

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**



**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE**  
**BLIDA 1**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE MECANIQUE**



**Projet de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de Master en**  
**Génie mécanique option énergétique**

## **Thème :**

**Étude du comportement hydrodynamiques d'un écoulement autour de deux**  
**cylindres avec des ailettes en arrangement vertical**

**Promoteur : Dr. Bensedira Sidali**

**Présenter par :**

**MEZIANI Toufik**

**BOUCHETARA Islem**

**Promotion : 2024/2025**

## **REMERCIEMENTS**

*Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.*

*Je remercie l'ensemble du corps enseignant et administratif pour la qualité de la formation reçue tout au long de mon parcours universitaire, ainsi que pour l'encadrement et le soutien apportés tout au long de ce travail.*

*Nous sommes reconnaissants envers Dr.Bensedira Sidali pour son encadrement, sa disponibilité et son dévouement qui ont contribué à la réussite de ce travail.*

Enfin, j'adresse ma profonde reconnaissance à ma famille et à mes proches pour leur soutien moral, leur patience et leur confiance, qui m'ont permis d'avancer sereinement jusqu'à l'aboutissement de ce projet.

## **Dédicace**

Nous dédions ce travail de fin d'études à nos parents qui nous ont toujours soutenus dans nos études malgré les hauts et les bas qu'on a rencontré, À notre famille élargie, pour leurs encouragements constants et leur présence rassurante qui nous ont permis de surmonter les moments difficiles. Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude envers nos amis, dont la camaraderie, l'aide précieuse et les mots réconfortants ont été d'une valeur inestimable tout au long de notre parcours. Enfin, à tous ceux qui ont cru en nous, qui ont soutenu nos efforts et nos choix, et qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire, nous vous adressons nos remerciements les plus sincères. Ce travail est le fruit de votre soutien et de votre confiance

## **Table des matières**

### **Table des matières**

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralité et étude bibliographique.....</b>	<b>4</b>
<b>I.1 Introduction générale : .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2 Généralités sur la mécanique des fluides .....</b>	<b>4</b>
I.2.1 Propriétés des fluides.....	5
I.2.2 L'écoulement de fluide.....	5
I.2.2.1 La masse volumique .....	5
I.2.2.2 La viscosité .....	6
I.2.2.2.1 La viscosité dynamique.....	6
I.2.2.2.2 La viscosité cinématique .....	6
I.2.3 Écoulement des fluides .....	6
I.2.3.1 Écoulement incompressible.....	6
I.2.3.2 Écoulement compressible.....	7
I.2.3.3 Écoulement stationnaire.....	7
I.2.3.4 Écoulement non stationnaire.....	7
I.2.3.5 Écoulement visqueux .....	8
I.2.3.6 Écoulement non visqueux .....	8
I.2.3.7 Écoulement stable .....	8
I.2.3.8 Écoulement instable .....	8
<b>I.3 Régime d'écoulement .....</b>	<b>9</b>
I.3.1 Régime laminaire .....	9
I.3.2 Régime turbulent .....	10
I.3.3 Régime transitoire.....	10
<b>I.4 Écoulement autour des obstacles .....</b>	<b>11</b>
<b>I.5 Études expérimentales de l'affouillement local autour des piles de pont.....</b>	<b>11</b>
<b>I.6 Simulation numérique de l'écoulement autour d'un cylindre monté sur un lit .....</b>	<b>14</b>
<b>I.7 Écoulement autour d'un cylindre circulaire .....</b>	<b>15</b>
<b>I.8 Perspectives et Travaux Futurs.....</b>	<b>16</b>
I.8.1 Objectifs des travaux futurs.....	17

## **Table des matières**

<b>I.9 Conclusion.....</b>	<b>17</b>
<b>Chapitre II : Formulation mathématique et modélisation numérique .....</b>	<b>20</b>
<b>II.1 Formulation Mathématique.....</b>	<b>20</b>
<b>II.2 Equation de conservation de la masse .....</b>	<b>20</b>
II.2.1 Forme différentielle.....	20
II.2.2 Cas particulier d'un fluide incompressible .....	21
II.2.3 Interprétation physique.....	21
II.2.4 Applications en simulation numérique .....	21
II.2.5 Équation de continuité .....	21
II.2.5 Équation de continuité (conservation de la masse).....	21
II.2.6 Équation de quantité de mouvement (équation de Navier-Stokes) .....	22
<b>II.3 Coefficients de portance et de traînée .....</b>	<b>22</b>
II.3.1 Définitions fondamentales .....	22
II.3.2 Cas d'un cylindre isolé.....	23
II.3.3 Distribution des forces selon la distance inter-cylindres .....	23
II.3.4 Interprétation physique.....	23
<b>II.4 Résolution numérique .....</b>	<b>24</b>
II.4.1 Principe de la méthode de différence finies.....	24
II.4.2 La méthode des volumes finis .....	24
II.4.2.1 Principe fondamental .....	24
II.4.3 Méthode des différences finies .....	25
II.4.4 Maillage .....	26
II.4.5 Géométrie.....	27
II.4.5.1 Cas avec ailettes .....	28
II.4.6 Configuration .....	28
II.4.7 Solution .....	31
<b>II.5 Conclusion.....</b>	<b>31</b>
<b>Chapitre III : Résultats et discussions .....</b>	<b>33</b>
<b>III.2 Structure du code ANSYS CFX.....</b>	<b>33</b>
III.2.1 Résultats et interprétation .....	33
III.2.2 Variation de la Portance moyen et la traînée moyen pour l'obstacle avec ailettes verticales : .....	35

## **Table des matières**

III.2.3 Comportement de Portance pour l'obstacle avec ailettes et sans ailette verticale ...	44
<b>III.3 Résultants de simulation numérique .....</b>	<b>52</b>
<b>III.4 Récapitulation des résultats.....</b>	<b>63</b>
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>	<b>65</b>
<b>Référence bibliographique .....</b>	<b>66</b>

## Liste des figures

### Liste des figures :

Figure	Nom	Page
Figure I-1	Fluide gazeux et liquide et solide	4
Figure I-2	Profil du régime laminaire	9
Figure I-3	Profil du régime turbulent	10
Figure I-4	Ecoulement autour d'un cylindre circulaire	15
Figure II-1	La portance et la traînée	22
Figure II-2	Maillage du modèle ( $L/D=0.5$ $L=3D$ ) axe (x-y)	26
Figure II-3	Géométrie du modèle ( $L/D=0.5$ $L=3D$ ) axe (x-y-z)	27
Figure II-4	Schéma cas avec ailette	27
Figure II-5	Caractéristiques du liquide	30
Figure III-1	Variation de Portance moyenne en fonction du $L/D$ avec ailettes verticales a $Re=200$	36
Figure III-2	Variation de Portance moyenne en fonction du $L/D$ avec ailettes vertical a $Re=200$	37
Figure III-3	Variation de Portance moyenne en fonction du $L/D$ avec ailettes vertical a $Re=200$	38
Figure III-4	Variation de Portance moyenne en fonction du $L/D$ avec ailettes vertical a $Re=200$	39
Figure III-6	Variation de Traînée moyenne en fonction du $L/D$ avec ailettes verticales a $Re=200$	41
Figure III-7	Variation de Traînée moyenne en fonction du $L/D$ avec ailettes verticales a $Re=200$	42
Figure III-8	Variation de Traînée moyenne en fonction du $L/D$ avec ailettes verticales a $Re=200$	43
Figure III-9	Variation de portance moyenne en fonction du $L/D = 2$ avec ailettes verticales a $Re=200$	44
Figure III-10	Variation de portance moyenne en fonction du $L/D=4$ avec ailettes verticales a $Re=200$	45
Figure III-11	Variation de portance moyenne en fonction du $L/D=1.5$ avec	46

## Liste des figures

	ailettes verticales a $Re=200$	
<b>Figure III-12</b>	Variation de portance moyenne en fonction du $L/D=4$ avec ailettes verticales a $Re=200$	47
<b>Figure III-13</b>	Variation de portance moyenne en fonction du $L/D= 1.5$ avec ailettes verticales a $Re=200$	48
<b>Figure III-14</b>	Variation de portance moyenne en fonction du $L/D= 3$ avec ailettes verticales a $Re=200$	49
<b>Figure III-15</b>	Variation de portance moyenne en fonction du $L/D= 1.5$ avec ailettes verticales $Re=200$	50
<b>Figure III-16</b>	Variation de portance moyenne en fonction du $L/D= 3$ avec ailettes verticales a $Re=200$	51
<b>Figure III-17</b>	Validation sans ailette étape 1	52
<b>Figure III-18</b>	Validation sans ailette étape 2	53
<b>Figure III-19</b>	Validation sans ailette étape 3	54
<b>Figure III-20</b>	Validation avec ailette étape 1	55
<b>Figure III-21</b>	Validation avec ailette étape 2	56
<b>Figure III-22</b>	Validation avec ailette étape 3	57
<b>Figure III-23</b>	Validation avec ailette étape 4	58
<b>Figure III-24</b>	Validation avec ailette étape 5	59
<b>Figure III-25</b>	Validation avec ailette étape 6	60
<b>Figure III-26</b>	Validation avec ailette étape 7	61
<b>Figure III-27</b>	Validation avec ailette étape 8	62



## Liste des tableaux :

## Liste des tableaux :

Tableau	Nom du tableau	Page
<b>Tableau 2.1</b>	Caractéristiques du liquide	29
<b>Tableau 2.2</b>	Les conditions d'entrée et de sortie	30
<b>Tableau 2.3</b>	Modèle de turbulence appropriés	30
<b>Tableau 2.4</b>	Les expressions utilisées	31
<b>Tableau 3.1</b>	Résultats des simulations sans ailette un cylindre $Re=200$	34
<b>Tableau 3.2</b>	Résultats des simulations sans ailette deux cylindre $Re=200$	34
<b>Tableau 3.3</b>	Résultats des simulations avec ailette deux cylindre $Re=200$	35
<b>Tableau 3.4</b>	Résultats des simulations avec ailette deux cylindre $Re=200$	35

## Liste des symboles

### Liste des symboles :

$\rho$	La masse volumique du fluide (kg/m <sup>3</sup> ).
$\vec{V}$	Le vecteur vitesse du fluide (m/s).
$V$	Le volume de contrôle (m <sup>3</sup> ).
$S$	La surface qui entoure le volume de contrôle(m <sup>2</sup> ).
$\vec{u}$	Le vecteur vitesse du fluide(m/s).
$p$	La pression (Pa).
$\mu$	La viscosité dynamique (Pa·s).
$\vec{f}$	Le vecteur des forces volumiques (ex. : gravité) (N/m <sup>3</sup> ).
$\nabla^2 \vec{u}$	Le Laplacien de la vitesse, représentant la diffusion visqueuse.
$((\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u})$	Le terme de convection inertielle.
$F_D$	Force de traînée parallèle à l'écoulement (N).
$F_L$	Force de portance perpendiculaire à l'écoulement (N).
$U_\infty^2$	Vitesse de l'écoulement en amont (m/s).
$D$	Diamètre du cylindre (m).
$L$	Longueur du cylindre dans la direction perpendiculaire au plan d'écoulement (m).

Introduction

Générale

## **Introduction générale**

L'étude des écoulements autour de corps immergés représente un domaine fondamental de la mécanique des fluides, en raison de ses implications directes dans les secteurs du génie civil, maritime, énergétique et environnemental. Les structures cylindriques, notamment, sont fréquemment rencontrées dans les ouvrages d'art, les échangeurs de chaleur et les capteurs immergés. Leur interaction avec le fluide ambiant donne lieu à des phénomènes complexes tels que la formation de sillages, le détachement tourbillonnaire, ou encore la génération de forces hydrodynamiques importantes.

Dans ce contexte, le présent travail s'intéresse spécifiquement à l'écoulement autour de deux cylindres circulaires en arrangement vertical, avec ou sans ailettes. L'objectif principal est de comprendre l'impact de cette configuration sur les coefficients de portance et de traînée, à travers une étude par simulation numérique utilisant le logiciel ANSYS CFX.

Le **chapitre I** pose le cadre scientifique général de l'étude. Il débute par une revue de littérature sur les recherches expérimentales et numériques concernant l'affouillement local autour des piles, les vortex générés par les structures cylindriques, et les effets dynamiques associés. Il présente également les notions essentielles de mécanique des fluides : propriétés des fluides, types d'écoulements, régimes laminaire et turbulent, ainsi que les principales interactions fluide-obstacle. Ce chapitre permet de situer la problématique dans son contexte théorique et d'en dégager les enjeux.

Le **chapitre II** est dédié à la formulation mathématique du problème et à la modélisation numérique mise en œuvre. Les équations fondamentales (conservation de la masse, équations de Navier-Stokes) y sont exposées, ainsi que les méthodes de discrétisation adoptées, notamment les différences finies et les volumes finis. Le processus de simulation avec ANSYS CFX est détaillé : génération du maillage, modélisation de la géométrie, choix des conditions aux limites et sélection des modèles de turbulence. Cette section établit le lien entre les lois physiques et leur implémentation informatique.

Le **chapitre III** présente enfin les résultats issus des simulations numériques. Une analyse comparative est menée entre les différentes configurations géométriques (avec et sans ailettes, pour plusieurs rapports  $L/D$ ). L'évolution des coefficients aérodynamiques est étudiée en fonction des paramètres testés, et les résultats sont discutés en regard des données de la littérature. Ce chapitre met en évidence les effets des ailettes sur les efforts hydrodynamiques, et propose une validation du modèle numérique utilisé.

## Introduction générale

Ainsi, ce mémoire combine rigueur théorique, approche numérique avancée et analyse physique approfondie, dans le but de mieux comprendre les mécanismes d'interaction fluide-structure, et d'apporter des éléments utiles à la conception optimisée de systèmes immergés.

**Chapitre I :**  
**Généralité et**  
**étude**  
**bibliographique**

## **Chapitre I : Généralité et étude bibliographique**

### **I.1 Introduction générale :**

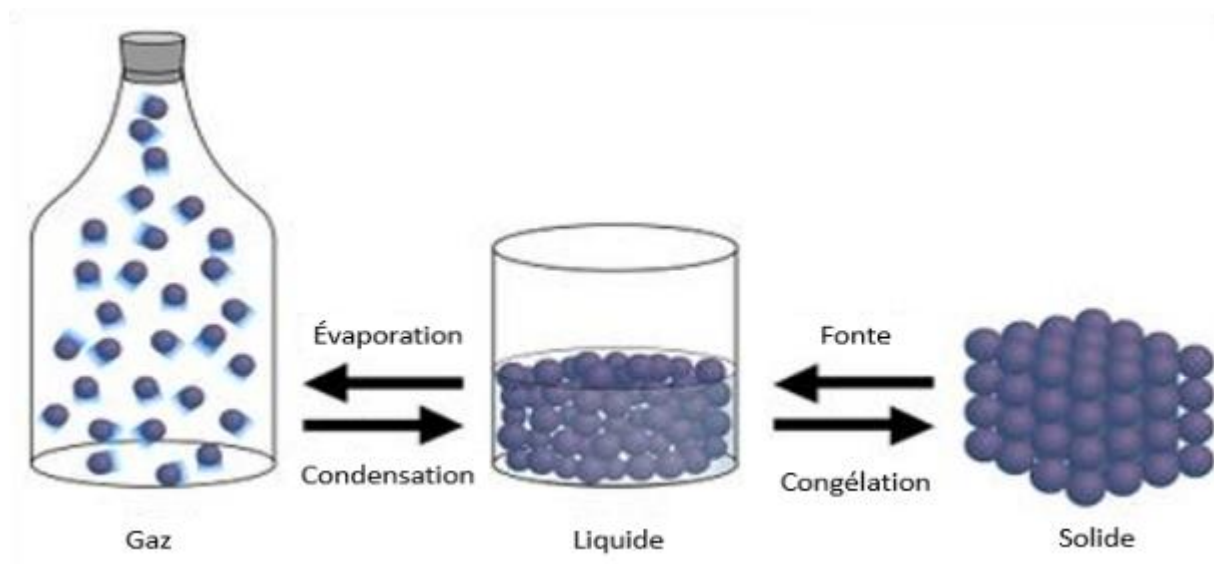
Ce chapitre de ce mémoire vise à poser les bases scientifiques nécessaires à la compréhension du comportement hydrodynamique de deux cylindres circulaires en arrangement vertical, avec ou sans ailettes. Il présente une revue bibliographique approfondie des travaux expérimentaux et numériques traitant de l'écoulement autour de structures immergées, en mettant l'accent sur des phénomènes clés tels que l'affouillement local, la formation des vortex (notamment les vortex en fer à cheval et de sillage).

Il introduit également les concepts fondamentaux de la mécanique des fluides, tels que les propriétés physiques des fluides, les types d'écoulements (stationnaire, instationnaire, laminaire, turbulent), ainsi que les notions de stabilité et de régimes d'écoulement. Une attention particulière est accordée aux phénomènes de transition et d'interaction fluide-structure, notamment dans le cas de configurations complexes impliquant plusieurs obstacles.

En posant ce cadre théorique, ce chapitre permet de contextualiser les objectifs du travail de recherche, d'identifier les enjeux scientifiques associés à la modélisation de ces écoulements, et de dégager les pistes d'analyse qui seront développées dans les chapitres suivants à travers la formulation mathématique et la simulation numérique.

### **I.2 Généralités sur la mécanique des fluides**

La mécanique des fluides est une branche de la mécanique qui étudie le comportement des liquides et des gaz lorsqu'ils sont soumis à des forces. Elle repose sur les lois fondamentales de la physique telles que la conservation de la masse, de la quantité de mouvement (deuxième loi de Newton) et de l'énergie. Cette discipline permet de décrire et de prédire les mouvements des fluides, ainsi que leurs interactions avec les surfaces solides ou d'autres fluides.



**Figure I-1 : Fluide gazeux et liquide et solide**

### **I.2.1 Propriétés des fluides**

La compréhension des propriétés physiques des fluides constitue une étape essentielle dans l'étude de la mécanique des fluides. Ces propriétés déterminent le comportement du fluide en présence de forces extérieures, d'obstacles ou de gradients de pression et de température. Un fluide, qu'il soit liquide ou gaz, se caractérise notamment par sa capacité à s'écouler sous l'effet d'une contrainte, même faible, ce qui le distingue des solides.

Parmi les propriétés fondamentales à prendre en compte figurent :

### **I.2.2 L'écoulement de fluide**

L'écoulement d'un fluide désigne le déplacement organisé d'une substance fluide (liquide ou gaz) sous l'effet de forces extérieures (pression, gravité, etc.) ou internes (forces visqueuses), au cours duquel les particules du fluide changent continuellement de position les unes par rapport aux autres. Ce mouvement peut être régulier ou chaotique selon les conditions physiques du système, telles que la vitesse, la viscosité et la géométrie du domaine d'écoulement.

#### **I.2.2.1 La masse volumique**

La masse volumique est la quantité de masse contenue dans un volume donné d'un fluide. Elle est une propriété intensive, essentielle pour caractériser les écoulements, la pression hydrostatique, la portance, ou encore la poussée d'Archimède.



### **I.2.2.2 La viscosité**

La viscosité est une propriété physique fondamentale des fluides qui exprime leur résistance à l'écoulement. Elle mesure la capacité d'un fluide à s'opposer aux déformations provoquées par une contrainte de cisaillement. En d'autres termes, c'est la tendance d'un fluide à « s'accrocher » à lui-même ou aux surfaces qu'il touche, ce qui ralentit son mouvement relatif.

Un fluide hautement visqueux (comme le miel ou l'huile) s'écoule lentement, tandis qu'un fluide faiblement visqueux (comme l'eau ou l'air) s'écoule plus facilement. La viscosité joue un rôle essentiel dans la dynamique des fluides, en particulier dans les forces de frottement internes, la formation des couches limites, et la transition entre les régimes laminaire et turbulent. [35]

#### **I.2.2.2.1 La viscosité dynamique**

La viscosité dynamique, notée généralement  $\mu$  est une propriété physique qui mesure la résistance interne d'un fluide à l'écoulement lorsqu'il est soumis à une contrainte. Elle représente les forces de frottement moléculaires qui s'opposent au glissement des couches de fluide les unes sur les autres. Cette viscosité dépend de la nature du fluide et de sa température. Elle s'exprime en pascal-seconde dans le système international.

#### **I.2.2.2.2 La viscosité cinématique**

La viscosité cinématique, notée  $\nu$  est le rapport entre la viscosité dynamique et la masse volumique du fluide. Elle représente la capacité d'un fluide à s'écouler sous l'effet de sa propre inertie, indépendamment des forces extérieures. La viscosité cinématique s'exprime en mètre carré par seconde ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

### **I.2.3 Écoulement des fluides**

L'écoulement des fluides désigne le mouvement d'un fluide, liquide ou gaz, lorsqu'il se déplace sous l'effet de forces internes (comme la viscosité) ou externes (comme la gravité ou la pression). Ce mouvement est caractérisé par des grandeurs telles que la vitesse, la pression, la densité et la température, qui peuvent varier dans l'espace et dans le temps. L'écoulement peut être régulier ou instable, lent ou rapide, et se produit dans des milieux naturels (rivières, atmosphère) ou des systèmes techniques

#### **I.2.3.1 Écoulement incompressible**

Un écoulement incompressible est un écoulement dans lequel la densité du fluide reste constante au cours du temps et dans tout le domaine d'écoulement. Cela signifie que le volume

élémentaire de fluide ne change pas lorsqu'il se déplace. Cette hypothèse est généralement valable pour les liquides, qui ont une compressibilité très faible, mais elle peut également être appliquée aux gaz à faible vitesse. [36]

### **I.2.3.2 Écoulement compressible**

Un écoulement compressible est un type d'écoulement dans lequel la densité du fluide varie sensiblement dans le temps et/ou dans l'espace, généralement en réponse à des variations de pression et de température. Cette variation de densité implique que le volume spécifique du fluide change, ce qui rend nécessaire la prise en compte des relations thermodynamiques (pression-température-densité) dans l'analyse de l'écoulement.

### **I.2.3.3 Écoulement stationnaire**

Un écoulement stationnaire (ou permanent) est un régime d'écoulement dans lequel les grandeurs physiques caractéristiques du fluide telles que la vitesse, la pression, la température et la densité ne varient pas dans le temps en un point donné de l'espace. Autrement dit, si l'on observe un point fixe dans le domaine d'écoulement, les propriétés du fluide qui y passent restent constantes au cours du temps, même si elles peuvent changer d'un point à un autre dans l'espace.

Ce type d'écoulement est typique des systèmes établis, comme l'écoulement dans une canalisation fonctionnant de manière continue ou autour d'un objet immobile dans un fluide en régime constant. À l'inverse, un écoulement instationnaire présente des variations temporelles, par exemple lors d'une mise en marche, d'un arrêt, ou d'une variation cyclique de l'écoulement.

### **I.2.3.4 Écoulement non stationnaire**

Un écoulement non stationnaire est un écoulement dans lequel les propriétés du fluide telles que la vitesse, la pression, la température ou la densité) varient avec le temps à un emplacement donné. Cela signifie que si l'on observe un point fixe dans le domaine d'écoulement, les caractéristiques du fluide à ce point changent au fil du temps, contrairement à un écoulement stationnaire où elles restent constantes.

Ce type d'écoulement est typique des phénomènes transitoires, tels que le démarrage ou l'arrêt de machines, les variations cycliques dans les moteurs, ou les ondes de choc. L'analyse d'un écoulement instationnaire requiert l'intégration du temps comme variable explicite dans les équations de conservation.

