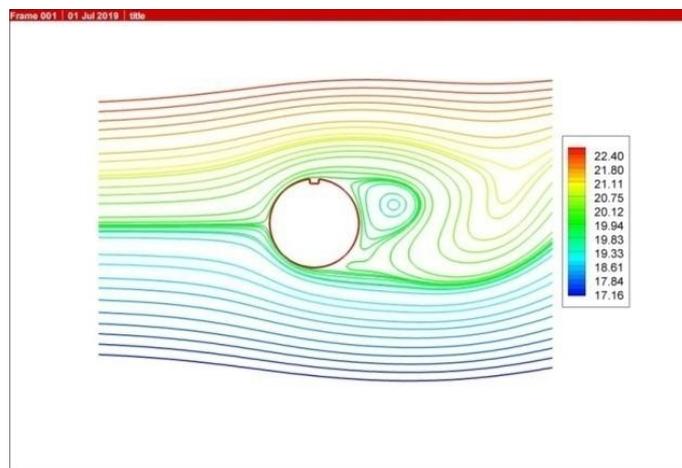
. On observe un décollement de chaque côté de cylindre où se forme la zone de recirculation qui se forme presque au milieu après le cylindre lisse par contre on bas pour le cylindre a rainure en 60 et on haut pour le cylindre a rainure en 90.



a)



b)



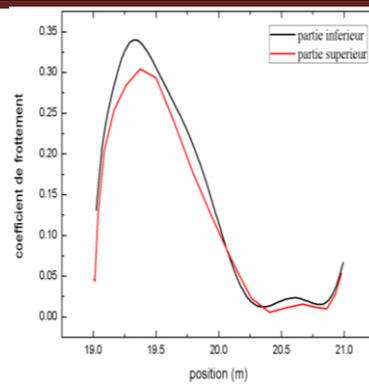
c)

Figure III.6. Distribution des lignes de courant pour cylindre a) lisse b) avec rainure en 60° c) avec rainure en 90°

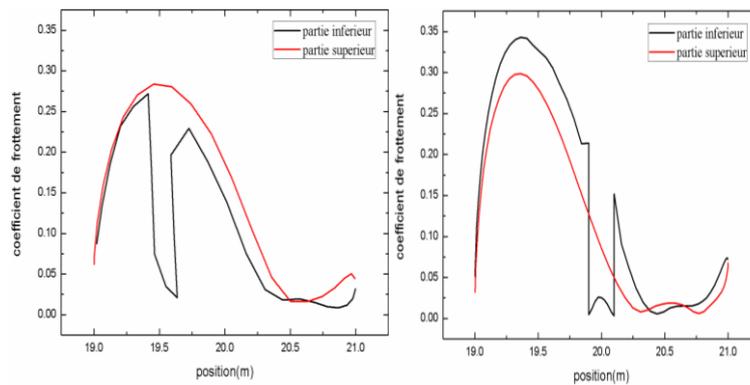
III.8. Coefficient de frottement

La figure (III.7) représente la variation de coefficient de frottement autour un cylindre lisse et avec rainure à l'angle 60° et 90° en fonction de la position de ce cylindre.

Le coefficient de frottement augmente au niveau inférieur de cylindre à cause de l'augmentation de profil de vitesse pour les trois domaines d'études. En comparant le résultat obtenu de cylindre lisse avec celle avec rainure ; on observe que les rainures influentes sur le coefficient de frottement. Le cylindre avec rainure à l'angle 90° donne une meilleure influence sur le coefficient de frottement.



a) cylindre lisse



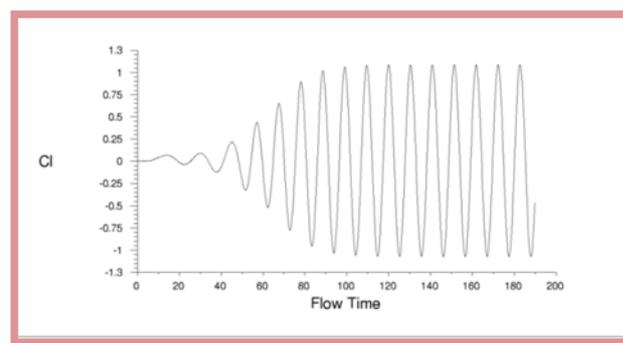
b) cylindre avec rainure à 60° c) cylindre avec rainure à 90°

Figure III.7. Coefficient de frottement autour un cylindre a) lisse b) avec rainure en 60° c) avec rainure en 90°

