

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



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



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme de master en génie mécanique

Option : ÉNERGETIQUE

SIMULATION NUMERIQUE D'ÉCOULEMENT AUTOUR DE
DEUX CYLINDRES AVEC DES AILETTES EN
ARRANGEMENT HORIZONTAL

Prépare par :

SLIMANE ATHMANE

DJEBLI ZINEDDINE

Encadré par : Mr.BENSEDIRA SIDALI

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement :

Avant toute chose, nous adressons nos louanges et notre gratitude à Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a guidés et donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. C'est grâce à Sa volonté que nous avons pu franchir toutes les étapes de ce long parcours universitaire.

À l'issue de ce cycle de master, il nous tient à cœur d'exprimer notre profonde reconnaissance à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration et à la réussite de ce mémoire. Leur soutien, qu'il soit moral, technique ou scientifique, nous a été d'un grand secours.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent tout particulièrement à Dr. Bensdira Sid Ali, notre encadreur, pour la confiance qu'il nous a accordée, pour la qualité des missions enrichissantes qu'il nous a confiées, ainsi que pour l'encadrement scientifique de haut niveau dont il nous a fait bénéficier. Nous saluons également sa disponibilité constante, sa bienveillance, ses remarques constructives, ses précieux conseils, ainsi que sa patience exemplaire tout au long de ce travail.

Nous n'oublions pas non plus de remercier chaleureusement l'ensemble du corps enseignant du département de génie mécanique, pour leur dévouement, leur accompagnement pédagogique, et pour l'ensemble des connaissances qu'ils nous ont transmises au fil des années.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus affectueux à nos camarades de promotion et à nos amis, pour les échanges, le soutien mutuel, les encouragements et l'esprit de solidarité qui ont marqué notre parcours commun. Leur présence a rendu cette expérience académique encore plus enrichissante et mémorable.

Dédicaces

Je dédie ce travail A ma chère maman, la personne qui a
Beaucoup sacrifié pour moi sans elle Je n'aurais eu la volonté
d'atteindre ce niveau .Que Dieu puisse la garder éternellement
heureuse .Merci du fond du cœur. A mon cher père qui m'a toujours
aider et soutenir dans les moments difficiles que dieu le garde.
À mes chers frères Rayene et Younes qui ont toujours été à mes côtés
À mes chers amis qui ont toujours été avec moi et m'ont motivé à faire
des bonnes choses.

Et à tous ceux qui m'ont aidé de prêt ou de loin à finaliser cette thèse
et qui m'ont contribué dans ma formation.

Slimane Athmane

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma chère maman, pour tout son amour, ses sacrifices et ses prières. Sans elle, je n'aurais jamais eu la force d'arriver jusqu'ici. Que Dieu la protège et la garde toujours en bonne santé.

À mon père, pour son soutien constant, ses encouragements et sa présence dans les moments difficiles. Que Dieu le protège et le garde auprès de nous.

À mes sœurs, pour leur tendresse, leur aide et leurs encouragements tout au long de mon parcours.

Et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail.

Djebli Zineddine

Résumé :

Dans ce travail, nous avons analysé numériquement le comportement dynamique d'un écoulement instationnaire autour de deux cylindres circulaires disposés horizontalement, en présence ou non d'ailettes.

L'étude a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS CFX. Plusieurs rapports d'espacement L/D ont été considérés, ainsi que différentes tailles d'ailettes. L'objectif était de comprendre l'influence de ces paramètres sur la stabilité de l'écoulement et les efforts hydro dynamiques exercés sur les cylindres.

Nous avons étudié, analysé et comparé le comportement de la portance (C_L), de la traînée (C_D), ainsi que leur évolution temporelle.

Les mots clé :

Écoulement instationnaire – Ailettes – Rapport L/D – Simulation numérique – ANSYS CFX – Portance (CL) – Traînée (CD) – Stabilité de l'écoulement.

ملخص

في هذا العمل، قمنا بتحليل السلوك الديناميكي لتدفق غير مستقر حول أسطوانتين دائريتين أفقيتين، مع أو بدون زعانف. أُجريت الدراسة باستخدام برنامج ANSYS CFX وُضعت في الاعتبار نسب تباعد متعددة (L/D) بالإضافة إلى أحجام مختلفة للزعانف. كان الهدف هو فهم تأثير هذه المعلمات على استقرار التدفق والقوى الديناميكية الهوائية المؤثرة على الأسطوانات.

درسنا، وحللنا، وقارنا سلوك الرفع (CL) والسحب (CD) بالإضافة إلى تطورهما الزمني.

الكلمات المفتاحية

– جريان غير مستقر – زعانف – نسبة الطول إلى البعد (L/D) – محاكاة عددية – برنامج ANSYS CFX – معامل الرفع – (CL) معامل السحب – (CD) استقرار الجريان.