### **I.2.3.5 Écoulement visqueux**

Un écoulement visqueux est un type d'écoulement dans lequel les effets de viscosité c'est-à-dire les forces de frottement internes entre les couches de fluide jouent un rôle important dans le comportement global du fluide. Contrairement à un écoulement idéal (ou non visqueux), où la viscosité est négligée, un écoulement visqueux prend en compte la résistance interne au cisaillement, ce qui conduit à des pertes d'énergie sous forme de chaleur et à la formation de couches limites près des parois solides. Dans un écoulement visqueux, la vitesse du fluide varie selon la position, en particulier près des surfaces solides où la vitesse relative du fluide par rapport à la paroi est nulle (condition de non-glissement). Cela entraîne des profils de vitesse caractéristiques et des gradients de contrainte de cisaillement importants.

### **I.2.3.6 Écoulement non visqueux**

Un écoulement non visqueux (ou écoulement idéal) est un modèle théorique d'écoulement dans lequel les effets de viscosité sont négligés. Autrement dit, on suppose que le fluide ne présente aucune résistance interne au cisaillement, ce qui signifie qu'il n'y a pas de frottements entre les différentes couches de fluide ni entre le fluide et les parois. Cette hypothèse simplificatrice permet d'analyser les écoulements de manière plus accessible, notamment dans les études préliminaires ou pour obtenir des solutions analytiques approximatives.

### **I.2.3.7 Écoulement stable**

Un écoulement stable est un type d'écoulement dans lequel, lorsqu'une petite perturbation est introduite dans le fluide, cette perturbation s'atténue avec le temps et le fluide revient progressivement à son état initial. Cela signifie que l'état d'écoulement est résistant aux perturbations, et que le système tend naturellement à conserver sa structure. La stabilité d'un écoulement dépend de nombreux facteurs : la vitesse, la géométrie du domaine, les propriétés physiques du fluide (comme la viscosité), et les conditions aux limites. En général, les écoulements laminaires sont plus stables que les écoulements turbulents. Un écoulement peut être stationnaire mais instable, ou instationnaire mais stable, selon l'évolution des perturbations. L'analyse de la stabilité est essentielle dans de nombreux domaines : elle permet, par exemple, de prévoir la transition d'un écoulement laminaire à un écoulement turbulent, ou de comprendre la formation d'ondes, de vortex ou d'instabilités hydrodynamiques.

### **I.2.3.8 Écoulement instable**

Un écoulement instable est un régime d'écoulement dans lequel de petites perturbations initiales amplifient au cours du temps, provoquant un changement progressif ou brutal de la

structure de l'écoulement. Cela signifie que le fluide, soumis à une perturbation, ne revient pas à son état d'origine, mais évolue vers un nouvel état dynamique, souvent plus complexe ou désordonné, comme la transition de l'écoulement laminaire vers le turbulent.

L'instabilité peut être déclenchée par divers facteurs : la vitesse d'écoulement, la géométrie du domaine, la variation de pression ou de température, ou encore la nature du fluide. Une fois que l'écoulement devient instable, il peut développer des ondes, des vortex, des fluctuations de vitesse ou de pression, et perdre sa régularité initiale.

L'étude des écoulements instables est cruciale en mécanique des fluides, car elle permet de prédire les transitions vers des régimes turbulents, d'identifier les conditions critiques d'un système, et de concevoir des dispositifs plus sûrs et performants.

### **I.3 Régime d'écoulement**

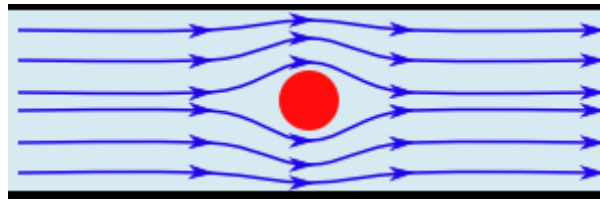
Le régime d'écoulement décrit la structure du mouvement d'un fluide en fonction de la manière dont ses particules interagissent entre elles et avec leur environnement. Il reflète si l'écoulement est ordonné ou désordonné, stable ou instable, et permet de distinguer des comportements très différents comme les régimes laminaire et turbulent ou transitoire.

Ce concept est crucial en mécanique des fluides car il influence fortement les pertes d'énergie, les échanges thermiques, la distribution de pression et les forces exercées sur les surfaces. Le nombre de Reynolds, qui combine la vitesse, une longueur caractéristique, la densité et la viscosité du fluide, est le principal critère utilisé pour identifier le régime d'un écoulement.

#### **I.3.1 Régime laminaire**

Le régime laminaire si  $Re < 2000$ , est une forme d'écoulement fluide dans laquelle les particules du fluide se déplacent selon des trajectoires parfaitement ordonnées et parallèles, sans mélanges transversaux significatifs. Dans ce régime, le fluide s'écoule en couches (ou "lamelles") fluides successives qui glissent les unes sur les autres avec un minimum de perturbation. Ce comportement résulte d'une dominance des forces visqueuses sur les forces d'inertie.

Selon Çengel & Cimbala (2014), le régime laminaire est typiquement observé pour des nombres de Reynolds inférieurs à 2 300 dans les conduites circulaires, bien que cette valeur seuil puisse varier légèrement selon la géométrie et les perturbations. L'écoulement laminaire est prévisible, stable et énergétiquement plus efficace, ce qui le rend souhaitable dans certaines applications comme les micros fluidiques, les échanges thermiques à bas débit, ou les systèmes à haute précision.



**Figure I-2 : Profil du régime laminaire**

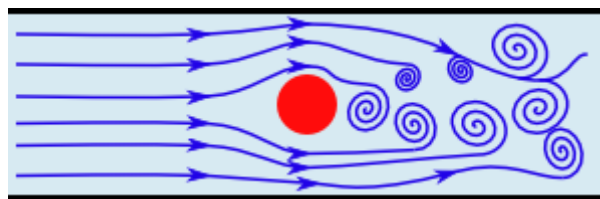
### I.3.2 Régime turbulent

Le régime turbulent si  $Re > 3000$  et se caractérise par un écoulement désordonné, où les particules du fluide se déplacent de manière chaotique et instable, avec des fluctuations aléatoires de vitesse et de pression dans le temps et dans l'espace. Contrairement au régime laminaire, les couches de fluide ne s'écoulent plus de façon parallèle ; au lieu de cela, elles interagissent de manière intense, provoquant des mélanges transversaux importants.

Selon Çengel & Cimbala (2014), l'écoulement turbulent apparaît généralement lorsque le nombre de Reynolds dépasse 4 000 dans un tuyau circulaire. Entre 2 300 et 4 000, le fluide se trouve dans une zone de transition. Dans le régime turbulent, les forces d'inertie dominent largement sur les forces visqueuses, ce qui favorise l'instabilité de l'écoulement.

Bien que le régime turbulent entraîne des pertes de charge plus importantes et un bruit accru, il présente aussi des avantages : il améliore considérablement le transfert de chaleur et de quantité de mouvement, ce qui est recherché dans de nombreuses applications industrielles.

Cependant, malgré sa stabilité, le régime laminaire transporte moins efficacement la chaleur ou la quantité de mouvement que le régime turbulent, en raison de l'absence de mélange transversal actif.



**Figure I-3 : Profil du régime turbulent**

### I.3.3 Régime transitoire

Le régime transitoire (ou régime de transition) correspond à une zone intermédiaire entre l'écoulement laminaire et l'écoulement turbulent. Dans ce régime, le comportement du fluide est instable et variable : des portions du fluide peuvent encore s'écouler de manière ordonnée, tandis que d'autres montrent des signes de turbulence croissante.

Selon Çengel & Cimbala (2014), ce régime est généralement observé pour des nombres de Reynolds compris entre 2 300 et 4 000 dans une conduite circulaire. Dans cette plage, de petites perturbations peuvent croître ou disparaître selon les conditions (rugosité, vibration, variation de vitesse), rendant l'écoulement imprévisible et sensible aux variations extérieures

#### **I.4 Écoulement autour des obstacles**

L'écoulement d'un fluide autour d'un obstacle constitue un sujet fondamental en mécanique des fluides, en aérodynamique et en hydrodynamique. Lorsqu'un fluide (air ou eau) interagit avec une forme immergée, l'obstacle modifie le champ de vitesse, de pression et engendre la formation de structures tourbillonnaires dans le sillage et ses caractéristiques principales sont :

La séparation de la couche limite : Lorsque le fluide longe la surface d'un obstacle, la couche limite peut se détacher sous l'effet d'un gradient de pression défavorable. Cela forme une zone de recirculation derrière l'obstacle appelée le sillage.

La formation de tourbillons : À partir d'un certain nombre de Reynolds, le sillage devient instable et des tourbillons se détachent périodiquement de part et d'autre de l'obstacle (phénomène de vortex shedding). Cette émission périodique crée une force latérale fluctuante sur l'obstacle.

La traînée et la portance : L'écoulement engendre des forces sur l'obstacle ; la traînée (dans le sens de l'écoulement) et la portance (perpendiculaire). Leur valeur dépend de la vitesse du fluide, de la forme, de l'orientation et du régime d'écoulement (laminaire, transitionnel ou turbulent).

#### **I.5 Études expérimentales de l'affouillement local autour des piles de pont**

Les investigations expérimentales constituent l'approche principale pour estimer la profondeur de l'affouillement local autour des piles de pont, notamment dans des conditions hydrodynamiques variées. [1]

Ces études permettent d'analyser en détail l'influence de paramètres hydrauliques et géométriques, ce qui offre une meilleure compréhension des mécanismes physiques impliqués dans les processus d'affouillement. [2]

Certaines de ces formules ont été corroborées par des données de terrain, ce qui permet leur application avec prudence dans des contextes réels (Richardson & Davis, 2001).

Il est important de souligner que la majorité des recherches expérimentales porte sur des piles

de forme circulaire, car cette géométrie représente un cas simplifié et standard pour la modélisation. [3]

Lorsqu'une structure telle qu'une jetée est placée dans un cours d'eau, un gradient de pression négatif apparaît sur sa face amont en raison de l'interaction avec l'écoulement de la couche limite, ce qui peut provoquer un écoulement descendant sur cette face. [6]

Schwind [7] a démontré expérimentalement qu'un tourbillon en fer à cheval se forme dans ces conditions et qu'il se détache périodiquement à certains nombres de Reynolds.

**Shen, Schneider et Karaki [8]** ont approfondi ce phénomène en s'appuyant sur la théorie de l'écoulement potentiel, confirmant que la couche limite se sépare en amont du cylindre.

**Tanaka & Yano [9]** ont néanmoins souligné que la vitesse verticale descendante devant la jetée ne semblait pas influencer directement l'affouillement local.

Des travaux ultérieurs ont reconnu que le vortex en fer à cheval se forme par la séparation tridimensionnelle de la couche limite sur la face avant du cylindre, avant de s'enrouler autour de celui-ci. [10]

**Melville et Raudkivi [11]** ont classifié les géométries de jetées et confirmé leur effet sur la formation du vortex.

Des expériences menées en soufflerie ont confirmé que ce tourbillon peut s'étendre sur trois à quatre diamètres en aval de la pile. [12]

**Baker [13]** a analysé les effets des paramètres géométriques et du nombre de Reynolds sur la taille du vortex, mettant en évidence une corrélation avec l'épaisseur de la couche limite.

Il a également été montré que l'intensité du vortex dépend fortement du rapport  $\delta/D$ , où  $\delta$  est l'épaisseur de la couche limite et  $D$  le diamètre de la pile.

**Suzuki [14]** a contribué à la compréhension des tourbillons secondaires et de leur impact sur la contrainte de cisaillement.

**Chiew, [15]** pour sa part, a défendu l'idée que dans les premières phases de l'affouillement, c'est le courant descendant qui en est la cause dominante, et non le vortex.

**Raudkivi [16]** a confirmé ce point de vue en suggérant que le tourbillon en fer à cheval n'est qu'une conséquence de l'affouillement initial.

**Dargahi [17]** a néanmoins défendu le rôle dominant du vortex en fer à cheval comme moteur de l'érosion locale autour des piles.

Plus récemment, une étude expérimentale de **Muzzammil & Gangadhariah [18]** a démontré que le développement du vortex en fer à cheval est intimement lié à la formation du trou d'affouillement jusqu'à son état d'équilibre.

**Sumer & Fredsøe [19]** ont enfin montré que la géométrie de la pile influence fortement la distance de séparation du vortex, avec des formes plus profilées produisant des vortex plus faibles. Ils ont également mis en évidence que dans le cas d'une couche limite laminaire, une augmentation du nombre de Reynolds accroît la taille du vortex, tandis que pour une couche limite turbulente, l'effet est inverse.

**Vortex de sillage :** D'après les travaux expérimentaux de **Roshko (1953)**, l'écoulement autour d'un cylindre produit une rue de vortex de Kármán dans une plage de Reynolds stable comprise entre  $40 < Re < 150$ . Dans cette zone, les tourbillons se forment de manière régulière, sont transversaux et périodiques, et se dissipent en aval sans créer de turbulence notable. **Roshko[20]** identifie également deux autres régimes : une plage de transition entre  $150 < Re < 300$ , et une plage irrégulière entre  $300 < Re < 10\,000$ , où les vortex deviennent plus instables. Des expériences menées par **Shen et al. (1966) [21]** ont montré qu'un grand trou d'érosion peut se former en aval des piles en l'absence de vortex en fer à cheval, ou si celui-ci est mal formé. Cela souligne l'importance du vortex de sillage dans le processus d'érosion localisé.

Selon **Melville (1975) [22]**, lors d'expériences menées dans des conditions d'équilibre, les vortex de sillage générés par le pilier jouent un rôle actif dans l'érosion du lit, notamment pendant la phase initiale où chaque tourbillon emporte une bouffée de sédiments.

Le vortex de sillage a été décrit par Breusers, **Nicollet et Shen (1977) [23]** comme ayant un effet similaire à un aspirateur, ou à des mini-tornades : il soulève les particules du lit en les arrachant verticalement, avant de les transporter en aval via les tourbillons détachés.

**Raudkivi (1991) [24]** a confirmé ce comportement, en insistant sur l'importance du vortex de sillage dans le transport vertical et horizontal des sédiments, ce qui contribue activement à la dégradation du lit dans la zone aval.

**Vortex de traînée :** est un phénomène aérodynamique ou hydrodynamique qui se produit dans le sillage d'un obstacle immergé dans un fluide en mouvement, comme un cylindre ou un pilier. Il est généré à la suite de la séparation des couches limites sur les bords arrière de l'obstacle. Cette séparation crée une zone de basse pression à l'arrière, provoquant la formation de tourbillons alternés – appelés rue de von **Kármán [25]** – qui induisent une traînée de forme significative sur le corps.

Les vortex de traînée sont directement liés à la perte d'énergie de l'écoulement : ils ralentissent le fluide dans la zone aval, augmentent les fluctuations de pression, et créent un champ de vitesses instable et turbulent. Cette traînée est dite de pression, par opposition à la traînée de



frottement (due à la viscosité). Le développement de ces vortex est fortement influencé par la forme de l'objet, sa rugosité, son inclinaison par rapport à l'écoulement, et le nombre de Reynolds.

## **I.6 Simulation numérique de l'écoulement autour d'un cylindre monté sur un lit**

Ces dernières années, la dynamique des fluides numérique (CFD) a été largement utilisée pour déterminer le comportement des flux dans des applications industrielles et environnementales. Les premières tentatives de modélisation numérique de l'écoulement autour d'un cylindre vertical monté sur un fond rigide ont été initiées dans le domaine de l'aérodynamique, en raison de la complexité du phénomène à modéliser. En effet, l'écoulement dans cette configuration est fortement tridimensionnel, ce qui engendre des structures tourbillonnaires telles que le vortex en fer à cheval, rendant la simulation numérique délicate à mettre en œuvre avec les outils de calcul de l'époque.

Dans ce contexte, **Breusers (1975) [26]** a proposé une solution numérique du profil de vitesse à l'intérieur d'un trou d'érosion (scour hole), en appliquant la méthode inductive de Reichardt. Néanmoins, cette étude présente certaines limites : elle ne prend pas en compte le transport sédimentaire, et son application reste restreinte à des écoulements bidimensionnels, donc peu représentatifs de la réalité tridimensionnelle rencontrée autour d'un cylindre ancré au sol.

Plus tard, **Briley et McDonald (1981) [27]** ont effectué une simulation de l'écoulement laminaire du vortex en fer à cheval se formant à la jonction entre une plaque plane et un cylindre circulaire vertical. Leur travail a permis de mieux comprendre la dynamique de cette structure tourbillonnaire, particulièrement importante dans les applications telles que les structures immergées ou les bases de piliers soumis à l'écoulement.

L'utilisation de la modélisation numérique et l'application de modèles de turbulence sophistiqués s'étaient accélérées dans les années 1990 avec le développement rapide des ordinateurs à grande vitesse et à grande capacité 990 – **O'Riordan & Clare [28]** ont étudié l'écoulement autour d'une structure de base gravitaire à section carrée en utilisant un programme de simulation numérique. Ils ont observé une amplification significative de la vitesse (jusqu'à 2,5 fois) aux bords d'attaque lorsque la face plate de la structure est orientée dans le sens de l'écoulement.

**Deng & Piquet [29]** ont simulé le vortex en fer à cheval en employant le modèle de turbulence algébrique de Baldwin–Lomax, ce qui a permis une meilleure représentation du phénomène dans des conditions laminaires et transitoires.

**Olsen & Melaaen [30]** ont utilisé une méthode des volumes finis tridimensionnelle couplée avec le modèle de turbulence  $k-\varepsilon$  (kappa–epsilon) pour modéliser l'érosion autour d'un cylindre, en tenant compte des effets tridimensionnels du sillage.

**Ouillon & Dartus [31]** ont développé un modèle numérique pour simuler l'écoulement à surface libre autour d'un épi, structure fixée au fond, mettant en évidence les interactions entre le relief et le fluide.

**Roulund [32]** et al ont approfondi la modélisation de l'érosion autour d'un cylindre, en combinant la méthode des volumes finis tridimensionnelle avec un modèle  $k-\varepsilon$ , fournissant une représentation plus précise des interactions fond-cylindre dans des écoulements turbulents.

**Yuhi, Ishida & Umeda [33]** ont réalisé une simulation de l'écoulement oscillant autour d'un pieu vertical avec un trou d'érosion fixe en régime laminaire, ce qui a permis de mieux comprendre la dynamique dans des configurations hydrauliques oscillantes telles que les marées ou les vagues.

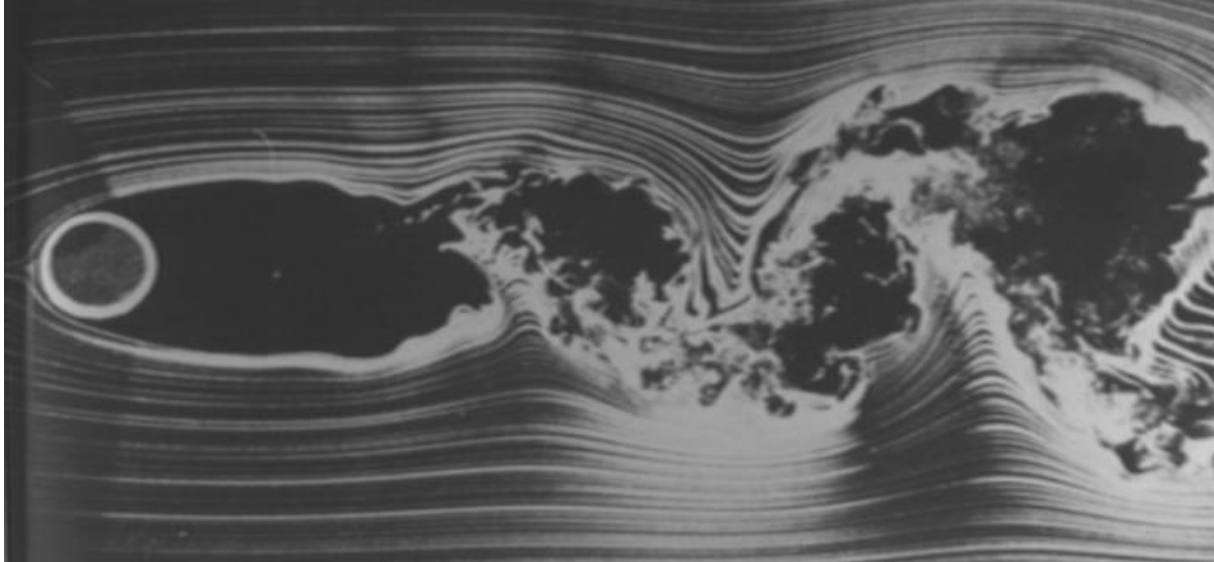
## **I.7 Écoulement autour d'un cylindre circulaire**

L'écoulement d'un fluide (air ou eau) autour d'un cylindre circulaire est un grand classique en mécanique des fluides. Lorsqu'un cylindre est placé perpendiculairement à la direction d'un écoulement, le fluide est obligé de contourner l'obstacle. À basse vitesse, le fluide épouse la forme du cylindre de manière symétrique : il se sépare à l'arrière pour créer une petite zone de recirculation stable.

Cependant, quand la vitesse du fluide augmente au-delà d'un certain seuil, le comportement change : le sillage derrière le cylindre commence à devenir instable. Deux tourbillons se forment alternativement, l'un en haut, l'autre en bas du cylindre, et sont ensuite emportés par le flux. Cela produit une succession régulière de tourbillons dans le sillage, que l'on appelle l'allée tourbillonnaire de Von Kármán.

Ce phénomène est directement lié aux caractéristiques du fluide (sa viscosité) et à la vitesse d'écoulement. Dans une plage de vitesses modérées, la formation des tourbillons est périodique et bien ordonnée. À des vitesses plus élevées, le sillage devient de plus en plus turbulent, ce qui entraîne des variations importantes de la pression sur le cylindre, et donc des forces alternées sur l'obstacle.

L'allée tourbillonnaire est un sujet clé car ces tourbillons périodiques provoquent une force transversale sur le cylindre. Cela peut engendrer des vibrations, parfois destructrices, sur des structures exposées au vent ou aux courants (cheminées, câbles, ponts suspendus, etc.). C'est pourquoi ce phénomène est étudié en profondeur dans la conception des structures.



**Figure I-4 :** Écoulement autour d'un cylindre circulaire

## **I.8 Perspectives et Travaux Futurs**

L'écoulement autour de deux cylindres en arrangement vertical constitue un domaine de recherche riche et complexe, en raison des nombreuses interactions hydrodynamiques qui émergent selon la configuration géométrique, les conditions aux limites et les paramètres de fluide comme le nombre de Reynolds. Bien que de nombreuses études aient été menées pour caractériser les régimes d'écoulement, les forces hydrodynamiques ou les interactions tourbillonnaires, plusieurs questions fondamentales restent encore ouvertes.

L'originalité de cette configuration tient à la diversité des phénomènes observés : formation et détachement de tourbillons, effets d'écran hydrodynamique, synchronisation ou compétition de sillages, et même apparition de vibrations auto-entretenues (VIV – Vortex Induced Vibrations). Ces phénomènes dépendent à la fois de paramètres classiques (comme le rapport  $H/D$  et le nombre de Reynolds) et de facteurs dynamiques moins explorés (tels que la flexibilité des cylindres, les effets tridimensionnels, ou les conditions turbulentes naturelles).

À l'issue de cette étude, plusieurs pistes de recherche se dessinent pour approfondir la compréhension de ces écoulements complexes, améliorer la précision des modèles numériques, ou encore guider la conception d'ingénieries plus efficaces et plus robustes.

### **I.8.1 Objectifs des travaux futurs**

Face à ces limites, plusieurs axes de développement apparaissent comme naturels et prometteurs :

**Extension tridimensionnelle** : intégrer la dimension verticale dans les simulations CFD pour mieux représenter les structures tourbillonnaires complexes telles que les cordes tourbillonnaires, caractéristiques des régimes instables.

**Étude fluide-structure** : modéliser des cylindres flexibles ou suspendus afin d'examiner les couplages dynamiques entre les forces fluides et les réponses mécaniques. Cette approche est essentielle pour les structures offshore ou les capteurs sensibles aux vibrations.

**Analyse non stationnaire et stochastique** : explorer la réponse du système à des fluctuations aléatoires ou transitoires dans le débit d'entrée, simulant des conditions environnementales réalistes.

**Optimisation de géométrie** : évaluer la possibilité d'optimiser la forme des cylindres ou leur position relative (angle d'inclinaison, profil non circulaire) pour réduire la traînée ou atténuer les effets d'instabilité.

## **I.9 Conclusion**

Ce chapitre a permis d'introduire les bases théoriques nécessaires à la compréhension de l'écoulement autour de structures cylindriques immergées. À travers une revue bibliographique ciblée, les principaux phénomènes hydrodynamiques tels que les vortex, les régimes d'écoulement et les interactions fluide-structure ont été mis en évidence. Ces éléments fournissent un cadre de référence solide pour aborder la suite de ce travail, orientée vers la modélisation mathématique et la simulation numérique.

# **Chapitre II**

Formulation  
mathématique et  
modélisation  
numérique

## Chapitre II : Formulation mathématique et modélisation numérique

### II.1 Formulation Mathématique

La formulation mathématique constitue une étape fondamentale dans toute étude physique ou numérique, car elle permet de traduire les phénomènes réels en équations rigoureuses pouvant être analysées ou résolues par des méthodes numériques. Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéressons à la modélisation du comportement d'un fluide incompressible en écoulement autour d'une géométrie donnée (par exemple, deux cylindres circulaires en arrangement vertical).

Ce processus débute par l'identification des lois physiques gouvernant l'écoulement, telles que :

- La conservation de la masse.
- La conservation de la quantité de mouvement.

Ces lois sont exprimées sous forme d'équations aux dérivées partielles (EDP) définies sur un domaine spatial et temporel. Leur résolution analytique étant souvent impossible en raison de la complexité des géométries ou des conditions aux limites, une discrétisation du domaine est nécessaire. C'est dans ce contexte que des méthodes numériques telles que la méthode des différences finies ou la méthode des volumes finis sont utilisées.

Ainsi, cette section présente les équations gouvernantes, les hypothèses physiques adoptées (écoulement incompressible, laminaire, stationnaire, etc.), ainsi que les conditions initiales et aux limites, afin de préparer le passage à la résolution numérique.

### II.2 Equation de conservation de la masse

Le principe fondamental de la conservation de la masse repose sur le fait qu'un fluide, quel que soit son mouvement ou sa transformation, conserve toujours la même quantité de matière. Autrement dit, la masse ne disparaît ni n'apparaît spontanément. Cette loi universelle trouve son application dans tous les régimes d'écoulement, que ceux-ci soient stables ou instables, compressibles ou non.

#### II.2.1 Forme différentielle

En appliquant le théorème de Gauss à la forme intégrale, on obtient l'équation de conservation de la masse sous forme locale (ou différentielle) :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (\text{II.2})$$

Cette équation indique que, localement, la variation de la densité au cours du temps et la divergence du flux de masse doivent s'équilibrer. Cette forme est utilisée dans la formulation des équations de Navier-Stokes et est essentielle dans les simulations numériques.

### II.2.2 Cas particulier d'un fluide incompressible

Lorsque le fluide est incompressible, c'est-à-dire que sa densité  $\rho$  est constante, l'équation se simplifie grandement. En effet, la dérivée temporelle de  $\rho$  devient nulle, et on obtient :

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (\text{II.3})$$

Cela signifie que le fluide ne peut pas s'accumuler ni disparaître en un point : le débit volumique est conservé. Cette simplification est couramment utilisée dans les écoulements à basse vitesse (nombre de Mach  $< 0,3$ ) où les effets de compressibilité sont négligeables.

### II.2.3 Interprétation physique

Physiquement, cette équation exprime que la masse d'un fluide entrant dans un domaine doit ressortir ou s'accumuler dans ce domaine. Elle constitue un outil de vérification essentiel dans les études expérimentales, les simulations numériques (CFD) et les modèles théoriques.

Dans le cadre de l'écoulement autour de deux cylindres en arrangement vertical, la conservation de la masse est fondamentale pour évaluer les zones de recirculation, d'interaction entre les sillages, et pour garantir la stabilité des solutions numériques.

### II.2.4 Applications en simulation numérique

Dans les logiciels de CFD, l'équation de conservation de la masse est systématiquement couplée à l'équation de quantité de mouvement (Navier-Stokes). Elle est résolue pour chaque cellule du maillage, garantissant ainsi la cohérence physique de la simulation.

Lors de la modélisation d'un écoulement tridimensionnel autour de cylindres, la satisfaction stricte de cette équation permet d'éviter l'apparition de sources ou puits de masse fictifs. Des schémas numériques conservatifs sont alors employés pour préserver l'équilibre global.

### II.2.5 Équation de continuité

Dans cet ouvrage, Batchelor présente les équations de base suivantes, formulées pour un fluide incompressible et isotherme :

#### II.2.5 Équation de continuité (conservation de la masse)

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (\text{II.4})$$

Cela signifie que le fluide est incompressible : il n'y a ni accumulation ni perte de masse dans un volume de contrôle.

### II.2.6 Équation de quantité de mouvement (équation de Navier-Stokes)

$$\rho \left( \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + ((\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u}) \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \vec{f} \quad (\text{II.5})$$

#### Version développée en coordonnées cartésiennes

En coordonnées  $(x, y, z)$ , on peut écrire les équations pour chaque composante de la vitesse  $(u, v, w)$ :

$$\begin{cases} \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \frac{\partial p}{\partial x} + \mu (\nabla^2 u) \\ \rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \frac{\partial p}{\partial y} + \mu (\nabla^2 v) \\ \rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \frac{\partial p}{\partial z} + \mu (\nabla^2 w) \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

## II.3 Coefficients de portance et de traînée

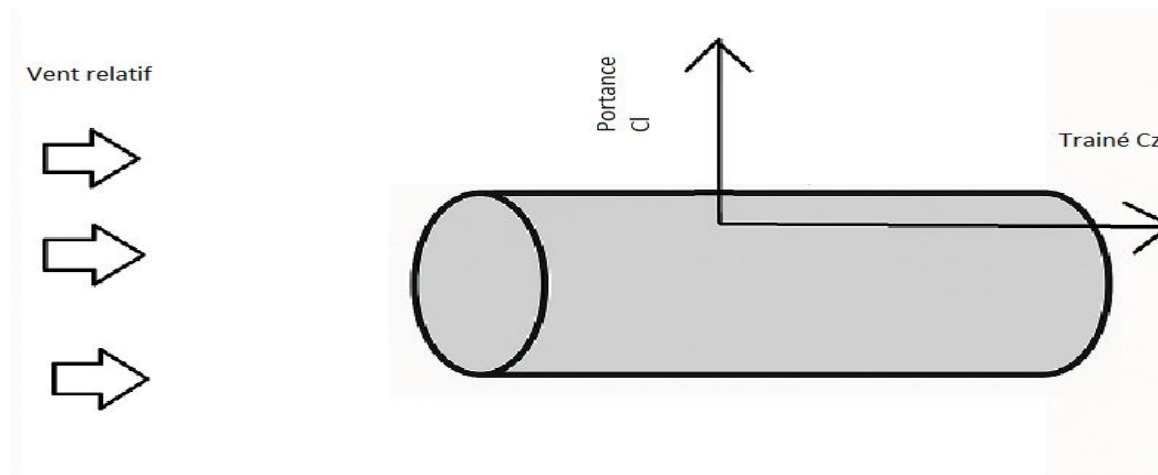
### II.3.1 Définitions fondamentales

Les coefficients de portance  $C_L$  et de traînée  $C_D$  sont des grandeurs adimensionnelles qui permettent de caractériser les efforts aérodynamiques exercés par un fluide en écoulement autour d'un corps :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 DL} \quad (\text{II.7})$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2 DL} \quad (\text{II.8})$$





**Figure II-1 : La portance et la traînée**

### II.3.2 Cas d'un cylindre isolé

Pour un cylindre isolé soumis à un écoulement uniforme à nombre de Reynolds modéré ( $10^3 < Re < 10^5$ ), les valeurs typiques sont :

$C_D \approx 0$  (Subcritique, avant transition).

$C_L \approx 0$  (Symétrie moyenne sur une période d'oscillation).

Cependant, dans ce régime, le phénomène de détachement tourbillonnaire induit une fluctuation périodique  $C_L$  avec une fréquence caractéristique (Strouhal  $St \sim 0.2$ ). [34]

### II.3.3 Distribution des forces selon la distance inter-cylindres

**Simulation numérique** (ou résultats expérimentaux disponibles dans la littérature) montrent :

**Cylindre amont :**

$C_D \approx 1.1 - 1.3$

$C_L \approx 0$  En moyenne, mais avec une amplitude périodique pouvant atteindre  $\pm 0.6$ .

**Cylindre aval :**

Pour  $T/D = 1.2$  :  $C_D \approx 0.2$   $C_L \approx \pm 1.0$

Pour  $T/D = 2.0$  :  $C_D \approx -0.1$ , forte instabilité transversale

Pour  $T/D > 3.5$  : le cylindre retrouve une réponse aérodynamique similaire à un corps isolé

### II.3.4 Interprétation physique

La variation des coefficients résulte de :

L'effet d'écran induit par le cylindre amont (réduction de la pression dynamique en aval).

Les interactions non-linéaires entre les couches limites et le sillage.

La modulation du vortex shed ding selon la synchronisation ou non des détachements.

Lorsque les deux cylindres sont très proches ( $T/D < 3.5$ ), un écoulement quasi-coalescent apparaît, où les deux cylindres se comportent comme un seul obstacle large, modifiant radicalement  $C_D$  et  $C_L$  de l'aval.

## II.4 Résolution numérique

La résolution numérique par la méthode des différences finies est une approche fondamentale de l'analyse numérique, visant à approximer la solution d'équations différentielles (ordinaires ou partielles) en remplaçant les dérivées continues par des expressions discrètes appelées différences finies. Elle est largement utilisée en sciences de l'ingénieur, en mécanique des fluides, en transfert thermique, en acoustique, en électromagnétisme et dans de nombreuses autres disciplines scientifiques où des phénomènes physiques sont modélisés par des équations différentielles.

### II.4.1 Principe de la méthode de différence finies

La méthode consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage. Avantages : grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul. Inconvénient : limitation de la géométrie des domaines des calculs (simple, non complexe), difficultés de prise en compte des conditions aux limites et en général absence de résultats de majoration d'erreurs.

### II.4.2 La méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis (MVF) est une technique de résolution numérique des équations aux dérivées partielles, largement utilisée dans les domaines de la mécanique des fluides, du transfert thermique, de la physique des plasmas, de la combustion, et bien d'autres. Elle est particulièrement prisée en mécanique des fluides numérique (CFD) pour son respect des lois de conservation et sa grande flexibilité face aux géométries complexes.

#### II.4.2.1 Principe fondamental

La méthode de volumes finis est une méthode de discrétisation pour les lois de conservation. Elle est basée sur l'écriture de bilans physiques.

Cette méthode consiste à discrétiser sur chacune des cellules, appelées volumes de contrôle, la forme intégrale du problème à résoudre. Une des difficultés essentielles qui peut être rencontrée

est l'estimation des flux aux frontières de chaque volume de contrôle lors de la mise en œuvre de cette technique. Ces points forts et faibles sont :

Cette méthode est essentiellement utilisée pour les applications de la mécanique des fluides et son point fort réside dans sa capacité à traiter les flux convectifs (sources d'instabilités) par des techniques de décentrement (amélioration de la stabilité du schéma).

La plupart des solveurs basés sur cette méthode utilise des maillages dits structurés qui rendent parfois difficile l'approche générale de traitement de géométries quelconques (avec objets internes par exemple) comme dans le cas de la méthode des éléments finis. Pour contrer cette limite, la méthode des volumes finis a été étendue au cas de maillages dits non structurés (mais ce ne constitue pas encore une approche générale).

On partage les méthodes de volumes finis en deux catégories :

Les méthodes "Cell-Vertex" pour lesquelles les solutions sont calculées aux nœuds du maillage.

Les méthodes "Cell-Centered" pour lesquelles les inconnues sont positionnées en des nœuds internes aux cellules.

### II.4.3 Méthode des différences finies

La méthode des différences finies (MDF) constitue l'une des approches numériques les plus classiques pour la résolution d'équations différentielles, en particulier les équations aux dérivées partielles (EDP). Elle repose sur la discrétisation du domaine continu en une grille de points et sur l'approximation des dérivées par des formules de différences entre les valeurs de la fonction aux points de la grille.

Cette méthode est appréciée pour sa simplicité de mise en œuvre et son efficacité sur des grilles régulières, bien qu'elle soit moins adaptée aux géométries complexes, où les méthodes des volumes finis ou des éléments finis sont préférées.

En pratique, la MDF est généralement utilisée dans des cas simples ou académiques, en particulier sur des domaines réguliers et structurés. Dans les logiciels industriels comme ANSYS CFX, cependant, ce n'est pas la méthode principale employée : CFX utilise essentiellement la méthode des volumes finis (MVF), qui est plus robuste pour les géométries complexes et les maillages non structurés. Toutefois, la logique sous-jacente de la discrétisation des équations et la structuration des algorithmes de résolution dans ANSYS CFX s'inspirent, dans certains cas particuliers, des concepts de la MDF :

Pour certaines approximations locales des dérivées.

Pour les schémas de différence temporelle (Euler implicite, Crank-Nicolson),

Ou pour des modèles simplifiés où la structure du maillage permet l'utilisation de schémas similaires à ceux de la MDF.

Ainsi, même si ANSYS CFX est fondamentalement basé sur la méthode des volumes finis, une compréhension préalable de la MDF reste précieuse pour analyser les mécanismes de discrétisation, vérifier la stabilité des solutions, et interpréter les résultats numériques obtenus dans les simulations CFD.

#### **II.4.4 Maillage**

Le Maillage (CFX-Mesh) est un processus fondamental en simulation numérique (CFD) utilisant l'outil spécifique d'ANSYS CFX pour discrétiser un domaine physique (géométrie d'écoulement, pièce mécanique, etc.) en un ensemble structuré ou non structuré d'éléments finis (tétraèdres, hexaèdres, prismes). Cette subdivision spatiale transforme la continuité du modèle réel en un réseau de petites cellules interconnectées (le maillage), sur lequel les équations de conservation (masse, énergie, quantité de mouvement) sont résolues numériquement. La qualité de ce maillage, gérée via CFX-Mesh, conditionne directement la précision des résultats, la stabilité du calcul et l'efficacité computationnelle, faisant de cette étape un élément critique dans la chaîne de modélisation avec le logiciel CFX.

Points clés inclus :

Outil : mailleur natif d'ANSYS CFX.

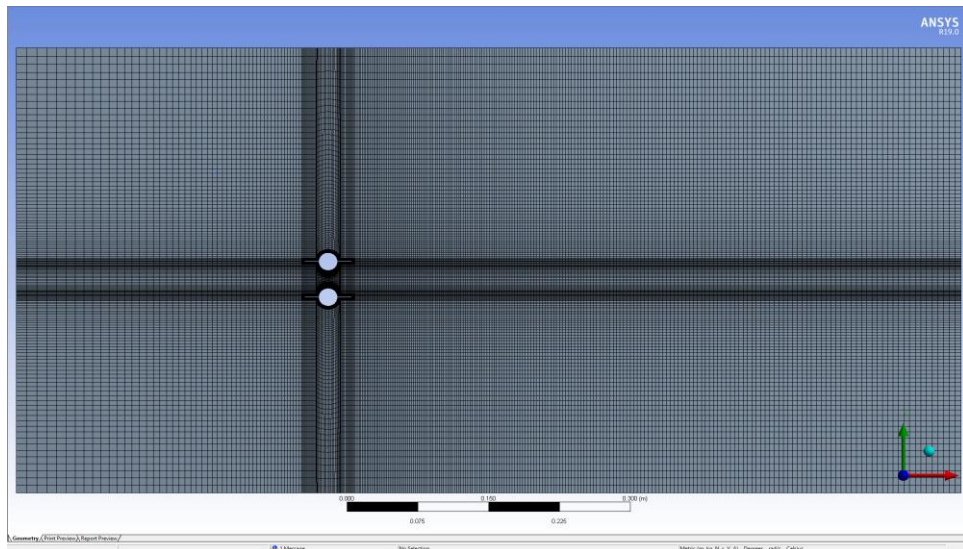
Objectif : Discrétisation spatiale pour résolution numérique des équations gouvernantes.

Éléments : Tétraèdres, hexaèdres, prismes.

Impact : Détermine la précision, la stabilité et le coût de la simulation.

Contexte : Intégré dans les travaux de CFD (mécanique des fluides numérique).

Cette définition justifie sa présence en Annexes (ANEXS) par la nécessité de documenter la méthodologie technique (paramètres de maillage, illustrations, validation de convergence) pour garantir la reproductibilité et la rigueur des simulations.

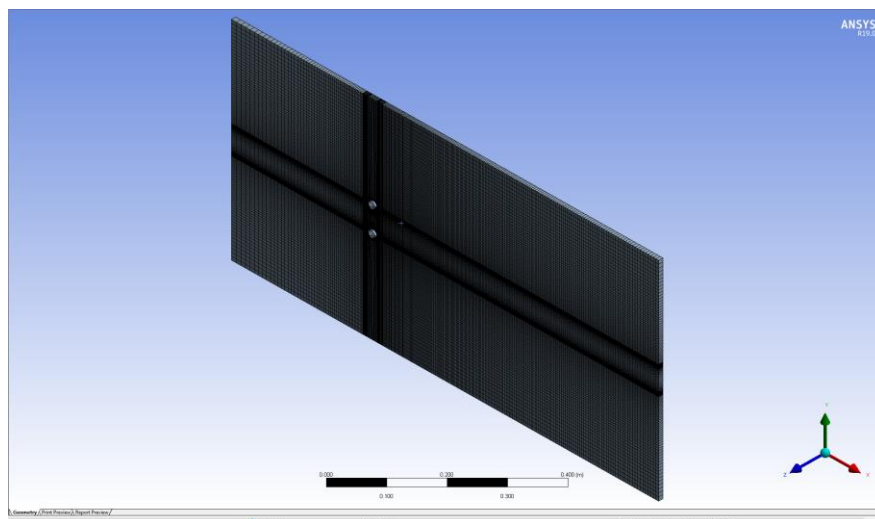


**Figure II-2 :** Maillage du modèle ( $L/D=0.5$   $L=3D$ ) axe (x-y)

### II.4.5 Géométrie

La première étape du processus de simulation consiste à concevoir la géométrie du modèle. Ce dernier se compose d'un cylindre circulaire muni d'ailettes. La géométrie est générée avec ANSYS CFX, ce qui permet de définir précisément les dimensions et les propriétés du système étudié.

Dans un premier temps, la simulation débute par la conception de la géométrie du modèle. Celui-ci est constitué deux cylindres avec des ailettes attachées, élaboré à l'aide du logiciel ANSYS CFX



**Figure II-3 :** Géométrie du modèle ( $L/D=0.5$   $L=3D$ ) axe (x-y-z)

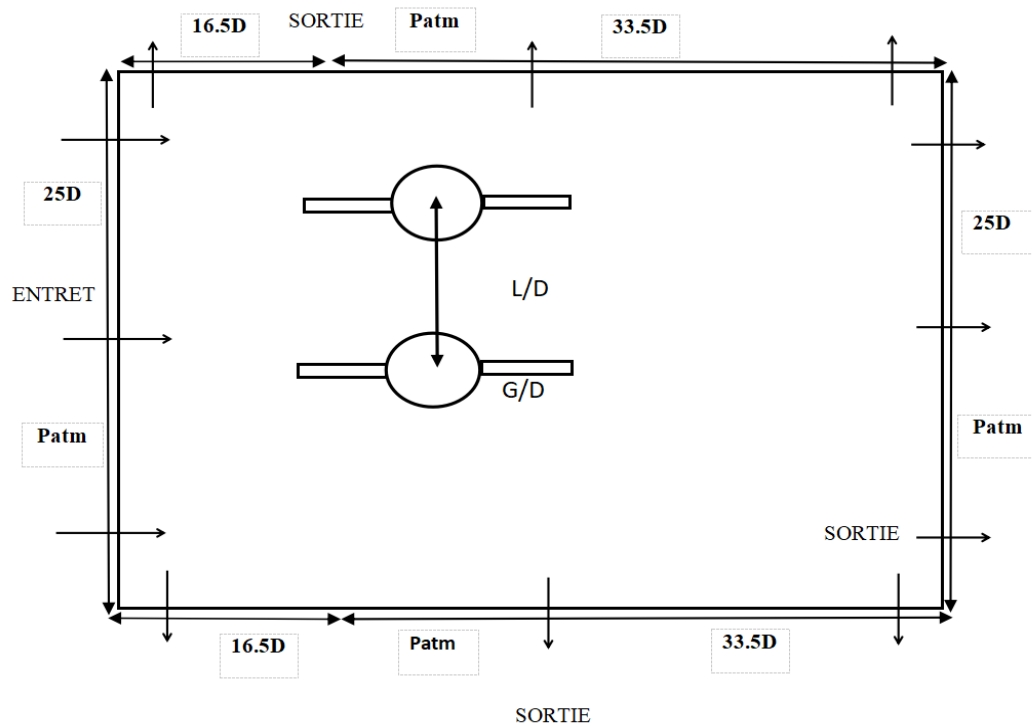
### II.4.5.1 Cas avec ailettes

La figure II-5 illustre la géométrie du problème considéré. Elle décrit un canal circulaire de longueur  $L$  et de hauteur  $h$ , ainsi qu'un obstacle cylindrique circulaire.

Le canal est de longueur  $15D$

La hauteur du canal est de  $50D$

La distance entre l'entrée du canal et la première arrête de cube est de  $25D$



**Figure II-4 : Schéma cas avec ailette**

### II.4.6 Configuration

Cette étape implique la configuration des paramètres de simulation dans ANSYS CFX. Étapes :  
 Définition des propriétés du fluide : Spécifier les propriétés physiques du fluide utilisé dans la simulation

**Tableau 2.1 : Caractéristiques du liquide**

Basic settings	Material properties
option	General material
Thermodynamic properties	
Equation of state	
option	value
Molar mass	18.02 [kg kmol <sup>-1</sup> ]
density	997.0 [J Kg <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup> ]
Specific heat type	
option	value
Specific heat type	4181.7[J Kg <sup>-1</sup> k <sup>-1</sup> ]
Specific heat type	Constant pressure
Reference state	
option	Specified point
Ref. Temperature	25 [C]
Reference pressure	1 [atm]
Reference specific Enthalpy	
Ref. spec. Enthalpy	0.0 [J/kg]
Reference specific Entropy	
Ref. spec. Entropy	0.0 [J/kg]
Transport properties	
Radiation properties	
Buoyancy properties	
option	value
Thermal Exapansivity	2.57E-04 [k <sup>-1</sup> ]
Electromagnetic	

**Définition des conditions aux limites :** Assigner les conditions d'entrée (vitesse ou débit), de sortie (pression), et les conditions aux parois :

**Tableau 2.2 : Les conditions d'entrée et de sortie**

Outline	Initialization
Details of <b>Global Initialization in flow Analysis 1</b>	
Global settings	
Coordinate frame	
Initial conditions	
Velocity type	Cartesian
Cartesian Velocity Components	
Option	Automatic with Value
U	FluidVelocity
V	0[m s <sup>-1</sup> ]
W	0[m s <sup>-1</sup> ]
Static pressure	
Option	Automatic with Value
Relative pressure	0[pa]
Temperature	293[k]

**Sélection des modèles physiques :** Choisir les modèles de turbulence appropriés et autres paramètres nécessaires pour la simulation.

**Tableau 2.3 : Modèle de turbulence appropriés**

Outline		Domain: Default Domain
<b>Details of Default Domain in Flow Analysis 1</b>		
Basic Settings	<b>Fluid Models</b>	Initialization
Heat Transfer		
Option		Thermal Energy
Include pressure Transient Term		
Ind. Viscous Dissipation		
Turbulence		
Option		None (Laminar)
Combustion		
Option		None
Electromagnetic Model		



**Tableau 2.4 : Les expressions utilisées**

Outline	Expressions
DRAG1	$(\text{force\_x0@CYLINDER1} * 2) \backslash (\text{FluidDensity} * \text{FluidVelocity}^2 * (0.01[\text{m}] * 0.02[\text{m}] + (4 * 0.01[\text{m}] * 0.01[\text{m}])))$
DRAG2	$(\text{force\_x0@CYLINDER2} * 2) \backslash (\text{FluidDensity} * \text{FluidVelocity}^2 * (0.01[\text{m}] * 0.02[\text{m}] + (4 * 0.01[\text{m}] * 0.01[\text{m}])))$
FluidDensity	997.0[kg\m^3]
FluidVelocity	$(\text{Re} * \text{FluidVelocity}) \backslash (\text{FluidDensity} * 0.02[\text{m}])$
FluidVelocity	8.889e-4[kg m^-1 S^-1]
LiFT1	$\text{force\_x0@CYLINDER1} * 2) \backslash (\text{FluidDensity} * \text{FluidVelocity}^2 * (0.01[\text{m}] * 0.02[\text{m}] + (4 * 0.01[\text{m}] * 0.01[\text{m}])))$
LiFT2	$(\text{force\_x0@CYLINDER2} * 2) \backslash (\text{FluidDensity} * \text{FluidVelocity}^2 * (0.01[\text{m}] * 0.02[\text{m}] + (4 * 0.01[\text{m}] * 0.01[\text{m}])))$
Re	200

#### II.4.7 Solution

Cette étape de la simulation vise à résoudre les équations de la mécanique des fluides, en s'appuyant sur la géométrie et le maillage établis.

##### Étapes :

Initialisation de la simulation : Lancer la simulation en configurant les conditions initiales et en démarrant le solveur.

Surveillance de la convergence : Suivre les résidus et autres critères de convergence pour s'assurer que la solution est stable et précise.

#### II.5 Conclusion

L'étude menée dans le cadre de ce mémoire s'inscrit dans une problématique classique mais toujours actuelle de la mécanique des fluides : la compréhension des interactions complexes entre un fluide en écoulement et des obstacles immergés, en l'occurrence deux cylindres circulaires disposés verticalement, avec ou sans ailettes. Ce travail visait à évaluer l'effet de la configuration géométrique sur les efforts hydrodynamiques exercés sur ces structures, notamment à travers les coefficients de portance et de traînée.

La première partie a permis d'établir les fondements théoriques en exposant les phénomènes caractéristiques des écoulements autour d'obstacles : détachement tourbillonnaire,

affouillement local, instabilités de sillage, etc. La seconde partie a développé le cadre mathématique et numérique de l'étude, en mettant en œuvre les équations de Navier-Stokes et les méthodes de discrétisation adaptées via le logiciel ANSYS CFX. Enfin, les résultats obtenus ont mis en évidence l'influence significative du rapport  $L/D$  et de la présence d'ailettes sur la distribution des efforts aérodynamiques.

Ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour l'optimisation de structures exposées à des écoulements, notamment dans les domaines du génie civil et maritime. Des études futures pourraient intégrer des effets tridimensionnels, des configurations dynamiques (fluid-structure interaction) ou encore des régimes transitoires plus complexes, afin d'approfondir la compréhension des mécanismes observés.

# **Chapitre III**

**Résultats et**

**discussions**

## Chapitre III : Résultats et discussions

### III.1 Introduction

Les simulations numériques ont un rôle important à jouer dans les problèmes d'ingénierie, ce qui en fait un outil essentiel pour étudier et prédire la turbulence dans la perspective d'applications de plus en plus complexes. Avec le développement rapide des ordinateurs et le développement des méthodes numériques, Il est possible d'effectuer des calculs d'écoulement bidimensionnel dans de nombreuses configurations et d'appréhender de nombreux phénomènes physiques, dont les écoulements turbulents. Dans ce travail, la simulation numérique a été réalisée à l'aide d'un code de calcul : **ANSYS-CFX 19.0**

### III.2 Structure du code ANSYS CFX

Le logiciel ANSYS CFX est une technologie de résolution avancée hautes performances utilisée notamment dans le domaine de la CFD, en tant qu'application de solution à grand débit, il nous permet de fournir des résultats de solution très précis, fiables, robustes et rapides. Un logiciel permettant la réalisation de la géométrie et du réseau est nécessaire pour effectuer l'analyse CFD, CFX a plusieurs caractéristiques qui en font un excellent investissement :

- Analyste avancé fiable et puissant.
- intégration complète dans la définition du problème, son analyse et la présentation des résultats.

Débogage intuitif et interactif à l'aide de menus et de graphiques avancés.

Le CFX dans la version ou le code **19.0**, est divisé en 4 modules :

**CFX-pre ; CFX-solver ; C FX-post**

#### III.2.1 Résultats et interprétation

##### Validation du modèle pour un cylindre sans ailette

Nous effectuons des simulations dans un modèle d'un cylindre sans ailettes où nous étudions la différence entre la Portance moyenne ( $C_{L_{moy}}$ ) et traînée moyenne ( $C_{D_{moy}}$ ) dans chaque Maillage.

**Tableau 3.1 : Résultats des simulations sans ailette un cylindre  $Re=200$** 

Étude actuelle					Autre simulation
Maillage	Nœuds	Éléments	$C_{Dmoy}$	$C_{Lmoy}$	$C_{Dmoy}$
Maillage 1	6880	3300	1.167	0.00240	1.6[12]
Maillage 2	22760	11130	1.234	0.00414	
Maillage 3	44300	21800	1.214	0.00349	
Maillage 4	72400	35750	1.214	0.00349	
Maillage 5	98240	48600	1.235	0.00144	

**Validation du modèle pour deux cylindres sans ailette**

Nous effectuons des simulations dans un modèle de deux cylindres sans ailettes où nous étudions la différence entre la Portance et la traînée est les résultats dans le **Tableau 3.2**

Suivant :

**Tableau 3.2 : Résultats des simulations sans ailette deux cylindre  $Re=200$** 

L/D	$C_{L1}$	$C_{L2}$	$C_{D1}$	$C_{D2}$
1.5	0.445	-0.440	1.524	1.520
2	0.208	-0.204	1.535	1.516
3	0.0862	-0.0862	1.482	1.482
4	0.0491	-0.0491	1.416	1.416

### Validation du modèle pour deux cylindres avec ailette

Nous effectuons des simulations dans un modèle de deux cylindres avec ailettes où nous étudions la différence entre la Portance et la traînée pour chaque ailette  $Ail=0.25$  ;  $Ail=0.5$  ;  $Ail=0.75$  ;  $Ail=1$  est les résultats dans le **Tableau 3.3** suivants :

**Tableau 3.3** : Résultats des simulations avec ailette deux cylindre  $Re=200$

<b>L/D</b>	<b>Ail=0.25</b>				<b>Ail=0.5</b>			
<b>////////</b>	<b>C<sub>L1</sub></b>	<b>C<sub>L2</sub></b>	<b>C<sub>D1</sub></b>	<b>C<sub>D2</sub></b>	<b>C<sub>L1</sub></b>	<b>C<sub>L2</sub></b>	<b>C<sub>D1</sub></b>	<b>C<sub>D2</sub></b>
<b>1.5</b>	0.295	-0.298	0.708	0.71	0.277	-0.281	0.442	0.442
<b>2</b>	0.158	-0.159	0.696	0.699	0.171	-0.175	0.421	0.426
<b>3</b>	0.0805	-0.08107	0.680	0.679	0.0975	-0.0990	0.416	0.416
<b>4</b>	0.0510	-0.0512	0.653	0.653	0.0597	-0.0607	0.401	0.401

**Tableau 3.4** : Résultats des simulations avec ailette deux cylindre  $Re=200$

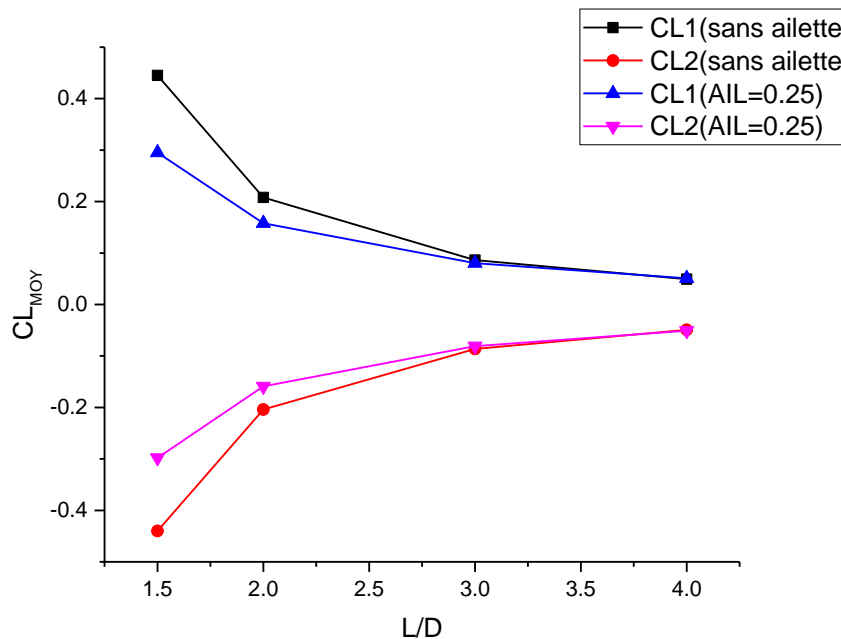
<b>L/D</b>	<b>Ail=0.75</b>				<b>Ail=1</b>			
<b>////////</b>	<b>C<sub>L1</sub></b>	<b>C<sub>L2</sub></b>	<b>C<sub>D1</sub></b>	<b>C<sub>D2</sub></b>	<b>C<sub>L1</sub></b>	<b>C<sub>L2</sub></b>	<b>C<sub>D1</sub></b>	<b>C<sub>D2</sub></b>
<b>1.5</b>	0.278	-0.284	0.306	0.305	0.292	-0.269	0.223	0.229
<b>2</b>	0.185	-0.298	0.298	0.297	0.185	-0.192	0.227	0.226
<b>3</b>	0.107	-0.107	0.292	0.292	0.109	-0.112	0.224	0.224
<b>4</b>	0.0683	-0.0676	0.283	0.283	0.0722	-0.0738	0.218	0.218

### III.2.2 Variation de la Portance moyen et la traînée moyen pour l'obstacle avec ailettes verticales :

#### Variation de la Portance moyen

Auna varier de la Portance moyenne en fonction du **L/D** avec ailettes verticales a **Re=200** dans chaque ailette **Ail=0.25** ; **Ail=0.5** ; **Ail=0.75** ; **Ail=1** est les résultats dans les graphes suivants :

<b>Cas ailette Ail=0.25 avec portance moyenne</b>
---

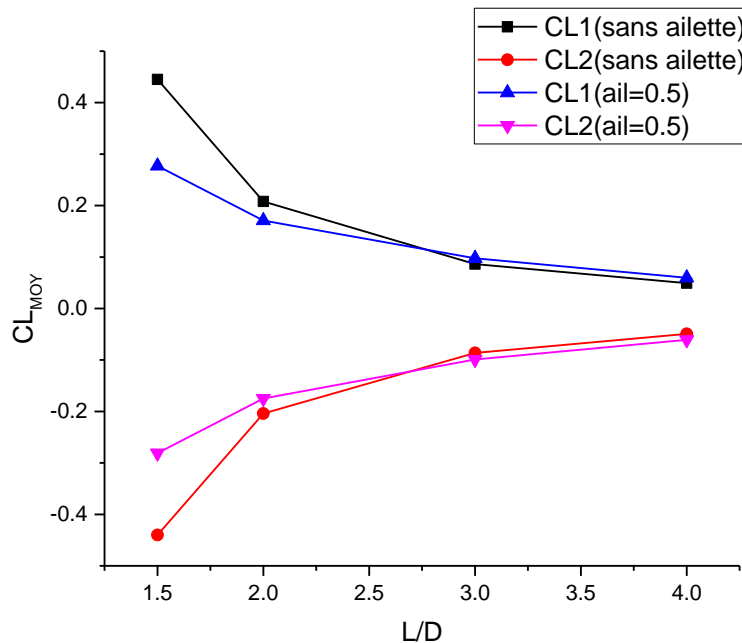


**Figure III-1 :** Variation de Portance moyenne en fonction du L/D avec ailettes verticales a  $Re=200$

La figure montre la variation du coefficient de portance ( $C_L$ ) en fonction du rapport ( $L/D$ ) pour différentes configurations : Le graphique illustre l'évolution des coefficients de portance moyenne (CL1 et CL2) pour deux cylindres verticaux dans deux configurations : sans ailette et avec ailettes verticales de taille (ail=0.25). On observe que dans le cas sans ailette, les coefficients (CL1) et (CL2) restent relativement stables, avec une légère décroissance lorsque le rapport  $L/D$  augmente, traduisant une réduction des interactions hydrodynamiques entre les deux cylindres.

En revanche, dans le cas avec ailettes, on constate une augmentation progressive des coefficients (CL1) et (CL2) à mesure que ( $L/D$ ) augmente. Cela indique que les ailettes modifient la structure de l'écoulement et favorisent une stabilisation de la portance, probablement en perturbant ou atténuant les détachements tourbillonnaires. Cette configuration semble donc plus favorable à la réduction des effets instationnaires et à une meilleure maîtrise des forces hydrodynamiques, notamment sur le cylindre aval.

<b>Cas ailette Ail=0.5 avec portance moyenne</b>
--



**Figure III-2 :** Variation de Portance moyenne en fonction du  $L/D$  avec ailettes vertical a  $Re=200$

Le graphique ci-dessus présente la variation de la portance moyenne ( $CL_{MOY}$ ) en fonction du rapport ( $L/D$ ) pour deux configurations : sans ailettes et avec ailettes verticales (ail = 0.5), à un nombre de Reynolds  $Re=200$ . Pour les configurations sans ailettes (courbes noire et rouge, (CL1) et (CL2)), la portance moyenne varie sensiblement avec le rapport ( $L/D$ ).

(CL1) commence avec une valeur positive relativement élevée (environ 0.4) à ( $L/D = 1.5$ ), mais diminue rapidement pour se stabiliser proche de zéro. À l'inverse, CL2 (rouge) débute avec une valeur négative marquée (environ -0.4), puis augmente avec ( $L/D$ ), approchant également une valeur proche de zéro.

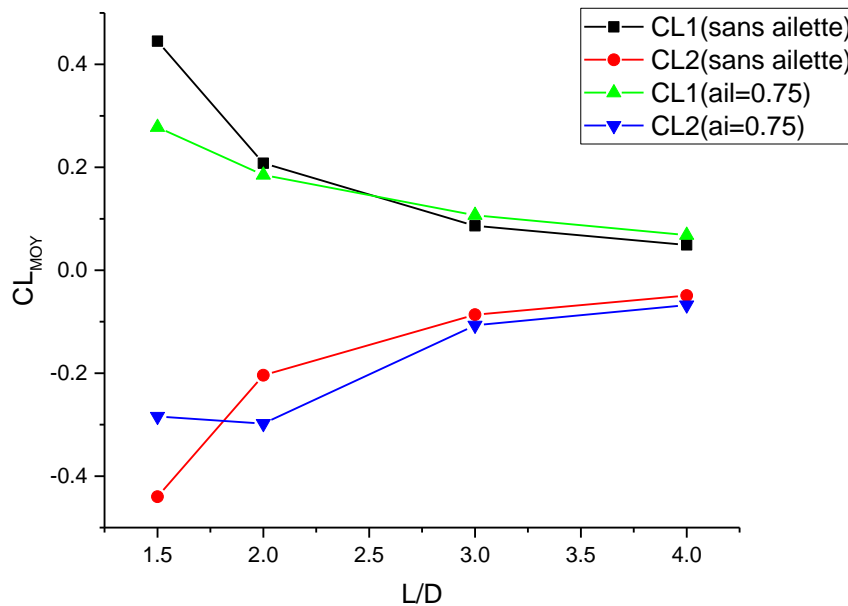
Pour les configurations avec ailettes verticales (ail = 0.5), représentées par les courbes bleue (CL1) et magenta (CL2), la portance moyenne est globalement plus modérée et montre une évolution plus régulière. CL1 (bleu) diminue légèrement avec l'augmentation de  $L/D$ , tandis que CL2 (magenta) augmente graduellement, les deux courbes convergeant vers des valeurs proches de zéro.

En conclusion, l'ajout d'ailettes verticales permet de stabiliser la portance moyenne en réduisant les écarts extrêmes observés dans les configurations sans ailettes. Les ailettes



semblent atténuer les déséquilibres aérodynamiques, ce qui peut être bénéfique pour améliorer la stabilité directionnelle et réduire les oscillations induites par la portance à bas nombre de Reynolds.

**Cas ailette Ail=0.75 avec portance moyenne**



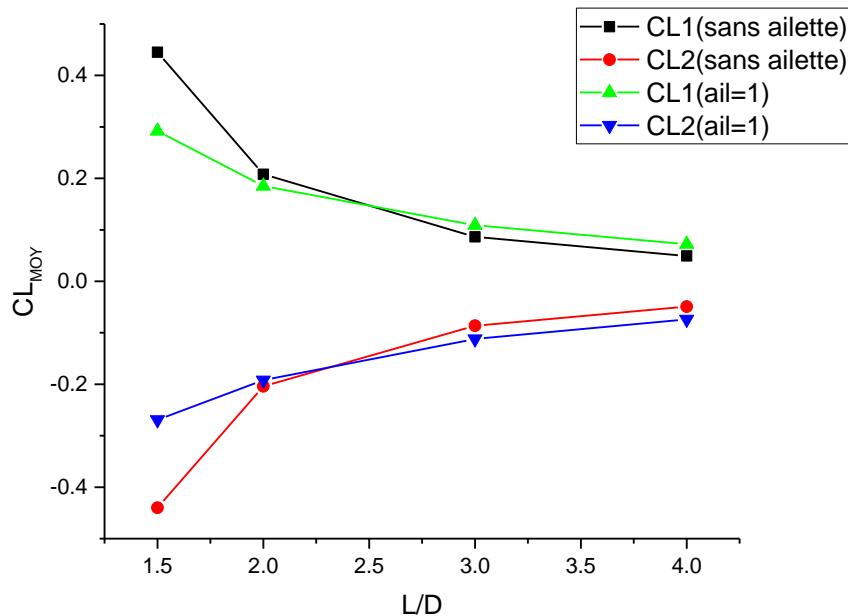
**Figure III-3 :** Variation de Portance moyenne en fonction du L/D avec ailettes vertical a  
Re=200

La figure présente la variation du coefficient de portance moyenne en fonction du rapport L/D, pour deux cylindres verticaux avec et sans ailettes vertical de taille (ail=0.75), à un nombre de Reynolds Re=200. On observe que dans le cas sans ailettes, les coefficients de portance (CL1) et (CL2) présentent un comportement relativement symétrique et décroissant, traduisant une interaction hydrodynamique modérée entre les deux cylindres.

En revanche, l'introduction des ailettes modifie sensiblement l'écoulement. Le coefficient (CL1), correspondant au cylindre amont, se stabilise à une valeur élevée, ce qui indique une amélioration de la portance grâce à l'ailette. À l'inverse, le coefficient (CL2), relatif au cylindre aval, subit une forte diminution avec l'augmentation du rapport (L/D). Cela révèle que l'ailette perturbe fortement le sillage du cylindre amont, réduisant l'intensité des structures tourbillonnaires atteignant le cylindre aval. Cette configuration entraîne une dissymétrie importante des efforts hydrodynamiques, et suggère que les ailettes verticales peuvent jouer un

rôle crucial dans le contrôle de la portance et la réduction des instabilités dans les structures immergées.

**Cas ailette Ail=1 avec portance moyenne**



**Figure III-4 :** Variation de Portance moyenne en fonction du L/D avec ailettes vertical a  $Re=200$

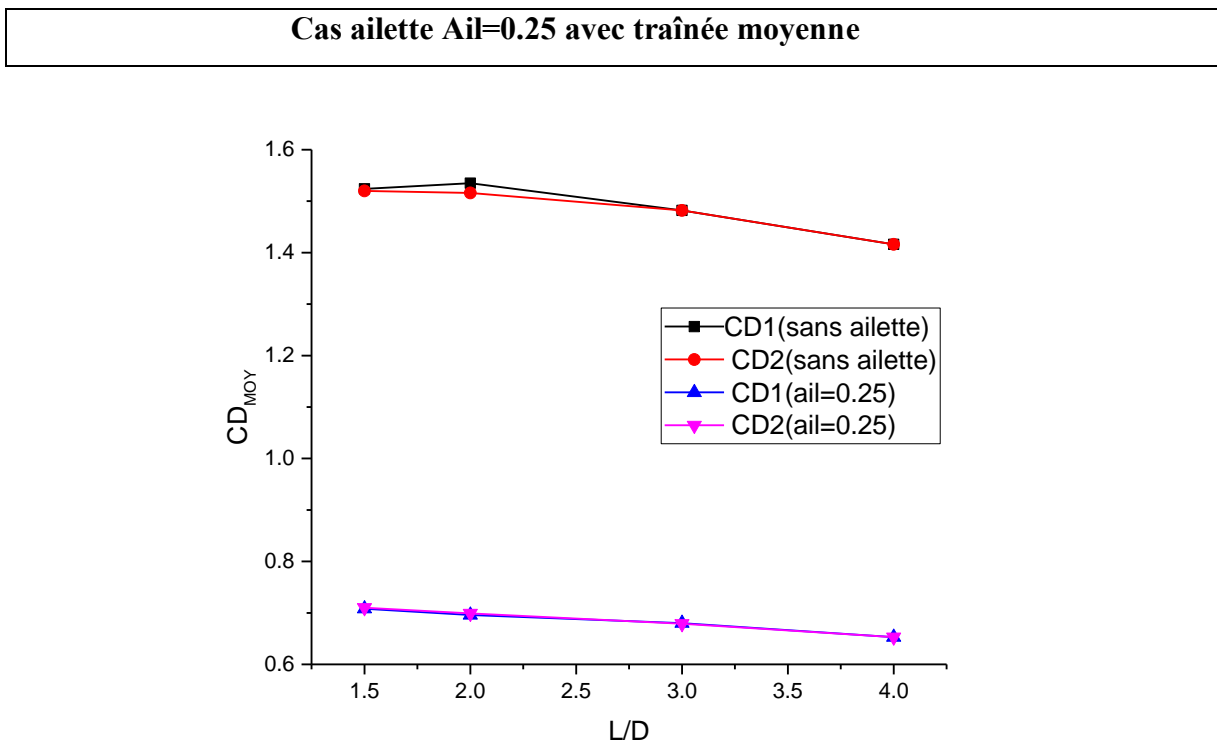
L'analyse du graphique montre l'évolution de la portance moyenne pour différentes configurations d'écoulement autour d'un obstacle cylindrique avec et sans ailettes vertical, en fonction du rapport (L/D) (longueur sur diamètre). En l'absence d'ailettes, les coefficients de portance moyenne (CD1) et (CD2) restent relativement élevés, témoignant d'une interaction plus intense entre le fluide et la surface de l'obstacle. En revanche, lorsqu'on ajoute des ailettes verticales avec un espacement (ail=1), on observe une diminution significative de ces coefficients pour toutes les valeurs de (L/D). Cette réduction est attribuée à une meilleure gestion des structures tourbillonnaires, réduisant ainsi l'effet de la traînée latérale.

En particulier, les courbes avec ailettes montrent une décroissance régulière de la portance moyenne avec l'augmentation du rapport (L/D), ce qui indique une stabilisation progressive l'écoulement. La superposition des courbes (CD1) et (CD2) dans le cas avec ailettes suggère également une symétrie ou homogénéité accrue de l'écoulement autour de l'obstacle.

En conclusion à  $Re=200$  l'ajout d'ailettes verticales permet de réduire significativement la portance moyenne, ce qui améliore la stabilité hydrodynamique du système, particulièrement à faible nombre de Reynolds. Le rapport ( $L/D$ ), joue un rôle important dans cette optimisation, avec un effet bénéfique plus marqué à plus grande distance relative.

### Variation de traînée moyen

Auna varier de la traînée moyenne en fonction du  $L/D$  avec ailettes verticales a  $Re=200$  dans chaque ailette  $Ail=0.25$  ;  $Ail=0.5$  ;  $Ail=0.75$  ;  $Ail=1$  est les résultats dans les graphes suivants :



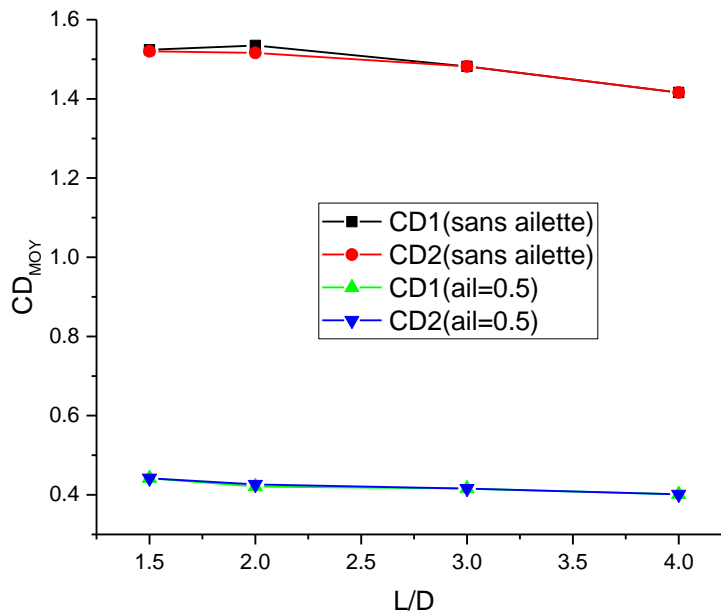
**Figure III-5 :** Variation de Traînée moyenne en fonction du  $L/D$  avec ailettes verticales a  $Re=200$

La figure illustre la variation de la traînée moyenne ( $CD$ ) en fonction du rapport( $L/D$ ) pour deux configurations : sans ailette et avec ailettes verticales à une déflexion d'aileron de 0,25. On distingue les composantes ( $CD1$ ) et ( $CD2$ ) pour chaque cas. Dans la configuration sans ailette, la traînée moyenne est significativement plus élevée, notamment pour  $CD2$  (courbe rouge), qui reste nettement au-dessus des autres courbes sur toute la plage de ( $L/D$ ).

À l'inverse, l'ajout d'ailettes avec une faible déflexion ( $\text{ail} = 0,25$ ) entraîne une réduction marquée de la traînée pour les deux composantes (courbes bleue et magenta), qui deviennent quasi identiques et stables, avec des valeurs bien inférieures à celles obtenues sans ailettes.

En conclusion à  $\text{Re}=200$ , l'utilisation d'ailettes verticales avec une déflexion modérée permet de réduire considérablement la traînée moyenne des deux composantes du système aérodynamique. Cette réduction de traînée est bénéfique pour améliorer le rendement aérodynamique global, ce qui en fait une stratégie efficace pour optimiser les performances à faible Reynolds, notamment lorsque la minimisation des pertes énergétiques est un objectif prioritaire.

#### Cas ailette $\text{Ail}=0.5$ avec traînée moyenne



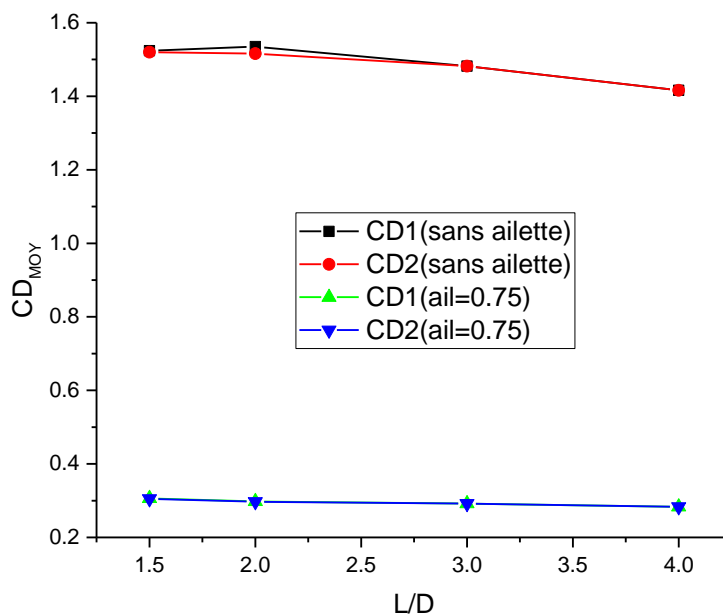
**Figure III-6 :** Variation de Traînée moyenne en fonction du  $L/D$  avec ailettes verticales a  $\text{Re}=200$

L'étude de la variation de la traînée moyenne en fonction du rapport ( $L/D$ ) met en évidence l'influence notable des ailettes verticales sur le comportement hydrodynamique autour d'un cylindre. Sans ailettes, les coefficients de traînée ( $CD1$ ) et  $CD2$  présentent des valeurs plus élevées, indiquant une résistance plus importante à l'écoulement, surtout pour le cas  $CD2$ , dont la courbe montre une décroissance modérée avec l'augmentation de  $L/D$ .

En revanche, l'ajout d'ailettes (cas avec ailette=0.5) entraîne une diminution significative des coefficients de traînée pour les deux courbes (CD1) et (CD2), traduisant une réduction des efforts de traînée exercés par le fluide. Cette amélioration est particulièrement visible par la chute nette de la traînée dès les faibles rapports L/D, ce qui suggère que les ailettes perturbent les structures tourbillonnaires en aval du cylindre, stabilisent l'écoulement, et réduisent les pertes d'énergie.

L'ajout d'ailettes verticales à un cylindre soumis à un écoulement laminaire ( $Re=200$ ) permet de réduire efficacement la traînée moyenne, notamment pour de faibles rapports L/D. Cette configuration constitue donc une solution hydrodynamique avantageuse pour améliorer les performances dans les systèmes où la réduction de la traînée est cruciale.

**Cas ailette Ail=0.75 avec traînée moyenne**



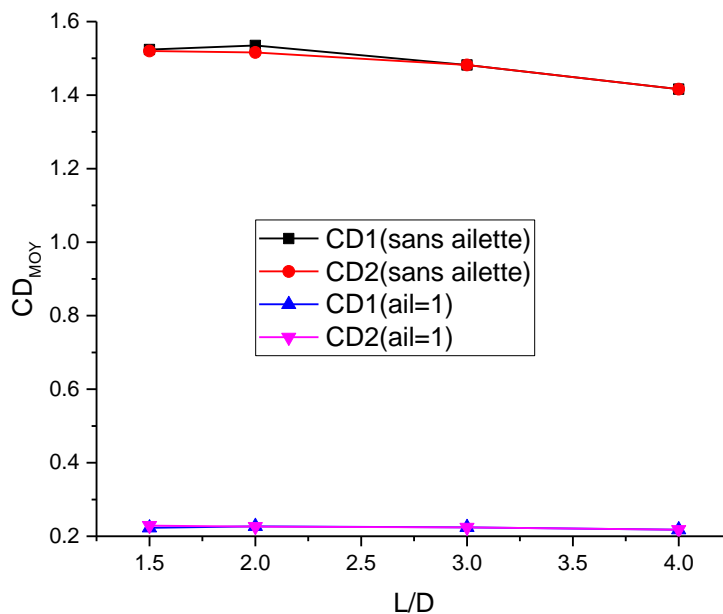
**Figure III-7 :** Variation de Traînée moyenne en fonction du L/D avec ailettes verticales a  $Re=200$

Le graphique illustre la variation de la traînée moyenne en fonction du rapport L/D pour un écoulement hydrodynamique à nombre de Reynolds  $Re=200$ , en comparant les cas avec et sans ailettes verticales de taille relative (ail=0,75). Les courbes noire et rouge correspondent aux configurations sans ailettes (CD1) et (CD2), tandis que les courbes verte et bleue représentent les configurations avec ailettes. On constate que l'ajout d'ailettes entraîne une nette diminution

de la traînée moyenne pour les deux géométries (CD1) et (CD2), avec des valeurs significativement inférieures à celles obtenues sans ailettes, sur toute la plage de  $(L/D)$  étudiée. Cette réduction est presque constante, indiquant que les ailettes verticales permettent de stabiliser et d'optimiser l'écoulement autour du corps.

Les courbes avec ailettes montrent également moins de variation en fonction de  $(L/D)$ , ce qui suggère une atténuation des effets géométriques sur la traînée grâce à l'action des ailettes. En conclusion à  $(Re=200)$  L'utilisation d'ailettes verticales de taille  $(ail=0,75)$  permet de réduire considérablement la traînée moyenne, quelles que soient les proportions géométriques exprimées par le rapport  $(L/D)$ . Cette amélioration est attribuée à une meilleure gestion du sillage et à une diminution des forces de résistance. Le dispositif d'ailettes se révèle ainsi efficace pour améliorer les performances hydrodynamiques à bas nombre de Reynolds, en particulier pour les configurations où la traînée joue un rôle crucial.

#### Cas ailette Ail=1 avec traînée moyenne



**Figure III-8 :** Variation de Traînée moyenne en fonction du  $L/D$  avec ailettes verticales a  $Re=200$

Le graphique présenté illustre la variation de la traînée moyenne ( $CD_{MOY}$ ) en fonction du rapport  $(L/D)$  pour deux configurations : sans ailettes et avec ailettes verticales ( $ail=1$ ), à un

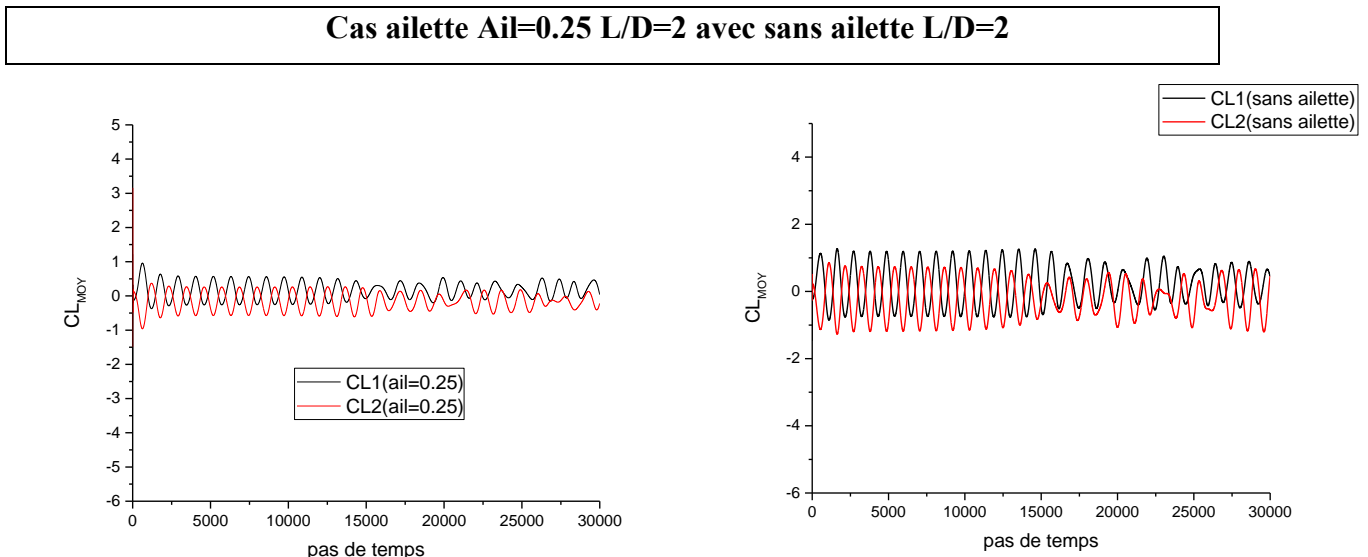
nombre de Reynolds de 200. On observe que pour les configurations sans ailettes (courbes noire et rouge, CD1 et CD2), la traînée moyenne est relativement élevée, se situant autour de 1.5. De plus, elle montre une légère tendance à diminuer lorsque le rapport  $L/D$  augmente, indiquant que l'allongement de la forme a un impact modéré sur la réduction de la traînée.

En revanche, pour les configurations avec ailettes verticales (courbes bleue et magenta), la traînée moyenne chute drastiquement pour atteindre des valeurs avoisinant 0.2, soit une réduction significative par rapport aux cas sans ailettes. De plus, dans cette configuration, la traînée reste quasiment constante malgré l'augmentation du rapport  $L/D$ , ce qui laisse penser que la présence des ailettes stabilise le comportement aérodynamique de l'objet.

En conclusion, l'ajout d'ailettes verticales a un effet très bénéfique sur la réduction de la traînée moyenne, beaucoup plus significatif que l'allongement seul de la forme (rapport  $L/D$ ). Ce résultat met en évidence l'efficacité des dispositifs passifs comme les ailettes dans le contrôle de la traînée à faible Reynolds.

### III.2.3 Comportement de Portance pour l'obstacle avec ailettes et sans ailette verticale

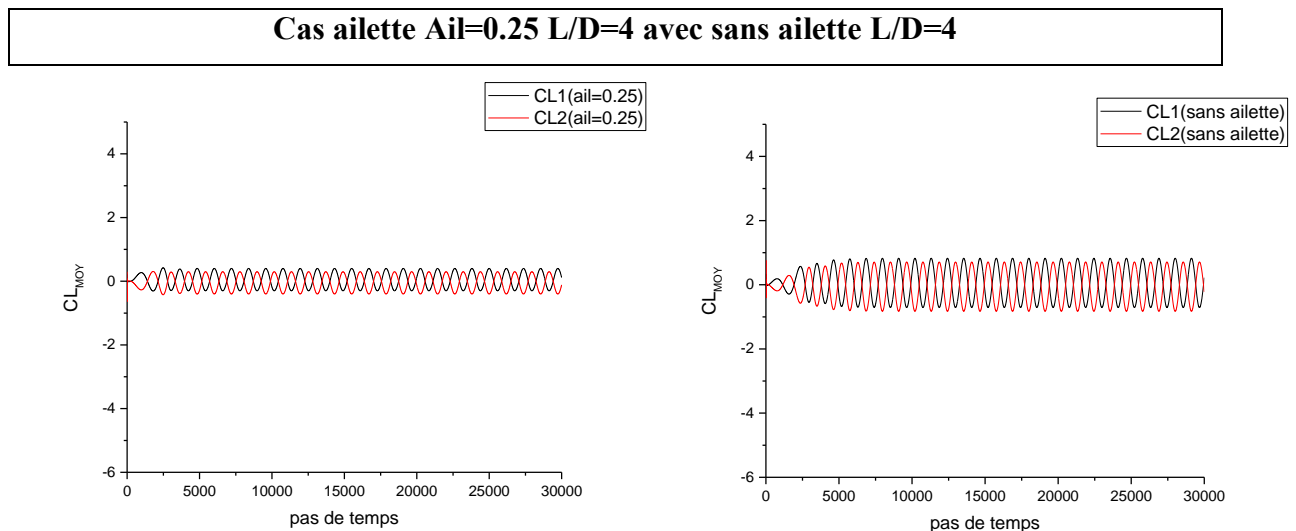
Auna fait la comparatrice entre les deux cas avec ailette et sans ailette entre deux cylindre CL1 et CL2 dans chaque ailette  $Ail=0.25$  ;  $Ail=0.5$  ;  $Ail=0.75$  ;  $Ail=1$  ; a  $Re=200$  est les résultats dans les graphes suivants :



**Figure III-9 :** variation de portance moyenne en fonction du  $L/D = 2$  avec ailettes verticales a  $Re=200$

L'analyse des courbes obtenues pour un rapport ( $L/D = 2$ ) à  $Re = 200$  met en évidence l'effet des ailettes verticales sur la portance moyenne ( $CL_{moy}$ ). Dans le cas avec ailettes (à gauche), les fluctuations de ( $CL_{moy}$ ) sont atténuées, montrant un comportement plus stable et régulier du système. Cela indique que les ailettes perturbent positivement la formation et le détachement des tourbillons, réduisant ainsi les instabilités hydrodynamiques. À l'inverse, en l'absence d'ailettes (à droite), les variations sont plus marquées et plus chaotiques, suggérant un écoulement dominé par des structures tourbillonnaires plus intenses et désordonnées. Les ailettes agissent donc comme un système de contrôle passif, modifiant la dynamique de l'écoulement autour du cylindre et favorisant une réduction des efforts fluctuants.

En conclusion, L'ajout d'ailettes verticales au cylindre à ( $L/D = 2$ ) et  $Re=200$  permet de stabiliser l'écoulement et de réduire les variations de portance moyenne. Ce dispositif s'avère efficace pour améliorer la performance hydrodynamique en atténuant les forces instationnaires susceptibles de provoquer des vibrations ou de diminuer la durée de vie des structures. Il représente ainsi une solution pertinente pour le contrôle passif des écoulements autour d'obstacles immergés.



**Figure III-10 :** variation de portance moyenne en fonction du  $L/D=4$  avec ailettes verticales  
à  $Re=200$

L'analyse des deux graphiques illustrant les cas avec (gauche) et sans ailettes verticales (droite), à ( $L/D= 4$ ) et  $Re = 200$ , révèle une évolution significative de la portance moyenne au fil du temps. Dans le cas avec ailettes, les oscillations de ( $CL_{moy}$ ) sont nettement atténuées : elles présentent une amplitude plus faible et une tendance quasi symétrique autour de zéro. Ce

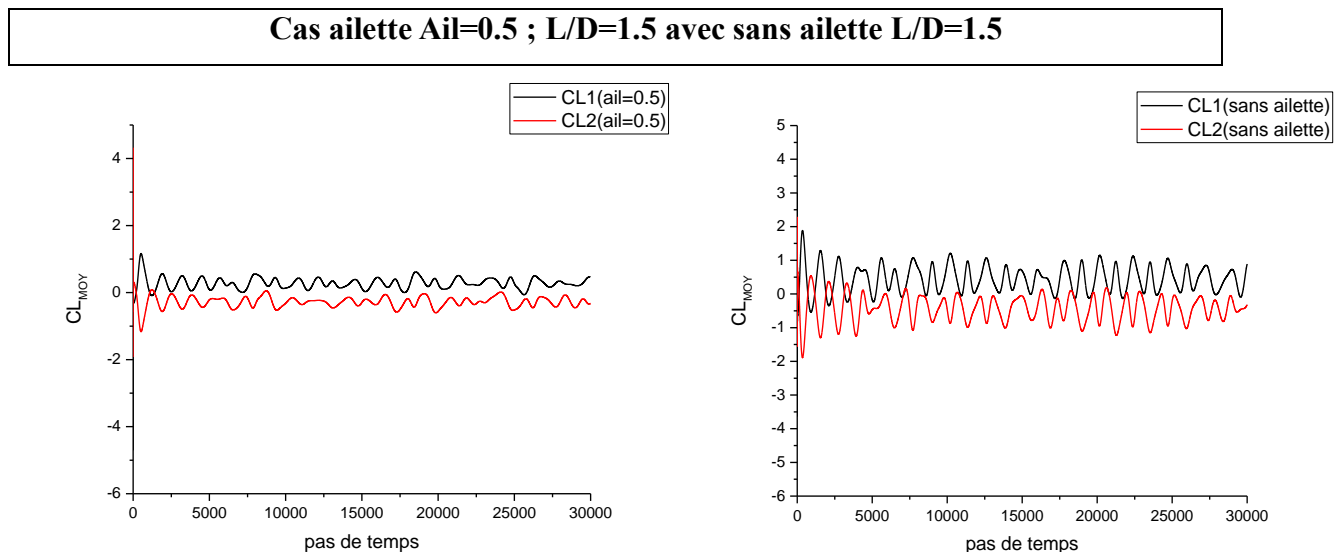


comportement indique un écoulement plus régulé, avec des tourbillons affaiblis ou mieux canalisés grâce à l'effet stabilisateur des ailettes verticales.

En revanche, sans ailettes, on constate des oscillations de portance plus importantes et plus persistantes, qui traduisent une dynamique tourbillonnaire plus intense et désorganisée derrière le cylindre.

Les ailettes verticales jouent ici un rôle essentiel dans la modification du sillage : elles réduisent l'intensité des tourbillons alternés (type von **Kármán**) en favorisant une séparation d'écoulement plus symétrique. Cela permet de limiter les variations de pression et donc de réduire les forces instationnaires sur la surface du corps.

En conclusion, Pour un rapport ( $L/D=4$ ) à  $Re = 200$ , l'ajout d'ailettes verticales améliore significativement la stabilité de l'écoulement et réduit les variations de portance moyenne. Cela témoigne de l'efficacité de ces dispositifs dans le contrôle passif des écoulements instationnaires. En ingénierie hydromécanique, ce type de configuration peut être particulièrement utile pour limiter les vibrations et prolonger la durée de vie des structures immergées, notamment dans les applications marines ou fluviales.



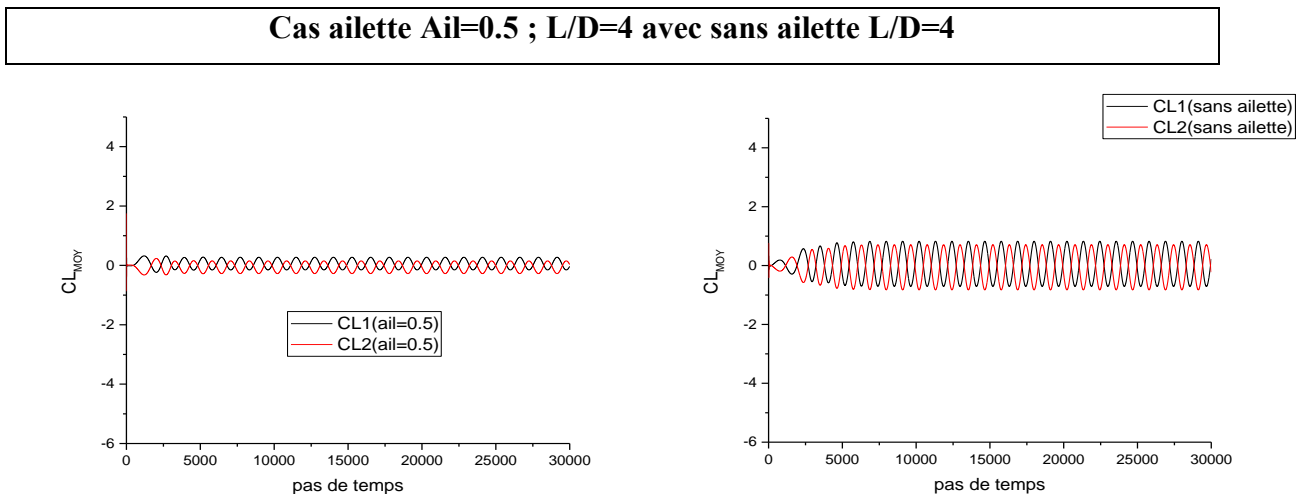
**Figure III-11 :** variation de portance moyenne en fonction du  $L/D=1.5$  avec ailettes verticales a  $Re=200$

Les deux graphes comparent les fluctuations de la portance moyenne ( $CL_{moy}$ ) dans un écoulement autour d'un obstacle cylindrique, avec (à gauche) et sans (à droite) ailettes verticales, pour un rapport ( $L/D=1.5$ ) et une longueur d'ailette de 0.5. On observe clairement que l'ajout des ailettes entraîne une réduction de l'amplitude des fluctuations de la portance.

Plus précisément, le cas avec ailettes (graphe de gauche) montre une décroissance rapide des oscillations en début de simulation, suivie par une phase relativement stable autour d'une valeur moyenne plus faible. Cela signifie que les ailettes favorisent une dissipation plus rapide de l'instabilité initiale et engendrent un sillage plus symétrique.

En revanche, sans ailettes (graphe de droite), les oscillations persistent avec une amplitude plus importante tout au long de la simulation, ce qui indique un écoulement instable et la présence de tourbillons alternés plus intenses de type von **Kármán**. Les ailettes jouent ici un rôle de stabilisation en réduisant les gradients de pression et en contrôlant la dynamique du sillage.

En conclusion, L'ajout d'ailettes verticales ( $Ail = 0.5$ ) pour un rapport ( $L/D = 1.5$ ) à  $Re = 200$  permet de réduire considérablement les fluctuations de portance moyenne, stabilisant ainsi l'écoulement autour de l'obstacle cylindrique. Ce comportement hydrodynamique montre l'efficacité des ailettes comme solution passive de contrôle de sillage, apportant des bénéfices en termes de réduction de vibrations, d'efforts fluctuants et de fatigue structurelle, ce qui est particulièrement intéressant pour les applications en hydraulique, génie maritime ou structures immergées.

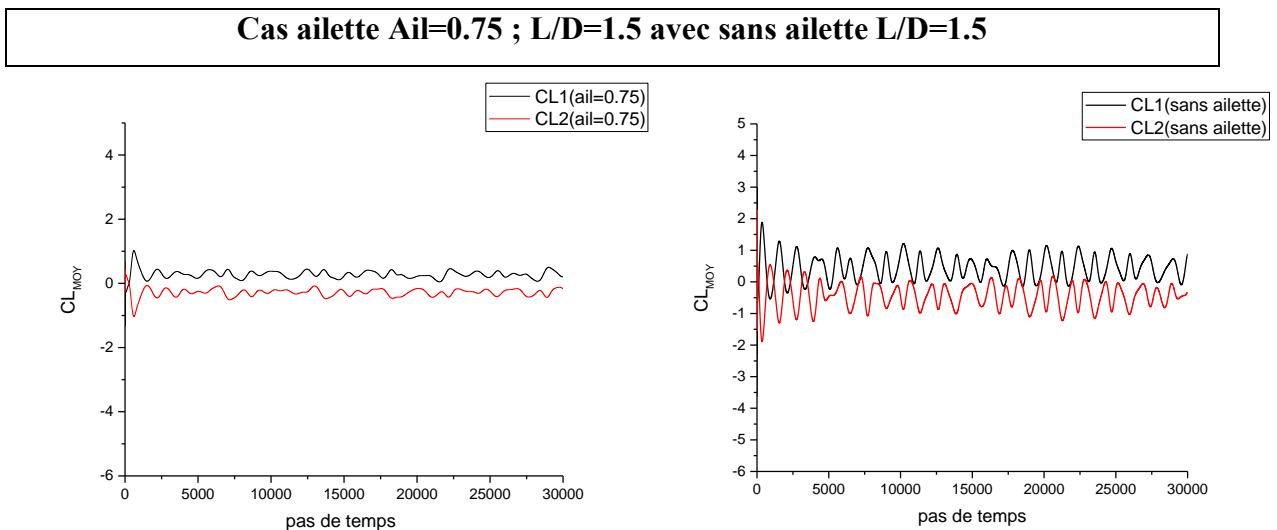


**Figure III-12 :** variation de portance moyenne en fonction du  $L/D=4$  avec ailettes verticales  
à  $Re=200$

Dans cette étude hydrodynamique à  $Re=200$ , l'effet des ailettes verticales ( $ail=0.5$ ) sur la portance moyenne est analysé en fonction du rapport ( $L/D=4$ ). Le graphique de gauche montre que, lorsque les ailettes sont présentes, les oscillations de ( $CL_{moy}$ ) sont significativement atténuées par rapport au cas sans ailette (graphique de droite). Cela traduit une réduction de l'instabilité des forces latérales agissant sur le corps, ce qui est bénéfique pour le contrôle des vibrations induites par vortex (VIV).

En effet, la présence des ailettes verticales agit comme un dispositif de stabilisation du sillage, atténuant les effets des tourbillons alternés de Bénard-Kármán. Par conséquent, la portance moyenne reste faible et relativement constante dans le temps, indiquant une dynamique d'écoulement plus symétrique et maîtrisée.

En conclusion, L'ajout d'ailettes verticales avec ( $ail=0.5$ ) permet de réduire l'intensité des oscillations de portance, améliorant la stabilité hydrodynamique du système à ( $L/D=4$ ). Ce dispositif est donc efficace pour le contrôle passif des efforts fluides dans les écoulements à faible Reynolds.



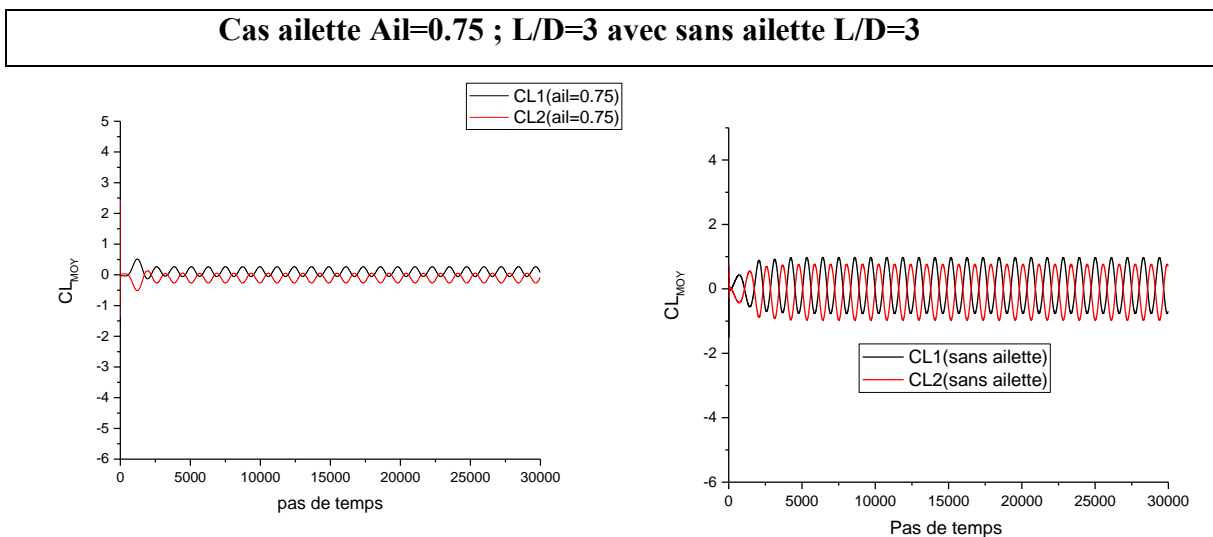
**Figure III-13 :** Variation de portance moyenne en fonction du  $L/D= 1.5$  avec ailettes verticales a  $Re=200$

Dans ce cas d'étude hydrodynamique, on observe l'effet de l'ajout d'ailettes verticales ( $ail=0.75$ ) sur les forces de portance moyennes générées autour d'un obstacle cylindrique à faible nombre de Reynolds. Le graphique de gauche représente la variation de ( $CL_{moy}$ ) avec ailettes, tandis que celui de droite correspond au cas sans ailette. Il est clair que la présence des ailettes entraîne une diminution significative de l'amplitude des oscillations de portance dans le temps, traduisant un effet stabilisateur sur le sillage.

Avec ailettes, les fluctuations deviennent moins marquées et plus régulières, ce qui indique une atténuation de l'instabilité transverse dans l'écoulement. En revanche, sans ailette, les variations de ( $CL_{moy}$ ) sont plus intenses, traduisant une plus grande influence des tourbillons alternés et des instabilités typiques du phénomène de vortex shed ding. Ce comportement

montre l'importance du ratio géométrique ( $L/D$ ) et de la taille des ailettes dans le contrôle des efforts hydrodynamiques.

En conclusion, L'ajout d'ailettes verticales avec ( $ail=0.75$ ) à ( $L/D=1.5$ ) permet de réduire sensiblement les oscillations de la portance moyenne. Cette configuration se révèle efficace pour stabiliser l'écoulement autour de l'obstacle et limiter les forces transverses non désirées, ce qui est bénéfique pour les applications nécessitant un contrôle passif des vibrations et de la traînée dans les écoulements à bas Reynolds.



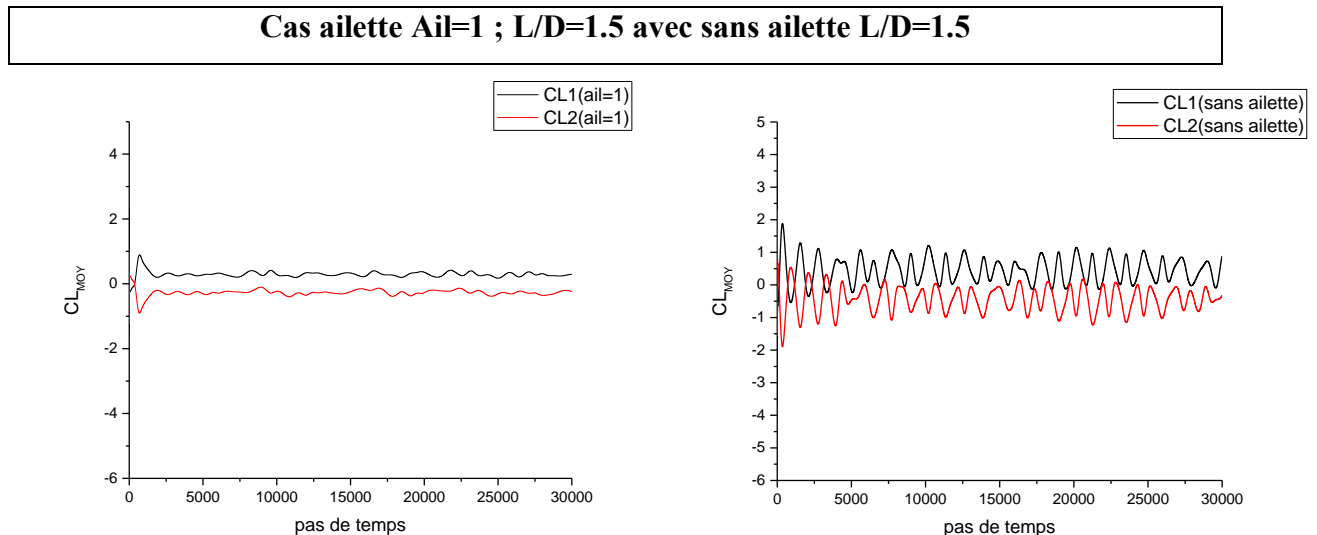
**Figure III-14 :** Variation de portance moyenne en fonction du  $L/D=3$  avec ailettes verticales  
à  $Re=200$

Le graphique présente deux situations : à gauche, l'évolution de ( $CL_{moy}$ ) pour un corps muni d'ailettes verticales ; à droite, celle d'un corps sans ailette. Dans le cas avec ailettes (gauche), les oscillations de portance sont rapidement amorties et deviennent faibles et régulières. Cela montre une stabilisation du sillage par les ailettes, qui limitent le développement des tourbillons alternés responsables des forces transverses non stationnaires.

En revanche, dans le cas sans ailette (droite), les oscillations de ( $CL_{moy}$ ) sont plus amples et persistent tout au long du temps simulé, indiquant une dynamique d'écoulement instable avec une forte influence du vortex shed ding. La régularité et l'intensité des oscillations traduisent un comportement périodique mais dynamique, qui peut induire des vibrations indésirables dans des structures exposées à ce type de flux.

En conclusion, à ( $L/D=3$ ), l'ajout d'ailettes verticales avec ( $ail=0.75$ ) améliore considérablement la stabilité de l'écoulement autour du cylindre. La réduction de l'amplitude

des oscillations de portance moyenne témoigne d'un contrôle passif efficace des instabilités du sillage. Ce résultat confirme que les ailettes jouent un rôle important dans la réduction des forces transverses, en atténuant les effets des tourbillons de **Bénard-Kármán** dans les écoulements à faible Reynolds.



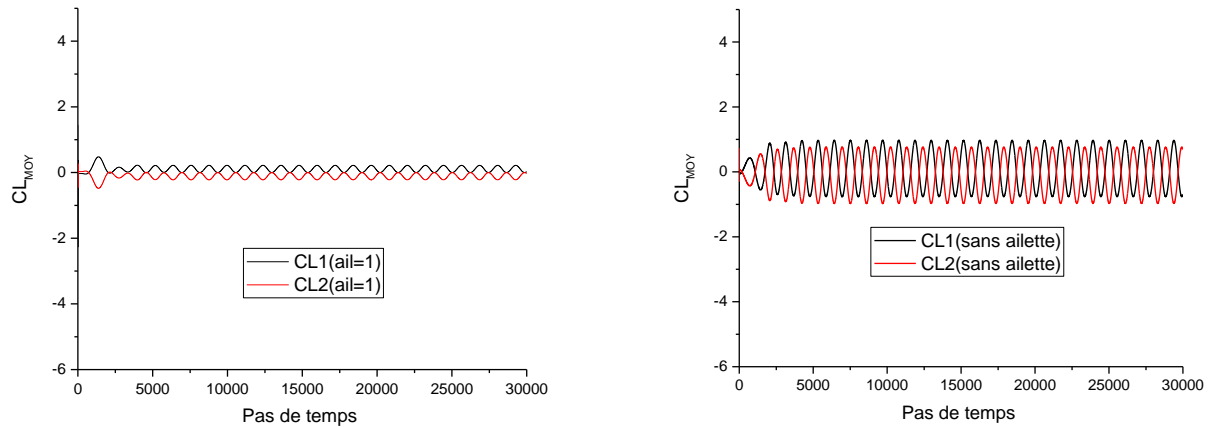
**Figure III-15 :** Variation de portance moyenne en fonction du  $L/D= 1.5$  avec ailettes verticales  $Re=200$

Le graphique compare l'évolution de la portance moyenne ( $CL_{moy}$ ) en fonction du rapport ( $L/D$ ) pour deux configurations : avec ailettes verticales (gauche) et sans ailettes (droite). Pour un nombre de Reynolds  $Re=200$  et un rapport ( $L/D=2$ ), on observe que l'ajout des ailettes verticales modifie considérablement la dynamique de portance.

Dans le cas avec ailettes (graphique de gauche), les valeurs de ( $CL_{moy}$ ) restent globalement plus stabilisées et moins oscillantes, avec des amplitudes réduites, traduisant un comportement aérodynamique plus stable et régularisé. En revanche, dans le cas sans ailette (graphique de droite), les courbes de ( $CL_{moy}$ ) présentent des oscillations plus marquées avec des amplitudes plus élevées, indiquant un écoulement plus instable et turbulent.

En conclusion, L'ajout des ailettes verticales permet de réduire l'amplitude des variations de portance moyenne et de stabiliser l'écoulement autour du cylindre. Cela démontre leur efficacité dans le contrôle de l'instabilité hydrodynamique, surtout à bas Reynolds ( $Re = 200$ ), et confirme leur rôle dans l'amélioration de la performance hydromécanique du système.

<b>Cas ailette Ail=1 ; L/D=3 avec sans ailette D=3</b>
--



**Figure III-16 :** Variation de portance moyenne en fonction du  $L/D=3$  avec ailettes verticales  
a  $Re=200$

Dans le cas où le rapport ( $L/D=3$ ) et le nombre de Reynolds est fixé à  $Re=200$ , l'effet des ailettes verticales sur la portance moyenne est particulièrement significatif. Lorsque les ailettes sont présentes, les variations de ( $CL_{moy}$ ) sont nettement atténuées, montrant un comportement aérodynamique stabilisé. Les oscillations deviennent quasi nulles et restent centrées autour de zéro, ce qui traduit une bonne régulation de l'écoulement et une diminution des effets instationnaires. À l'inverse, dans le cas sans ailette, on observe des oscillations périodiques importantes et durables tout au long de l'intervalle de ( $L/D$ ). Ces fluctuations indiquent une instabilité de l'écoulement, pouvant entraîner des perturbations dynamiques dans les systèmes hydromécaniques. Ainsi, l'ajout d'ailettes verticales dans cette configuration permet non seulement d'améliorer la stabilité, mais également de réduire les charges variables sur la structure, confirmant leur efficacité dans le contrôle de l'écoulement à bas Reynolds.

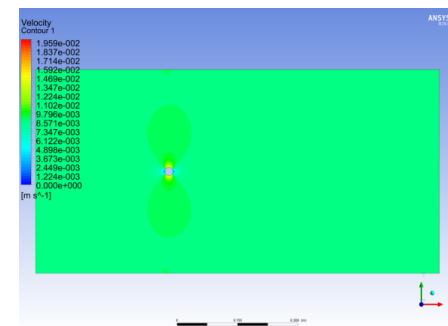
### III.3 Résultats de simulation numérique

Analyse de l'effet des ailettes sur l'écoulement autour d'un cylindre sans ailette

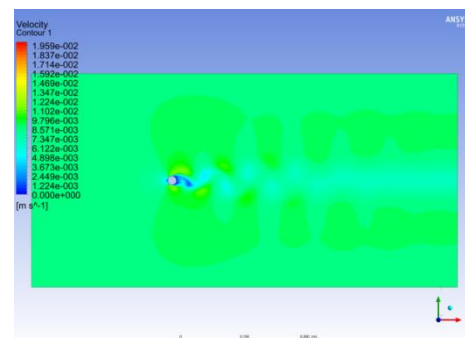
Dans le cas sans ailette présenté à l'étape 1, l'écoulement autour de l'obstacle cylindrique montre une dynamique caractéristique d'un sillage non contrôlé. À l'instant initial ( $T=0.05$ ), le champ de vitesse reste symétrique et localisé autour du cylindre, indiquant une perturbation faible. Toutefois, à partir de  $T=100$ , on commence à observer une accélération du fluide derrière l'obstacle, suivie par la formation progressive de tourbillons irréguliers. À  $T=150$  et  $T=300$ , ces structures deviennent de plus en plus désordonnées, traduisant une instabilité croissante dans le sillage. L'absence d'ailettes empêche toute stabilisation ou directionnalité du flux, ce qui entraîne une perte d'efficacité hydrodynamique et une amplification des zones de recirculation. De plus, la vitesse maximale reste concentrée dans une région étroite derrière le cylindre, avec une dispersion importante du fluide latéralement. En somme, ce cas met en évidence le rôle crucial des ailettes dans la régulation des tourbillons et l'optimisation du profil de vitesse autour de l'obstacle.

#### ETAPE 1

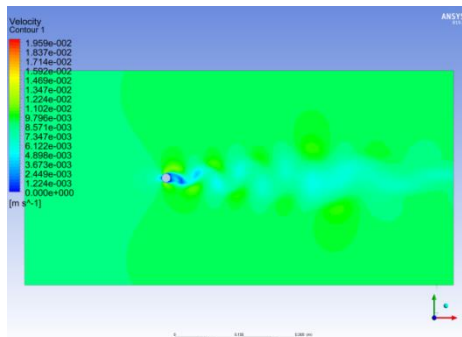
CAS SANS AILETTE  $T=0.05$



CAS SANS AILETTE  $T=100$



CAS SANS AILETTE  $T=150$



CAS SANS AILETTE  $T=300$

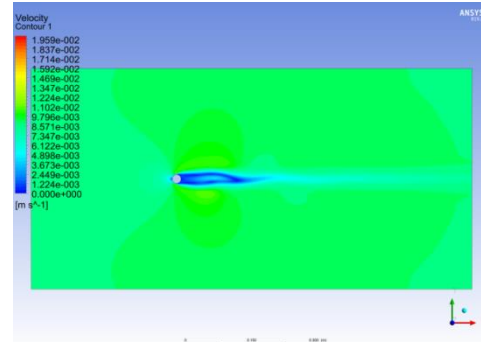


Figure III-17 : validation sans ailette étape 1

Dans le cas sans ailette à l'étape 2, nous observons une évolution marquée du comportement de l'écoulement autour de l'obstacle cylindrique. À l'instant initial ( $T=0.05$ ), le flux reste symétrique et faiblement perturbé, similaire au comportement observé à l'étape 1. Toutefois, à partir de  $T=100$ , des structures tourbillonnaires commencent à émerger derrière le cylindre, indiquant une instabilité croissante. Cette tendance s'intensifie aux instants  $T=150$  et  $T=300$ , où le sillage devient nettement plus désordonné, avec une alternance régulière de tourbillons (phénomène de Von Kármán). L'absence d'ailettes accentue l'effet de détachement périodique du flux, ce qui engendre une plus grande perte d'énergie cinétique et une augmentation de la traînée. De plus, la distribution des vitesses montre une forte dissymétrie en aval de l'obstacle, soulignant l'inefficacité du système à canaliser ou stabiliser le courant. Ces résultats confirment que l'absence d'ailettes ne permet pas de contrôler efficacement les effets de turbulence et de recirculation

## ETAPE 2

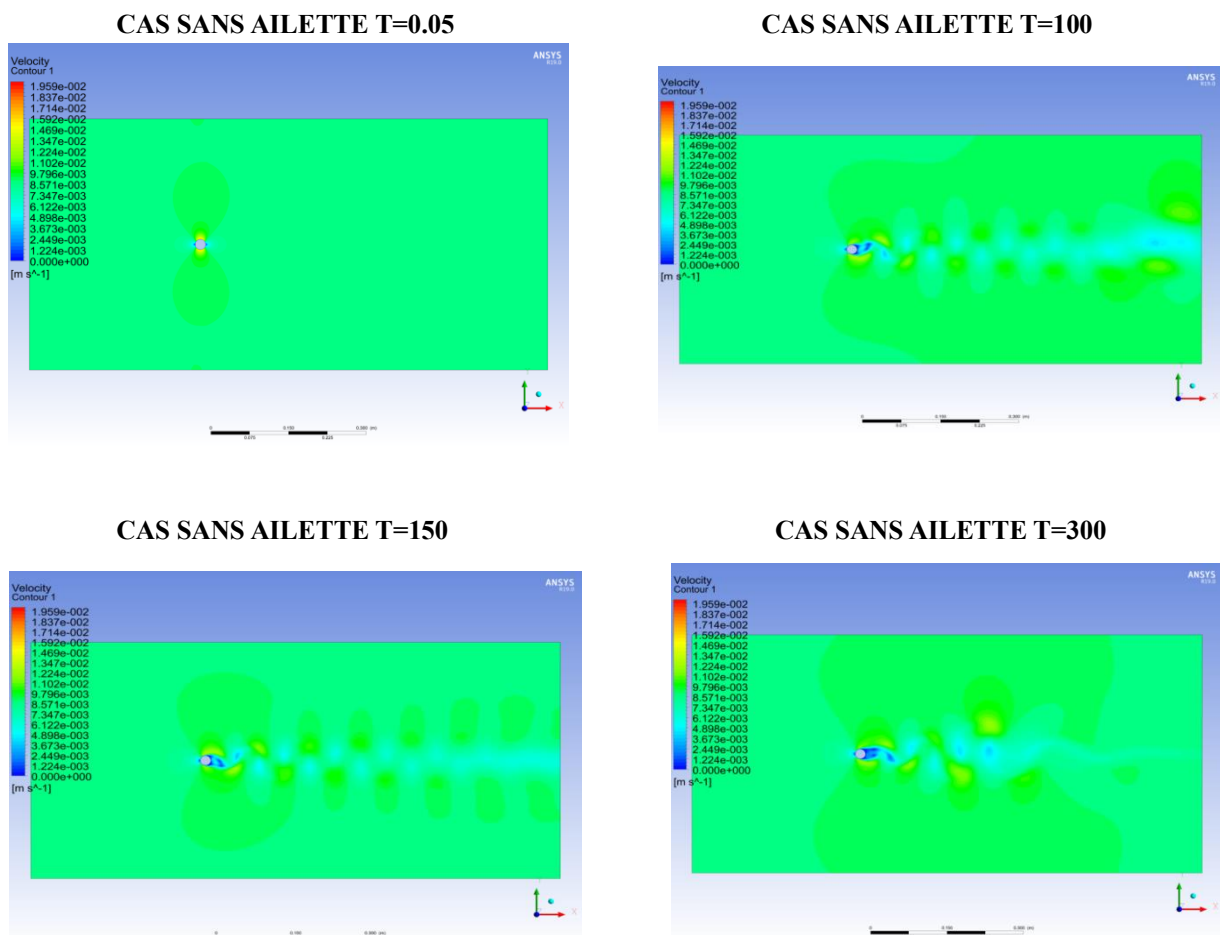


Figure III-18 : validation sans ailette étape



À l'étape 3, l'analyse des écoulements autour d'un cylindre sans ailettes révèle une dynamique fluide caractérisée par une instabilité croissante au fil du temps. À  $T=0.05$ , le champ de vitesse reste symétrique avec une faible zone de perturbation en aval de l'obstacle. Cependant, à partir de  $T=100$ , on observe l'apparition des premières zones tourbillonnaires, marquant le début d'un sillage instable. Cette instabilité se développe davantage à  $T=150$  et atteint son apogée à  $T=300$ , où l'on distingue clairement une alternance de structures tourbillonnaires de type Von Kármán. Ces tourbillons sont associés à une perte d'énergie importante et à une traînée accrue sur le cylindre. En l'absence d'ailettes, rien ne vient perturber ni dissiper ces vortex, ce qui permet à l'écoulement instable de se développer librement. Ainsi, le manque d'éléments de contrôle comme les ailettes entraîne une augmentation notable des perturbations hydrodynamiques, réduisant l'efficacité aérodynamique du système

## ETAPE 3

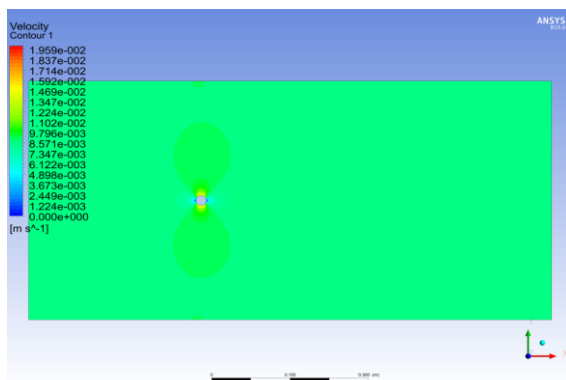
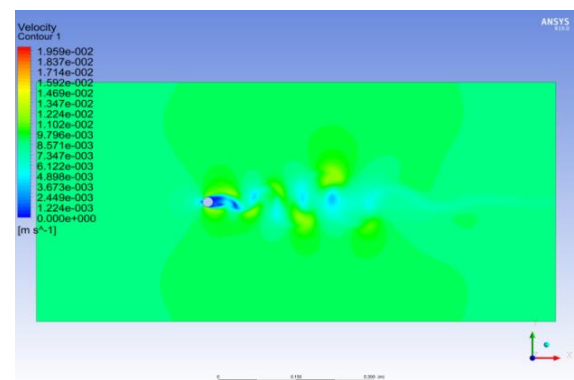
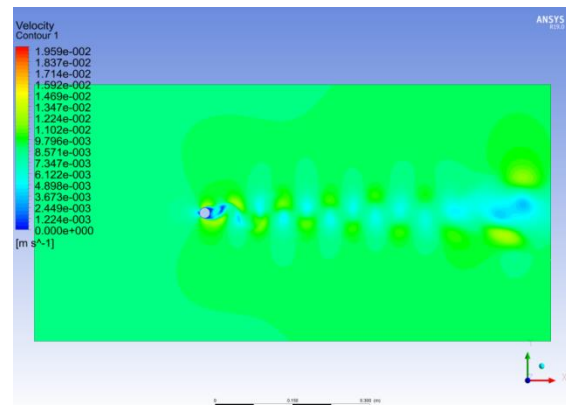
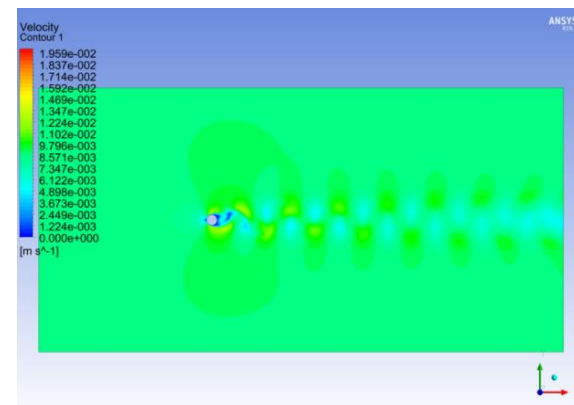
CAS SANS AILLETE  $T=0.05$ CAS SANS AILLETE  $T=100$ CAS SANS AILLETE  $T=150$ CAS SANS AILLETE  $T=300$ 

Figure III-19 : validation sans ailette étape 3

Analyse de l'effet des ailettes sur l'écoulement autour d'un cylindre avec ailette : L'ajout des ailettes autour d'un obstacle cylindrique a un impact significatif sur la dynamique de l'écoulement, en particulier sur la distribution de la vitesse et la formation des structures tourbillonnaires. Dans les résultats illustrés à l'étape 1, on observe, à l'instant initial ( $T=0.05$ ) un écoulement encore symétrique, avec une faible perturbation autour du cylindre équipé d'ailettes. À mesure que le temps progresse ( $T=100$  à  $T=300$ ), des zones de recirculation et des tourbillons bien définis apparaissent en aval de l'obstacle. Ces tourbillons alternés, caractéristiques du phénomène de Von **Kármán**, sont influencés par la présence des ailettes qui perturbent localement le champ de vitesse. On note une intensification de la turbulence et une déviation plus marquée des lignes de courant, ce qui suggère une interaction accrue entre les ailettes et le fluide. Ces effets peuvent améliorer le mélange du fluide, mais aussi augmenter la traînée sur le corps. Ainsi, les ailettes modifient sensiblement le sillage du cylindre, en rendant l'écoulement plus instable et complexe au fil du temps.

## ETAPE 1

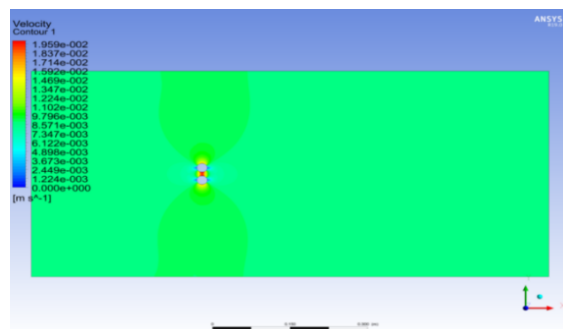
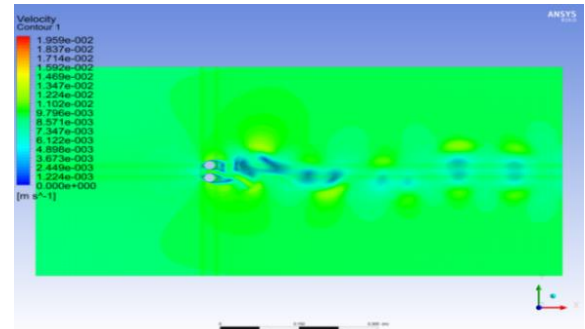
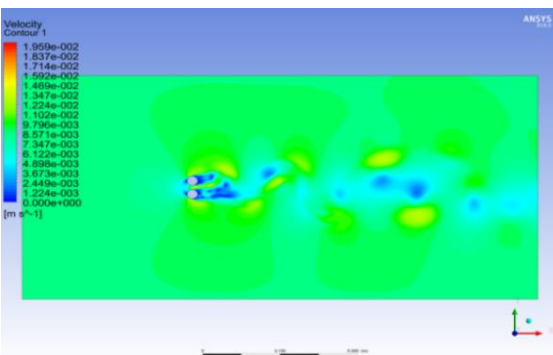
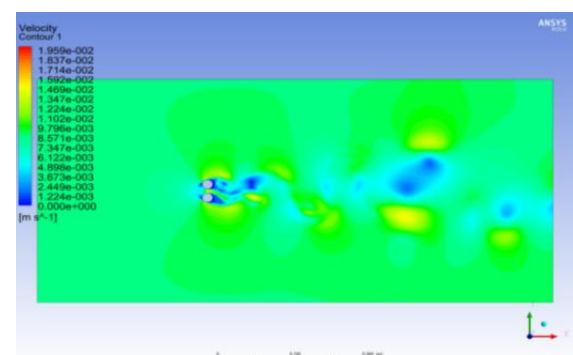
CAS AVEC AILETTE  $D=0.25$   $L=1.5$   $T=0.05$ CAS AVEC AILETTE  $D=0.25$   $L=1.5$   $T=100$ CAS AVEC AILETTE  $D=0.25$   $L=1.5$   $T=100$ CAS AVEC AILETTE  $D=0.25$   $L=1.5$   $T=100$ 

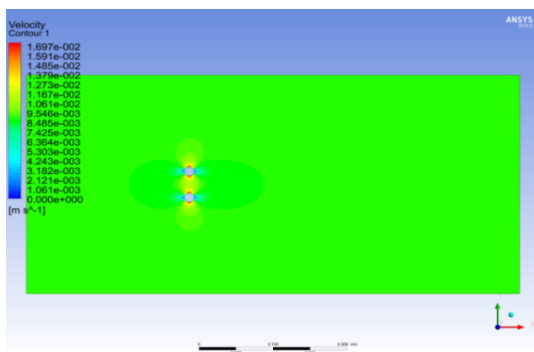
Figure III-20 : validation avec ailette étape 1

Dans cette deuxième étape, on examine l'effet des ailettes avec une longueur doublée ( $L=3$ ) sur l'écoulement autour d'un cylindre. À l'instant initial ( $T = 0.05$ ), le champ de vitesse reste symétrique et peu perturbé, avec une faible interaction entre le fluide et les ailettes. Toutefois, dès  $T = 100$ , on constate la formation de structures tourbillonnaires régulières et alternées dans le sillage de l'obstacle, traduisant un comportement typique de décollement tourbillonnaire accentué par la présence des ailettes plus longues.

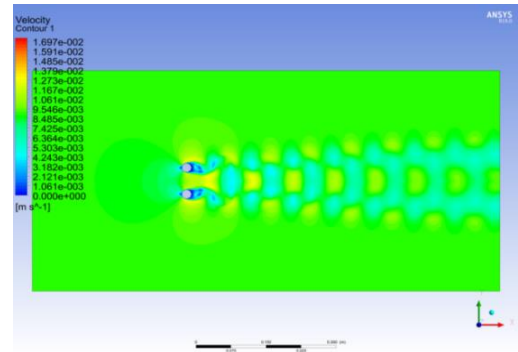
À  $T = 150$  et  $T = 300$ , l'écoulement devient plus organisé par rapport à l'étape 1 ( $L=1.5$ ), montrant une traînée allongée et une alternance régulière de zones de faible vitesse. Cela indique que l'augmentation de la longueur des ailettes stabilise partiellement le sillage, réduisant les effets chaotiques et favorisant une distribution plus symétrique de la vitesse. Les ailettes agissent donc comme des guides de flux, influençant la direction et la fréquence de génération des tourbillons. Ce comportement peut être exploité pour contrôler l'écoulement derrière les structures cylindriques, améliorer l'échange thermique ou réduire les vibrations induites par les tourbillons.

#### ETAPE 2

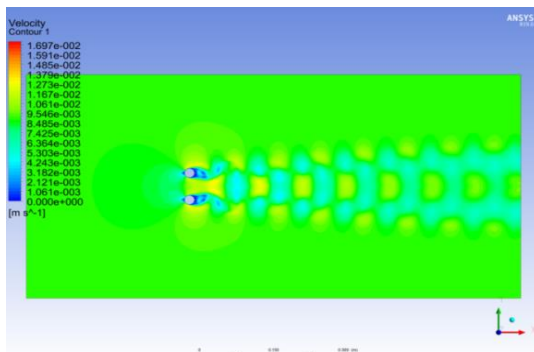
CAS AVEC AILETTE  $D=0.25$   $L=3$   $T=0.05$



CAS AVEC AILETTE  $D=0.25$   $L=3$   $T=100$



CAS AVEC AILETTE  $D=0.25$   $L=3$   $T=150$



CAS AVEC AILETTE  $D=0.25$   $L=3$   $T=300$

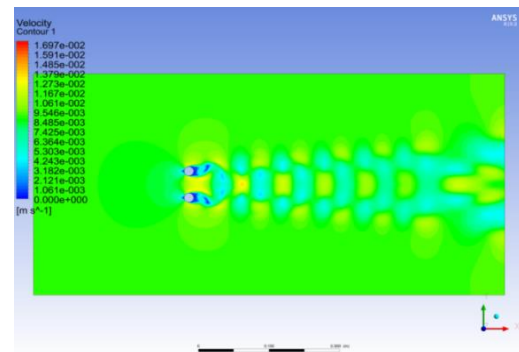


Figure III-21 : validation avec ailette étape 2

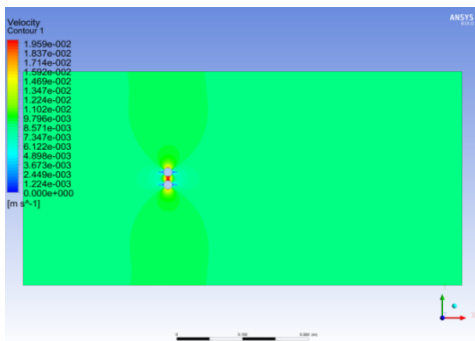
Dans cette troisième étape, l'augmentation du diamètre des ailettes à  $D=0.5$  modifie profondément la structure de l'écoulement autour du cylindre. À  $T = 100$ , la figure de gauche montre un écoulement encore symétrique, avec peu de perturbations apparentes. Cependant, dès que les effets transitoires s'estompent (à partir de  $T = 150$ ), on observe une forte instabilité dans le sillage, marquée par une alternance irrégulière de zones de faible vitesse et la naissance de tourbillons bien développés. Par rapport aux étapes précédentes, l'intensité des zones tourbillonnaires est plus marquée, ce qui suggère que l'augmentation du diamètre des ailettes intensifie le couplage fluide-structure.

Les ailettes de plus grand diamètre augmentent la surface de contact entre le fluide et l'obstacle, provoquant une séparation plus précoce de la couche limite et favorisant la formation de structures tourbillonnaires plus grandes et plus éloignées du cylindre. À

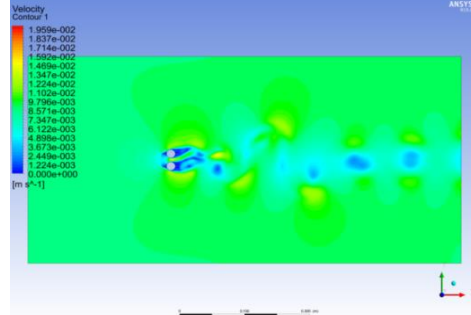
$T = 300$ , le sillage devient plus large et plus turbulent, indiquant une perte plus importante d'énergie cinétique due à la traînée. Cette configuration, bien qu'efficace pour perturber le sillage, pourrait avoir des effets défavorables sur la stabilité de l'écoulement si l'objectif est de réduire les forces stationnaires.

### ETAPE 3

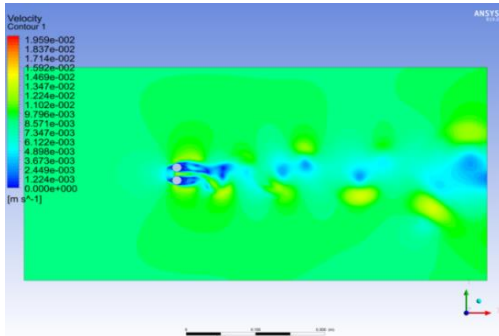
**CAS AVEC AILLETE  $D=0.5$   $L=1.5$   $T=100$**



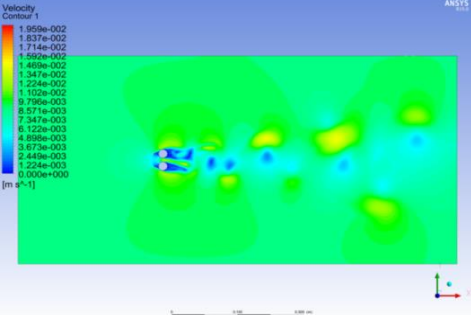
**CAS AVEC AILLETE  $D=0.5$   $L=1.5$   $T=100$**



**CAS AVEC AILLETE  $D=0.5$   $L=1.5$   $T=150$**



**CAS AVEC AILLETE  $D=0.5$   $L=1.5$   $T=300$**



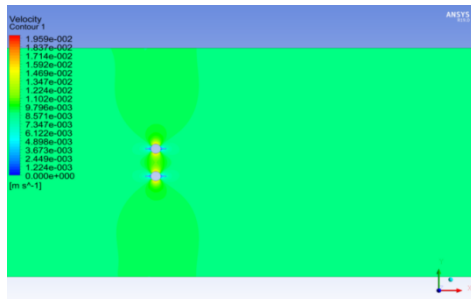
**Figure III-22 : validation avec ailette étape 3**

Notable le comportement de l'écoulement fluide. L'analyse des champs de vitesse à différents instants ( $T=0.05, 100, 150, 300$ ) montre que la présence des ailettes influence significativement la structure de l'écoulement. Initialement, à  $T=0.05$ , l'écoulement est relativement symétrique avec une vitesse peu perturbée, indiquant une phase stable. Cependant, à mesure que le temps progresse, on observe une intensification des tourbillons (vortex) en aval du cylindre. Ces tourbillons deviennent plus prononcés et plus réguliers, formant une traînée typique connue sous le nom de rue de von **Kármán**.

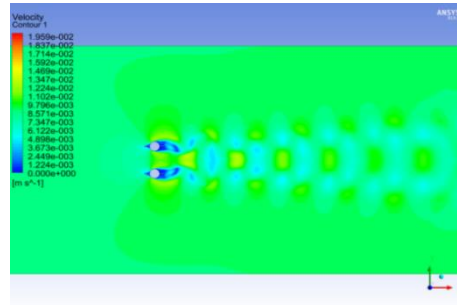
Les ailettes agissent comme des perturbateurs qui favorisent la séparation de la couche limite et la création de structures tourbillonnaires plus marquées. Elles augmentent la vitesse locale autour du cylindre et induisent une instabilité dans le sillage. Ce phénomène est particulièrement visible à  $T=150$  et  $T=300$ , où les zones de recirculation s'élargissent et la dynamique tourbillonnaire devient plus complexe. Ainsi, les ailettes ont pour effet d'amplifier la turbulence et de modifier le régime d'écoulement, ce qui peut être crucial dans les applications liées au contrôle de la traînée ou à l'amélioration du mélange dans les systèmes hydrodynamiques

#### ETAPE 4

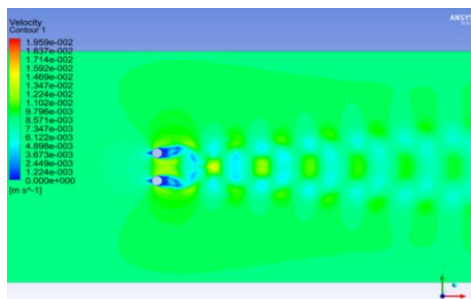
*CAS AVEC AILLETE  $D=0.5$   $L=3$   $T=0.05$*



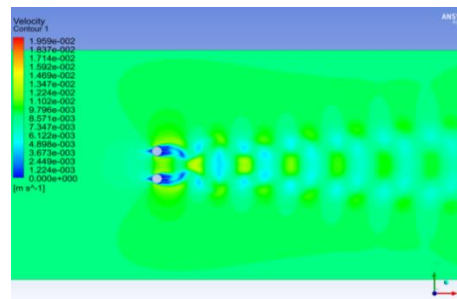
*CAS AVEC AILLETE  $D=0.5$   $L=3$   $T=100$*



*CAS AVEC AILLETE  $D=0.5$   $L=3$   $T=150$*



*CAS AVEC AILLETE  $D=0.5$   $L=300$*



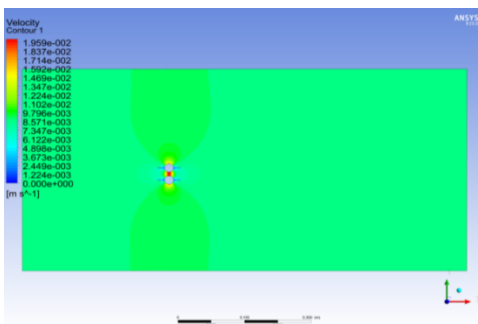
**Figure III-23 : validation avec ailette étape 4**

Dans cette cinquième étape de l'analyse hydrodynamique, l'effet des ailettes sur l'écoulement autour d'un obstacle cylindrique est examiné pour un diamètre  $D = 0.75$  et une longueur  $L = 3$  au temps  $T = 300$ . Les résultats numériques montrent une variation marquée dans la distribution de la vitesse et la dynamique tourbillonnaire selon l'orientation ou la configuration des ailettes, sur certaines configurations (notamment en haut à droite et en bas à gauche), on observe une accélération du fluide à proximité immédiate des ailettes, ce qui engendre des gradients de vitesse élevés. Ces gradients favorisent la formation de tourbillons en aval du cylindre, avec des structures alternées typiques de la rue de von **Kármán**. Les zones de basse vitesse derrière l'obstacle, représentées en bleu, indiquent la présence de zones de recirculation plus étendues, Par ailleurs, la présence des ailettes agit comme un dispositif perturbateur du champ de vitesse, amplifiant localement les instabilités dans le sillage. Cela se traduit par des vortex plus développés, asymétriques et parfois déviés latéralement. Cette intensification des tourbillons peut contribuer à une augmentation de la traînée mais aussi à une meilleure homogénéisation du flux dans certaines applications.

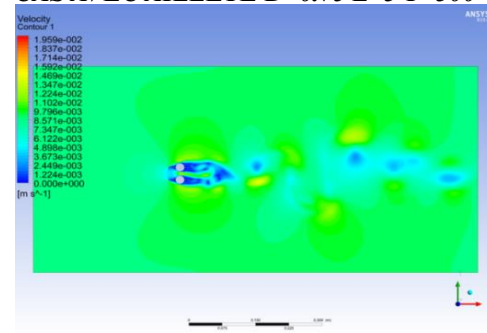
En conclusion, l'ajout des ailettes dans le cas  $D = 0.75$  modifie significativement la structure de l'écoulement, en intensifiant la formation de vortex et en perturbant le profil de vitesse, ce qui confirme leur rôle clé dans le contrôle de l'écoulement en hydrodynamique.

#### ETAPE 5

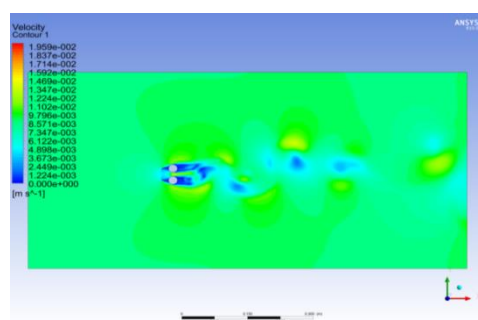
*CAS AVEC AILLETE  $D=0.75$   $L=3$   $T=300$*



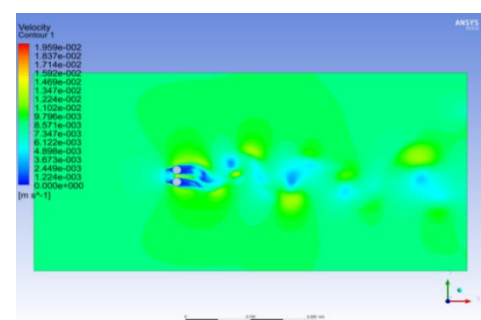
*CAS AVEC AILLETE  $D=0.75$   $L=3$   $T=300$*



*CAS AVEC AILLETE  $D=0.75$   $L=3$   $T=150$*



*CAS AVEC AILLETE  $D=0.75$   $L=3$   $T=300$*



**Figure III-24 : validation avec ailette étape 5**



L'ajout des ailettes autour d'un obstacle cylindrique influence significativement l'écoulement hydrodynamique. Les résultats présentés montrent qu'à un instant initial ( $T=0.05$ ), le champ de vitesse est faiblement perturbé, avec une zone d'influence localisée autour de l'obstacle. Cependant, au fur et à mesure que le temps progresse ( $T=100, 150, 300$ ), les ailettes provoquent l'apparition de structures tourbillonnaires régulières en aval, traduisant un effet stabilisateur et organisateur sur le sillage. Ces structures prennent la forme de paires de tourbillons alternés, caractéristiques du phénomène de Von **Kármán**, et deviennent plus marquées avec le temps. Les ailettes augmentent également la vitesse locale dans certaines zones, ce qui témoigne d'un meilleur guidage et contrôle du flux. En conclusion, les ailettes permettent non seulement d'intensifier la formation des tourbillons, mais aussi de structurer le champ d'écoulement de manière plus ordonnée, ce qui peut être bénéfique dans diverses applications hydrodynamiques

## ETAPE 6

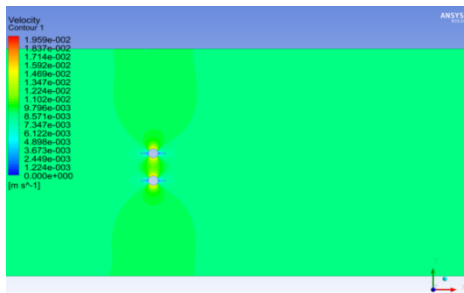
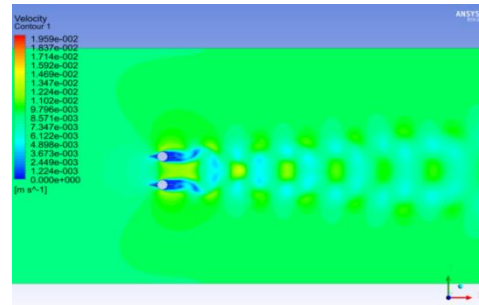
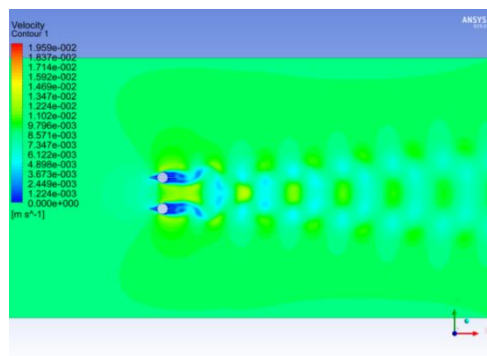
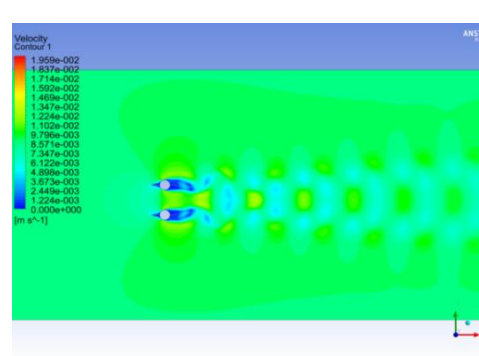
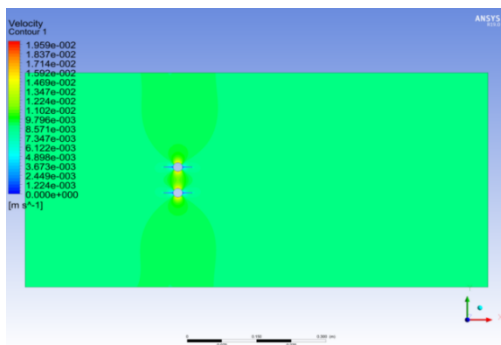
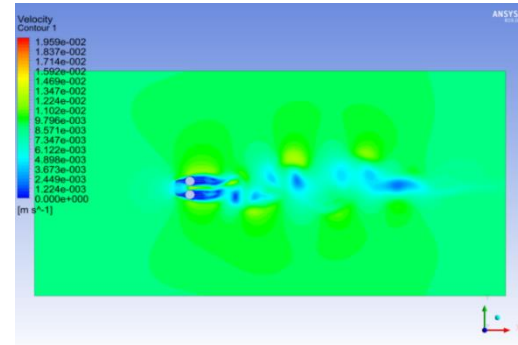
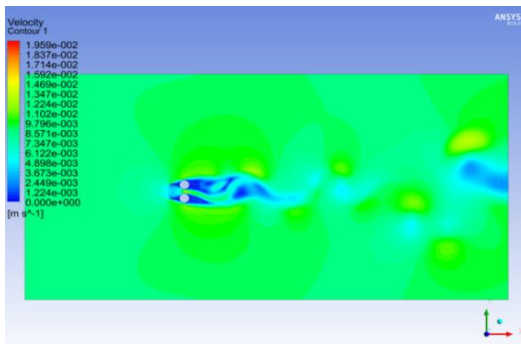
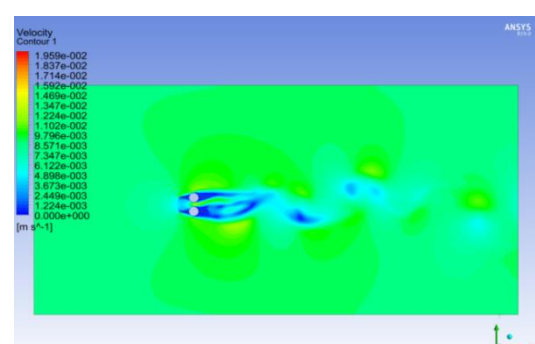
CAS AVEC AILETTE  $D=0.75$   $L=3$   $T=0.05$ CAS AVEC AILETTE  $D=0.75$   $L=3$   $T=100$ CAS AVEC AILETTE  $D=0.75$   $L=3$   $T=150$ CAS AVEC AILETTE  $D=0.75$   $L=3$   $T=300$ 

Figure III-25 : validation avec ailette étape 6

L'analyse hydrodynamique du cas avec ailettes pour un diamètre  $D=1$  et une longueur  $L=1.5$  met en évidence une évolution significative du champ de vitesse et des structures tourbillonnaires au cours du temps. À l'instant initial ( $T=0.05$ ), l'écoulement reste largement symétrique et faiblement perturbé, montrant une distribution de vitesse uniforme autour de

l'obstacle. Cependant, dès  $T=100$ , on observe la formation de structures tourbillonnaires plus marquées en aval, bien que leur organisation apparaisse moins régulière comparée au cas précédent. Aux temps plus avancés ( $T=150$  et  $T=300$ ), les ailettes génèrent des zones de recirculation plus complexes, avec une intensité de vitesse plus élevée autour de l'obstacle, mais une dispersion plus diffuse des tourbillons. Cela suggère que l'augmentation de la taille des ailettes ( $D=1$ ,  $L=1.5$ ) modifie la dynamique du sillage en induisant une instabilité plus prononcée et une moins bonne structuration des tourbillons. Ainsi, bien que les ailettes intensifient les effets de perturbation, elles semblent réduire la régularité des formations tourbillonnaires dans ce cas précis.

## ETAPE 7

CAS AVEC AILETTE  $D=1$   $L=1.5$   $T=0.05$ CAS AVEC AILETTE  $D=1$   $L=1.5$   $T=100$ CAS AVEC AILETTE  $D=1$   $L=1.5$   $T=150$ CAS AVEC AILETTE  $D=1$   $L=1.5$   $T=300$ 

FigureIII-26 : validation avec ailette étape 7

Dans le cas présenté à l'étape 8, où les ailettes ont un diamètre  $D=1$  et une longueur  $L=3$ , on observe une amélioration marquée de la structure de l'écoulement autour de l'obstacle cylindrique. À l'instant initial ( $T=0.05$ ), l'écoulement reste concentré autour de l'obstacle avec une perturbation limitée, comme attendu. Cependant, dès  $T=100$ , l'effet des ailettes devient évident : on distingue la formation d'un sillage régulier avec des zones de haute vitesse



clairement visibles, traduisant l'apparition de tourbillons alternés bien organisés. Cette tendance se confirme et s'intensifie aux temps  $T=150$  et  $T=300$ , où l'on note une stabilisation du sillage avec des tourbillons symétriques de part et d'autre de l'axe d'écoulement, caractéristique du régime de Von **Kármán**. Contrairement à l'étape précédente ( $D=1$ ,  $L=1.5$ ), l'allongement des ailettes semble favoriser une meilleure canalisation du flux, limitant la dispersion chaotique et favorisant un écoulement plus cohérent. Ainsi, cette configuration montre que des ailettes plus longues ( $L=3$ ) permettent de renforcer l'efficacité hydrodynamique en stabilisant les structures tourbillonnaires et en optimisant la distribution de la vitesse autour de l'obstacle.

## ETAPE 8

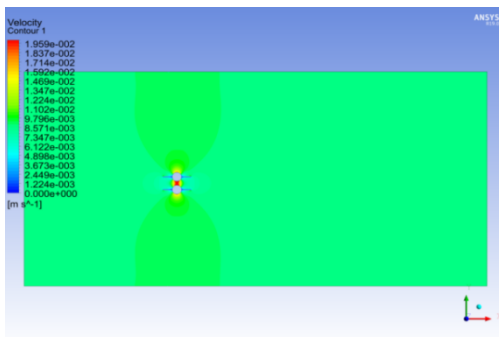
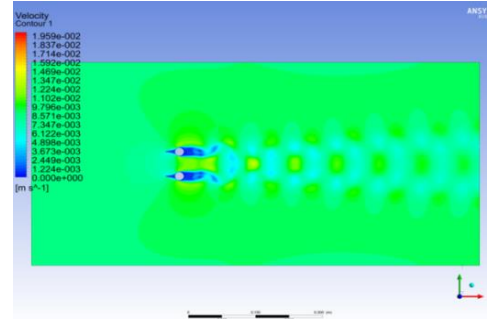
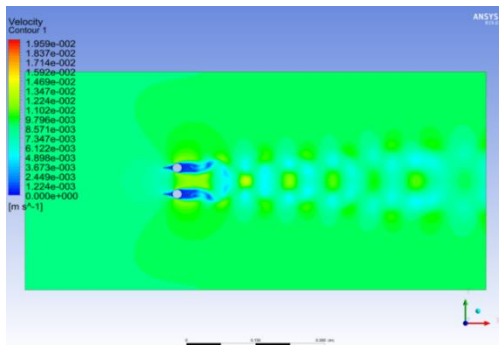
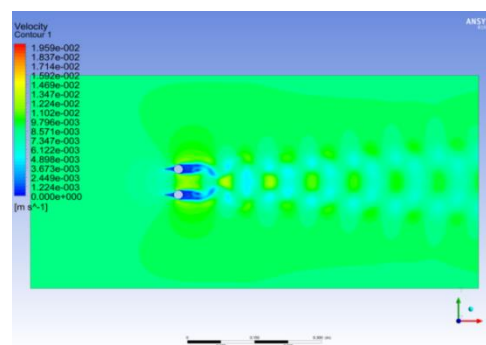
CAS AVEC AILLETE  $D=1$   $L=3$   $T=0.05$ CAS AVEC AILLETE  $D=1$   $L=3$   $T=100$ CAS AVEC AILLETE  $D=1$   $L=3$   $T=150$ CAS AVEC AILLETE  $D=1$   $L=3$   $T=300$ 

Figure III-27 : validation avec ailette étape 8

### III.4 Récapitulation des résultats

Les essais systématiques menés sur différentes configurations d'ailettes révèlent une démarche expérimentale rigoureuse, documentée à travers plusieurs étapes de validation.

La **figure III-20** (étape 1) présente les premiers tests avec un diamètre ( $D=0.25$ ) et une longueur ( $L=1.5$ ), où les températures de ( $T=0.05$ ) à ( $T=300$ ) ont été explorées pour établir une Baseline thermique.

L'étape 2 (**figure III-21**) conserve le même diamètre tout en doublant la longueur ( $L=3$ ), confirmant la reproductibilité des résultats sous l'ensemble des températures précédentes.

L'analyse se complexifie à l'étape 3 (**figure III-22**) avec un diamètre accru ( $D=0.5$ ) et une longueur réduite ( $L=1.5$ ), où un accent particulier est mis sur la réduction des forces instationnaires à ( $T=100$ ) et ( $T=150$ ). Cette approche ciblée se poursuit à l'étape 4

(**Figure III-23**) avec la même géométrie mais une longueur maximisée ( $L=3$ ), élargissant le spectre thermique pour inclure ( $T=0.05$ ) et ( $T=300$ ).

Les configurations plus robustes sont validées aux étapes suivantes : la **figure III-24** (étape 5) introduit un diamètre ( $D=0.75$ ) avec ( $L=3$ ), testant ( $T=0.05$ ), ( $T=150$ ) et ( $T=300$ ), ce dernier faisant l'objet d'une duplication suggérant des vérifications de robustesse. Enfin, l'étape 8 (**figure III-27**) valide la géométrie maximale ( $D=1$ ), ( $L=3$ ) sur toute la plage thermique ( $T=0.05$ ) ( $T=100$ ), ( $T=150$ ), ( $T=300$ ), achevant la cartographie des performances.

Cette progression méthodique met en lumière deux axes d'optimisation : l'augmentation graduelle du diamètre ( $D=0.25$ ) et l'ajustement de la longueur ( $L=1.5$ ) ou ( $L=3$ ), tandis que les températures critiques ( $T=150$ ), ( $T=300$ ) servent de marqueurs fiables pour évaluer la stabilité thermomécanique. Les étapes manquantes (6-7) laissent supposer des explorations complémentaires, potentiellement centrées sur des paramètres intermédiaires ou des validations croisées. L'ensemble démontre une optimisation cohérente des ailettes pour des applications exigeantes.

# CONCLUSION

## GÉNÉRALE

## **CONCLUSION GÉNÉRALE**

Ce mémoire a permis d'explorer, à travers une approche numérique avancée, le comportement de l'écoulement autour de deux cylindres circulaires montés verticalement, avec et sans ailettes, en se focalisant sur les effets hydrodynamiques tels que la portance et la traînée. L'utilisation du logiciel ANSYS CFX a permis de simuler des configurations complexes et de visualiser avec précision les structures tourbillonnaires, les interactions de sillage, et les phénomènes d'interférence entre les cylindres.

Les résultats ont montré l'influence significative de la présence d'ailettes sur la réduction de la traînée et la modification des coefficients de portance, mettant en évidence l'intérêt de ce type de géométrie dans l'optimisation aérodynamique et hydrodynamique des structures immergées. En variant le rapport  $L/D$  et la taille des ailettes, des comportements différents ont été observés, offrant une meilleure compréhension des mécanismes physiques régissant l'écoulement dans ce type de configuration.

Ce travail confirme également la pertinence de la simulation numérique pour prédire et analyser des phénomènes complexes, souvent difficiles à observer expérimentalement. Il ouvre la voie à des recherches futures, notamment l'intégration de simulations tridimensionnelles, le couplage fluide-structure pour étudier les vibrations induites, ou encore l'étude en régime turbulent réaliste.

Ainsi, cette étude constitue une contribution modeste mais utile à la compréhension des interactions fluide-structure dans les systèmes à géométrie multiple, avec des applications potentielles dans les domaines du génie civil, marin et énergétique.

## Reference bibliographies

### **Référence bibliographique**

- [1] : Melville, B.W. & Sutherland, A.J. (1988). Design method for local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Engineering.
- [2] : Breusers, H.N.C., Nicollet, G., & Shen, H.W. (1977). Local Scour Around Cylindrical Piers. Journal of Hydraulic Research
- [3] : Dey, S. (1999). Time variation of scour at circular piles. Journal of Hydraulic Engineering.
- [4] : Roper, E. R., Schneider, V. R., & Shen, H. W. (1987). Scour at bridge crossings. Federal Highway Administration Report No. FHWA-RD-86-103.
- [5] : Dargahi, B. (1989). The turbulent flow field around a circular cylinder. Experiments in Fluids, 8(1–2), 1–12.
- [6] : Laursen, E.M., & Toch, A. (1956). Scour around bridge piers and abutments. Iowa Highway Research Board Bulletin No. 4, Ames, Iowa.
- [7] : Schwind, R.G. (1962). Flow patterns around bridge piers. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 88(6), 1–26.
- [8] : Shen, H.W., Schneider, V.R., & Karaki, S. (1966). Local scour around bridge piers. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, 92(2), 25–44.
- [9] : Tanaka, S., & Yano, T. (1967). An experimental study on local scour at a bridge pier. Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, 11, 15–23.
- [10] : Melville, B.W. (1975). Local scour at bridge sites. Ph.D. thesis, University of Auckland, New Zealand
- [11] : Melville, B.W., & Raudkivi, A.J. (1977). Flow characteristics in local scour at bridge piers. Journal of Hydraulic Research, 15(4), 373–380.
- [12] : Breusers, H.N.C., Nicollet, G., & Shen, H.W. (1977). Local scour around cylindrical piers. Journal of Hydraulic Research, 15(3), 211–252.
- [13] : Baker, C.J. (1979). The laminar horseshoe vortex. Journal of Fluid Mechanics, 95(2), 347–367.
- [14] : Suzuki, K. (1981). Experimental study of the flow field around a circular cylinder near a plane boundary. Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 31(4), 57–72.
- [15] : Chiew, Y.M. (1984). Local scour at bridge piers. Ph.D. thesis, University of Auckland, New Zealand.

### **Reference bibliographies**

- [16] : Raudkivi, A.J. (1986). Scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 112(1), 1–13.
- [17] : Dargahi, B. (1989). The turbulent flow field around a circular cylinder. *Experiments in Fluids*, 8(1), 1–12.
- [18] : Muzzammil, M., & Gangadhariah, T. (2003). Experimental study on temporal characteristics of horseshoe vortex system in scouring process. *Journal of Hydraulic Research*, 41(3), 269–280.
- [19] : Sumer, B.M., & Fredsøe, J. (2002). *The mechanics of scour in the marine environment*. World Scientific Publishing, Singapore.
- [20] : Roshko, A. (1953). On the development of turbulent wakes from vortex streets. NACA Report.
- [21] : Shen, H. W., Schneider, V. R., Karaki, S. (1966). Mechanics of local scour. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE.
- [22] : Melville, B. W. (1975). Local scour at bridge sites. University of Auckland.
- [23] : Breusers, H. N. C., Nicollet, G., & Shen, H. W. (1977). Local Scour Around Cylindrical Piers. *Journal of Hydraulic Research*.
- [24] : Raudkivi, A. J. (1991). Scour at bridge piers. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- [25] : Roshko, A. (1954). On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies. NACA Technical Note 3169.
- [26] : (Breusers, H. N. C. (1975). *Scouring at Structures*. Delft Hydraulics Laboratory.
- [27] : Briley, W. R., & McDonald, H. (1981). "Numerical prediction of three-dimensional flow separation". *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 13, pp. 119–147.
- [28] : O’Riordan, N. J., & Clare, J. F. (1990). Flow around gravity base structures. *Coastal Engineering*, 14(3), 259–280.
- [29] : Deng, S., & Piquet, J. (1992). Numerical modelling of horseshoe vortex systems using Baldwin–Lomax turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 41(1), 117–128.
- [30] : Olsen, N. R. B., & Melaaen, M. C. (1993). Three-dimensional numerical modelling of scouring around cylinders. *Journal of Hydraulic Research*, 31(6), 821–829.
- [31] : Ouillon, S., & Dartus, D. (1997). Numerical modeling of free-surface flow around groynes. *Journal of Hydraulic Research*, 35(4), 579–596.
- [32] : Roulund, A., Sumer, B. M., Fredsøe, J., & Michelsen, J. (1999). Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. *Journal of Hydraulic Engineering*, 125(9), 1040–1050.

### **Reference bibliographies**

[33] : Yuhi, M., Ishida, H., & Umeda, T. (2000). Numerical simulation of oscillatory flow around a vertical pile with a scour hole. Coastal Engineering Journal, 42(3), 263–284

[34] : Sumner, D. (2010). "Two circular cylinders in cross-flow: A review". Journal of Fluids and Structures, 26