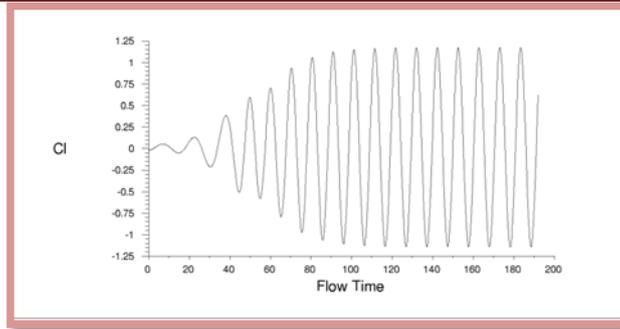
III.9. Coefficient de portance

La figure(III.8) représente respectivement la variation de coefficient de portance en fonction de temps(s) pour le cas de cylindre lisse et rainuré à l'angle de 60° et 90°.

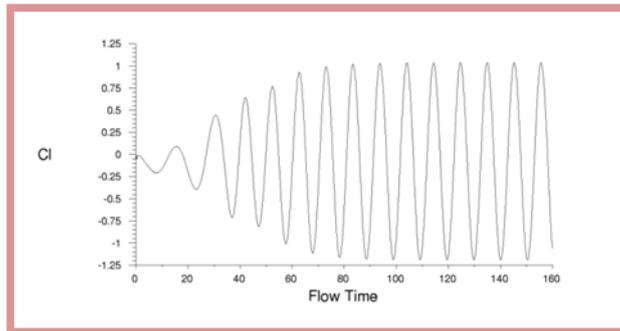
On remarque que pour les graphes de coefficient de portance garde la même allure dont le temps est instationnaire.



a)



b)



c)

Figure III.8. Coefficient de portance autour un cylindre a) lisse b) avec rainure en 60° c) avec rainure en 90°

III.10. Bilan des résultats

Après la simulation par code FLUENT de nos domaines d'études et la comparaison entre les résultats trouvée nous illustre que :

- Il semble que la rainure en U affecte l'écoulement laminaire bidimensionnel près du mur cylindrique.
- A l'angle de 90° la rainure causé un changement pour le champ de vitesse plus significatif que l'angle 60° .
- le gradient de pression est moins important dans la position à l'angle 60° que pour l'autre position à l'angle 90° .
- La rainure pour les deux positions de l'angle ne donne aucune influence aux profils de vitesse.
- Le coefficient de frottement augmente avec l'augmentation de profil de vitesse ; il s'annule au niveau de la rainure en position de 90° .
- L'allure de graphe de coefficient de portance pour un écoulement laminaire instationnaire autour un cylindre lisse et rainuré est identique.

III.11. Conclusion

Les résultats obtenus d'après la simulation numérique autour un obstacle cylindrique lisse et avec rainure en « U » pour deux angles différents 60° et 90° sont satisfaisants. Lorsque on compare les résultats de cylindre simple avec celle de cylindre rainuré, il est intéressant de noter que les structures d'écoulement sont différentes ; où l'influence de la rainure sur le champ de vitesse, de pression les lignes de courant et sur le coefficient de frottement est remarquable et la rainure à l'angle 90° donne une bonne influence.

Conclusion général
&
Perspective

Conclusion

Le projet de fin d'étude nécessite de gros effort et collaboration entre l'étudiant et l'enseignant quelque soit le cas étudié. Notre thème est : la simulation numérique autour un cylindre avec rainure.

L'écoulement autour un cylindre est un problème fondamental dans la mécanique de fluide avec une grande importance dans des applications pratiques. La simulation numérique quelque soit logiciel utilisé est devenue un outil très performant de nos jours. Pour but de pouvoir analyser ce problème, la simulation de notre travail est réalisée par le code commercial FLUENT qui se base sur la méthode des volumes finis. Ce code fait la résolution numérique de l'écoulement d'air autour un obstacle cylindrique lisse et rainuré pour deux différent angle ; dans un régime laminaire $Re=100$ est le temps instationnaire. Nous avons choisi un maillage raffiné non-structuré qui adopte la forme des rainure pour avoir une meilleur précision des résultats ; où le choix de domaine d'étude est d'après [].

Après plusieurs essais de simulation nous avons atteint des résultats logiques et satisfaites pour le contour de vitesse, champs de pression et le coefficient de frottement.

La comparaison entre le cas de cylindre lisse avec le cylindre en rainure de forme «U» à l'angle 60° et 90° et voir l'influence des rainures sur l'écoulement sont notre objectif principal de ce travail.

La rainure en forme « U » à l'angle 90° nous donne une influence remarquable par rapport à l'angle 60° qui ne varie pas trop de l'influence d'un cylindre simple.

Perspective

Après la réalisation de notre travail et l'interprétation des résultats obtenus ; on peut envisager :

- De changer le fluide utilisé et les conditions aux limites ainsi que la vitesse d'entré et la pression de sortie.

Conclusion et Perspective

- De varier la forme de la rainure en «U» à une forme en «V» en gardant les mêmes positions de la rainure et conditions aux limites.
- De rainurer toute la surface de cylindre.
- De lancer une simulation tridimensionnelle de notre cas d'étude.
- De passer de régime laminaire en régime turbulent en changeant le nombre de Reynolds.
- De lancer une simulation numérique de notre domaine d'étude en ajoutant un transfert de chaleur.
- De remplacer l'obstacle cylindrique par un obstacle elliptique.

Références
Bibliographies

Références Bibliographique

- [1] **Samir khene, (mécanique des fluides)**, publications de l'université de Baji Mokhtar, Annaba, 2000.
- [2] Batchelor, 1970 An Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press.
- [3] **Y.H. Madani, M.Abidat.** Etude numérique de l'écoulement d'un fluide visqueux Incompressible autour de corps profilés par une méthode combinée d'ordre 0(h2) et 0(h4). Séminaire international de Génie Mécanique. Sigma'02.E.N.S.E.T.Oran. 28 & 29 AVRIL 2002.
- [4] <https://lesfluides8sciences.weebly.com/les-proprieacuteteacutes-des-fluides.html>
- [5] <https://ridha.users.lmno.cnrs.fr/pdf/HOutDynFluidM1-4.pdf>
- [6] **ION Paraschivoiu, (Aérodynamique subsonique)**, Editions de l'école polytechnique de Montréal (Québec), Canada, 1998.
- [7] **DANIEL Cauvin, (Aérodynamique, mécanique de vol)**, université aéronautique Jean Mermoz, France, 1990.
- [8] **I. Khabbouchi, M.S. Guellouz.** Ecoulement autour d'un cylindre circulaire proche d'une paroi : Effet de l'écoulement type jet. Laboratoire d'Etude des Systèmes Thermiques et Energétiques Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir Rue Ibn El Jazzar 5019 Monastir, Tunisie. (2008).
- [9] **Benjamin Renaud, (Instabilité de Bénard –Von Karman derrière obstacle oscillant)**, Rapport de stage expérimental, Laboratoire de Physique et de Mécanique des Milieux Hétérogènes, Paris, 2000.
- [10] **Allain,J. Analyse physique de mécanismes de transition tridimensionnelle dans le sillage d'un cylindre circulaire par simulation directe.** Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, (1999).
- [11] <http://ressources.univlemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/divers/ecoulami.html>.
- [12] **D.Calluau, L.David, S. Rouvreau, P. Joulain.** Ecoulement laminaire autour d'un cylindre de section carrée comparaison calcul expérimental Laboratoire

Références Bibliographique

d'Etudes Aérodynamiques (UMR 6609-CNRS) Boulevard Pierre et Marie Curie
Téléport 2, B.P. 30179 86960 FUTUROSCOPE Cedex. 2001.

[13] **R. Belakroum, M. Khadja, H. Zibouche.** Simulation numérique du phénomène d'éclatement tourbillonnaire dans la zone de sillage d'un obstacle de section circulaire. International Conférence on Energetics and pollution constantine .2007.

[14] **Guojon-Durand, J E Wesfried , P.Jenffer.** Contrôle D'actif Du Sillage Autour D'un Cylindre Oscillant. Ecole Supérieur De Physique Et Chimie Industrielles De Paris (Espci), Pmmh. 10 Rue Vaulquelin, 75231 Paris Cedex 05, France 2001.

[15] **D.Calluud, L.David, S. Rouvreau, P. Joulain.** Ecoulement laminaire autour d'un cylindre de section carrée comparaison calcule expérimental Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques (UMR 6609-CNRS) Boulevard Pierre et Marie Curie Téléport 2, B.P. 30179 86960 FUTUROSCOPE Cedex. 2001.

[16] **C. Shu , N. Liu, Y.T. Chew.**A novel immersed boundary velocity correction–lattice Boltzmann method and its application to simulate flow past a circular cylinder. Journal of Computational Physics. Vol 226 PP 1607–1622. 2008.

[17] **N. Roquet, P. Saramito.** An adaptive finite element method for Bingham fluid flows around a cylinder. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. VOL192 PP3317–3341.2003.

[18] **P.F. Zhang, J.J. Wang, L.X. Huang.** Numerical simulation of flow around cylinder with an upstream rod in tandem at low Reynolds numbers. Applied Ocean Research Vol 28 PP183–192. 2006.

[19] **D'Allessio et S.kocabiyik,** Numerical simulation of the flow induced by transversaly oscillating inclined elliptic cylinder, Journal Of Fluide And Structures(2001) 15, 691-715.

[20] **Q.Rong, L. G.Ya, L. Wei, W. Jian, Z. Xin.** Study of vortex characteristics of the flow around a horizontal circular cylinder at various gap-ratios in the cross-flow. Journal of Hydrodynamics Ser.B, VOL18PP334-340 .2006

Références Bibliographique

- [21] **Norberg, C.** An Experimental Investigation Of The Flow Around A Circular Cylinder : influence of aspect ratio, *J. fluid mechanics*, 258,287-316,1994.
- [22] **T.Nishino, G.T.Roberts, X.Zhang.** Detached-eddy simulation of flow around a circular cylinder in ground effect. The seventeenth international symposium on transport phenomena, Toyama, JAPAN. 2006.
- [23] **Matthieu Boiraud, Dominique Couton, Frederic Ploudre.** Structures cohérentes dans le sillage turbulent d'un cylindre circulaire horizontal en régime de convection mixte. ENSMA, INSTITUT P' (UPR3346).1, avenue Clément Ader, BP40109,86961 Futuroscope Chasseneuil Cedex, France.
- [24] **R. Belakroum, M. Khadja, H. Zibouche.** Simulation numérique du phénomène d'éclatement tourbillonnaire dans la zone de sillage d'un obstacle de section circulaire. International Conférence on Energetics and pollution constantine .2007.
- [25] **F.Meddane, T.Yahiaoui, L.Adjlout.** Influence du volet sur les performances du profil NACA 0021. International Conférence on Energetics and pollution constantine .2007.
- [26] **S. Pascal-Ribot, Y. Blanchet.** Buffeting lift forces and local air–water flow aspects around a rigid cylinder. *International Journal of Multiphase Flow*.VOL 33 PP 1237–1254.200
- [27] **bhattacharyya, A.KSingh.** Vortex shedding and heat transfer dependence on affective Reynold number for mixed convection around a cylinder in cross flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*,53(15-16),3202-3212.
- [28] **I. Khabbouchi, M.S. Guellouz.** Ecoulement autour d'un cylindre circulaire proche d'une paroi : Effet de l'écoulement type jet. Laboratoire d'Etude des Systèmes Thermiques et Energétiques Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir Rue Ibn El Jazzar 5019 Monastir, Tunisie. (2008).
- [29] **S. Cao, Y. Tamura.** Flow around a circular cylinder in linear shear flows

Références Bibliographique

At subcritical Reynolds number. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol 96 PP 1961–1973. 2008.

[30] **M.S. Dhouiab, F. Aloui, S. Turki et S. Ben Nasrallah**, Etude expérimentale et numérique des écoulements instationnaires derrière un barreau carré placé dans un milieu confiné, 1^{ère} Conférence Internationale sur La Conversion et La maîtrise de L'Energie, CICME'08, 11-13, Avril 2008, Sousse –Tunisie.

[31] **K.Lam-L. Zou**. Experimental study and large eddy simulation for the turbulent flow around four cylinders in an in-line square configuration. International journal of heat and fluid flow. Vol 30PP 276-285,2009.

[32] **Goujon-Durand, S.Jenffer, P. and Wesfreid, JE**. Downstream evolution of the Bénard-von Karman instability. Phys.Rev.E 50(1), 308-313,10 (1994).

[33] **Johnson J.P.** 1978, « internal flows in turbulence », topics in applied physics, vol. 12N3, Ed.P.bradshaw.

[34] **Nishino, Roberts, Zhang**. Detached-eddy simulation of flow around a circular cylinder in ground effect. The seventeenth international symposium on transport phenomena, Toyama, JAPAN.2006

[35] **E.Faghani, H.A.Ardakani, N.S.Vaghefi, S.A.Niaki, and B.Farhanich**. Numerical investigation of flow and heat transfer characteristics from an impinging jet on circular

[36] **S.Bensedira, A.Abdellah El Hadj Et D.Semmar**, (étude dynamique de l'écoulement autour d'un cylindre placé proche d'une paroi), Third International Conference on Energy, Materials, Applied Energetics and Pollution, ICEMAEP2016, October 30-31, 2016, Constantine, Algeria.

[37] **Influence of single rectangular groove on the flow past a circular cylinder**. Cetin Canpolat, Besir Sahin. Cukurova University Scientific Research Office under Contract no MMF2014BAP2. International Journal of Heat and Fluid Flow.

Références Bibliographique

[38] Numerical Simulation of the Subcritical Flow Over a Circular Cylinder With “U” and “V” Grooves. Alejandro Alonzo-García. ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress November 15-21, 2013, San Diego, California, USA.

[39] Modélisation 2D de l'écoulement visqueux autour un cylindre fixe par la méthode SPH-ALE. Université de Lyon, LTDS, UMR CNRS 5513, Ecole Centrale de Lyon, 36 avenue Guy de Collonges, 69134 Ecully Cedex. Université de Lyon, LMFA, UMR CNRS 5509, Ecole Centrale de Lyon, 36 avenue Guy de Collonges.

[40] Simulation du transfert convectif dans une couche limite turbulente en présence d'obstacle décollé de la paroi. MEKROUSSI Saïd pour obtenir le Diplôme de Magister. Université Ibn Khaldoun – Tiaret

[41] LADJEL Mahmoud et ADJLOUT L.901, W1061901, USTO, 2011, Mécanique des fluides numérique, Université De Science Et Technologie Oran Mohamed Boudiaf 2013.

ملخص:

مجال دراسة التدفق حول الحواجز الثابتة واسع للغاية، والتدفق حول الأسطوانة ذات الأخدود (فتحة) هو الحالة التي اخترناها لدراسة مشروع نهاية الموسم الدراسي. يتم إجراء تحليل رقمي للمعادلات الموافقة للنموذج بواسطة كود FLUENT الذي يعتمد على طريقة حجم محدود لتدفق ثنائي الأبعاد لسائل غير قابل للانضغاط مع نظام صفحي $Re=100$ بدون تبادل للحرارة بين السطحين للأسطوانتين مختلفتي زاوية الأخدود (فتحة) ذات الشكل U. هدفنا هو المقارنة بين النتائج المتحصل عليها للأسطوانتين ذات الـ 60 و 90 درجة مع أسطوانة عادية؛ وأيضا المقارنة بين خطوط السرعة، الضغط و خطوط التيار وتحديد رقم Strouhal و عامل الرفع في الحالة غير المستقرة لكل أسطوانة. النتائج المتحصل عليها مرضية و مشجعة، والتأثير على هيكل التدفق ملاحظ جيدا.

الكلمات المفتاحية: FLUENT، حاجز، أسطوانة ذات الأخدود، تدفق، صفحي، طريقة حجم محدود

، غير مستقرة

Résumé :

Le domaine d'étude de l'écoulement autour des obstacles fixes est très vaste, l'écoulement autour d'un cylindre avec rainure c'est le cas qu'on a choisi pour l'étude de notre projet de fin de cycle. Une résolution numérique de système des équations qui régissent ce modèle est faite par le code FLUENT qui est basée sur la méthode des volumes finis pour un écoulement bidimensionnel d'un fluide incompressible avec un régime laminaire $Re=100$ sans transfert de chaleur pour deux cylindres avec une variation de l'angle de la rainure en U. Notre but est de comparer les résultats trouvés de cylindres avec rainures en 60° et 90° avec celle de cylindre simple ; et de comparer entre les contours de vitesse, de pression et les lignes de courant et pour déterminer le nombre de Strouhal et le coefficient de portance dans le cas non stationnaire de chaque cylindre. Les résultats obtenus avec la simulation sont satisfaites et encourageantes ; ainsi que les influences sur la structure de l'écoulement bien observée.

Mots clés : FLUENT, obstacle, cylindre avec rainure, écoulement, laminaire, méthode des volumes finis, non stationnaire.

Abstract

The field of study of the flow around fixed obstacles is very large, the flow around a cylinder with groove is the case we chose for the study of our end of study cycle . A numerical system resolution of the equations that govern this model is made by the FLUENT code which is based on the finished volumes method for a two-dimensional flow of a incompressible fluid with a laminar regime $Re = 100$ without heat transfer for two cylinders with a variation of the angle of the U-shaped groove. Our goal is to compare the results of cylinders with grooves in 60° and 90° with that of single cylinder; and to compare the velocity, pressure and current line contours and to determine the Strouhal number and the lift coefficient in the unsteady case of each cylinder. The results obtained with the simulation are satisfied and encouraging; as well as the influence on the structure of the flow are well observed.

Key words : FLUENT, obstacle, cylinder with groove, flow, laminar, the finished volumes method, unsteady.