Abstract:

In this work, we numerically analysed the dynamic behaviour of an unsteady flow around two circular cylinders arranged horizontally, with or without fins.

The study was conducted using ANSYS CFX software. Several L/D spacing ratios were considered, as well as different fin sizes. The objective was to understand the influence of these parameters on flow stability and the aerodynamic forces exerted on the cylinders.

We studied, analysed, and compared the behaviour of lift (CL) and drag (CD), as well as their temporal evolution.

Keywords :

Unsteady flow –Fins – L/D ratio – Numerical simulation – ANSYS CFX – Lift coefficient (CL) – Drag coefficient (CD) – Flow stability

Sommaire

chapitre 1: Généralités et recherches bibliographiques

Introduction générale :	1
1-1 Introduction :	2
1-2 Généralité sur la mécanique des fluides :	2
1-2-1 Notion de fluide :	2
1-2-2 propriétés des fluides :	3
1-3 Ecoulement de fluides :	5
1-3-1 Différent types des écoulements :	5
1-3-2 Les régimes de l'écoulement :	7
1-4 Ecoulement autour des obstacles :	9
1-4-1 Ecoulements autour d'un cylindre :	10
1-4-2 Ecoulement de Von karman :	10
1-4-3 Caractéristiques de l'écoulement autour d'un cylindre :	11
1-5 Analyse bibliographique des recherches portant sur l'écoulement autour de cylindres :.	15
1-6 Conclusion :	19

Chapitre 2: Formulation mathématique et calcul numérique

2-1 Introduction :	20
2-2 Formulation mathématique :	20
2-2-1 Equations de transport :	20
2-3 Résolution numérique :	21
2-3-1 Méthode des différences finie :	21
2-3-2 Méthode des éléments finie :	22
2-3-3 Méthode des volumes finie :	22
2-4 Le maillage :	23
2-4-1 Nœuds et éléments :	23
2-4-2 Géométrie et topologie :	24
2-4-3 Connectivité :	25
2-5 Description général du problème :	25
2-5-1 les conditions aux limites :	26
2-5-2 Méthodologie de simulation numérique avec ANSYS CFX :	27

2-6 Conclusion :	34
------------------	----

Chapitre 3 : Résultats et interprétation

3-1 Introduction :	35
3-2 Validation du travail :	35
3-3 Variation de portance moyenne (CL_{moy}) et trainée moyenne (CD_{moy}) de deux cylindres en fonction de L/D :	36
3-3-1 Variation de portance moyenne (CL_{moy}) en fonction de L/D :	37
3-3-2 Variation de la trainée moyenne (CD_{moy}) en fonction de L/D :	41
3-4 Le comportement des forces hydrodynamique la force de portance (CL) et la force de trainée (CD) :	45
3-4-1 Le comportement de la force de portance CL :	45
3-4-1-1 La longueur des ailettes constante et la distance L/D variable :	45
3-4-1-1 La longueur des ailettes variable et la distance L/D constant :	49
3-4-2 Le comportement de la force de portance CD :	54
3-4-2-1 La longueur des ailettes constante et la distance L/D variable :	54
3-4-2-2 La longueur des ailettes variable et la distance L/D constant :	57
3-5 Les champs de vitesse (vélocités) :	64
3-5-1 Meilleurs cas de champ de vitesse (vélocité) :	71
3-6 Effet et rôle des ailettes dans l'écoulement autour de deux cylindres :	72
3-7 Conclusion :	73
Conclusion générale	74
Référence Bibliographique	75

Liste des Figures

Figure 1-1 : Deux types différents de fluide.....	3
Figure 1-2 : Viscosité d'un fluide	4
Figure 1-3 : Répartition des vitesses des couches du fluide	5
Figure 1-4 : Régime laminaire	8
Figure 1-5 : Régime turbulent	8
Figure 1-6 : Écoulements autour d'un cylindre	10
Figure 1-7 : Phénomène de Von Kármán	11
Figure 1-8 : Système des forces aérodynamiques sur un cylindre	12
Figure 1-9 : La couche limite	14
Figure 1-10 : Profil de vitesse	14
Figure 1-11 : Zone de recirculation autour d'un cylindre.....	15
Figure 2-1 : Schéma du maillage	23
Figure 2-2 : illustration de la Notion de maillage	24
Figure 2-3 : dimension de domaine de calcul.....	24
Figure 2-4 : les différentes structures de maillage	25
Figure 2-5 : les conditions aux limites	27
Figure 2-6 : Géométrie du domaine	28
Figure 2-7 : Modèle de maillage	29
Figure 2-8 : Propriété des fluides	30
Figure 2-9 : les conditions initiales	31
Figure 2-10 : les conditions aux parois de sortie.....	32
Figure 2-11 : l'expressions utilisées	32
Figure 2-12 : Lancement du processus dans ANSYS	33
Figure 3-1 : la portance moyenne (CL_{moy}) de deux cylindres avec et sans ailettes en fonction de L/D	40
Figure 3-2 : la traînée moyenne (CD_{moy}) de deux cylindres avec et sans ailettes en fonction de L/D	44
Figure 3-3 : le comportement de la portance CL en fonction de pas du temps (sans ailette) ..	47

Figure 3-4: le comportement de la portance C_L en fonction de pas du temps ($\text{ail}=0.75$) ...	49
Figure 3-5 : le comportement de la portance C_L en fonction de pas du temps ($L/D=2$)	50
Figure 3-6 : le comportement de la portance C_L en fonction de pas du temps ($L/D=4$)	52
Figure 3-7 : le comportement de la portance C_L en fonction de pas du temps ($L/D=6$)	54
Figure 3-8 : le comportement de la trainée C_D en fonction de pas du temps (sans ailette) ...	56
Figure 3-9 : le comportement de la trainée C_D en fonction de pas du temps ($L/D=2$)	57
Figure 3-10 : le comportement de la trainée C_D en fonction de pas du temps ($L/D=4$)	59
Figure 3-11 : le comportement de la trainée C_D en fonction de pas du temps ($L/D=6$)	61
Figure 3-12 : le comportement de la trainée C_D en fonction de pas du temps ($L/D=8$)	63
Figure 3-13 : Contours des vitesses dans différent temps ($L/D=2$ et sans ailettes)	66
Figure 3-14 : Contours des vitesses dans différent temps ($L/D=6$ et $\text{ail}=0.25$)	68
Figure 3-15 : Contours des vitesses dans différent temps ($L/D=6$ et $\text{ail}=1$)	71

Liste Des Tableaux

Tableau 1-1 : La déférence entre des régimes de l'écoulement	9
Tableau 3-1 : Détails du maillage et de trainée moyenne obtenue pour chaque configuration	38
Tableau 3-2 : Portance moyenne (CL_{moy}) et trainée moyenne (CD_{moy}) de deux cylindres sans ailette en fonction de rapport L/D	36
Tableau 3-3 : Portance moyenne (CL_{moy}) et trainée moyenne (CD_{moy}) de deux cylindres avec ailette en fonction de rapport L/D	36

Tableaux de nomenclature :

Symbole	Définition	Unité
m	Masse de fluide	[kg]
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]
t	Temps	[s]
ν	Viscosité cinématique	[m ² /s]
μ	Viscosité dynamique	[Pa·s]
P	Pression	[Pa]
U	Vitesse de l'écoulement	[m/s]
D	Diamètre de section	[m]
U_{∞}	Vitesse à l'infini amont	[m/s]
Re	Nombre de Reynolds	-
St	Nombre de Strouhal	-
C_D	Coefficient de traînée	-
C_L	Coefficient de portance	-
F_D	Force de traînée	-
F_L	Force de portance	-
C_f	Coefficient de frottement	-
C_p	Coefficient de pression	-
$\frac{1}{2}\rho U_{\infty}^2$	Pression dynamique d'écoulement libre	[Pa]
A_t	Section de référence	[m ²]
f	Fréquence	[s ⁻¹]
dV	Différence de vitesse des couches	-
$(u_i, u_j) = (u, v)$	Champ de vitesse	[m/s]
u_t	Vitesse de frottement de paroi	[m/s]
x	Coordonnée spatiale	[m]
y	Ordonnée spatiale	[m]

Abréviation :

RANS Navier Stokes en moyenne de Reynolds

MEF Méthode des éléments finie

MDF Méthode des différences finie

MVF Méthode des volumes finie

CFD Computational fluid dynamics

2D Bidimensionnel

3D Tridimensionnel

Nombres adimensionnels :

Nombre de Reynolds

$$Re = \frac{UD}{\nu}$$

Nombre de Strouhal

$$St = \frac{f_v D}{U}$$

Coefficient de traînée

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 A}$$

Coefficient de portance

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 A}$$

Les différents termes représentent :

1. $\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$: la force d'inertie
2. $-\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$: la force appliquée
3. $u_j \frac{\partial u_i}{\partial t}$: le terme instationnaire
4. $-\frac{\partial p}{\partial x_i}$: l'effet
5. $\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$: le terme visqueux

Introduction générale :

La mécanique des fluides est une discipline essentielle de la physique appliquée, qui étudie le comportement des liquides et des gaz, que ce soit au repos ou en mouvement. Elle occupe une place centrale aussi bien dans la compréhension des phénomènes naturels — tels que les vagues, les vents, ou la résistance des corps se déplaçant dans l'air ou dans l'eau — que dans de nombreuses applications pratiques, comme la propulsion des aéronefs, le transport des fluides, ou encore le refroidissement des systèmes industriels. Son objectif principal est de fournir les outils théoriques et numériques nécessaires à l'analyse des écoulements, en vue de modéliser et prévoir le comportement des fluides dans des contextes variés. Grâce aux avancées en simulation numérique, il est désormais possible d'étudier des écoulements complexes, autour de géométries variées, avec un niveau de détail difficilement atteignable par des expériences physiques seules. Parmi les thématiques classiques et toujours d'actualité en dynamique des fluides, l'étude de l'écoulement autour d'obstacles — tels que les cylindres — suscite un intérêt particulier. Ce type de configuration est à la fois riche en phénomènes physiques (séparation de couche limite, formation de tourbillons, instabilités...) et représentatif de nombreuses situations réelles. Les travaux menés dans ce domaine reposent souvent sur des approches complémentaires : expérimentales, théoriques et numériques. Dans notre travail, nous nous intéressons à la simulation numérique d'un écoulement d'air laminaire non stationnaire autour de deux cylindres disposés horizontalement, dont l'un est lisse et l'autre muni de rainures en forme de « U ». L'objectif est d'analyser et de comparer les effets de la géométrie sur les caractéristiques d'écoulement, à l'aide du logiciel ANSYS CFX, basé sur la méthode des volumes finis. Ce type de simulation permet d'obtenir des informations précieuses sur les champs de vitesse, de pression et d'autres grandeurs physiques, souvent difficiles à mesurer expérimentalement, mais indispensables pour la compréhension fine des phénomènes d'interaction fluide-structure.

Chapitre 1

Recherche Bibliographique

1-1 Introduction :

La mécanique des fluides est la science des lois de l'écoulement des fluides. Elle est la base du dimensionnement des conduites de fluides et des mécanismes de transfert des fluides. C'est une branche de la physique qui étudie les écoulements de fluides c'est-à-dire des liquides et des gaz lorsque ceux-ci subissent des forces ou des contraintes. Elle comprend deux grandes sous branches :

- la statique des fluides, ou hydrostatique qui étudie les fluides au repos. C'est historiquement le début de la mécanique des fluides, avec la poussée d'Archimède et l'étude de la pression.
- la dynamique des fluides qui étudie le fluide en mouvement. Comme autres branches de la mécanique des fluides.

On distingue également d'autres branches liées à la mécanique des fluides : l'hydraulique, l'hydrodynamique, l'aérodynamique, ... Une nouvelle approche a vu le jour depuis quelques décennies : la mécanique des fluides numérique (CFD ou Computational Fluid Dynamics en anglais), qui simule l'écoulement des fluides en résolvant les équations qui les régissent à l'aide d'ordinateurs très puissants : les supercalculateurs. La mécanique des fluides a de nombreuses applications dans divers domaines comme l'ingénierie navale, l'aéronautique, mais aussi la météorologie, la climatologie ou encore l'océanographie.

1-2 Généralité sur la mécanique des fluides :

1-2-1 Notion de fluide :

La mécanique des fluides est une discipline scientifique qui analyse le comportement des liquides et des gaz, qu'ils soient immobiles ou en mouvement. Un fluide se distingue par sa capacité à se déformer continuellement sous l'effet d'une contrainte, sans rupture entre ses particules. Contrairement aux solides, il ne résiste pas aux efforts de cisaillement et épouse instantanément la forme du contenant. Cette particularité fait du fluide un matériau unique, étudié à travers des lois fondamentales comme la conservation de la masse et de l'énergie. Ce domaine trouve des applications variées dans l'ingénierie, l'environnement et même le domaine biomédical, en s'appuyant notamment sur les équations de Navier-Stokes pour modéliser les écoulements.

- a) **fluide liquide** : C'est une matière qui peut couler et se déplacer facilement, comme l'eau. Elle prend la forme du récipient qui la contient, mais son volume reste le même.
- b) **fluide gazeux** : un fluide liquide est une substance qui s'écoule facilement, prend la forme du récipient qui le contient, tout en conservant un volume constant. Contrairement aux gaz, les liquides sont peu compressibles et possèdent une surface libre au repos.

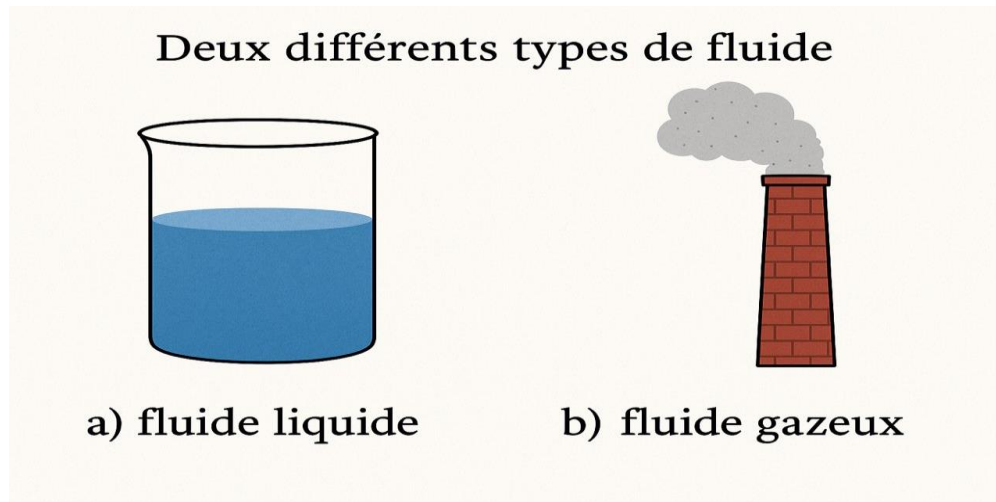


Figure 1-1 : deux types différents de fluide

1-2-2 propriétés des fluides :

Les fluides se caractérisent par un ensemble de propriétés physiques qui permettent de décrire leur état à un moment donné. Parmi ces propriétés, on peut citer :

- **Masse volumique** : La masse volumique est la masse par unité de volume d'un fluide

$$\rho = \frac{M}{v}$$

- **Densité** : La densité correspond au rapport entre la masse volumique d'un fluide et celle d'un fluide de référence. C'est une grandeur adimensionnelle, c'est-à-dire qu'elle ne possède pas d'unité

$$d = \frac{\rho}{\rho_{ref}}$$

- Viscosité :

La viscosité est une grandeur qui caractérise la résistance due aux frottements internes, d'un fluide à son écoulement lorsqu'il est soumis à l'application d'une force. Elle est mesurée par un viscosimètre à chute de bille. Il faut savoir que plus la viscosité d'un fluide est petite et plus ce fluide s'écoule facilement, c'est le cas de l'exemple suivant :

La viscosité de l'eau < la viscosité de l'huile < la viscosité du miel [1]



Figure1-2 : viscosité d'un fluide

- Viscosité dynamique :

On considère deux couches adjacentes d'un même fluide distantes de ΔZ . Le coefficient de viscosité dynamique du fluide (μ) est donc proportionnel à cette distance ΔZ et à la force de frottement F qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches (cette force s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre) et inversement proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit ΔV et à leur surface S

$$F = \mu \cdot S \cdot \frac{\Delta v}{\Delta z}$$

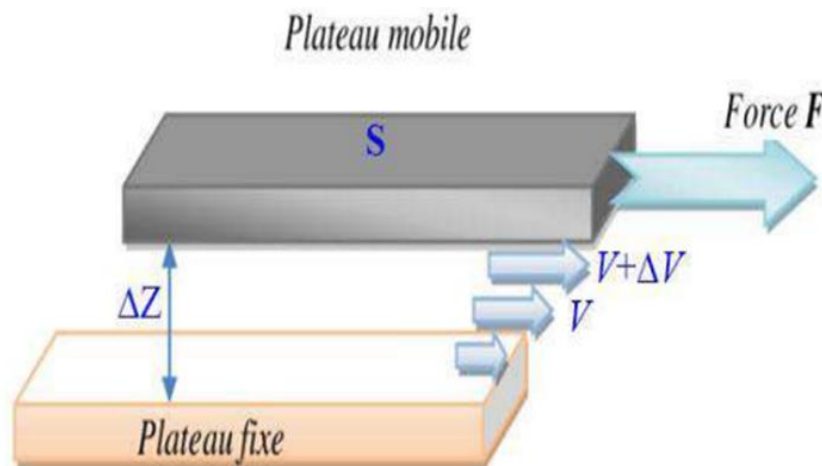


Figure 1-3 : Répartition des vitesses des couches du fluide

- **Viscosité cinématique :** est le rapport entre la viscosité dynamique d'un fluide et sa densité. Elle traduit la capacité du fluide à s'écouler sous l'effet de la gravité. Elle s'exprime en m^2/s .

$$U = \frac{\mu}{\rho}$$

1-3 Ecoulement de fluides :

L'écoulement d'un fluide est le mouvement de particules fluides sous l'influence de forces telles que la pression ou la gravité. Lorsque les particules se déplacent en lignes régulières, sans collision ni turbulence, on parle d'écoulement laminaire. Si le mouvement est aléatoire et comprend des tourbillons, on parle d'écoulement turbulent. [3]

1-3-1 Différent types des écoulements :

En physique, les écoulements fluides se distinguent par une grande variété de comportements, pouvant être stables ou instables, compressibles ou incompressibles, visqueux ou idéaux, ainsi que stationnaires ou transitoires.

- Ecoulement incompressibles :

Un fluide est dit incompressible lorsque le volume qu'il occupe ne varie pas significativement sous l'effet de la pression. Cette approximation est généralement valable pour les liquides tels que l'eau ou l'huile, notamment dans des conditions de pression et de température normales.

[2]

- Ecoulement compressible :

Un fluide est dit compressible lorsque le volume qu'il occupe peut varier sensiblement sous l'effet de la pression. Cette propriété est caractéristique des gaz, tels que l'air ou l'hydrogène, en raison de la grande distance entre leurs molécules, ce qui permet une variation de volume significative sous l'action de forces extérieures.

- Ecoulement stationnaire :

L'écoulement d'un fluide est dit permanent si le champ de la vectrice vitesse des particules fluides est constant dans le temps. Notons cependant que cela ne veut pas dire que le champ de la vectrice vitesse est uniforme dans l'espace. L'écoulement stationnaire d'un fluide parfait incompressible est le seul que nous aurons à considérer dans ce cours. Un écoulement non permanent conduirait à considérer les effets d'inertie des masses fluides

- Ecoulement non stationnaire :

On parle d'un écoulement non stationnaire lorsque les grandeurs physiques qui caractérisent le fluide, telles que la vitesse, la pression ou la température, varient au cours du temps en un point donné de l'espace. Autrement dit, le champ d'écoulement n'est pas constant dans le temps. Ce type d'écoulement peut apparaître, par exemple, lors du démarrage ou de l'arrêt d'un fluide, ou encore dans des situations où les conditions aux limites changent avec le temps.

- Ecoulement visqueux :

L'écoulement visqueux peut prendre une configuration plane, souvent appelée l'écoulement de Poiseuille entre deux plaques parallèles, ou bien une configuration axiale dans une conduite cylindrique, connue sous le nom de Poiseuille cylindrique.

- **Ecoulement non visqueux :**

Un écoulement non visqueux désigne un mouvement de fluide dans lequel la viscosité est considérée comme nulle.

- **Ecoulement stable :**

On qualifie un écoulement de stable lorsque, en tout point du fluide, la vitesse reste inchangée au fil du temps. Autrement dit, les propriétés de l'écoulement restent constantes pendant une durée déterminée

- **Ecoulement instable :** En présence d'un écoulement instable, la distribution de la vitesse du fluide n'est pas uniforme et peut changer entre différents points de l'écoulement.

1-3-2 Les régimes de l'écoulement :

Selon l'augmentation progressive du nombre de Reynolds, on peut identifier quatre régimes d'écoulement principaux : le régime de Stokes, le régime laminaire, le régime de transition et enfin le régime turbulent.

Si $Re < 2000$, le régime est Laminaire

Si $Re > 3000$, le régime est turbulent

Si $2000 < Re < 3000$, le régime est transitoire

- **Régime laminaire :**

Le courant d'une rivière profonde et dépourvue d'obstacles circule de manière fluide et rapide. L'eau suit alors un trajet presque rectiligne. Ce type de mouvement est désigné par le terme *écoulement laminaire*. En mécanique des fluides, on parle d'écoulement laminaire lorsque le fluide se déplace en couches parallèles qui ne se mélangent pas, sans perturbation. Une caractéristique notable de ce régime est que la vitesse du fluide reste uniforme en tout point. Par ailleurs, les fluides soumis à un écoulement laminaire présentent généralement un comportement d'écoulement régulier et stable.

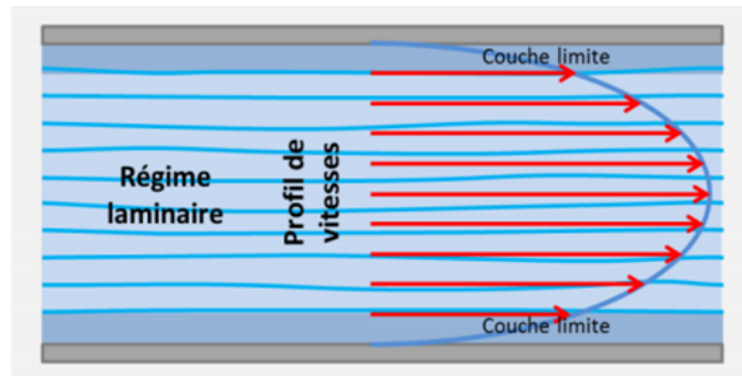


Figure 1-4 : Régime laminaire

- **Régime turbulent :**

Lorsqu'un cours d'eau est peu profond et encombré de rochers, l'écoulement de l'eau devient irrégulier et chaotique. Il ne suit plus une trajectoire rectiligne, mais présente des mouvements désordonnés caractéristiques d'un écoulement turbulent. Ce type de régime s'accompagne de la formation de petites zones tourbillonnaires et de structures spiralées. La vitesse du fluide varie continuellement d'un point à un autre. Dans de telles conditions, il est nécessaire de prendre en compte une contrainte de cisaillement additionnelle, liée aux effets dynamiques de ces tourbillons.

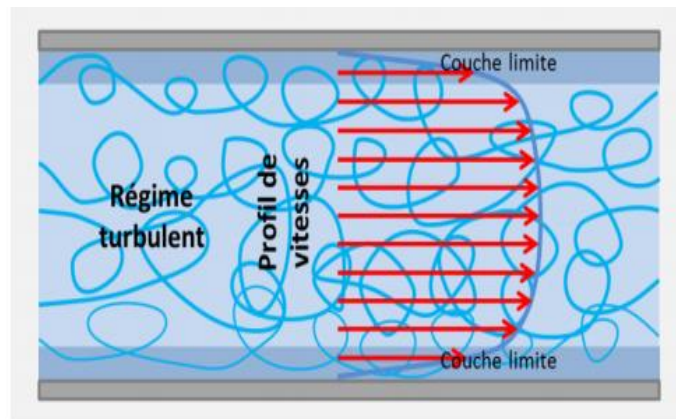


Figure 1-5 : Régime turbulent

Les caractéristiques différenciant les deux régimes d'écoulement sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 1-1 : La différence entre des régimes de l'écoulement

Caractéristique	Écoulement laminaire	Écoulement turbulent
Organisation du fluide	Trajectoires fluides régulières et parallèles	Mouvements désordonnés et tourbillonnaires
Vitesse	Faible à modérée	Élevée
Nombre de Reynolds	$Re < 2000$	$Re > 3000$
Profil de vitesse	Parabolique	Plus aplati et instable
Perte de charge	Relativement faible	Importante

1-4 Écoulement autour des obstacles :

L'écoulement de fluide autour des obstacles est un phénomène que l'on retrouve souvent dans la vie réelle. Il est important à comprendre pour concevoir des systèmes mécaniques et thermiques, comme les avions, les voitures, les bâtiments ou les composants électroniques. Ce phénomène joue aussi un rôle clé dans le fonctionnement des échangeurs de chaleur, des radiateurs ou des turbines qui font avancer les bateaux. Étudier la manière dont le fluide se déplace autour de ces objets, ainsi que le sillage qu'ils laissent derrière eux, permet d'analyser les effets aérodynamiques et hydrodynamiques liés à ces écoulements.

Les obstacles aérodynamiques de géométrie simple sont classés en trois types :

- **Obstacles à forme arrondie** : comme les sphères ou les cylindres, ils permettent au point de décollement de la couche limite de se déplacer selon les conditions d'écoulement.
- **Obstacles à arêtes vives** : comme une plaque inclinée, ils provoquent un décollement fixe de la couche limite, toujours au même endroit.
- **Obstacles profilés** : conçus pour éviter le décollement, comme une plaque placée parallèlement à l'écoulement de l'air ou du fluide. [3]

1-4-1 Écoulements autour d'un cylindre :

L'écoulement autour d'un cylindre est un phénomène classique en mécanique des fluides, largement étudié en raison de sa complexité et de ses nombreuses applications industrielles (aéronautique, génie civil, transfert thermique, etc.). Lorsque le fluide interagit avec la surface du cylindre, différentes structures d'écoulement apparaissent selon le nombre de Reynolds (Re), qui caractérise le régime du fluide. Pour des valeurs faibles de Re (inférieures à 40), l'écoulement reste laminaire et symétrique, sans détachement important du fluide. Entre $Re = 40$ et $Re = 200$, le fluide commence à se séparer périodiquement derrière le cylindre, formant une succession de tourbillons alternés connue sous le nom de rue de Von Kármán. Au-delà de $Re = 2000$, l'écoulement devient complètement turbulent, avec des zones de recirculation instables et une traînée importante. Ce comportement instationnaire et complexe rend l'étude numérique de ce type d'écoulement essentielle, notamment pour prédire les efforts exercés sur les structures cylindriques et optimiser leur conception.

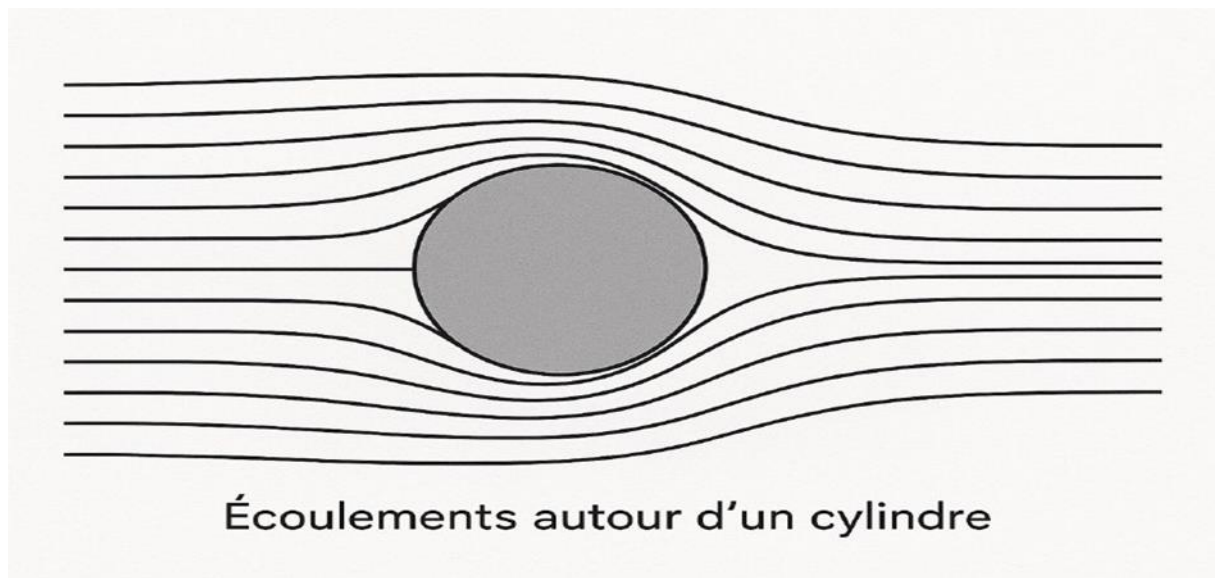


Figure 1-6 : Écoulements autour d'un cylindre

1-4-2 Écoulement de Von Karman :

L'écoulement de Von Kármán désigne une structure tourbillonnaire instationnaire qui se forme derrière un corps cylindrique placé dans un écoulement de fluide, notamment à des nombres de Reynolds modérés (environ 40 à 10^5). Ce phénomène se caractérise par la formation périodique

et alternée de vortex à gauche et à droite du cylindre, créant une structure appelée “rue de Von Kármán”. Cette instabilité hydrodynamique provient du détachement alterné des couches limites, ce qui engendre des forces oscillantes sur le cylindre. La fréquence de détachement des vortex est décrite par le nombre de Strouhal St où f est la fréquence, D le diamètre du cylindre, et U la vitesse du fluide en amont. Ce phénomène joue un rôle crucial dans l’étude des écoulements autour de deux cylindres munis d’ailettes, car ces dernières peuvent modifier ou atténuer la formation de la rue tourbillonnaire, influençant ainsi la traînée, la portance et la stabilité de l’écoulement. L’analyse de cette instabilité est essentielle pour mieux comprendre les interactions entre les corps et les écoulements turbulents dans de nombreuses applications d’ingénierie.

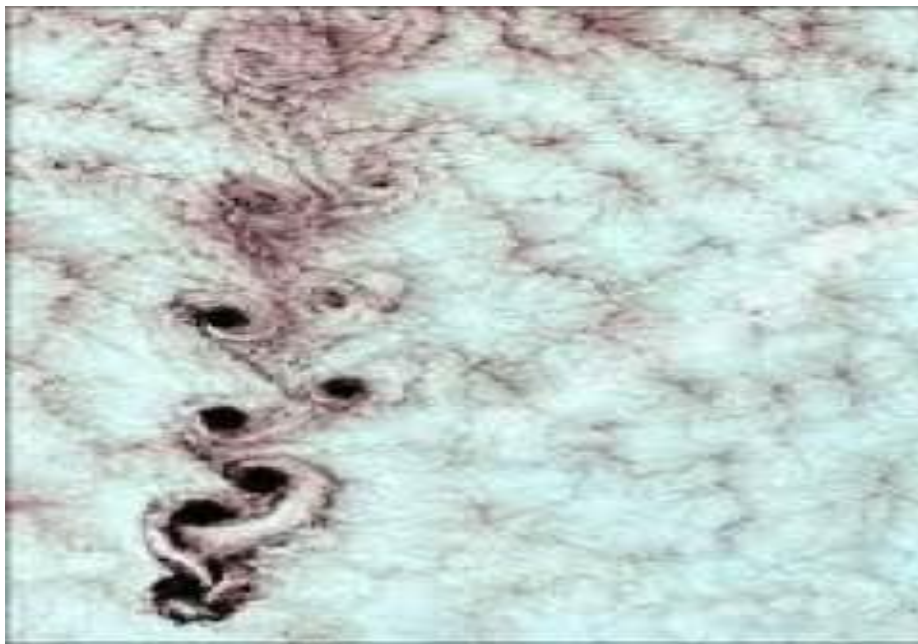


Figure 1-7 : phénomène de von karman

1-4-3 Caractéristiques de l'écoulement autour d'un cylindre :

- Nombre de Reynolds :

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

Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ce nombre sans dimension apparaît naturellement en dimensionnant les équations de

Navier-Stokes. On le définit de la manière suivante :

$$Re = \frac{V_D \rho}{\mu}$$

Avec :

D : