

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



UNIVERSITÉ SAAD-DAHLEB DE BLIDA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE MÉCANIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

Pour l'obtention du diplôme de Master en Génie mécanique

Option : • Énergétique

• Installations énergétiques et turbomachines

THÈME

**Simulation numérique d'un écoulement
laminaire autour d'un cylindre circulaire
avec des ailettes**

Préparé par : *TAMI Salah Eddine*

Encadré par : *BENSEDIRA Sidali*

SLIMI Riadh

Année universitaire : 2023/2024

REMERCIEMENTS

Merci bon dieu pour la santé, la volonté, le courage et la détermination qui nous ont accompagné tout au long de ces années d'étude et durant la préparation et l'élaboration de ce modeste travail. On voudrai remercier ensuite notre famille pour leurs précieux soutien moral et physique et leurs encouragements pour poursuivre notre mémoire de fin d'études.

Ce mémoire est non seulement le résultat de notre courage, sacrifice, patience et endurance mais aussi une intervention, conscience, d'un grand nombre de personnes. On souhaite ici les en remercier.

On tiens également à remercier très chaleureusement Mr. BENSEDIRA Sid Ali qui nous a permis de bénéficier de son encadrement, ainsi que sa disponibilité et son dévouement pour notre réussite à l'élaboration de ce modeste mémoire il trouve ici notre profonde gratitude et nos sincères remerciements.

On tien à remercier le département de Mécanique, c'est l'une des meilleures expériences qu'on a vécues. On remercie également nos amis et nos enseignants du département de Mécanique spécialement ceux de l'option énergétique.

Au terme de ce parcours, on remercie enfin celles et ceux qui nos sont chers, leurs attentions et encouragements nous ont accompagné tout au long de ces années. On est redevable à nos parents et à notre famille, pour leurs soutien moral et matériel et leur confiance indéfectible dans nos choix.

DEDICACES

*À mes chers parents pour l'éducation et le grand amour dont ils m'ont entouré
depuis ma naissance.*

À mes chères soeurs Amina et Naila.

À toute ma famille.

À tous mes profs qui nous a appris.

À mes chers amis.

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

TAMI SALAH EDDINE

DEDICACES

*C'est avec grand plaisir que je dédie ce modeste travail accompagné d'une
profonde gratitude,*

*A celle qui m'a arrosé de tendresse et d'espoirs, à la source d'amour éternel
incessible, à la mère des sentiments fragiles qui ne cesse et ne m'oubliera
jamais de la faveur de ces prières, ma chère mère.*

*A ma chère soeur qui n'a pas cessé de me conseiller, encourager et soutenir
tout au long de mes études. Que dieu la protège et lui offre la chance et le
bonheur.*

*Loin de vous, votre soutien et votre encouragement m'ont toujours donné de la
force pour préserver et pour prospérer dans la vie.*

A mes amis chacun en son nom.

A mes collègues, de la promotion installation énergétique.

*A mon binôme TAMI Salaheddine, qui a contribué pour la réalisation de ce
modeste travail.*

SLIMI RIADH

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre I : Étude bibliographique et généralités	
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.....	03
I.2.2.1. Masse volumique	03
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.....	04
I.3. Écoulement de fluides.....	05
I.3.1. Différents types des écoulements.....	05
I.3.1.1 Écoulement incompressible.....	05
I.3.1.2 Écoulement compressible.....	05
I.3.1.3 Écoulement stationnaire.....	05
I.3.1.4 Écoulement non stationnaire.....	05
I.3.1.5 Écoulement visqueux.....	05
I.3.1.6 Écoulement non visqueux.....	06
I.3.1.7 Écoulement stable.....	06
I.3.1.8 Écoulement instable.....	06
I.3.2. Les régimes de l'écoulement.....	06
I.3.2.1 Régime laminaire.....	06
I.3.2.2 Régime turbulent.....	06
I.4. Écoulement autour des obstacles.....	08
I.4.1. Écoulements autour d'un cylindre circulaire.....	09
I.4.2. Écoulement de Von Karman.....	10
I.4.3. Classification des écoulements autour un cylindre circulaire fixe.....	11
I.4.4. Caractéristiques de l'écoulement autour d'un cylindre circulaire.....	11
I.4.4.1. Nombres de Reynolds.....	11
I.4.4.2. Coefficient de traînée et de portance.....	12
I.4.4.2.1. Coefficient de traînée (drag coefficient).....	12

I.4.4.2.2. Coefficient de portance (lift coefficient).....	13
I.4.4.3. La couche limite.....	13
I.4.4.4. Profil de vitesse.....	14
I.4.4.5. Point de séparation.....	15
I.4.4.6. Zone de formation tourbillonnaire.....	15
I.4.4.7. Couche de cisaillement.....	15
I.4.4.8. Zone de recirculation.....	15
I.5. Revue des travaux sur les écoulements autour des cylindres.....	16
I.6. Conclusion.....	18

Chapitre II : Résolution numérique

II.1. Introduction.....	20
II.2. Formulation mathématique.....	20
II.2.1 Hypothèses Simplificatrices.....	20
II.2.2. Equations de transport.....	20
II.2.2.1. Equation de conservation de masse (continuité).....	20
II.2.2.2 Equations de quantité de mouvement.....	21
II .3. Résolution numérique.....	21
II.3.1. Méthode des différences finie.....	22
II .3.2 Méthode des éléments finie.....	22
II .3.3 Méthode des volumes finie.....	22
II .4. Le maillage.....	23
II .4.1. Nœuds et éléments.....	23
II .4.2. Géométrie et topologie.....	24
II .4.3. Connectivité.....	25
II .5. Description générale du problème.....	25
II.5.1.Paramètres des ailettes.....	26
II.5.2. Les conditions aux limites.....	26
II.5.3. Étapes de la simulation numérique dans ANSYS CFX.....	27
II.5.3.1. Géométrie.....	27
II.5.3.2. Maillage.....	28
II.5.3.3. Configuration.....	28
II.5.3.4. Solution.....	30
II .6. Conclusion.....	31

Chapitre III : Résultats et Discussions

III.1. Introduction.....	33
III.2. Vérification des résultats.....	33
III.3. Analyse de la portance moyenne et de trainée moyenne avec et sans ailettes $Re=200$...	34
III.3.1. Analyse des résultats pour l'obstacle sans ailettes.....	35
III.3.1.1. La portance moyenne avec $Re=200$	35
III.3.1.2. La trainee moyenne avec $Re=200$	35
III.3.2. Analyse des résultats pour l'obstacle avec ailettes horizontale.....	35
III.3.2.1. Interprétation de graphique de portance moyenne	35
III.3.2.2. Interprétation de graphique de trainée moyenne	36
III.3.3. Analyse des Résultats pour l'obstacle avec ailettes verticale.....	37
III.3.3.1. Interprétation de graphique de portance moyenne	37
III.3.3.2. Interprétation de graphique de trainée moyenne	38
III.3.4. Comparaison de l'impact des ailettes horizontales et vertical sur la portance et la trainée :.....	39
III.3.5. Comportement hydrodynamique d'écoulement autour d'un cylindre avec ailettes horizontales..... ;;	40
A.Portance	40
B.Trainée	41
III.3.6. Comportement hydrodynamique d'écoulement autour d'un cylindre avec ailettes verticales.....	42
A.Portance	42
B.Trainée	43
III.4. Analyse des effets de Ailettes sur les écoulements autour de l'obstacle circulaire : Étude de la vitesse , de la vorticité et des forces de trainée et de portances.....	44
III.4.1. Analyse des effets des Ailettes sur la distribution de la vitesse.....	44
III.4.1.1.Ailettes horizontales.....	44
III.4.1.2.Ailettes verticales.....	47
III.4.2. Analyse des effets des Ailettes sur la distribution de la Vorticité.....	50
III.4.2.1.Ailettes horizontales.....	50
III.4.2.2.Ailettes verticales.....	52

Conclusion générale

Conclusion générale.....	56
Références Bibliographie.....	59

*Listes Des figures et
tableaux et
nomenclature*

Liste des figures

Figure I.1	Deux différents types de fluide.....	3
Figure I.2	Un régime laminaire.....	6
Figure I.3	Un Régime turbulent.....	7
Figure I.4	Écoulement autour un cylindre.....	9
Figure I.5	Phénomène de Von Karman - Sillage et nuages.....	10
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.....	11
Figure I.8	Système des forces aérodynamiques s'exercent sur un cylindre.....	12
Figure I.9	La couche limite.....	14
Figure I.10	Profil de vitesse.....	14
Figure I.11	Écoulement autour un obstacle circulaire.....	16
Figure II.1	Schéma du maillage.....	23
Figure II.2	illustration de la notion de maillage.....	24
Figure II.3	géométrie de domaine.....	24
Figure II.4	les différentes structures de maillage par le logicielle de simulation.....	25
Figure II.5	conditions aux limites de domaine.....	27
Figure II.6	géométrie de modèle.....	27
Figure II.7	Maillage du modèle.....	28
Figure II.8	Caractéristiques du fluide.....	29
Figure II.9	Les conditions initiale de l'écoulement.....	29
Figure II.10	Les conditions aux parois et de sortie.....	30
Figure II.11	Les expressions utilisés.....	30
Figure II.12	L'exécution de la solution de logiciel ANSYS.....	31
Figure III.1	Graphe de moyenne de portance avec ailette horizontale.....	35
Figure III.2	Graphe de moyenne de trainée avec ailette horizontale.....	36
Figure III.3	Graphe de moyenne de portance avec ailette verticale.....	37
Figure III.4	Graphe de moyenne de trainée avec ailette verticale.....	38
Figure III.5	Graphe des portances Horizontales.....	40
Figure III.6	Graphe des Trainée Horizontales.....	41
Figure III.7	Graphe des portances Verticales.....	42
Figure III.8	Graphe des Trainée Verticales.....	43

Figure III.9	Contours de vitesse avec ailette horizontales pour $G/D=0.1$ $Re= 200$	44
Figure III.10	Contours de vitesse avec ailette horizontales pour $G/D=0.025$ $Re= 200$	46
Figure III.11	Contours de vitesse avec ailette verticale $G/D=0.1$ $Re= 200$	47
Figure III.12	Contours de vitesse avec ailette verticale $G/D=0.025$ $Re= 200$	48
Figure III.13	Contours de vorticité avec ailette horizontale $G/D=0.1$ $Re= 200$	50
Figure III.14	Contours de vorticité avec ailette horizontale $G/D=0.025$ $Re= 200$	51
Figure III.15	Contours de vorticité avec ailettes verticales $G/D=0.1$ $Re= 200$	52
Figure III.16	Contours de vorticité avec ailettes verticales $G/D=0.025$ $Re= 200$	53

Liste des tableaux

Tableau I.1	Caractéristiques des régimes de l'écoulement	7
Tableau II.1	Tableau des configurations des ailettes	26
Tableau III.1	Independence de maillage à $Re=100$	33
Tableau III.2	Moyenne de portance C_L et de trainee C_D pour un obstacle circulaire avec ailettes horizontales en fonction des rapports G/D et L/D	34
Tableau III. 3	Moyenne de portance C_L et de trainee C_D pour un obstacle circulaire avec ailettes verticale en fonction des rapports G/D et L/D	34

Tableaux de nomenclature

Symbole	Définition	Unité
m	masse de fluide	[kg]
ρ	masse volumique	[kg/m ³]
t	temps	[s]
d	la densité	-
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	-

C_D	coefficient de traînée	-
C_L	coefficient de portance	-
F_D	Force de trainé	[N]
F_L	Force de portance	[N]
C_p	le coefficient de pression	[J/Kg.K]
$\frac{\rho}{2} U_\infty^2$	Pression dynamique d'écoulement libre	
A	Section de référence	[m ²]

Nombres adimensionnels

Nombre de Reynolds	R_e
Coefficient de traînée	C_D
Coefficient de portance	C_L

Abréviation

MEF	Méthode des éléments finie
MDF	Méthode des différences finie
MVF	Méthode des volumes finie
CFD	Computational Fluid Dynamics
2D	Bidimensionnel

Introduction Générale

Introduction Générale :

Introduction générale

L'analyse des écoulements de fluides autour d'obstacles cylindriques constitue un enjeu majeur dans de nombreux secteurs industriels tels que le génie civil, l'aéronautique ou le nucléaire. En effet, la compréhension fine des phénomènes hydrodynamiques et tourbillonnaires autour de ces géométries simples mais fondamentales est indispensable pour assurer la conception sûre et performante des structures exposées aux écoulements.

Malgré leur apparente simplicité, ces écoulements cylindriques se révèlent d'une grande richesse en raison des différents régimes d'écoulements instationnaires et turbulents qui s'y développent en fonction des nombres de Reynolds. Le phénomène des lâchers tourbillonnaires alternés est particulièrement critique puisqu'il engendre des forces fluctuantes et des vibrations qu'il est primordial de pouvoir prédire et contrôler.

Face à la difficulté de décrire analytiquement la physique complexe de ces écoulements, la simulation numérique par mécanique des fluides numérique (CFD) s'est imposée comme l'outil privilégié pour en permettre l'étude approfondie. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce présent mémoire qui vise à analyser au moyen du logiciel ANSYS les caractéristiques d'un écoulement laminaire 2D autour d'un cylindre circulaire.

ANSYS constitue en effet un environnement numérique intégré particulièrement performant et adapté à la modélisation, au maillage et à la simulation d'écoulements fluides complexes. Les puissantes fonctionnalités de visualisation des différents champs fluides qu'offre ANSYS seront notamment un atout clé pour mener une analyse physique approfondie des résultats obtenus.

Ce mémoire s'articulera autour de trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre consistera en une recherche bibliographique complète sur les écoulements cylindriques à partir de la documentation théorique effectuées sur ce sujet.
- Le second chapitre détaillera la méthode numérique par élément finis utilisée sous ANSYS, avec la modélisation géométrique, le maillage et les schémas de calcul employés.
- Le troisième et dernier chapitre sera entièrement dédié à la présentation, l'analyse approfondie et la valorisation des résultats obtenus par simulations numériques de l'écoulement laminaire 2D autour du cylindre circulaire sous ANSYS.

Chapitre I

Généralités et étude bibliographique

I.1. Introduction

Les écoulements de fluides autour de cylindres sont un problème important en hydromécanique. Ils ont des applications dans plusieurs domaines.

Ce chapitre fait un résumé des différents travaux réalisés sur ce sujet. Il présente une revue de la littérature sur les écoulements autour de cylindres. Ceci nous permettra de mieux comprendre les concepts qui seront abordés dans les prochains chapitres.

I.2. Généralités sur la mécanique des fluides

1.2.1 Notion de fluide

Le fluide est un milieu matériel qui peut se déformer sous l'effet de la pression, ce qui le fait s'écouler et prendre la forme du récipient dans lequel il est placé. Contrairement aux solides, qui ne s'écoulent pas et ne se déforment pas facilement, les liquides conservent la cohésion de leurs molécules même sous une forte déformation. En revanche, les solides sont susceptibles de se casser lorsque la déformation augmente sous l'effet de la pression. En fin de compte, on peut définir le liquide comme un corps qui prend la forme qui lui est présentée, ce qui le distingue des solides qui conservent leur forme d'origine.



(a)



(b)

Figure I.1 : Deux différents types de fluide a) fluide liquide b) fluide gazeux

1.2.2 Propriétés des fluides

Tous les fluides présentent des propriétés permettant de décrire leurs conditions physiques à un moment donné. Parmi ces propriétés, on peut citer :

1.2.2.1. Masse volumique (ρ) :

La masse volumique est une mesure de la quantité de masse par unité de volume. Elle s'exprime en kg/m^3 .

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

avec :

m : Masse du fluide (k_g)

v : Volume du fluide (m^3)

I.2.2.2. Densité :

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

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

I.2.2.3. Viscosité (μ) :

La viscosité est une mesure de la résistance d'un fluide à l'écoulement. Elle s'exprime en Pa.S (pascal-seconde). Un fluide à haute viscosité s'écoule plus lentement qu'un fluide à faible viscosité.

I.2.2.3.1. Viscosité dynamique :

La viscosité dynamique, représentée par le symbole μ , exprime la résistance d'un fluide à l'écoulement sous l'effet d'une force de cisaillement. Elle se calcule en divisant la force de cisaillement F appliquée sur une surface A par le taux de variation de gradient de la vitesse du fluide $\frac{du}{dy}$.

$$\mu = \frac{F}{A \frac{du}{dy}} \quad (\text{I.3})$$

I.2.2.3.2. Viscosité cinématique :

La viscosité cinématique du fluide est le rapport de la viscosité dynamique du fluide μ à la densité de fluide ρ à la même température, son unité est m^2/s .

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

- Certains fluides présentent une certaine élasticité, ce qui signifie qu'ils peuvent être comprimés ou étirés sous l'effet de forces extérieures et retrouver leur forme initiale une fois que ces forces sont supprimées.
- La tension superficielle est la force exercée à leur surface, due à l'attraction entre les molécules. Elle mesure la résistance à l'extension de la surface libre. Cette caractéristique est responsable de phénomènes comme la formation de gouttelettes et la capillarité.

I.3. Écoulement de fluides

Le fluide s'écoule en douceur lorsque chaque particule suit sa propre trajectoire sans interférer ou entrer en contact avec les trajectoires des autres particules.

I.3.1. Différents types des écoulements :

L'écoulement des fluides, qu'il s'agisse de liquides ou de gaz, est un phénomène complexe et fascinant qui régit leur mouvement dans diverses conditions. Pour bien comprendre les subtilités de ce domaine, il est essentiel de distinguer les différents types d'écoulements des fluides, chacun étant caractérisé par des propriétés et des comportements distincts. Explorons ensemble de manière détaillée ces divers types d'écoulements.

I.3.1.1 Écoulement incompressible :

La densité du fluide reste constante tout au long de l'écoulement. C'est le cas de la plupart des écoulements liquides et des écoulements gazeux à basses vitesses.

Exemple : Ecoulement de l'eau dans un tuyau, écoulement de l'air à température ambiante.

I.3.1.2 Écoulement compressible :

La densité du fluide varie en fonction de la pression et de la température. C'est le cas des écoulements gazeux à des vitesses élevées (supersoniques ou hypersoniques).

Exemple : Ecoulement de l'air dans un moteur à réaction, écoulement de gaz dans une turbine.

I.3.1.3 Écoulement stationnaire :

La vitesse et les autres propriétés du fluide ne changent pas avec le temps en un point donné. Le régime d'écoulement est stable et permanent. Exemple : Ecoulement de l'eau dans un tuyau de section constante.

I.3.1.4 Écoulement non stationnaire :

La vitesse et les autres propriétés du fluide changent avec le temps en un point donné. Le régime d'écoulement est variable et dynamique. Exemple: Ecoulement de l'eau à la sortie d'un robinet ouvert.

I.3.1.5 Écoulement visqueux :

Les fluides visqueux ont une résistance à l'écoulement. Les couches fluides adjacentes glissent les unes sur les autres avec une certaine friction. Ce type d'écoulement est généralement rencontré dans les liquides et les gaz à basse vitesse. Exemple : Écoulement de l'huile dans un tuyau, écoulement du miel qui coule.

I.3.1.6 Écoulement non visqueux :

Les fluides non visqueux sont idéalisés et n'ont aucune résistance à l'écoulement. Les couches fluides adjacentes glissent les unes sur les autres sans aucune friction. Ce type d'écoulement

est théorique et n'existe pas en réalité, mais il est utile pour simplifier les modèles mathématiques. Exemple: Écoulement de l'eau dans un tuyau parfaitement lisse, écoulement de l'air à très basse vitesse.

I.3.1.7 Écoulement stable :

Le mouvement du fluide est ordonné et prévisible. Les lignes de courant restent parallèles et il n'y a pas de fluctuations importantes de vitesse ou de pression.

Exemple : Ecoulement laminaire de l'eau dans un tuyau étroit à faible débit.

I.3.1.8 Écoulement instable :

Le mouvement du fluide est chaotique et imprévisible. Des tourbillons et des fluctuations de vitesse et de pression apparaissent. Exemple : Ecoulement turbulent de l'eau dans une rivière en crue.

I.3.2. Les régimes de l'écoulement :

I.3.2.1 Régime laminaire :

Lorsqu'on observe le cours d'une rivière profonde et sans obstacles, on remarque que le débit est rapide et régulier. L'eau s'écoule en ligne droite ou presque, phénomène que l'on appelle l'écoulement laminaire. En dynamique des fluides, l'écoulement laminaire se produit lorsque le fluide s'écoule en couches parallèles et continues. Une caractéristique de l'écoulement laminaire est que la vitesse du fluide reste constante à n'importe quel point du fluide. Les fluides qui s'écoulent de manière laminaire ont généralement un écoulement uniforme.

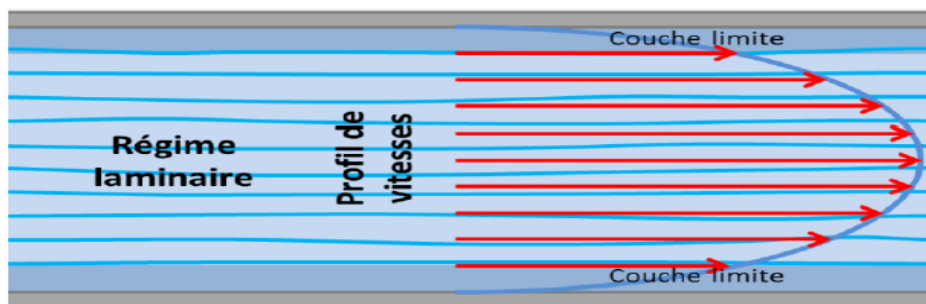


Figure I.2 : Un régime laminaire .

I.3.2.2 Régime turbulent :

En mécanique des fluides, le régime turbulent est un type de modèle d'écoulement des fluides caractérisé par le mouvement irrégulier et chaotique des particules liquides. Dans ce régime, des tourbillons et des fluctuations importantes de vitesse se produisent, entraînant un désordre et un chevauchement entre les couches de liquide. Le mouvement dans le régime turbulent est désordonné et imprévisible, avec des tourbillons appelés turbulences. Lorsque le fluide s'écoule de manière turbulente, sa vitesse et ses directions changent continuellement dans le temps et à différents points à l'intérieur du fluide. Les écoulements turbulents se produisent

lorsque la vitesse d'écoulement est relativement élevée, ou en présence de facteurs perturbateurs tels que des obstacles sur le trajet de l'écoulement ou des variations de pression du fluide. Les vents forts, les courants montagneux et les écoulements autour de grands objets tels que les navires et les avions sont des exemples d'écoulements turbulents.

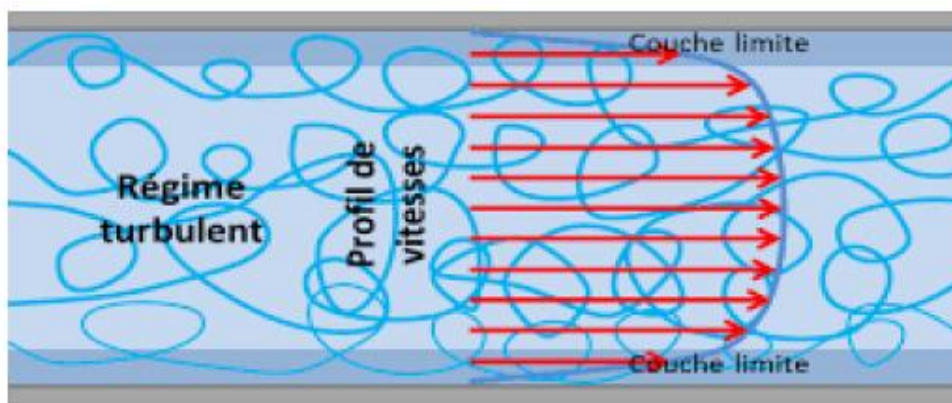


Figure I.3 : Un Régime turbulent .

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

Tableau I.1 : Caractéristiques des régimes de l'écoulement.

Caractéristiques	Régime laminaire	Régime turbulent
Mouvement des particules	Se déplacent en couches parallèles et ordonnées	Mouvement irrégulier, chaotique avec des tourbillons
Forme de l'écoulement	Linéaire ou flux rectiligne	Non linéaire, irrégulier avec des tourbillons
Interférence entre les couches	Aucune interférence entre les couches	Interférence et mélange entre les couches avec des variations de vitesse
Vitesse du fluide	Constants à chaque point dans le fluide	Variable dans le temps et à différents points dans le fluide

Energie de pression	Faible énergie de pression, suit la loi Newtonienne des fluides	Haute énergie de pression variable et significative
Caractère de l'écoulement	Écoulement calme, stable et moins énergivore	Écoulement turbulent, agité et plus énergivore

I.4. Écoulement autour des obstacles :

L'écoulement autour des obstacles est un phénomène très important dans de nombreux domaines de l'ingénierie, car il a un impact direct sur la conception mécanique et thermique de systèmes tels que les avions, les automobiles, les bâtiments, les composants électroniques, les profils d'ailes d'avion, les échangeurs de chaleur, les turbines industrielles, etc.

L'étude de l'écoulement autour des obstacles, en particulier les phénomènes hydrodynamiques et aérodynamiques qui se produisent dans le sillage de l'obstacle, reste un sujet d'intérêt majeur dans de nombreux domaines.

Cette étude permet de mieux comprendre les forces de traînée et de portance exercées sur l'obstacle, ainsi que les zones de recirculation et de réattachement du fluide en aval de l'obstacle, qui sont cruciales pour des applications telles que le refroidissement électronique ou l'étude de la canopée urbaine.

Les recherches actuelles se concentrent notamment sur l'influence de la forme de l'obstacle, en particulier l'effet de l'arrondissement des arêtes, sur ces phénomènes complexes en aval de l'obstacle.

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

- **Les obstacles à courbure progressive :**

Le point de décollement de la couche limite est susceptible de se déplacer. Le modèle géométrique est la sphère ou le cylindre.

- **Les obstacles à arête vive :**

Le point de décollement de la couche limite est fixe. Le modèle géométrique est la plaque plane inclinée par rapport à la direction de l'écoulement.

- **Les obstacles profilés :**

Il n'y a pas de décollement de la couche limite. Le modèle géométrique est la plaque plane parallèle à la direction de l'écoulement.[1]

I.4.1. Écoulements autour d'un cylindre circulaire :

L'écoulement d'un fluide autour d'un cylindre circulaire est un problème fondamental en mécanique des fluides, où les équations de Navier-Stokes, qui régissent le comportement des fluides, trouvent une solution exacte. Cette étude de cas présente un intérêt pratique majeur car elle se retrouve fréquemment dans des domaines tels que l'aérodynamique et l'hydrodynamique. Le profil de l'écoulement, caractérisé par la forme des filets fluides, ainsi que le coefficient de traînée (C_D) et le coefficient de portance (C_L), représentent respectivement la résistance à l'avancement du cylindre et la force de frottement le long de sa surface, dépendent tous du nombre de Reynolds. Ce nombre adimensionnel est défini en fonction du diamètre du cylindre (D), de la viscosité dynamique du fluide (μ), de sa masse volumique (ρ) et de la vitesse d'écoulement.

Lorsque le fluide rencontre le cylindre, il est perturbé et se détache de sa surface en créant des tourbillons alternés de sens. Ce phénomène, appelé décollement tourbillonnaire, modifie la distribution de la pression autour du cylindre.

L'écoulement autour d'un cylindre illustre un cas classique en mécanique des fluides, avec des implications pratiques importantes. La compréhension de ce phénomène permet de mieux appréhender les interactions entre les fluides et les structures immergées, ce qui est crucial dans divers domaines d'ingénierie.

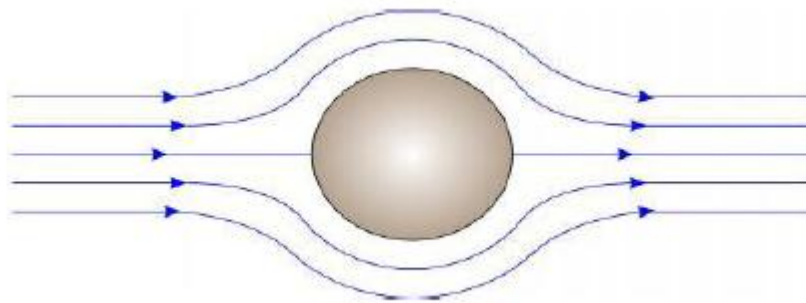


Figure I.4 : Écoulement autour un cylindre [2]

I.4.2. Écoulement de Von Karman :

L'écoulement de Von Kármán est un type de phénomène de turbulence qui se produit autour d'un obstacle dans le trajet d'un écoulement fluide, tel qu'un cylindre, lorsque le nombre de Reynolds (Re) dépasse une valeur critique. Ce type d'écoulement se caractérise par la formation d'alternances régulières de tourbillons derrière l'obstacle, connues sous le nom d'allées tourbillonnaires de von Kármán.

À des valeurs basses de Re , l'écoulement reste généralement laminaire et ordonné, sans formation de tourbillons significatifs. Cependant, à mesure que Re augmente, des tourbillons stables commencent à se former derrière l'obstacle. Au-delà d'une valeur critique de Re , les tourbillons se détachent périodiquement de part et d'autre de l'obstacle, formant les allées tourbillonnaires alternées.

Ce type d'écoulement peut entraîner des effets dynamiques importants sur l'obstacle, notamment des fluctuations de pression et des forces aérodynamiques variables. Les vibrations induites par ces tourbillons peuvent être proches de la fréquence naturelle de l'obstacle, ce qui peut poser des défis en termes de conception et d'ingénierie dans divers domaines, tels que l'aéronautique, l'ingénierie civile et l'architecture.



Figure I.5 : Phénomène de Von Karman - Sillage et nuages .

I.4.3. Classification des écoulements autour un cylindre circulaire fixe :

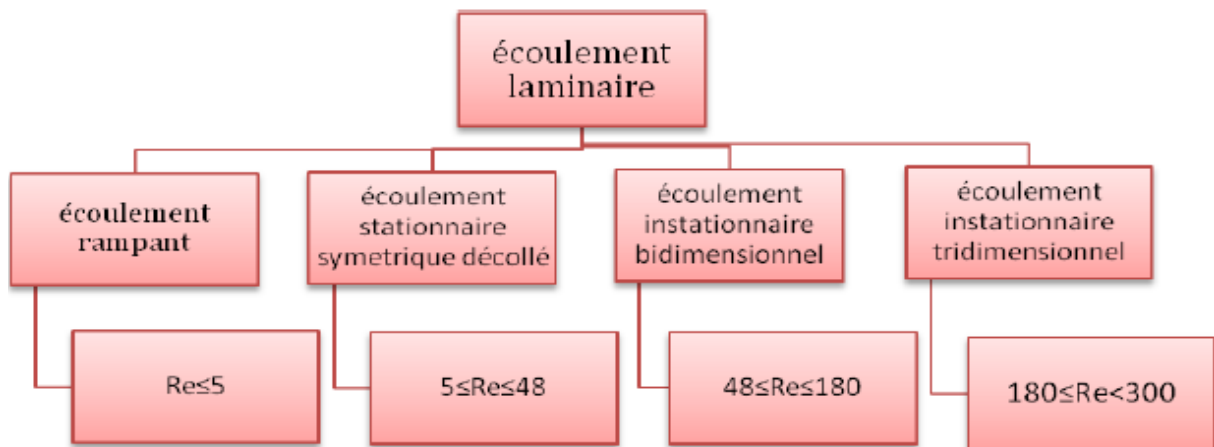


Figure I.6 : La variation de nombre de Reynolds pour le cas 2d et 3d et l'écoulement laminaire. [3]

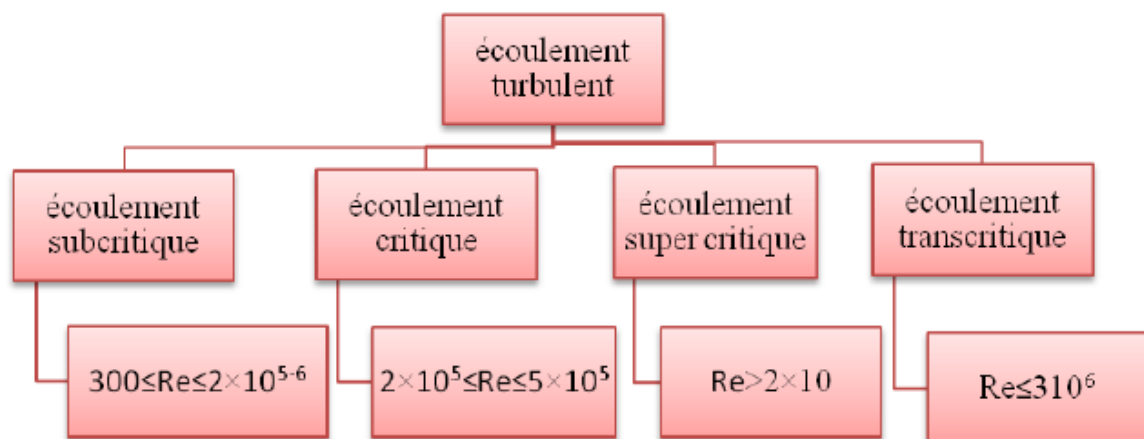


Figure I.7 : La variation de nombre de Reynolds pour l'écoulement turbulent. [3]

I.4.4. Caractéristiques de l'écoulement autour d'un cylindre circulaire :

I.4.4.1. Nombres de Reynolds :

Le nombre de Reynolds (Re) est un paramètre sans dimension essentiel pour caractériser l'écoulement autour d'un cylindre circulaire. Il est défini comme le rapport des forces d'inertie aux forces visqueuses et joue un rôle majeur dans la transition entre les régimes d'écoulement laminaires et turbulents. Le calcul du nombre de Reynolds permet d'évaluer la stabilité de l'écoulement et l'apparition éventuelle de phénomènes dynamiques tels que la formation de tourbillons et la traînée. On le définit par :

$$R_e = \frac{U D}{\nu} \quad (I.5)$$

I.4.4.2. Coefficient de trainée et de portance :

Il est exact de dire que lorsque qu'un objet se déplace dans un fluide ou qu'un fluide s'écoule autour d'un objet solide, cela entraîne l'apparition de forces aérodynamiques ou hydrodynamiques sur l'objet. Ces forces peuvent être décomposées en deux composantes principales : la portance et la trainée.

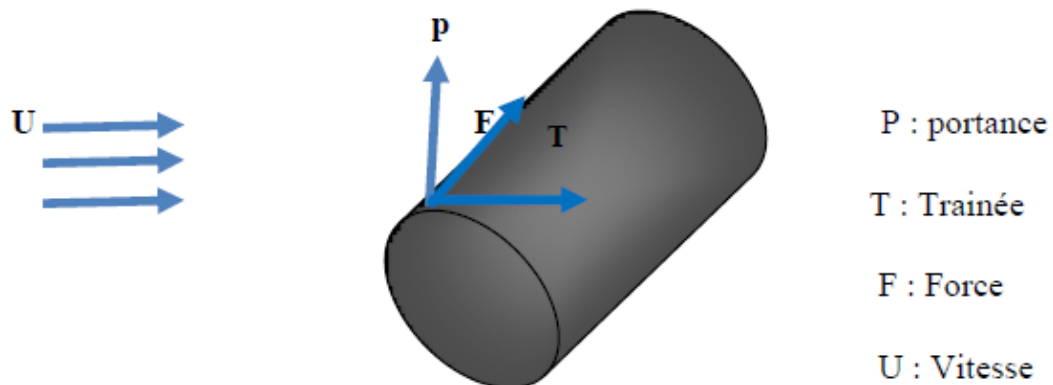


Figure I.8 : système des forces hydrodynamiques s'exercent sur un cylindre. [3]

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

I.4.4.2.1. Coefficient de trainée (drag coefficient) :

La force de trainée est une force qui s'oppose au déplacement d'un corps dans un fluide. C'est une force de frottement exercée par le fluide sur le corps en mouvement dans la direction opposée au mouvement.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho U_\infty^2 A}{2}} \quad (I.6)$$

I.4.4.2.2. Coefficient de portance (lift coefficient) :

C'est un nombre adimensionnel, une composante des forces hydrodynamiques 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 [3] :

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 A} \quad (I.7)$$

I.4.4.3. La couche limite :

La couche limite est une zone de transition entre une région de fluide au repos et un écoulement extérieur à grande vitesse. Elle se forme lorsqu'un fluide s'écoule le long d'une surface solide, en raison des effets de la viscosité du fluide, la couche limite a une épaisseur qui varie en fonction de la vitesse du fluide et de l'état de la surface. Elle peut être de type laminaire ou turbulente, ce qui affecte grandement les forces de frottement et la traînée.

La compréhension et la modélisation des équations de la couche limite, souvent simplifiées à partir des équations de Navier-Stokes, représentent des avancées importantes en mécanique des fluides. Cela permet de mieux prédire et contrôler les phénomènes liés à la couche limite, avec de nombreuses applications en aérodynamique, hydrodynamique, météorologie, etc.

La couche limite est un concept fondamental en mécanique des fluides, avec des implications pratiques dans de nombreux domaines de l'ingénierie.

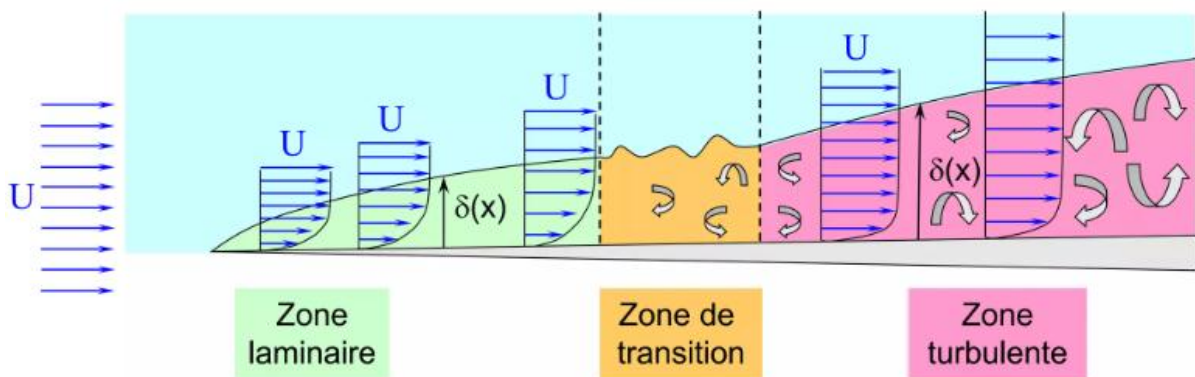


Figure I.9 : la couche limite [4]

I.4.4.4. Profil de vitesse :

Le profil de vitesse représente la distribution des vitesses d'écoulement d'un fluide le long d'une section transversale. Sa forme dépend du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), de la géométrie, des propriétés du fluide et des conditions aux limites.

Les forces entre les molécules de fluide et la paroi sont essentielles pour comprendre comment le profil de vitesse d'un écoulement fluide se comporte. Elles créent une couche limite près de la paroi où le frottement est important, ralentissant les molécules de fluide. Cela modifie la répartition des vitesses dans l'écoulement.

En écoulement laminaire, le profil de vitesse est parabolique, avec une vitesse maximale au centre et nulle près des parois à cause de cette couche limite. En régime turbulent, les forces d'interaction rendent le profil de vitesse plus complexe en raison des tourbillons et des variations locales de vitesse et de pression. Comprendre ces forces est crucial pour prédire le comportement des fluides dans diverses situations.

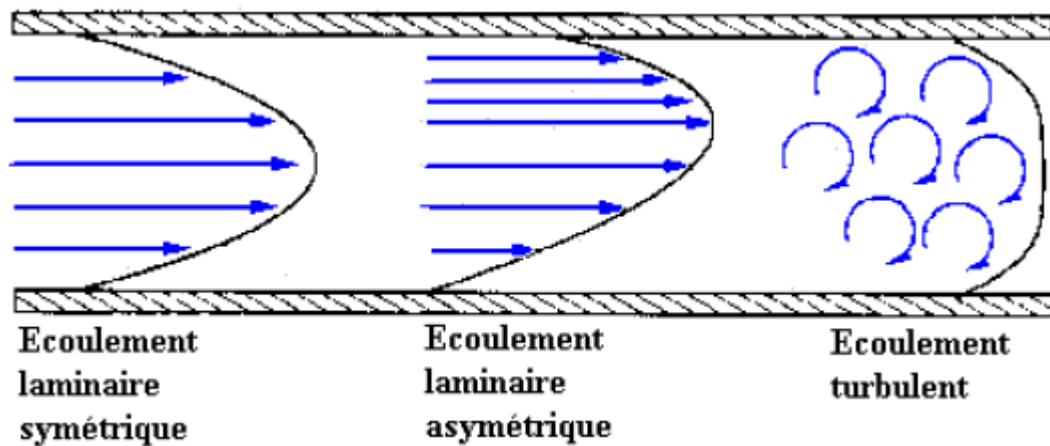


Figure I.10. : Profil de vitesse [5]

I.4.4.5. Point de séparation :

Le point de séparation est le point où la couche limite se détache de la paroi, marquant l'annulation du frottement. Contrairement à une géométrie comme celle d'un cylindre carré, le décollement sur un cylindre circulaire n'est pas dû à une singularité géométrique mais au développement de la couche limite en présence d'un gradient de pression adverse. Lorsque ce gradient est suffisamment important, la vitesse des particules fluides diminue jusqu'à devenir nulle puis négative, déclenchant ainsi le processus de décollement de la couche limite.

I.4.4.6. Zone de formation tourbillonnaire :

Le phénomène de détachement tourbillonnaire autour d'un cylindre circulaire est principalement dû à des effets visqueux et constitue une caractéristique récurrente pour les écoulements avec un nombre de Reynolds supérieur à 49. Dans ces conditions, la couche limite subit un cisaillement sur la surface du cylindre en raison d'un gradient de pression défavorable. Lorsque l'énergie cinétique du fluide dans la couche limite n'est pas suffisante pour surmonter la pression accrue en aval du cylindre, le fluide se détache, créant ainsi un tourbillon de recirculation. Ce tourbillon, une fois formé, se détache de la couche limite et se connecte dans le sillage, modifiant l'écoulement en aval pour former une allée tourbillonnaire distincte.

I.4.4.7. Couche de cisaillement :

Les couches de cisaillement sont des zones au sein d'un fluide où il existe une forte variation de la vitesse d'écoulement. Cette différence de vitesse entre les particules fluides rapides et lentes engendre d'importantes contraintes de cisaillement. Dans le cas de l'écoulement autour d'un cylindre, deux couches de cisaillement libres se forment de part et d'autre de l'obstacle. Ces couches séparent la zone d'écoulement libre à vitesse élevée de la zone pratiquement immobile dans le sillage, située derrière le cylindre.

I.4.4.8. Zone de recirculation :

La zone de recirculation dans le champ proche du sillage joue un rôle crucial dans la prédiction des forces sur le cylindre et la fréquence des tourbillons libérés. Cette région est influencée par des paramètres externes tels que le nombre de Reynolds, le niveau de turbulence, les dimensions du cylindre et ses conditions aux extrémités.

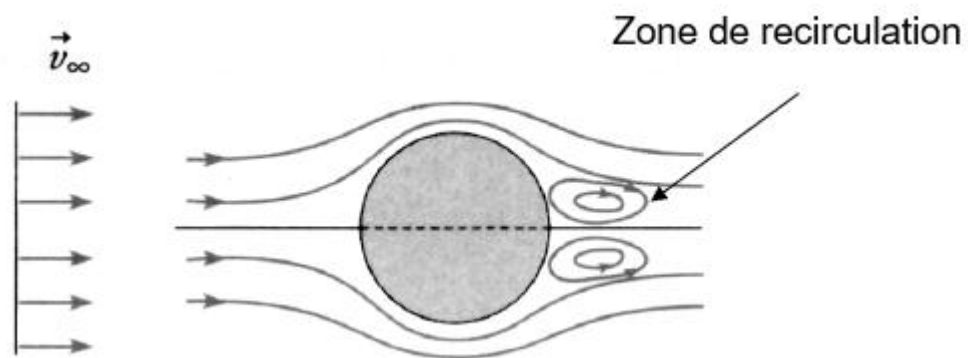


Figure I.11. : écoulement autour un obstacle circulaire $Re=20$ [6]

I.5. 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 résument comme suit :

Guojon-Durand et al : Ils ont étudié l'écoulement d'un fluide autour d'un cylindre soumis à un mouvement de rotation oscillante autour de son axe. Ils ont confirmé que, pour certaines valeurs de la fréquence d'oscillation, il y a une réduction de l'instabilité hydrodynamique. Par la suite, ils ont modifié l'écoulement moyen en fonction de certains paramètres mécaniques de la structure du corps.[7]

D.Calluad et al.: Ils ont mené une étude expérimentale et numérique de l'écoulement laminaire d'un fluide autour d'un obstacle de section carrée placé sur une plaque plane. La mesure de l'écoulement a été réalisée par PIV (Particle Image Velocimetry). La comparaison des deux méthodes a montré des résultats concordants en termes de topologie de l'écoulement, des lignes de séparation et de la formation des tourbillons. Toutefois, l'expérience a révélé une formation de tourbillons verticaux légèrement plus importante au-dessus du cube par rapport aux résultats numériques.[8]

Madani et abidat : Ils ont proposé un algorithme pour résoudre les équations de Navier-Stokes, utilisant 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 termes de temps de calcul et de précision de la méthode proposée ont été démontrés..[9]

Bensedira et al : Ils ont étudié le comportement aérodynamique de l'écoulement autour d'un obstacle cylindrique proche d'une paroi. L'écoulement bidimensionnel 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'équations régissant l'écoulement. L'analyse a été réalisée pour différents nombres de Reynolds ($Re = 10, 20, \dots, 700$) et différentes distances entre le cylindre et la paroi (10d, 15d et 20d). [10]

P.F. Zhang et al.(2006) 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 traînée moyenne et le coefficient de fluctuation de portance du cylindre peuvent être réduits par une tige ascendante.[11]

P.Ribot et Y. Blanchet (2007) ont réalisé une étude expérimentale et numérique de l'écoulement de fluide autour d'un cylindre avec variation de fluide (air, 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. [12]

Xu Liu et al (2019) ont effectué une simulation numérique de l'écoulement autour du cylindre (ou particule) a été réalisée ici en utilisant COMSOL Multiphysics comme outil de recherche. Ce article discute principalement de l'influence des paramètres physiques (module d'élasticité et coefficient de Poisson) et de l'oscillation latérale sur l'écoulement autour des cercles (cylindre ou particule). Les paramètres de propriété physique ont une plus grande influence sur la déformation, le coefficient de portance et le coefficient de traînée de l'objet, et cela n'affecte fondamentalement pas la fréquence de décollement des vortex. Après avoir analysé l'écoulement autour de la particule oscillante, quatre types de modes de séparation des vortex (modes AI, AII, S, S-S) sont définis. De plus, les coefficients de portance et de traînée pour différents modes sont discutés. Le phénomène de "verrouillage de fréquence" se produit dans l'écoulement autour de la particule oscillante. Les résultats de la simulation prouvent que la fréquence de séparation des vortex est liée à la fréquence d'oscillation. [13]

A.Sohankar et al (2020) ont effectué une étude sur les écoulements de cisaillement linéaires, les forces et le transfert de chaleur autour de cylindres carrés uniques et en tandem sont étudiés numériquement à différents nombres de Reynolds et de Prandtl. Les écoulements sont laminaires et bidimensionnels. Les effets du taux de cisaillement, du nombre de Reynolds, et de l'espacement entre les cylindres sont analysés sur divers paramètres aérodynamiques et de transfert de chaleur. Pour un cylindre unique, la force de portance moyenne varie selon le nombre de Reynolds. Pour les cylindres en tandem, deux solutions liées à l'hystérésis apparaissent pour certaines conditions, affectant le transfert de chaleur et les forces. Le cisaillement d'entrée influence davantage le cylindre en aval que celui en amont. [14]

J. M. Bergada et al (2020) Cette étude examine l'écoulement autour d'un cylindre carré 2D avec une plaque placée devant, en utilisant la méthode de Boltzmann sur réseau et le code open source Nektar++. Trois paramètres de la plaque (rapport de vitesse, distance à la plaque, épaisseur de la plaque) sont analysés pour leur impact sur l'écoulement. Les interactions entre ces paramètres sont également étudiées, notamment leurs effets sur les bifurcations de Hopf et de Neimark–Sacker. Lorsque le rapport de vitesse dépasse un certain seuil, les instabilités de Kelvin–Helmholtz dominant le décollement des vortex, augmentant ainsi le coefficient de traînée et la fréquence de décollement. La méthode POD, utilisée pour prédire le comportement

de l'écoulement, s'avère fiable et permet de réduire les ressources computationnelles nécessaires. [15]

Zakaria Rahmani et al (2019) ont effectué un travail pour étudier le comportement d'un écoulement turbulent incompressible autour d'obstacles cylindriques et d'expliquer les phénomènes physiques qui apparaissent dans certaines configurations. L'étude de l'écoulement par l'approche RANS en utilisant le modèle de turbulence $k-\omega$ -SST, est réalisée à l'aide du code de calcul Code_Saturne pour résoudre le système d'équations régissant l'écoulement. Après l'étude du cas d'un seul cylindre comme un cas de validation à un nombre de Reynolds de 3900, la deuxième partie concerne la configuration de quatre cylindres en arrangement carré avec un espacement entre le centre des cylindres $P/D=1.5$ et un nombre de Reynolds égale à 3000. [16]

I.6. Conclusion

Ce chapitre a présenté les principes fondamentaux de la mécanique des fluides. Il débute par une introduction générale, puis examine les différents types d'écoulements de fluides, avant de se concentrer sur l'écoulement des fluides autour des obstacles. Enfin, il passe en revue les travaux précédents sur les écoulements autour des cylindres. Dans le chapitre suivant, nous allons voir une formulation mathématique et une présentation de logicielle de calcul utilisé pour résoudre notre problème.

Chapitre II
Résolution numérique

II.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la formulation mathématique rigoureuse qui régit la dynamique des fluides ainsi qu'à la description détaillée des techniques numériques employées pour résoudre ces équations à l'aide du logiciel ANSYS CFX. Une compréhension approfondie de ces outils est essentielle pour garantir l'exactitude et la fiabilité des simulations qui seront réalisées.

II.2. Formulation mathématique

Les équations de Navier-Stokes sont cruciales dans la modélisation mathématique des écoulements de fluides. Fondées sur les lois de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et d'énergie, elles permettent de décrire le mouvement des fluides incompressibles à densité constante. Cependant, en raison de leur caractère non linéaire, ces équations sont généralement résolues numériquement, bien qu'elles puissent être simplifiées pour permettre des solutions analytiques dans certains cas.

La résolution numérique rigoureuse des équations de Navier-Stokes constitue donc un enjeu majeur en mécanique des fluides numérique. Elle permet de prédire et d'analyser les caractéristiques d'écoulements variés avec une grande précision, ouvrant la voie à de nombreuses applications industrielles et scientifiques.

II.2.1 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 :

- L'écoulement est instationnaire et le fluide est incompressible.
- L'écoulement est bidimensionnel.
- Le fluide est visqueux et newtonien.
- Le profil de vitesse à l'entrée du canal est constant.
- Le transfert thermique par tous les modes est négligeable.

II.2.2. Equations de transport

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

II.2.2.1. 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 [3]:

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

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

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{II.2})$$

II.2.2.2 Equations de quantité de mouvement

Ils s'appellent aussi les équations de Navier Stokes et ils traduisent la loi fondamentale de la dynamique à un fluide newtonien. Ils s'écrivent selon la direction X_i ($i=1, 2$) comme suit [3]:

$$\underbrace{\frac{\partial u_i}{\partial t}} + \underbrace{u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}} = - \underbrace{\frac{\partial p}{\partial x_i}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j})} \quad (\text{II.3})$$

D'où les termes liés représentent :

$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$: la force d'inertie ; $-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j})$: la force appliquée

$\frac{\partial u_i}{\partial t}$: 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 :

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

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

II .3. Résolution numérique

La résolution numérique joue un rôle central en mécanique des fluides pour traiter des problèmes mathématiques complexes qui ne peuvent être résolus analytiquement. Cette méthode implique la discrétisation de l'espace et du temps, transformant les équations différentielles en un ensemble d'équations algébriques résolues par des algorithmes informatiques. C'est un outil indispensable pour étudier les écoulements fluides, offrant une analyse précise et efficace de divers phénomènes. On distingue trois approches principales sont utilisées pour discrétiser un problème continu : la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis.

II.3.1. Méthode des différences finie

La méthode des différences finies est une approche numérique pour résoudre des équations différentielles, comme les équations de Navier-Stokes en mécanique des fluides. Elle consiste à discrétiser les dérivées spatiales et temporelles en approximations finies basées sur des différences entre les valeurs de la fonction à des points voisins dans l'espace et dans le temps. Cette méthode permet de transformer les équations différentielles en un système d'équations algébriques, qui peuvent être résolues numériquement.

II .3.2 Méthode des éléments finie

La méthode des éléments finis ou est une technique numérique majeure pour résoudre les équations aux dérivées partielles complexes, notamment en mécanique des fluides. Son principe est de subdiviser le domaine d'étude en petits éléments finis reliés par des nœuds. Sur chaque élément, les inconnues sont approchées par des fonctions d'interpolation définies aux nœuds. Cela permet de transformer les équations continues en un système algébrique à résoudre.

Les principaux avantages sont sa flexibilité pour traiter des géométries complexes avec un maillage adapté, et sa précision accrue en raffinant localement le maillage. Cependant, sa mise en œuvre numérique est plus complexe, nécessitant un choix judicieux des fonctions d'interpolation et une gestion rigoureuse des non-linéarités.

II .3.3 Méthode des volumes finie

La méthode des volumes finis est une technique numérique largement utilisée dans le domaine de la mécanique des fluides pour la résolution des équations de conservation, telles que les équations de Navier-Stokes.

Cette méthode repose sur la division de la région d'intérêt en un ensemble de petits volumes de contrôle discrets. Pour chaque volume de contrôle, les flux de quantité conservée (comme la masse, la quantité de mouvement et l'énergie) sont évalués à travers les faces du volume. Les flux entrants et sortants sont équilibrés pour assurer la conservation locale des quantités physiques. L'intégration des équations différentielles partielles sur chaque volume de contrôle et l'application du théorème de Gauss permettent de convertir les équations en une forme discrète appropriée pour la résolution numérique. Cette approche est particulièrement avantageuse car elle garantit la conservation des propriétés physiques à travers les frontières des volumes, ce qui est crucial pour la précision et la stabilité des simulations en mécanique des fluides.

De plus, la méthode des volumes finis est flexible et peut être appliquée à des géométries complexes et des conditions aux limites variées, ce qui la rend très adaptée aux applications industrielles et aux recherches avancées en dynamique des fluides.

II .4. Le maillage

Le maillage, qui divise le domaine d'étude en petits volumes de calcul, a un effet majeur sur la précision des simulations numériques d'écoulements de fluides. Dans les logiciels comme ANSYS CFX, basés sur la méthode des volumes finis, le choix du maillage impacte directement la qualité des approximations réalisées lors de la discrétisation des équations régissant l'écoulement.

Un maillage trop grossier peut engendrer des erreurs importantes, conduisant à des résultats inexacts ou non réalistes. À l'opposé, un maillage extrêmement fin augmente considérablement les coûts de calcul sans forcément apporter un réel gain de précision.

Il est donc crucial de générer un maillage adapté, plus fin dans les zones à forts gradients de vitesse ou de pression, mais raisonnable ailleurs. De plus, la géométrie des petits volumes de calcul influence grandement la convergence et la stabilité du processus de résolution numérique des équations discrétisées.

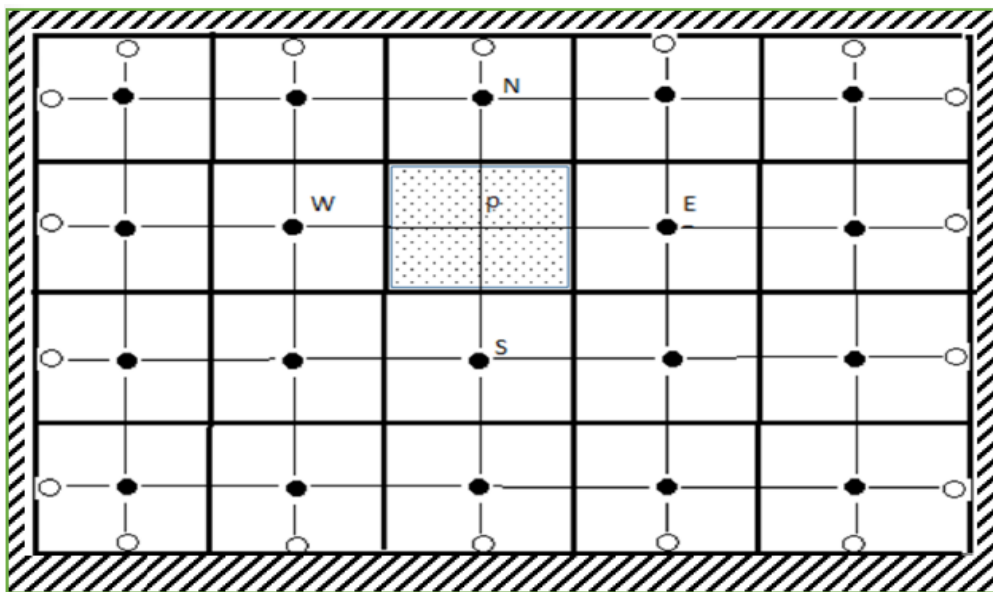


Figure II.1 : Schéma du maillage [17]

II .4.1. Nœuds et éléments

La modélisation numérique des écoulements fluides repose sur un maillage composé de petits volumes élémentaires appelés mailles. À chaque maille sont associés des nœuds où seront calculées les variables de l'écoulement lors de la résolution numérique. L'ensemble des mailles

et de leurs nœuds forme le maillage, obtenu par un découpage adapté de la géométrie étudiée. C'est sur ce maillage que les équations régissant l'écoulement seront discrétisées et approximées numériquement.

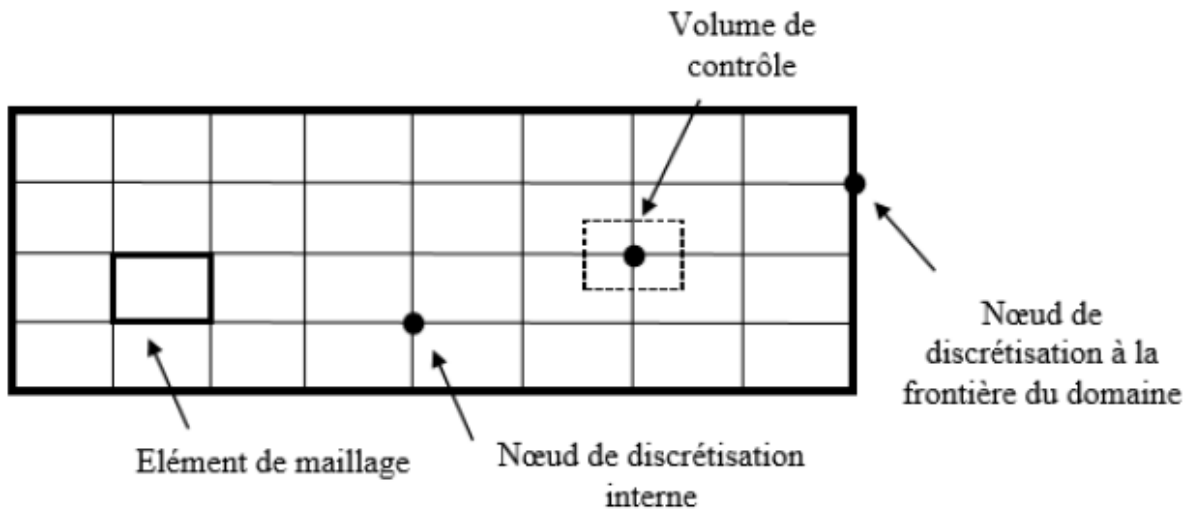


Figure II.2 : illustration de la notion de maillage [18]

II .4.2. Géométrie et topologie

La géométrie du problème considéré est schématisée par la figure II.3 elle décrit un canal rectangulaire de longueur L et de hauteur H, et d'un obstacle circulaire avec des ailettes place sur le fond du canal.

Le canal est de longueur 15D

La hauteur de canal est de 5D

La distance entre l'entrée du canal et la première arrête de l'obstacle est de 5D

La distance entre la deuxième arrête de l'obstacle et la sortie du canal est de 10D

1D est le diamètre d'obstacle.

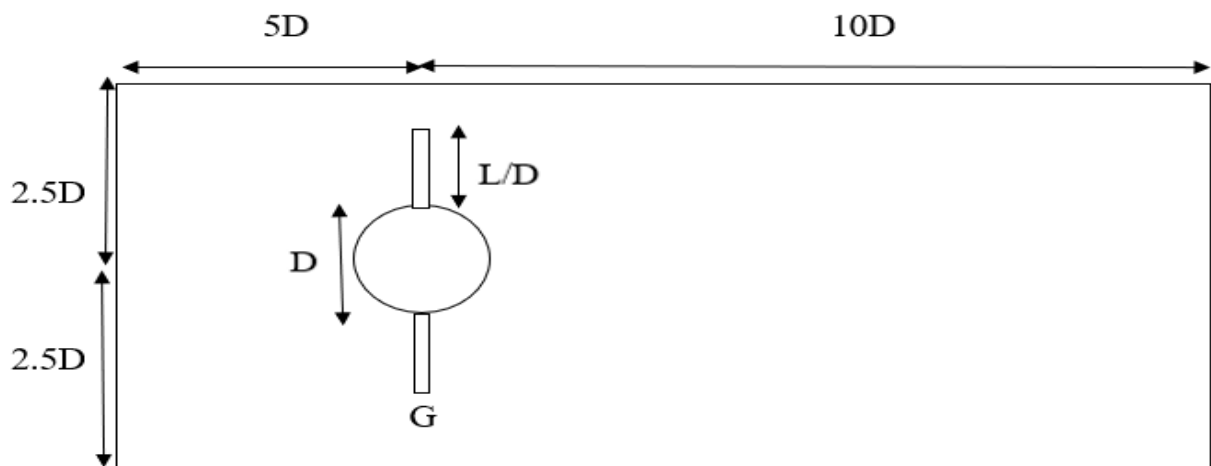


Figure II.3 : géométrie de domaine

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.[5]

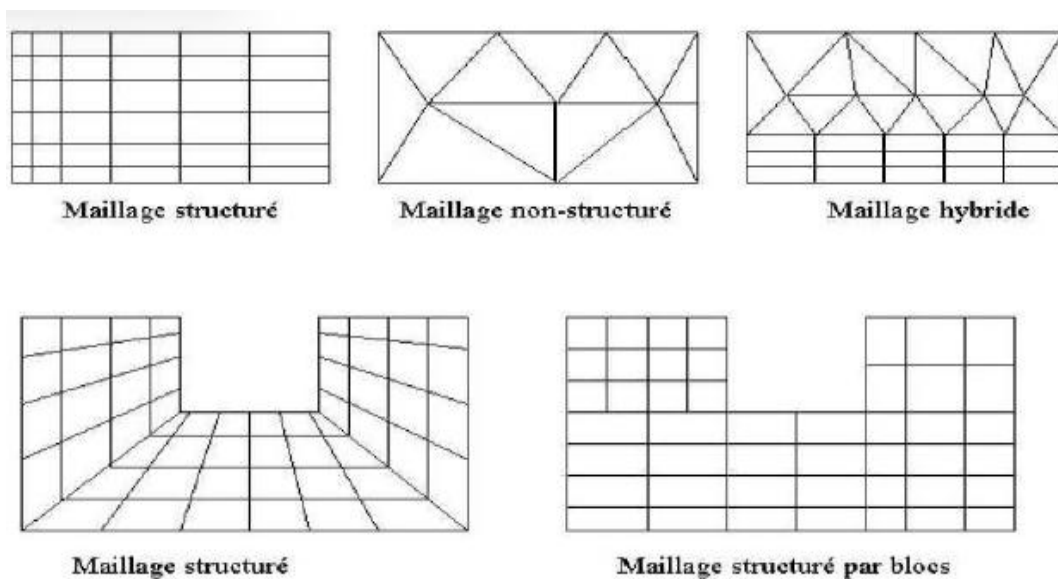


Figure II.4 : les différentes structures de maillage par le logiciel de simulation [3]

II .5. Description générale du problème

L'étude porte sur une simulation numérique de l'écoulement d'un fluide autour d'un cylindre circulaire muni d'ailettes. Les paramètres pris en compte dans la simulation comprennent le type de fluide, le nombre de Reynolds, la durée totale, le pas de temps, la pression imposée à la sortie du domaine ainsi que les conditions aux limites appliquées. Concernant la géométrie, les paramètres considérés sont le rapport d'épaisseur (G/D) et le rapport de longueur (L/D) des ailettes.

Pour étudier l'influence des ailettes, deux configurations ont été ajoutées au cylindre : des ailettes orientées horizontalement et des ailettes orientées verticalement. Pour chaque orientation, les dimensions des ailettes ont été modifiées en faisant varier leur épaisseur relative (G/D) et leur longueur relative (L/D) par rapport au diamètre D du cylindre.

II.5.1. Paramètres des ailettes

- **Epaisseur des ailettes (G/D) :** 0.1 ; 0.05 ; 0.025
- **Longueur des ailettes (L/D) :** 1 ; 0.75 ; 0.5 ; 0.25 ; 0.12

Tableau II.1 : Tableau des configurations des ailettes

Orientation	G/D	L/D
Horizontale	0.1	1 ; 0.75 ; 0.5 ; 0.25 ; 0.125
	0.05	1 ; 0.75 ; 0.5 ; 0.25 ; 0.125
	0.025	1 ; 0.75 ; 0.5 ; 0.25 ; 0.125
Verticale	0.1	1 ; 0.75 ; 0.5 ; 0.25 ; 0.125
	0.05	1 ; 0.75 ; 0.5 ; 0.25 ; 0.125
	0.025	1 ; 0.75 ; 0.5 ; 0.25 ; 0.125

II.5.2. Les conditions aux limites

Le domaine de calcul et les conditions aux limites pour un cylindre avec des ailettes horizontales et verticales sont représentés dans la **Figure II.5**. Le domaine (une zone rectangulaire de $15D \times 5D$) comprend une entrée, trois sorties et un cylindre avec des ailettes attachées, le cylindre situé au milieu du domaine étant éloigné de l'entrée de $5D$. **Figure II.5** montre ce qui suit : un cylindre de diamètre ($D = 2$ cm) avec des ailettes horizontales et verticales .

La principale condition aux limites à l'entrée est la vitesse, mais nous pouvons la manipuler et la modifier via les paramètres suivants : le nombre de Reynolds $Re = 200$, la masse volumique $\rho = 997,0$ kg/m³, la viscosité dynamique $\mu = 8,899 \times 10^{-4}$ kg/m.s, et la variation de la pression le long de l'axe (x) $\partial p / \partial x = 0$. À la sortie : des conditions de flux libre sont considérées ; à savoir $\partial u_1 / \partial x_1 = 0$, $\partial u_2 / \partial x_2 = 0$ et la pression relative $P_{rel} = 0$ ($p = 1$ atm). Des conditions aux limites de non-glissement sont considérées sur les surfaces du cylindre : $u_1 = 0$ et $u_2 = 0$. Et pour les conditions aux limites de symétrie : $\partial u_1 / \partial x_2 = 0$, $u_2 = 0$ et $\partial p / \partial x_2 = 0$.

Il est supposé que la distribution de la vitesse à l'entrée est uniforme et parallèle, donc les conditions initiales sont les suivantes : $u_1 = U_0$ et $u_2 = 0$

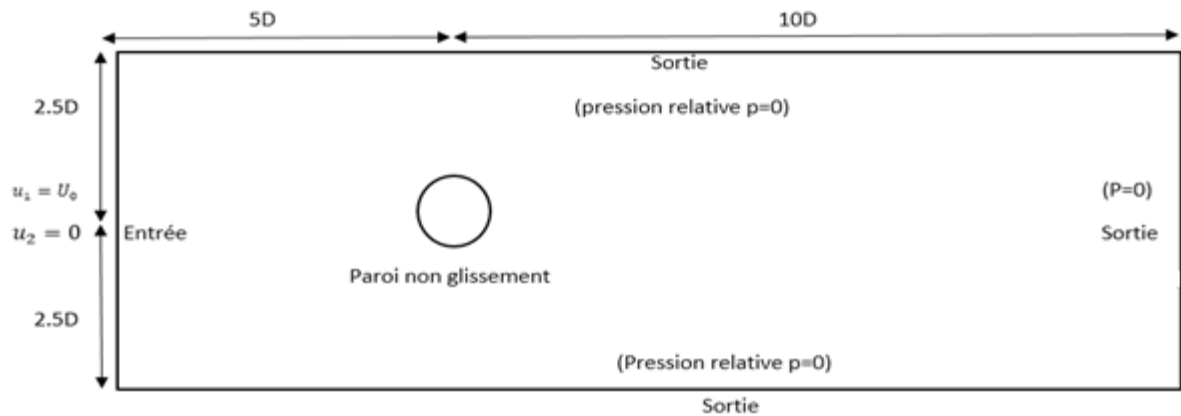


Figure II.5 : conditions aux limites de domaine dans le cas sans ailettes

II.5.3. Étapes de la simulation numérique dans ANSYS CFX

II.5.3.1. Géométrie

La première étape consiste à créer une représentation géométrique du domaine d'étude à l'aide du logiciel ANSYS CFX. Cette modélisation comprend un cylindre circulaire sur lequel sont ajoutées des ailettes.

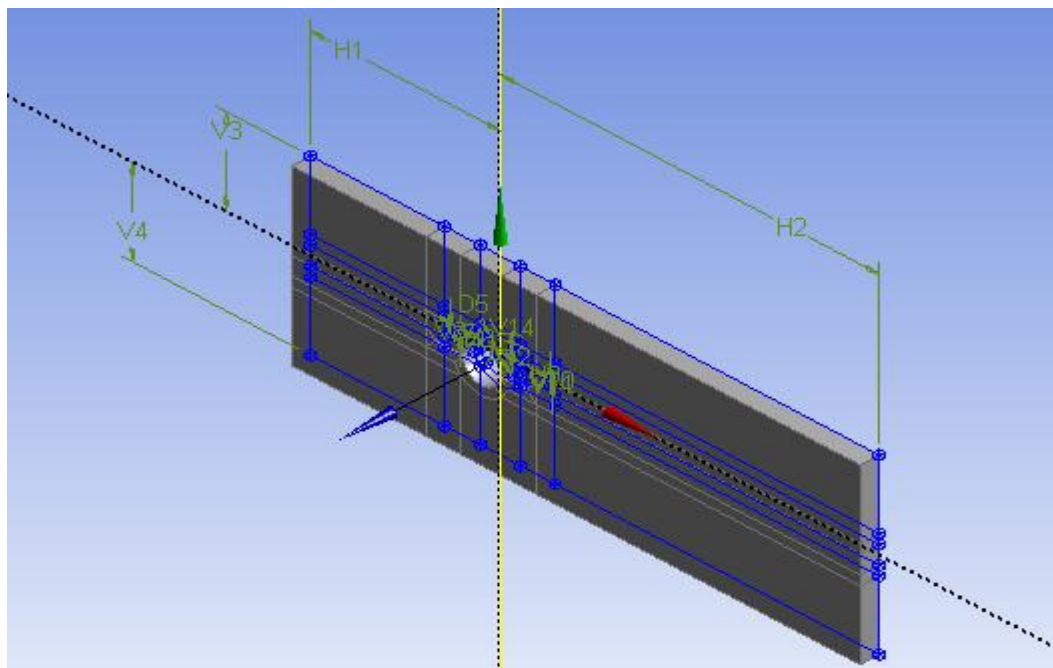


Figure II.6 : géométrie de modèle

II.5.3.2. Maillage

La deuxième étape consiste à subdiviser le domaine de calcul en éléments pour résoudre numériquement les équations de fluide.

Étapes :

- Définir les zones de maillage et les propriétés de chaque zone.
- Génération de maillage en choisissant le type de maillage (structuré ou non structuré) et en spécifiant la densité de maillage.
- Affiner le maillage près du cylindre en ajoutant des couches de cellules fines pour résoudre la couche limite.

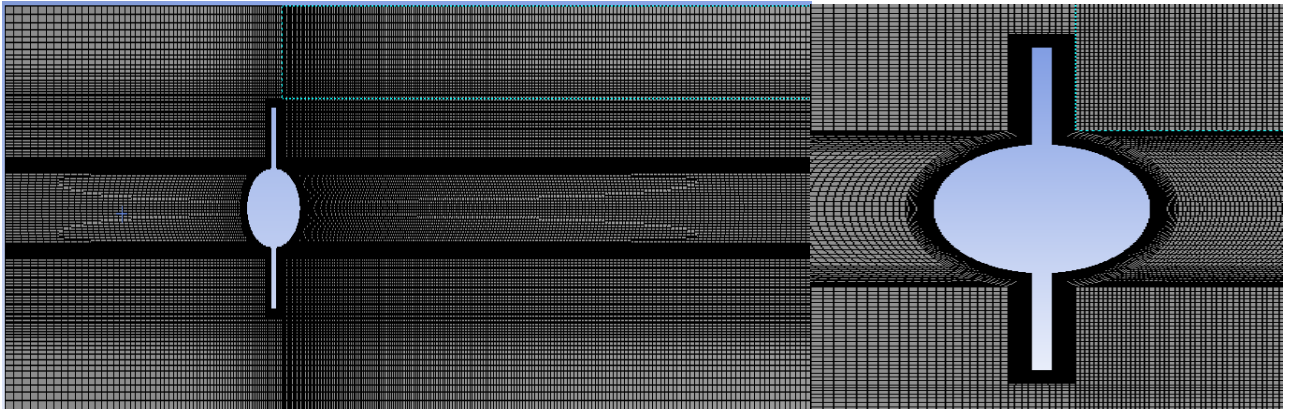


Figure II.7 : *Maillage du modèle (Nœud : 86460 , Elément : 42700)*

II.5.3.3. Configuration

Cette étape implique la configuration des paramètres de simulation dans ANSYS CFX

Définition des propriétés du fluide : Spécifier les propriétés physiques du fluide utilisé dans la simulation.

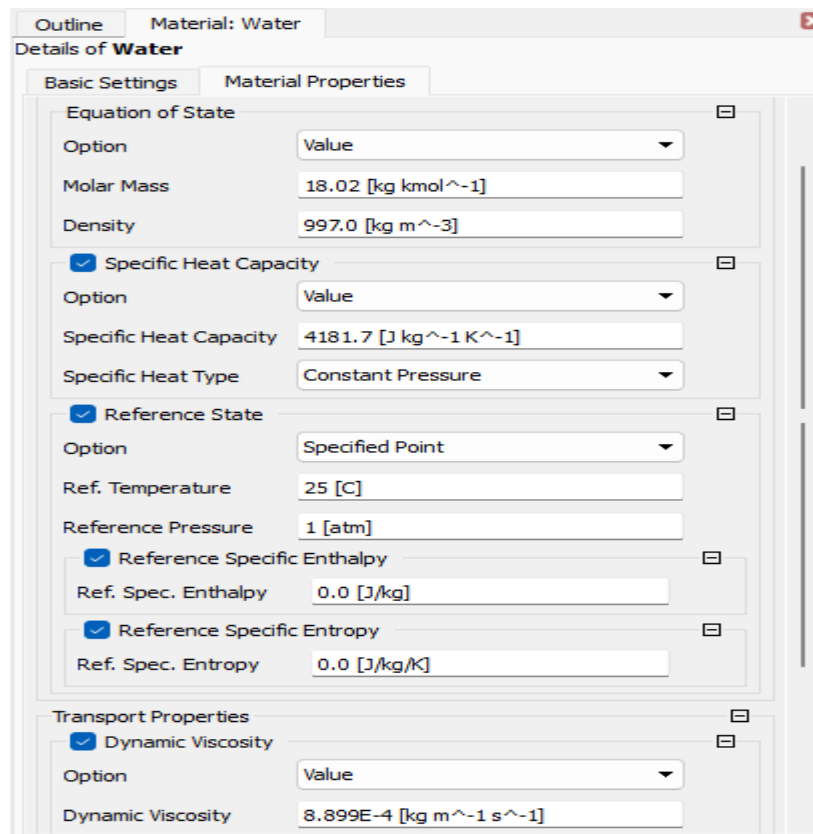


Figure II.8 : Caractéristiques du fluide

Définition des conditions aux limites : Assigner les conditions d'entrée (vitesse ou débit) et de sortie (pression) et les conditions aux paroi (aucun glissement).

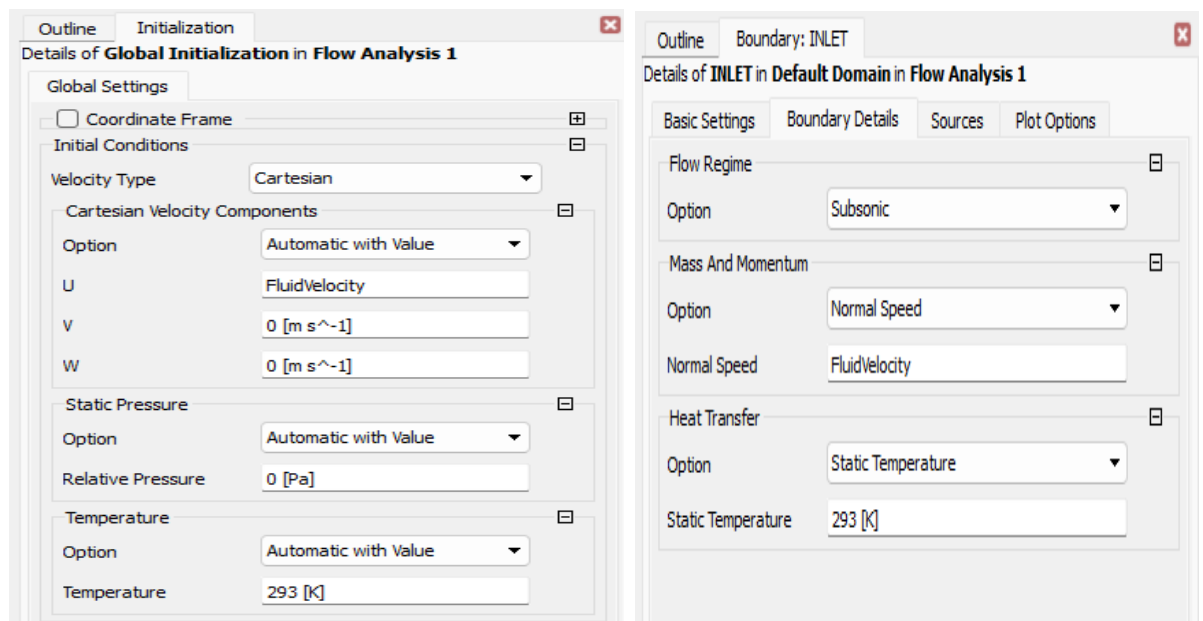


Figure II.9 : Les conditions initiale de l'écoulement

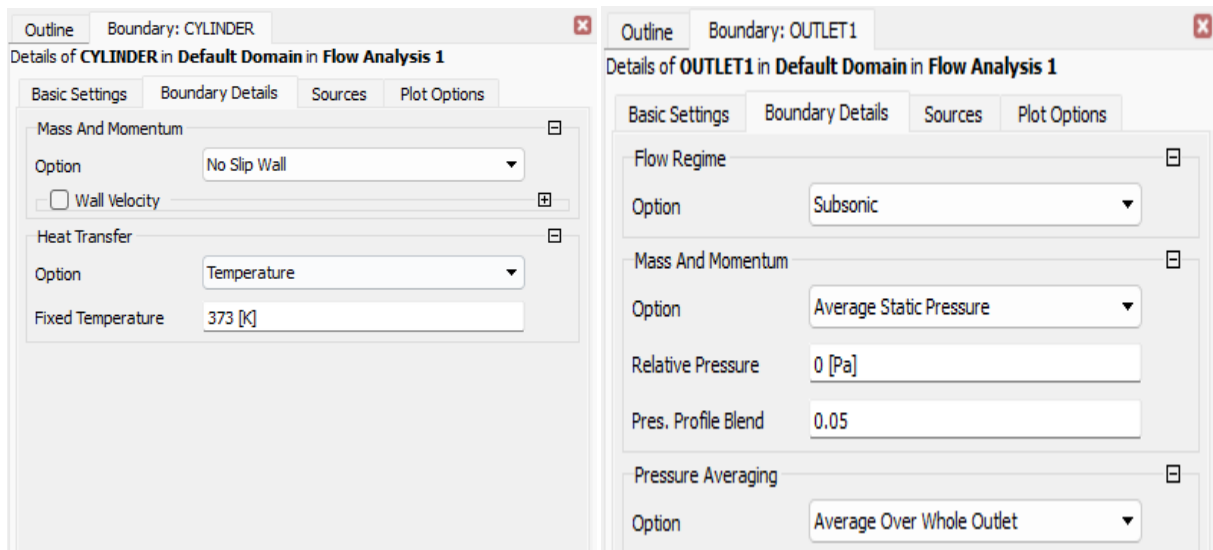


Figure II.10 : Les conditions aux parois et de sortie

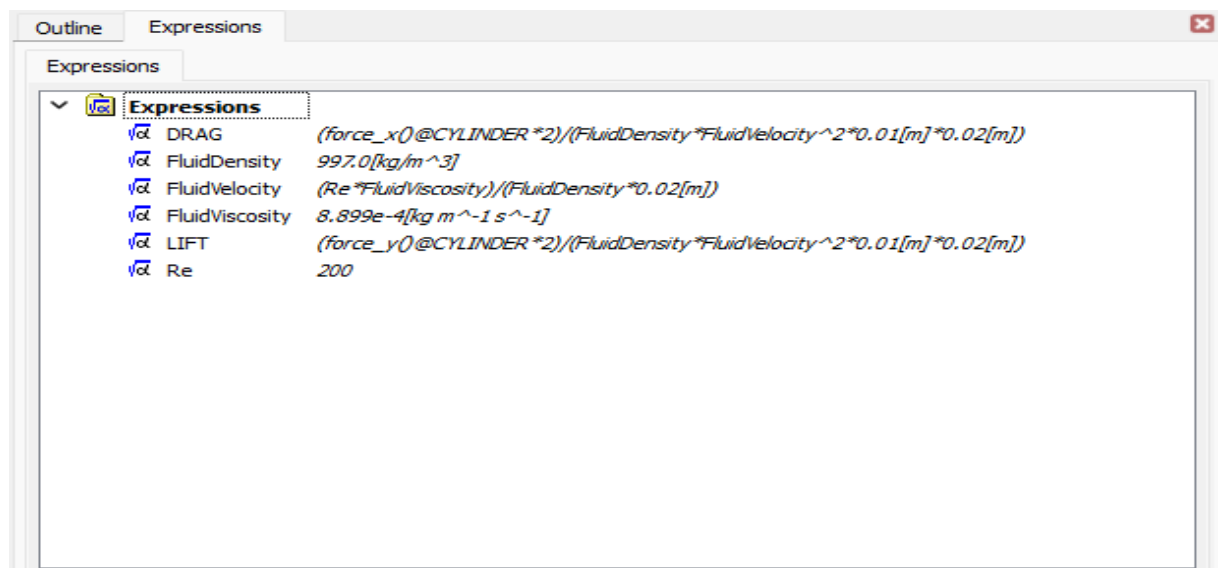


Figure II.11 : Les expressions utilisés

II.5.3.4. Solution

Cette étape consiste que le logiciel réalise les calculs pour simuler l'écoulement du fluide à travers la géométrie et les conditions définies.

Étapes :

- Définir les conditions initiales de l'écoulement.

- Lancement le calcul dans CFX Solver pour résoudre les équations de l'écoulement à travers le domaine de calcul défini.
- Suivre la progression de la simulation en surveillant les résidus, qui sont des mesures de l'erreur numérique.

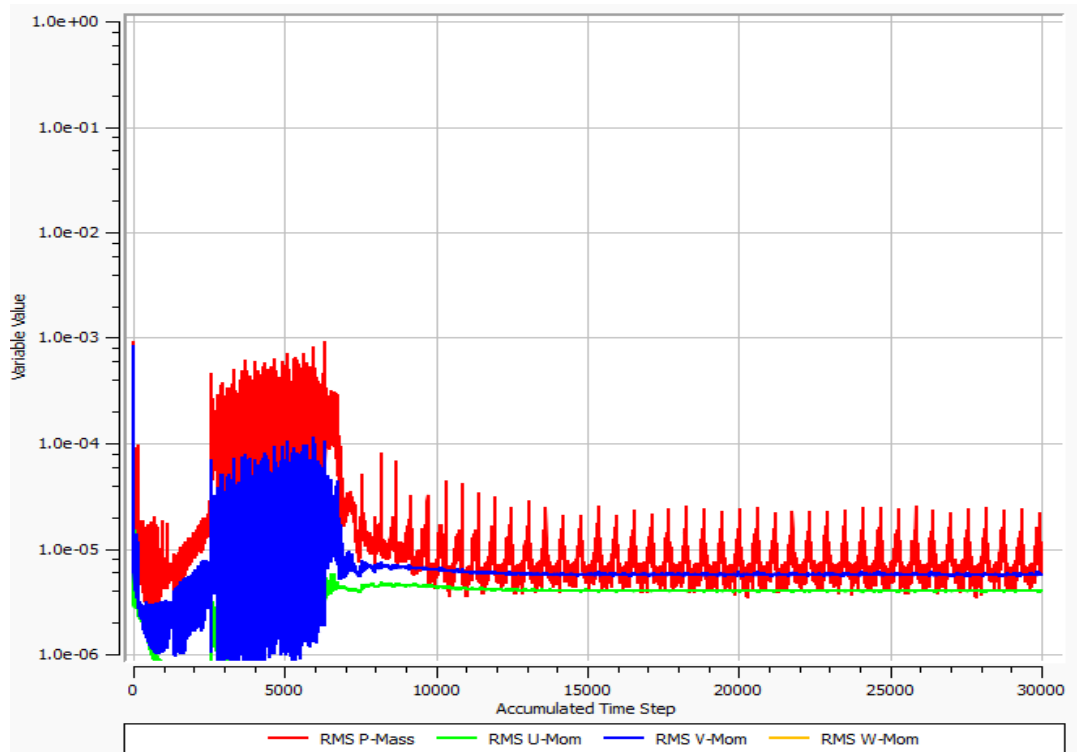


Figure II.12 : L'exécution de la solution de logiciel ANSYS

II .6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les éléments théoriques et numériques essentiels pour mettre en œuvre une simulation bidimensionnelle ANSYS CFX. Nous avons présenté les équations de Navier-Stokes régissant l'écoulement des fluides, ainsi que les différentes méthodes numériques, le maillage du domaine d'étude avec les techniques de maillage structuré et non structuré, a également été abordé pour obtenir des résultats précis. Enfin, nous avons fourni une description générale du problème, incluant les conditions aux limites, propriétés du fluide et paramètres d'entrée pertinents pour la simulation.

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 chapitre, nous examinons les résultats de l'écoulement laminaire autour d'un cylindre circulaire, en étudiant l'impact des ailettes verticales et horizontales de différentes tailles sur les forces de portance et de traînée, avant et après leur installation. Notre but est d'analyser comment les variations géométriques, telles que le rapport d'épaisseur G/D et la longueur L/D des ailettes, influent sur les caractéristiques de l'écoulement et les forces de traînée et de portance. Ces forces revêtent une importance cruciale dans la conception de systèmes hydrodynamiques performants.

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

III.2. Vérification des résultats

Tableau III.1 : *Independence de maillage à $Re=100$*

Maillage	Nombre des nœuds	Nombre des éléments	C_D moy	Peskin CS et al [19] Valeur expérimentale	Linwei Shen et al [20] Valeur expérimentale
Mesh_1	6880	3300	1,628	1.4473	1.376
Mesh_2	24520	12000	1,595		
Mesh_3	68840	34000	1,587		
Mesh_4	98440	48700	1,591		
Mesh_5	121180	60000	1,592		

III.3. Analyse de la portance moyenne et de trainée moyenne avec et sans ailettes à $Re=200$

Tableau III.2 : Portance moyenne C_L et de trainée moyenne C_D pour un obstacle circulaire avec ailettes horizontales en fonction des rapports G/D et L/D et $Re=200$

Ailettes Horizontale											
L/D		1		0.75		0.5		0.25		0.125	
		C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D
G/D	0.1	-0,003	1,2140	-0,002	1,233	-0,004	1,277	-0,0008	1,355	-0,002	1,411
	0.05	0,0013	1,233	-0,003	1,251	-0,004	1,295	0,003	1,369	0,003	1,409
	0.025	-0,0005	1,242	-0,001	1,261	-0,003	1,303	-0,003	1,368	0,003	1,412

Tableau III.3 : Portance moyenne C_L et de trainée moyenne C_D pour un obstacle circulaire avec ailettes verticales en fonction des rapports G/D et L/D et $Re=200$

Ailettes Verticale											
L/D		1		0.75		0.5		0.25		0.125	
		C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D	C_L	C_D
G/D	0.1	0,186	19,942	0,046	18,467	-0,046	7,207	0,029	3,685	0,0002	2,442
	0.05	0,156	33,790	-0,011	19,216	-0,024	7,515	-0,008	3,705	-0,013	2,442
	0.025	0,064	33,399	0,247	17,137	-0,104	7,231	0,041	3,750	-0,0006	2,450

Nous allons interpréter les résultats obtenus à partir des simulations numériques réalisées sur un obstacle cylindre, avec et sans ailettes.

III.3.1. Analyse des résultats pour l'obstacle sans ailettes

III.3.1.1. La portance moyenne avec $Re = 200$

Valeur moyenne : **-0,003**

Interprétation:

La portance moyenne est faible ou nulle en raison de l'écoulement laminaire symétrique autour du cylindre, qui équilibre les forces perpendiculaires au flux.

III.3.1.2. La trainée moyenne avec $Re = 200$

Valeur moyenne : **1,449**

Interprétation:

la traînée est significative par rapport à la portance en raison de la séparation de l'écoulement derrière le cylindre, créant une différence de pression importante entre l'avant et l'arrière.

III.3.2. Analyse des résultats pour l'obstacle avec ailettes horizontale

III.3.2.1. Interprétation de graphique de portance moyenne :

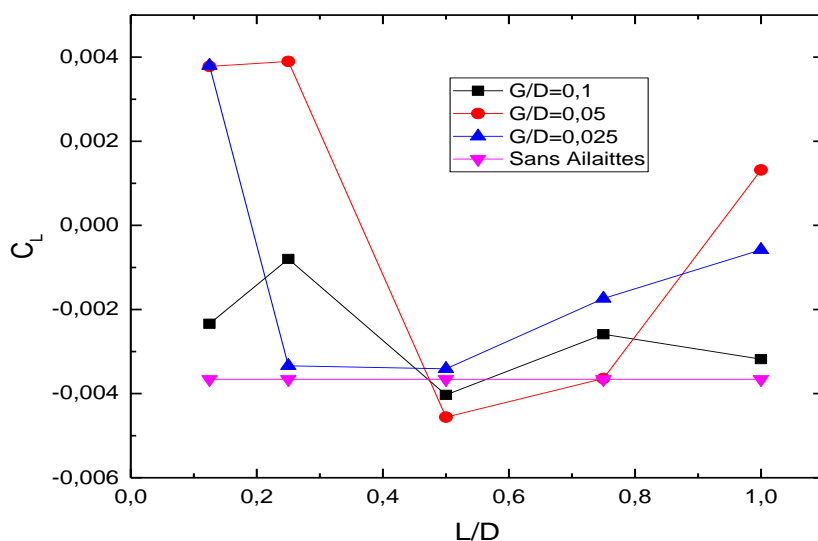


Figure III.1 : Graphique de portance moyenne d'écoulement autour d'un cylindre avec ailette horizontale et $Re = 200$

Analyse et résultats

La **Figure III.1** montre le coefficient de portance moyen C_L avec et sans ailettes horizontales à différents rapports L/D (0.125 ; 0.25 ; 0.5 ; 0.75 ; 1). et différents rapports G/D (0.1 ; 0.05 ; 0.025). On constate que la présence d'ailettes affecte considérablement la portance par rapport au cas sans ailettes, qui ont des valeurs constantes, on observe que la courbe pour $G/D=0,05$ se stabilise à $C_L = 0,004$ dans la plage de $L/D=0,125$ à $L/D=0,25$. Dans cette même plage, on remarque une légère augmentation de la courbe $G/D=0,1$ et une forte diminution des valeurs de la courbe $G/D=0,025$ jusqu'à environ $C_L=0,0037$. Dans la plage de $L/D=0,25$ à $L/D=0,5$, nous remarquons une forte diminution des valeurs de $G/D=0,05$ et $G/D=0,1$ jusqu'à environ $C_L = -0,004$ avec une valeur constante de $G/D=0,025$. De $L/D=0,5$ à $L/D=0,75$, on remarque une légère augmentation de toutes les courbes G/D , puis de $L/D=0,75$ à $L/D=1$, on observe une légère diminution de $G/D=0,1$ et une augmentation continue de $G/D=0,025$ et une forte croissance de $G/D = 0,05$.

Ces résultats indiquent que les ailettes ont une incidence significative sur la portance, avec un effet plus important et des oscillations plus marquées pour des valeurs plus faibles du rapport G/D . Cela peut s'expliquer par le fait que les ailettes ajoutent une variation dans l'écoulement autour du cylindre, ce qui entraîne des différences de portance en fonction du rapport L/D .

III.3.2.2. Interprétation de graphique de trainée moyenne:

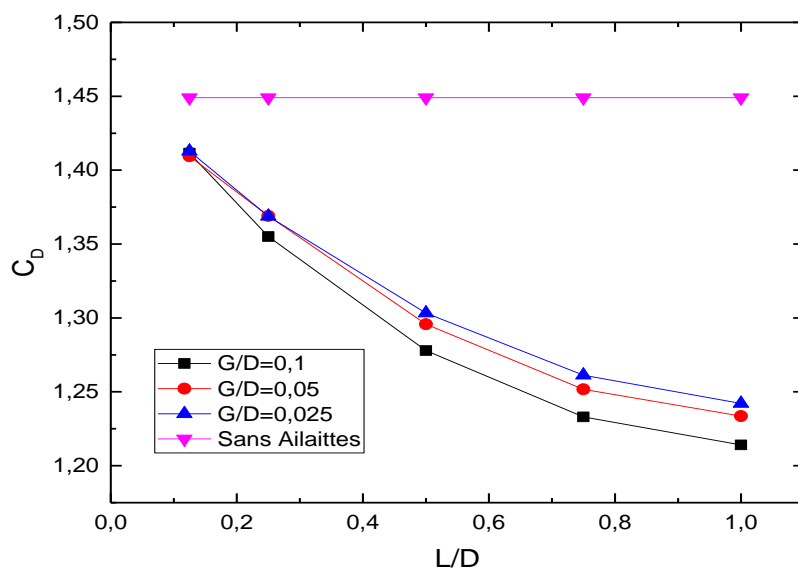


Figure III.2 : Graphique de trainée moyenne d'écoulement autour d'un cylindre avec ailette horizontale et $Re=200$

Analyse et résultats

La **Figure III.2** montre l'effet du rapport L/D sur le coefficient de traînée C_D avec et sans ailettes horizontales. Pour le cas sans ailettes, Nous observons des valeurs constantes. Pour les ailettes avec $G/D=0,1$, le C_D commence avec une valeur plus élevée d'environ 1,41, et diminue progressivement à mesure que L/D augmente, pour atteindre environ 1,22 à $L/D=1$. Pour les ailettes avec $G/D=0,05$ et $G/D=0,025$, la même tendance est observée où C_D commence à 1,41 et diminue progressivement avec l'augmentation de L/D pour atteindre environ 1,23 et 1,25 respectivement à $L/D=1$. Cette figure montre que la présence d'ailettes affecte le coefficient de traînée et le diminue progressivement à mesure que le rapport L/D augmente. Cette diminution est plus prononcée pour les ailettes plus grandes $G/D=0.1$ et moins prononcée pour les ailettes plus petites $G/D=0.05$ et $G/D=0.025$. Indiquant que les ailettes contribuent à réduire la traînée par réduction de la zone de turbulence derrière le cylindre. Dans la présence des ailettes, surtout de grande dimension, peut donc être bénéfique pour réduire la traînée sur le cylindre en modifiant l'écoulement, ce qui pourrait améliorer l'efficacité hydrodynamique.

III.3.3. Analyse des résultats pour l'obstacle avec ailettes verticale

III.3.3.1. Interprétation de graphique de portance moyenne:

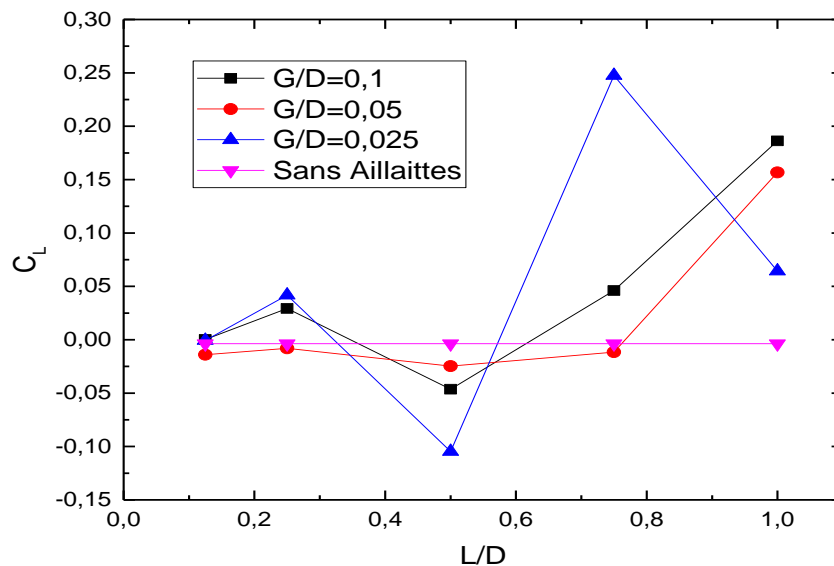


Figure III.3 : Graphique de portance moyenne d'écoulement autour d'un cylindre avec ailette verticale et $Re=200$

Analyse et résultats

La **Figure III.3** montre le coefficient de portance moyen C_L avec et sans ailettes verticales à différents rapports L/D (0.125 ;0.25 ;0.5 ;0.75 ;1). et différents rapports G/D (0.1 ;0.05 ;0.025).On constate que la présence d'ailettes affecte considérablement la portance par rapport au cas sans ailettes qui ont des valeurs constantes. Entre $L/D=0,125$ et $L/D=0,25$, la valeur de C_L augmente légèrement sur toutes les courbes pour atteindre $C_L =0,025$ à la fois pour $G/D=0,1$ et $G/D=0,025$ alors que les valeurs de $G/D=0,05$ atteignent zéro. Nous observons ensuite une diminution des valeurs de C_L à la fois pour $G/D=0,1$ et $G/D=0,025$ alors que les valeurs de $G/D=0,05$ changent pour atteindre $C_L =-0,025$ de $L/D=0,25$ à $L/D=0,5$, Ensuite, pour un rapport L/D compris entre 0,5 et 0,75, les différences commencent à devenir apparentes car les courbes $G/D=0,1$ et $G/D=0,025$ montrent une augmentation significative des valeurs C_L jusqu'à $C_L =0,05$ et une valeur maximale de $C_L =0,25$, respectivement, avec une stabilité relative à $G/D=0,05$. Ensuite, dans la plage de $L/D=0,75$ à $L/D=1$, la courbe $G/D=0,025$ diminue de manière significative jusqu'à environ $C_L =0,05$, avec des valeurs C_L croissantes à $G/D=0,1$ et $G/D=0,05$ jusqu'à environ $C_L =0,175$.

La courbe montre que l'effet des ailettes verticales dépend fortement du rapport G/D et du rapport L/D utilisés, avec des effets divers sur le coefficient de portance.

III.3.3.2. Interprétation de graphique de trainée moyenne:

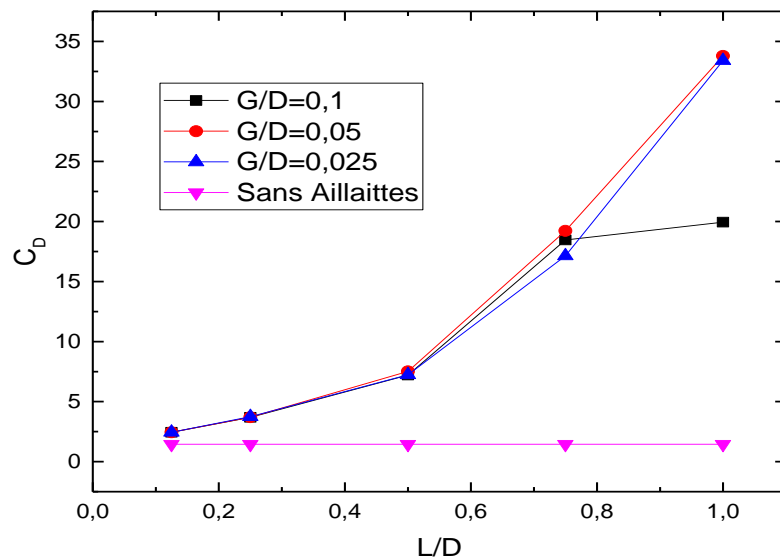


Figure III.4 : Graphique de trainée moyenne d'écoulement autour d'un cylindre avec ailette verticale et $Re=200$

Analyse et résultats

La **Figure III.4** montre l'effet du rapport L/D sur le coefficient de traînée C_D avec et sans ailettes verticales. Pour le cas sans ailettes, nous observons des valeurs constantes. Par contre, nous remarquons une augmentation symétrique de C_D pour toutes les courbes G/D de $L/D=0,125$ à $L/D=0,75$. Ensuite, de $L/D=0,75$ à $L/D=1$, nous observons une augmentation continue et convergente pour $G/D=0,05$ et $G/D=0,025$ jusqu'à une valeur de $C_D = 34$, pour $G/D=0,1$. On observe une légère augmentation de C_D due à l'effet de G/D jusqu'à $C_D = 20$.

L'analyse du graphique montre que les configurations sans ailettes sont plus efficaces sur le plan hydrodynamique, affichant un coefficient de traînée C_D très bas. En revanche, les configurations avec ailettes présentent une augmentation significative du coefficient de traînée à mesure que L/D augmente. Cela indique que les ailettes verticales augmentent la traînée et doivent être utilisées avec précaution pour optimiser les performances hydrodynamiques.

III.3.4. Comparaison de l'impact des ailettes horizontales et vertical sur la portance et la traînée :

Pour les configurations sans ailettes, la portance est relativement nulle. En ce qui concerne les ailettes horizontales, elles montrent des variations de portance faibles et limitées, proches de zéro, tout en permettant une réduction de la traînée en fonction du rapport L/D pour tous les rapports G/D . D'autre part, les ailettes verticales présentent des variations de portance plus importantes, avec une portance plus élevée pour les rapports L/D élevés, mais entraînent également une augmentation de la traînée avec l'augmentation de L/D pour tous les rapports G/D . En conclusion, pour minimiser la traînée, il est préférable d'utiliser les ailettes horizontales. Cependant, pour augmenter sensiblement le coefficient de portance, il est avantageux d'utiliser les ailettes verticales, malgré l'augmentation conséquente du coefficient de traînée.

III.3.5. Comportement hydrodynamique d'écoulement autour d'un cylindre avec ailettes horizontales :

A. Portance :

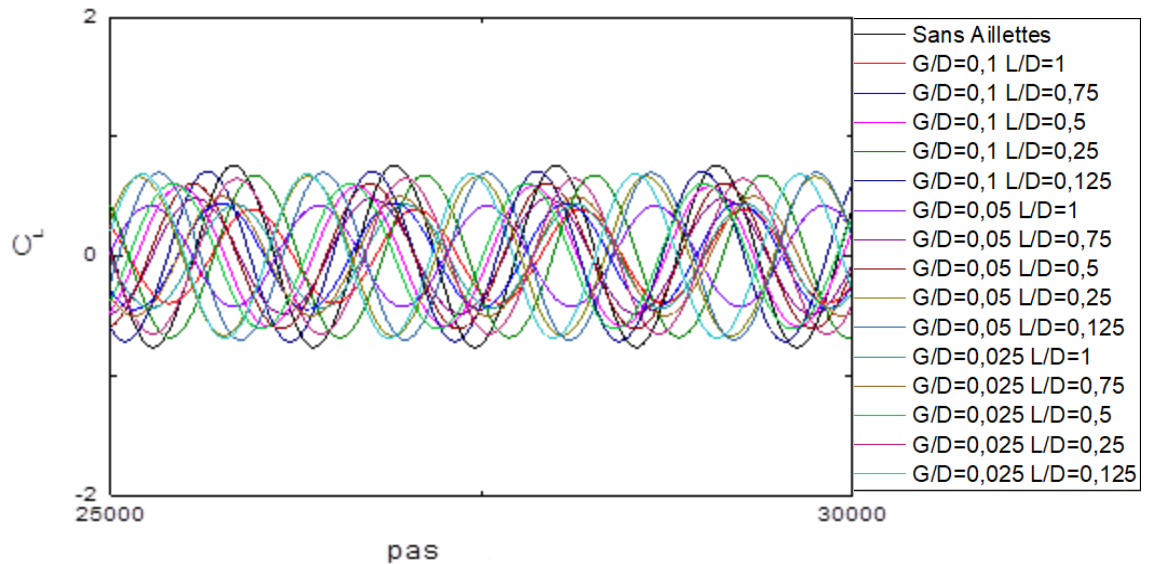


Figure III.5: Graphique des portances (cas d'un cylindre avec ailettes horizontales $Re=200$)

L'analyse des courbes de coefficient de portance C_L en fonction du pas de temps révèle plusieurs points importants concernant les différentes configurations de G/D et L/D dans le cas d'ailettes horizontales. Toutes les courbes montrent des oscillations régulières et périodiques, indiquant une stabilité globale. Les amplitudes des oscillations sont similaires pour toutes les configurations, oscillant autour de ± 1 , sans variations significatives qui pourraient indiquer un comportement instable. Les périodes des oscillations semblent également être similaires pour chaque courbe, ce qui suggère que les variations de G/D et L/D n'ont pas d'effet notable sur la fréquence des oscillations de portance. Cette observation est constante à travers toutes les configurations testées, incluant sans ailettes. Les configurations de G/D et L/D étudiées n'ont pas d'impact significatif sur l'amplitude et la période des oscillations de portance, et les courbes atteignent un état stable dans toutes les situations analysées.

B. Trainée :

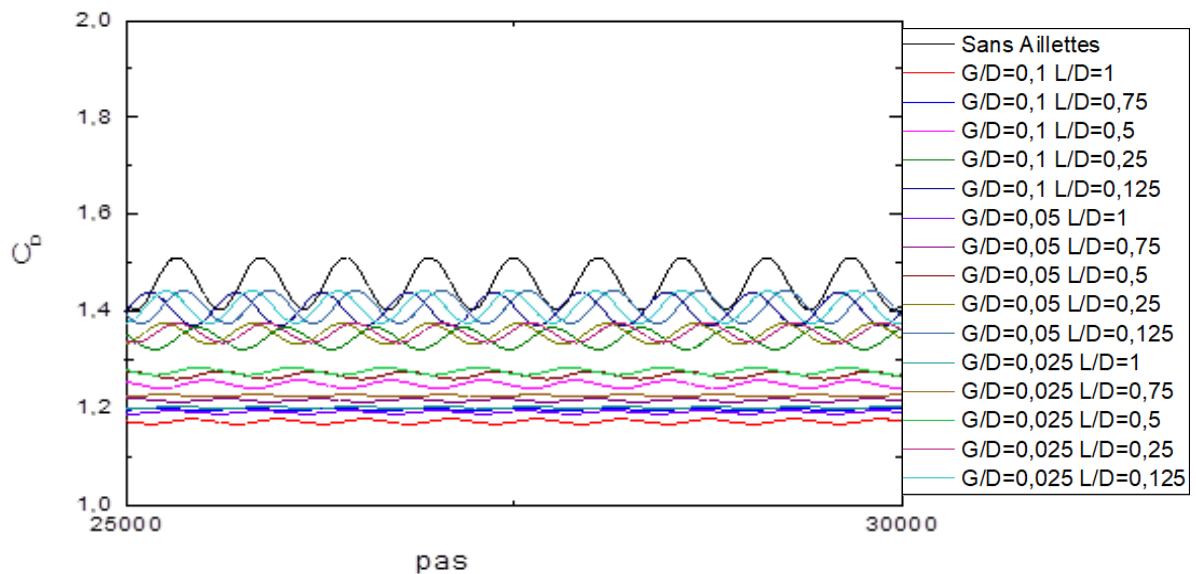


Figure III.6: Graphique des trainées (cas d'un cylindre avec ailettes horizontales $Re=200$)

L'analyse des courbes du coefficient de traînée C_D en fonction du pas de temps pour différentes configurations de G/D et L/D révèle plusieurs caractéristiques clés. La courbe sans ailettes présente des fluctuations très périodiques, oscillant entre 1,4 et 1,5, indiquant une instabilité hydrodynamique notable. En comparaison, la configuration avec $G/D=0,1$ affiche des fluctuations faibles et périodiques, avec des oscillations autour de 1,18 à 1,28 et une période plus courte, suggérant une meilleure stabilité hydrodynamique. La configuration $G/D=0,05$ montre des fluctuations similaires à $G/D=0,1$ mais avec une amplitude légèrement plus élevée, oscillant entre 1,28 et 1,4. Pour $G/D=0,025$, les fluctuations sont plus prononcées, variant entre 1,32 et 1,42, bien que toujours inférieures à celles sans ailettes. Les configurations avec ailettes horizontales réduisent les fluctuations de traînée comparativement à la configuration sans ailettes, améliorant ainsi la stabilité hydrodynamique. En particulier, la configuration avec $G/D=0,1$ et un L/D élevé se distingue par ses faibles amplitudes de fluctuation et une traînée moyenne plus basse, démontrant que la présence d'ailettes horizontales réduit la traînée moyenne.

III.3.6. Comportement hydrodynamique d'écoulement autour d'un cylindre avec ailettes verticales :

A. Portance :

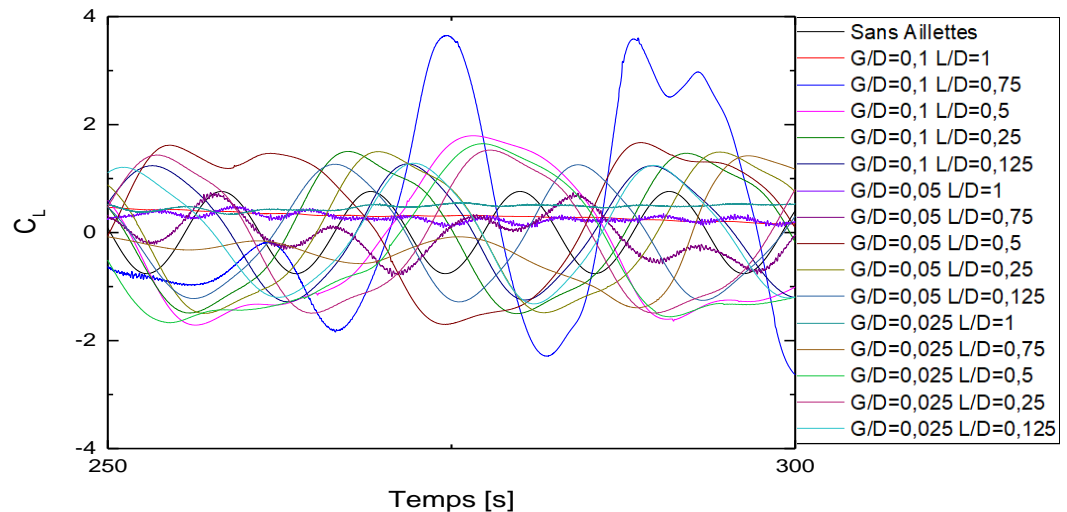


Figure III.7: Graphique des portances (cas d'un cylindre avec ailettes verticales $Re=200$)

L'analyse des courbes de coefficient de portance C_L pour différentes configurations d'ailettes verticales révèle des variations distinctes en fonction du rapport G/D et L/D . Pour $G/D=0.1$, la configuration sans ailettes montre une amplitude modérée et des oscillations régulières. La présence d'ailettes avec $L/D=1$ stabilise fortement la portance, presque sans oscillations, indiquant un état très stable et non périodique. En revanche, les configurations avec $L/D=0.75$ et $L/D=0.5$ montrent des oscillations significatives et irrégulières, signalant des états instables avec de grandes amplitudes. Les configurations avec $L/D=0.25$ et $L/D=0.125$ présentent des oscillations régulières et de faible amplitude, indiquant une stabilité modérée. Pour $G/D=0.05$, la configuration avec $L/D=1$ est également la plus stable, montrant une quasi-absence d'oscillations et une portance presque constante. Les configurations avec $L/D=0.75$ et $L/D=0.125$ présentent des oscillations régulières de faible à moyenne amplitude, indiquant une stabilité modérée. Les configurations avec $L/D=0.5$ et $L/D=0.25$ montrent des oscillations régulières de moyenne amplitude, suggérant une stabilité modérée. Enfin, pour $G/D=0.025$, la configuration avec $L/D=1$ reste la plus stable avec une quasi-absence d'oscillations. La configuration avec $L/D=0.75$ montre de l'instabilité et un manque de périodicité, tandis que celle avec $L/D=0.125$ présente des oscillations régulières de faible à moyenne amplitude. Les configurations avec $L/D=0.5$ et $L/D=0.25$ montrent également des oscillations régulières de moyenne amplitude, avec $L/D=0.5$ étant moins périodique par rapport à $L/D=0.25$.

En conclusion, les ailettes avec $L/D=1$ sont les plus efficaces pour stabiliser la portance à travers toutes les configurations de G/D .

B. Trainée :

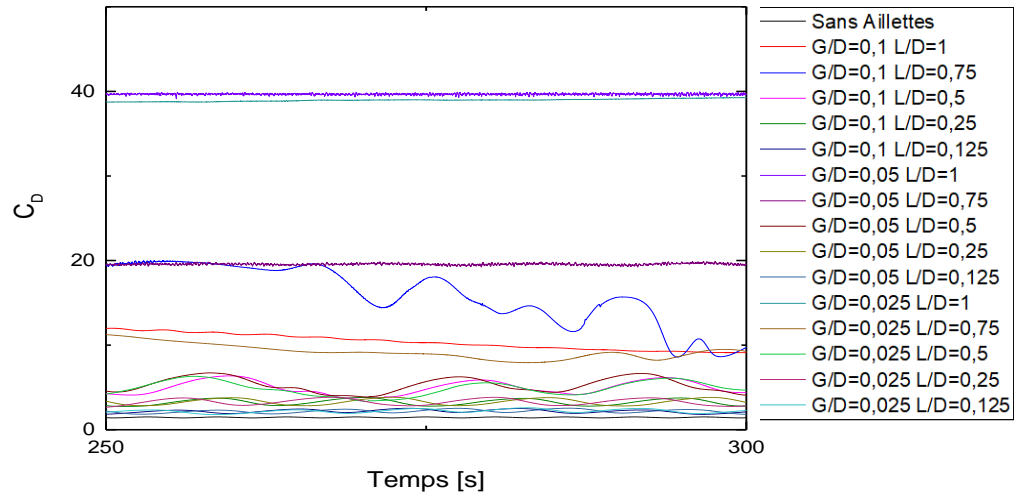


Figure III.8: Graphique des traînées (cas d'un cylindre avec ailettes verticales $Re=200$)

L'analyse des courbes du coefficient de traînée C_D pour différentes configurations d'ailettes révèle des variations significatives selon les rapports G/D et L/D . Pour $G/D=0,1$, la configuration sans ailettes est la plus stable, avec une traînée pratiquement constante et sans oscillations. La configuration avec $L/D=1$ est également très stable, présentant une diminution constante. La configuration avec $L/D=0,125$ montre des oscillations régulières de très faible amplitude, tandis que les configurations avec $L/D=0,25$ et $L/D=0,5$ présentent des oscillations régulières de faible à moyenne amplitude, indiquant une stabilité modérée. En revanche, la configuration avec $L/D=0,75$ est la moins stable, affichant de grandes amplitudes et des oscillations irrégulières, signalant une forte instabilité.

Pour $G/D=0,05$, les configurations avec $L/D=1$ et $L/D=0,75$ sont les plus stables, présentant des valeurs de C_D pratiquement constantes sans oscillations. Les configurations avec $L/D=0,5$, $L/D=0,25$, et $L/D=0,125$ montrent des oscillations régulières de faible amplitude, indiquant une stabilité modérée. Ainsi, les configurations avec $G/D=0,05$ et des valeurs de L/D de 1 et 0,75 sont les plus efficaces pour minimiser les oscillations de traînée et stabiliser la traînée.

Enfin, pour $G/D=0,025$, les configurations avec $L/D=1$ sont les plus stables, présentant des valeurs de C_D presque constantes sans oscillations. La configuration avec $L/D=0,75$ est

également stable, montrant une traînée modérée avec très peu d'oscillations. Les configurations avec $L/D=0.5$, $L/D=0.25$ et $L/D=0.125$ présentent des oscillations régulières de faible amplitude, indiquant une stabilité modérée. En résumé, les configurations $G/D=0.025$ avec $L/D=1$ et $L/D=0.75$ sont les plus efficaces pour minimiser les oscillations et stabiliser la traînée, tandis que les configurations avec des longueurs d'ailettes intermédiaires maintiennent également une stabilité relative.

III.4. Analyse des effets d'ailettes sur les écoulements autour de l'obstacle circulaire :

Étude de la vitesse , de la vorticité et des forces de trainée et de portances

Cette étude a examiné les écoulements laminaires autour d'un obstacle circulaire, avec et sans ailettes horizontales et verticales, en utilisant des simulations avec ANSYS CFX Les analyses ont porté sur la distribution de la vitesse et de la vorticité, ainsi que sur les forces de trainée et de portance, à différents intervalles de temps (50s, 100s, 200s, 300s)

III.4.1. Analyse des effets des Ailettes sur la distribution de la vitesse

III.4.1.1.Ailettes horizontales :

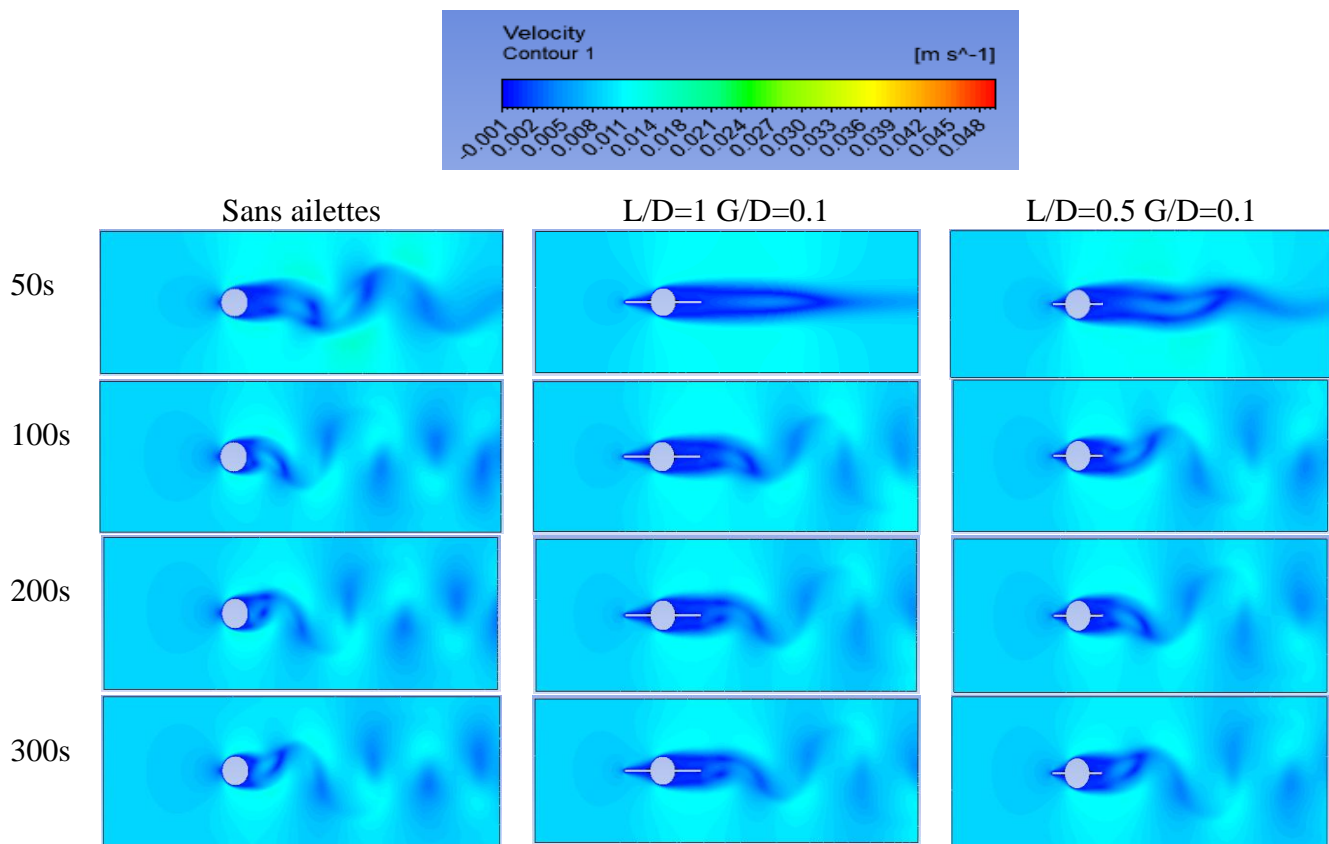


Figure III.9: contours de vitesse avec ailette horizontales pour $G/D=0.1$ $Re= 200$

La **Figure III.9** présente des contours de vitesse illustrant l'écoulement laminaire autour d'un cylindre circulaire avec des configurations différentes, sans ailettes, avec des ailettes horizontales de longueur $L/D=1$ et épaisseur $G/D=0.1$, et avec des ailettes de longueur $L/D=0.5$ et épaisseur $G/D=0.1$. Les simulations sont effectuées à des intervalles de temps de 50s, 100s, 200s, et 300s. Pour l'obstacle sans ailettes, les vortex de von Karman commencent à apparaître dès 50s et deviennent plus prononcés à 100s. À 200s et 300s, les vortex sont bien formés et stables, montrant un détachement périodique classique des vortex.

Pour l'obstacle avec des ailettes de longueur $L/D=1$, le détachement des vortex est initialement retardé à 50s par rapport à l'obstacle sans ailettes. Cependant, à 100s, les vortex commencent à se détacher, et à 200s et 300s, un schéma de détachement stable et périodique est observé, similaire à celui de l'obstacle sans ailettes mais légèrement décalé dans le temps.

Pour l'obstacle avec des ailettes de longueur $L/D=0.5$, les vortex commencent à se former à 50s, bien que de manière moins distincte que sans ailettes. À 100s, les vortex sont plus définis et commencent à se détacher. À 200s et 300s, le phénomène de vortex de Von Karman est bien établi, avec des détachements périodiques similaires à ceux des autres configurations.

En résumé, la présence d'ailettes horizontales parallèles à l'écoulement tend à retarder légèrement le début du détachement des vortex de Von Karman, surtout pour les ailettes plus longues ($L/D=1$). Cependant, une fois établi, le détachement des vortex suit un schéma stable et périodique, semblable à celui observé sans ailettes. Cela montre que les ailettes influencent principalement le délai initial de la formation des vortex, mais ont un effet limité sur le comportement stable à long terme du phénomène.

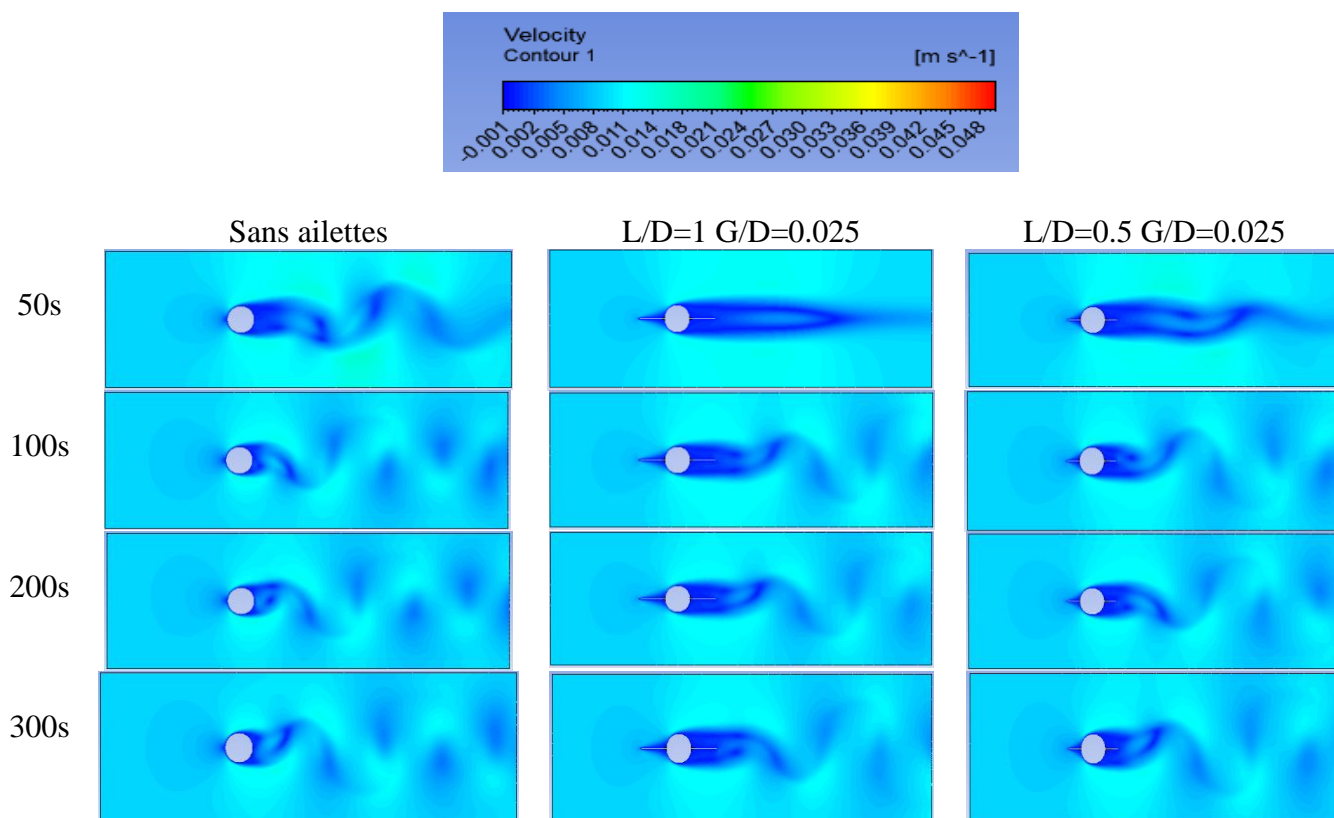


Figure III.10: contours de vitesse avec ailette horizontales pour $G/D=0.025$ $Re=200$

La **Figure III.10** présente les contours de vitesse d'un écoulement laminaire autour d'un cylindre, analysé avec et sans ailettes horizontales d'épaisseur réduite ($G/D = 0.025$). L'écoulement est observé à différentes échelles de temps (50s, 100s, 200s, et 300s) pour visualiser l'évolution du comportement du fluide autour du cylindre.

Pour l'obstacle avec des ailettes de longueur $L/D=1$ et une épaisseur $G/D=0.025$, on observe un retard initial du détachement des vortex à 50s, similaire aux configurations précédentes. Cependant, à 100s, les vortex commencent à se détacher plus distinctement, et à 200s et 300s, le schéma de détachement est stable et périodique, montrant une influence minimale de l'épaisseur réduite par rapport à $G/D=0.1$.

Pour l'obstacle avec des ailettes de longueur $L/D=0.5$ et une épaisseur $G/D=0.025$, les vortex se forment initialement à 50s mais de manière moins distincte qu'avec des ailettes plus épaisses. À 100s, les vortex deviennent plus définis et se détachent régulièrement. À 200s et 300s, le phénomène de vortex de Von Karman est bien établi, avec un détachement périodique similaire aux autres configurations.

Les ailettes plus longues ($L/D=1$) retardent légèrement le détachement initial des vortex par rapport aux ailettes plus courtes ($L/D=0.5$). Ce retard est particulièrement notable dans les premiers instants de l'écoulement, comme à 50s et 100s, où les vortex commencent à se former mais ne se détachent pas encore régulièrement. Cependant, une fois le détachement des vortex établi, le comportement de l'écoulement devient similaire pour les deux configurations de longueur d'ailettes.

En comparant les deux ensembles d'images avec différentes épaisseurs G/D , on constate que la réduction de l'épaisseur des ailettes (G/D passant de 0.1 à 0.025) influence légèrement le début du détachement des vortex. Les ailettes plus minces tendent à permettre un détachement des vortex légèrement plus rapide par rapport aux ailettes plus épaisses. Cependant, une fois le détachement des vortex établi, la stabilité et la périodicité du phénomène de Von Karman restent similaires, indépendamment de l'épaisseur des ailettes. Cela suggère que, bien que l'épaisseur des ailettes puisse affecter le moment initial de formation des vortex, elle a peu d'impact sur le comportement stable à long terme de l'écoulement.

III.4.1.2. Ailettes verticales :

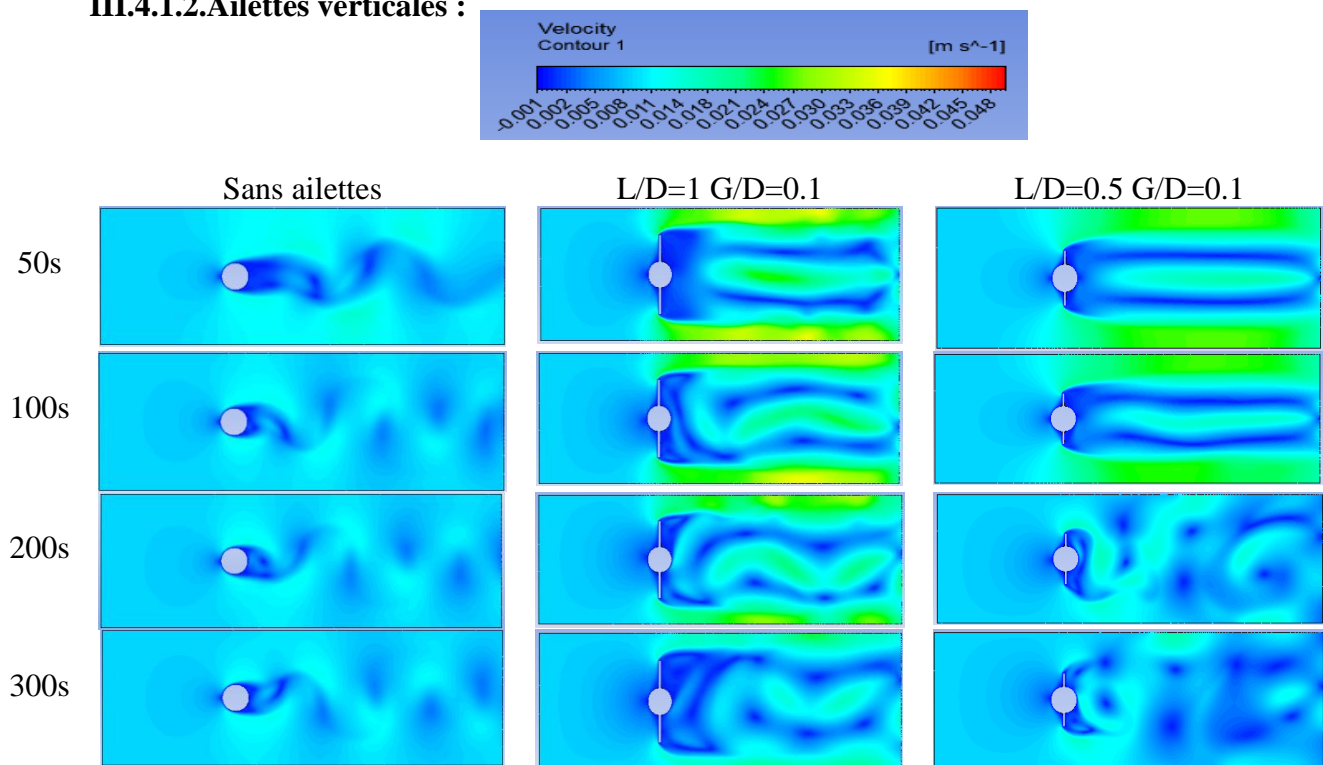


Figure III.11 : contours de vitesse avec ailette verticale $G/D=0.1$ $Re=200$

La Figure III.11 illustre des contours de vitesse dans un écoulement laminaire autour d'un cylindre, avec et sans ailettes verticales avec épaisseur $G/D=0.1$. Elle présente des instantanés

à différentes durées (50s, 100s, 200s et 300s) pour comparer les effets de la présence des ailettes sur le comportement de l'écoulement.

Pour l'obstacle sans ailettes, le détachement des vortex de Von Kármán commence à se manifester dès 50s, avec une croissance progressive de la formation des vortex au fil du temps. À 100s, les vortex sont clairement visibles et deviennent de plus en plus définis à 200s et 300s, indiquant que le système atteint un état stable au fur et à mesure que le phénomène de vortex de Von Kármán se développe.

Dans le cas des ailettes de longueur $L/D=1$, l'apparition des vortex est retardée par rapport au cas sans ailettes. À 50s, l'écoulement reste principalement instable avec peu de formation de vortex. À 100s, quelques signes de détachement commencent à apparaître, mais c'est seulement à 200s et 300s que les vortex de Von Kármán deviennent clairement visibles, montrant que les ailettes retardent l'atteinte de l'état stable en retardant le détachement des vortex.

Pour les ailettes de longueur $L/D=0.5$, l'écoulement montre une instabilité initiale similaire à celle observée avec des ailettes $L/D=1$. À 50s et 100s, il y a peu de formation de vortex. Cependant, à 200s, des signes plus clairs de détachement de vortex apparaissent et à 300s, les vortex de Von Kármán sont bien définis. Cela suggère que, bien que les ailettes de longueur réduite augmentent la stabilité de l'écoulement, elles sont plus efficaces que les ailettes plus longues pour atteindre l'état stable.

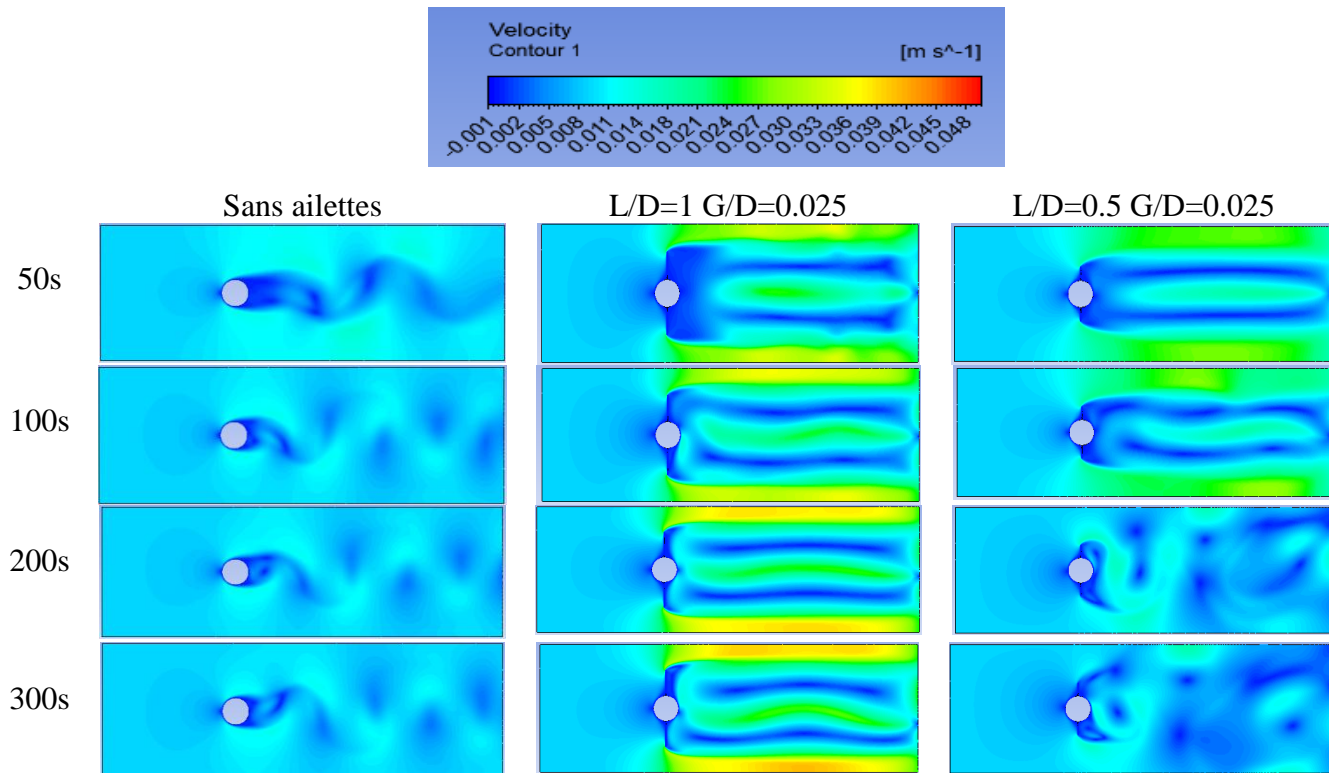


Figure III.12 : contours de vitesse avec ailette verticale $G/D=0.025$ $Re=200$

La **Figure III.12** illustre des contours de vitesse dans un écoulement laminaire autour d'un cylindre, avec et sans ailettes verticales. Cependant, l'épaisseur des ailettes a changé, passant de $G/D=0.1$ à $G/D=0.025$. Elle présente des instantanés à différentes durées (50s, 100s, 200s et 300s) pour comparer les effets de la présence des ailettes sur le comportement de l'écoulement.

Dans le cas des ailettes de longueur $L/D=1$ et d'épaisseur $G/D=0.025$, l'apparition des vortex est encore plus retardée par rapport au cas sans ailettes. À 50s, l'écoulement reste principalement instable avec peu de formation de vortex. À 100s, 200s et 300s, l'écoulement reste instable en l'absence des vortex de Karman. Cela indique que les ailettes retardent l'atteinte de l'état stable en retardant le détachement des vortex, ce qui prolonge ainsi la stabilité de l'écoulement.

Pour les ailettes de longueur $L/D=0.5$ et d'épaisseur $G/D=0.025$, l'écoulement montre une instabilité initiale similaire à celle observée avec des ailettes $L/D=1$. À 50s et 100s, il y a peu de formation de vortex. Cependant, à 200s, des signes plus clairs de détachement de vortex apparaissent et à 300s, les vortex de Von Kármán sont bien définis. Cela suggère que, bien que les ailettes de longueur réduite retardent également la formation des vortex, elles sont plus efficaces que les ailettes plus longues pour atteindre l'état stable, diminuant ainsi la stabilité de l'écoulement.

En comparant les deux figures, nous observons que l'épaisseur des ailettes (G/D) joue un rôle significatif dans la stabilité de l'écoulement. Une épaisseur plus faible ($G/D=0.025$) retarde encore plus l'apparition des vortex de Von Kármán, diminuant ainsi la stabilité de l'écoulement. Cela est particulièrement visible dans les configurations avec des ailettes minces ($G/D=0.025$) où les vortex prennent plus de temps pour se former comparé à la configuration avec des ailettes plus épaisses ($G/D=0.1$).

En conclusion, les ailettes verticales retardent l'apparition des vortex de Von Kármán et diminuent ainsi la stabilité de l'écoulement. Les ailettes plus longues ($L/D=1$) et plus fines ($G/D=0.025$) sont plus efficaces pour retarder le détachement des vortex et retarder l'atteinte d'un état stable comparées aux ailettes plus courtes et plus épaisses.

III.4.2. Analyse des effets des Ailettes sur la distribution de la Vorticité

III.4.2.1. Ailettes horizontales :

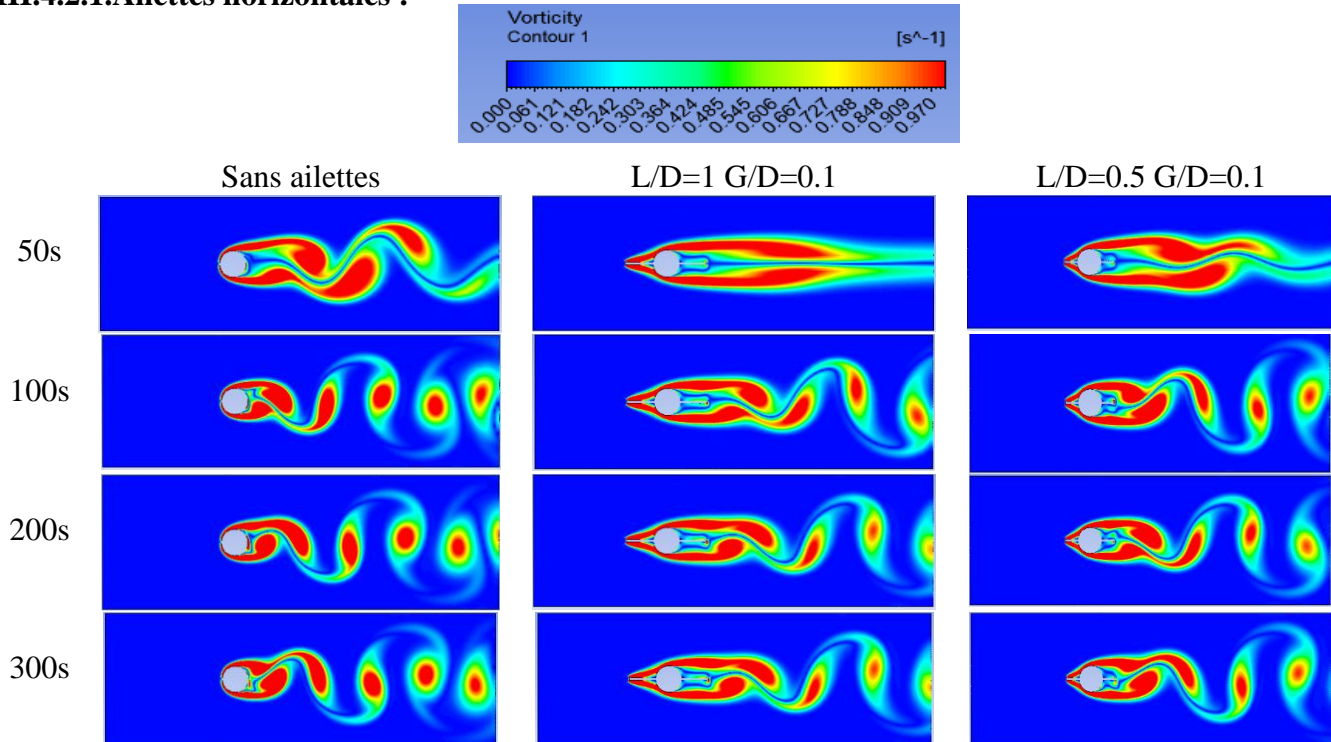


Figure III.13 : contours de vorticité avec ailette horizontale $G/D=0.1$ $Re=200$

L'analyse de **Figure III.13** montre que les vortex de Kármán apparaissent et se détachent plus rapidement dans le cas sans ailettes, suivi par $L/D=0.5$, puis $L/D=1$. L'absence d'ailettes permet un détachement plus immédiat et régulier des tourbillons, tandis que les ailettes allongent le temps de formation et perturbent légèrement la régularité des vortex. À 50s, les tourbillons commencent à se former dans les configurations $L/D=0.5$ et sans ailettes, mais ils sont plus prononcés et réguliers avec sans ailettes. À 100s, les tourbillons deviennent plus distincts, les configurations avec ailettes montrent un écoulement prolongé avant la formation des vortex. À 200s, la formation des tourbillons est bien établie, mais leur structure est plus complexe avec des ailettes, surtout pour $L/D=1$. Enfin, à 300s, les tourbillons sont pleinement développés dans toutes les configurations, mais leur régularité et leur distance de détachement varient significativement. Dans le cas sans ailettes, les tourbillons se forment immédiatement derrière l'obstacle et leur structure reste simple et régulière. Avec des ailettes $L/D=1$ $G/D=0.1$, les tourbillons se forment plus loin de l'obstacle avec une structure plus complexe. Pour $L/D=0.5$ $G/D=0.1$, les tourbillons se forment plus près de l'obstacle comparé à $L/D=1$, mais leur structure est légèrement irrégulière en raison de l'interaction avec les ailettes.

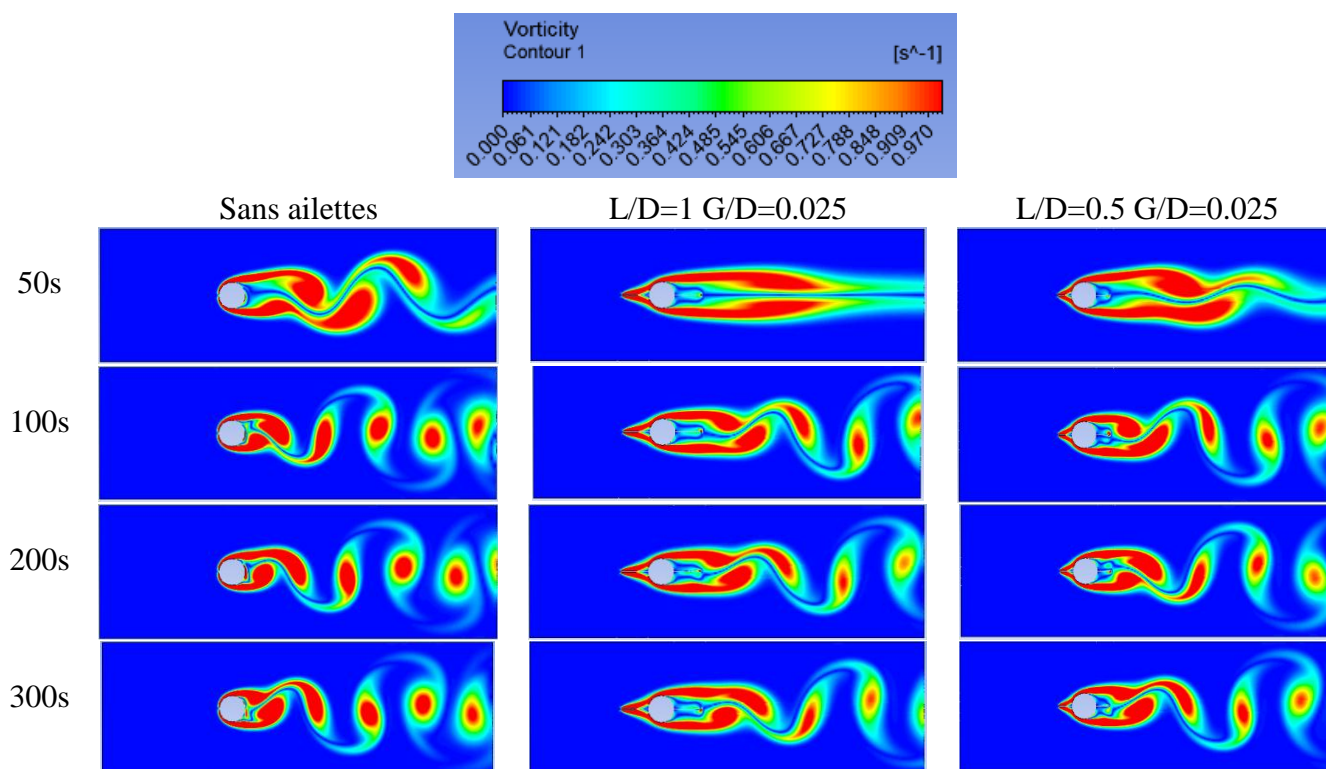


Figure III.14 : contours de vorticité avec ailette horizontale $G/D=0.025$ $Re= 200$

L'analyse de **Figure III.14** montre que les vortex de Kármán apparaissent et se détachent plus rapidement dans le cas sans ailettes, suivi par $L/D=0.5$, puis $L/D=1$. L'absence d'ailettes permet un détachement plus immédiat et régulier des tourbillons, tandis que les ailettes allongent le temps de formation et perturbent légèrement la régularité des vortex.   50s, les tourbillons commencent à se former dans toutes les configurations, mais ils sont plus prononcés et réguliers sans ailettes.   100s, les tourbillons deviennent plus distincts, les configurations avec ailettes montrent un écoulement prolongé avant la formation des vortex.   200s, la formation des tourbillons est bien établie, mais leur structure est plus complexe avec des ailettes, surtout pour $L/D=1$. Enfin, à 300s, les tourbillons sont pleinement développés dans toutes les configurations, mais leur régularité et leur distance de détachement varient significativement.

Dans le cas sans ailettes, les tourbillons se forment immédiatement derrière l'obstacle et leur structure reste simple et régulière. Avec des ailettes $L/D=1$ $G/D=0.025$, les tourbillons se forment plus loin de l'obstacle avec une structure plus complexe. Pour $L/D=0.5$ $G/D=0.025$, les tourbillons se forment plus près de l'obstacle comparé à $L/D=1$, mais leur structure est légèrement irrégulière en raison de l'interaction avec les ailettes.

En comparant les deux séries d'images avec $G/D=0.1$ et $G/D=0.025$, on observe que l'épaisseur G/D a une influence notable sur la formation et la structure des tourbillons. Une épaisseur plus

faible ($G/D=0.025$) entraîne un détachement des tourbillons légèrement plus rapide et une structure des vortex moins perturbée par les ailettes. Ainsi, une épaisseur plus fine des ailettes réduit leur impact sur la régularité et la complexité des tourbillons formés derrière l'obstacle. En conclusion, l'épaisseur des ailettes joue un rôle important dans la dynamique des tourbillons de Kármán, avec des ailettes plus fines ayant un effet moindre sur la perturbation de l'écoulement et permettant un retour plus rapide à un état de détachement régulier des tourbillons.

III.4.2.2. Ailettes verticales :

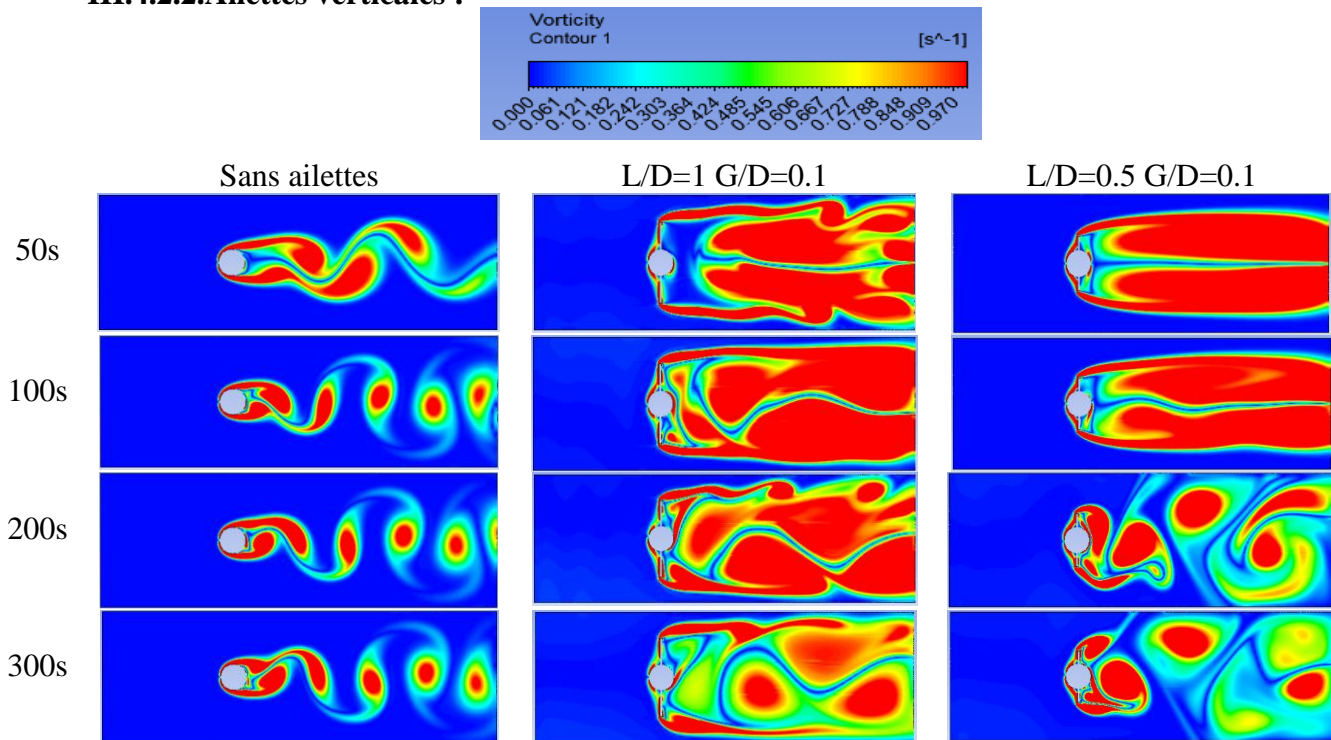


Figure III.15 : contours de vorticité avec ailettes verticales $G/D=0.1$ $Re= 200$

L'analyse des différents cas de Figure III.15 montre que la présence et la taille des ailettes influencent significativement la formation et la structure des tourbillons à chaque intervalle de temps. Dans le cas sans ailettes, les premiers signes de formation de tourbillons apparaissent derrière l'obstacle à 50 secondes, avec des structures qui ne sont pas encore pleinement développées.   100 secondes, les vortex de Kármán sont bien formés et se détachent périodiquement, créant des structures alternées claires.   200 secondes, les structures de vortex sont bien développées et se propagent en aval de manière régulière et périodique, avec un détachement stable et soutenu. Enfin, à 300 secondes, les vortex de Kármán sont bien établis et continuent de se détacher de manière périodique, maintenant des structures stables et uniformes sur une longue distance en aval.. Avec des ailettes de taille $L/D=1$, les tourbillons, bien que reconnaissables, sont plus perturbés.   50s, la formation des tourbillons est légèrement

perturbée dans un écoulement symétrique. À 100s, les tourbillons continuent à se développer mais avec une régularité réduite. À 200s, les vortex montrent des perturbations, et à 300s, la structure des tourbillons reste perturbée, avec des vortex plus gros et une régularité réduite. La réduction de la taille des ailettes ($L/D=0.5$) entraîne une perturbation plus marquée, avec une structure de vortex moins régulière et plus complexe. À 50s, les tourbillons apparaissent plus déformés et moins réguliers dans un écoulement symétrique. À 100s, la structure est plus désordonnée. À 200s, les tourbillons sont chaotiques et irréguliers avec grand dimension, et à 300s, ils forment une structure très désordonnée. La vitesse de formation des tourbillons est également affectée par les ailettes, avec un détachement plus lent et moins uniforme pour les configurations avec ailettes, en particulier pour $L/D=0.5$. En résumé, les ailettes modifient non seulement la forme et les dimensions des vortex, mais également leur fréquence de détachement et la régularité de la ligne de Von Kármán, soulignant l'importance de la géométrie de l'obstacle sur les caractéristiques de l'écoulement.

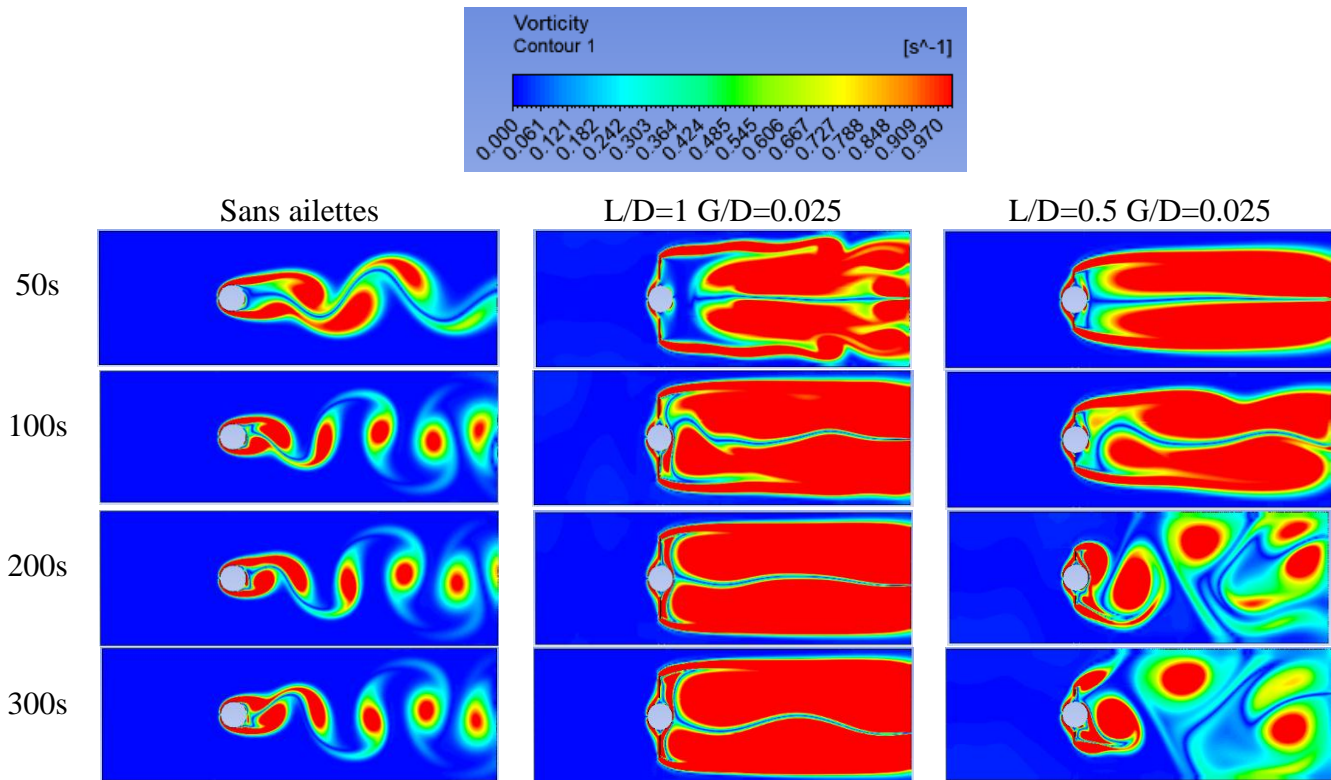


Figure III.16 : contours de vorticité avec ailettes verticales $G/D=0.025$ $Re= 200$

L'analyse de la **Figure III.16** montre que la présence d'ailettes influence significativement la structure des tourbillons à chaque intervalle de temps.

Pour la configuration avec des ailettes ayant un rapport $L/D=1$ et $G/D=0,025$, celles-ci retardent le détachement à chaque intervalle de temps, ce qui empêche la formation du phénomène de Von K rman.

En ce qui concerne les ailettes de rapport $L/D=0.5$ $G/D=0.025$, la formation des tourbillons à 50 secondes est intermédiaire, les vortex commençant à se détacher mais avec une perturbation dans leur structure initiale due aux ailettes plus courtes. À 100 secondes, les tourbillons deviennent plus distincts et commencent à se détacher, mais montrent des signes d'instabilité et de perturbation. À 200 secondes, les tourbillons sont plus nombreux et se détachent plus rapidement, avec une structure plus chaotique et des vortex se mélangeant et perdant leur forme régulière en aval. Enfin, à 300 secondes, les tourbillons se détachent rapidement et montrent une structure désorganisée et chaotique, avec une instabilité plus prononcée et des vortex se déformant rapidement après leur détachement.

Une épaisseur plus faible ($G/D=0,025$) comparée à une épaisseur plus grande ($G/D=0,1$) semble légèrement réduire la perturbation des tourbillons, bien que les effets de perturbation persistent, surtout avec des ailettes plus longues. La longueur des ailettes influence la vitesse de l'initiation du détachement, des ailettes plus courtes ($L/D=0,5$) accélèrent ce processus, entraînant un temps de stabilisation plus court.

Conclusion générale

Conclusion générale

D'après les résultats obtenus on peut conclure :

1. Minimisation de la traînée :

- Utilisation d'ailettes horizontales pour réduire la traînée moyenne.
- Ailettes parallèles à l'écoulement retardent légèrement le détachement des vortex de Von Karman.
- Ailettes plus longues retardent davantage le détachement des vortex.
- Ailettes plus fines entraînent un détachement des vortex légèrement plus rapide que les ailettes plus épaisses.

2. Augmentation du coefficient de portance :

- Utilisation d'ailettes verticales pour augmenter sensiblement la portance.
- Augmentation conséquente du coefficient de traînée avec les ailettes verticales.
- Ailettes verticales avec un rapport (L/D) de 1 sont les plus efficaces pour stabiliser la portance à travers toutes les configurations de rapport (G/D).

3. Stabilisation et réduction des oscillations :

- Configurations avec $G/D = 0.025$ et $L/D = 1$ ainsi que $L/D = 0.75$ avec des ailettes verticales minimisent les oscillations et stabilisent la traînée.
- Ailettes verticales modifient la forme, les dimensions et la fréquence de détachement des vortex, ainsi que la régularité de la ligne de Von Kármán.
- Ailettes plus longues ($L/D = 1$) et plus fines ($G/D = 0.025$) retardent le détachement des vortex.
- Ailettes plus courtes ($L/D = 0.5$) accélèrent le détachement des vortex, entraînant un temps de stabilisation plus court.

4. Impact de la longueur relative des ailettes horizontales (L/D) :

- Affecte la dynamique des tourbillons, leur formation, leur régularité et leur distance de détachement.
- Ailettes horizontales plus fines perturbent moins l'écoulement, permettant un retour plus rapide à un état de détachement régulier des tourbillons de Kármán.

5. Impact des ailettes verticales :

- Modifient la structure de la ligne de Von Kármán, retardent l'apparition des vortex et diminuent la stabilité de l'écoulement.
- Ailettes plus longues ($L/D = 1$) et plus fines ($G/D = 0.025$) sont plus efficaces pour retarder le détachement des vortex et atteindre un état stable comparées aux ailettes plus courtes et plus épaisses.

Références Bibliographie

Références Bibliographie

- [1] DANIEL Cauvin, (Aérodynamique, mécanique de vol), université aéronautique Jean Mermoz, France, 1990.
- [2] 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).
- [3] B.F.Z. GUELAILIA , S. MERABET . Simulation numérique d'un écoulement laminaire autour d'un cylindre avec rainure .2019.
- [4]<https://fr.slideshare.net/slideshow/couches-limites-laminaire-et-turbulente/254860362>
- [5] Pascal Dereumaux. Mesure et capteurs de débit.21/09/2001.
- [6] Spéciale PSI - Cours "Mécanique des fluides"- Etude phénoménologique des fluides- Chapitre II : Classification des écoulements.
- [7] 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.
- [8] D.Calluaud, L.David, S. Rouvreau, P. Joulain. Ecoulement laminaire autour d'un cylindre de section carrée comparaison calculé expérimental Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques (UMR 6609-CNRS) Boulevard Pierre et Marie Curie Téléport 2, B.P. 30179 86960 FUTUROSCOPE Cedex. 2001.
- [9] 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 & 29AVRIL 2002.
- [10] 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.

- [11] 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.
- [12] P. Ribot et 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. 2007».
- [13] Xu Liu, Nan Gui, Hao Wu, Xingtuan Yang, Jiyuan Tu, Shengyao Jiang. Numerical simulation of flow past stationary and oscillating deformable circles with fluid–structure interaction. Tsinghua University Press. 2019.
- [14] A. Sohankar, E. Rangraz, M. Khodadadi, Md. Mahbub Alam. Fluid flow and heat transfer around single and tandem square cylinders subjected to shear flow. *The Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering* 2020.
- [15] J. M. Bergada, Bo An, F. Mellibovsky, W. M. Sang, C. Xi. Numerical investigation on the flow around a square cylinder with an upstream splitter plate at low Reynolds numbers. *Springer Nature B.V.* 2020.
- [16] Zakaria RAHMANI, Yacine KAHIL, Abdelkrim BENLEFKI. Étude numérique d'écoulement turbulent autour de quatre cylindres en configuration carré. *Université des Sciences et de Technologie d'Oran-Mohamed Boudiaf, Algérie.* 2019.
- [17] https://energetique.uae.ma/formations/cours_informations/cours/cours_kharbouch/GE%20S2%20cours%20Volumes%20Finis.pdf : Modélisation et simulation numérique des systèmes énergétique par éléments et volumes finis
- [18] R. Ait Ameer, B. Ait-Ferhat, S. Issadoudene. Simulation Numérique d'un Ecoulement Autour d'un Obstacle. 2019.
- [19] Lai M-C, Peskin CS. An immersed boundary method with formal second-order accuracy and reduced numerical viscosity. *J Comput Phys* 2000;160:705–19.
- [20] Linwei Shen et al., Calculation of hydrodynamic forces acting on a submerged moving object using immersed boundary method, *J Computers & Fluids* 2009 691–702.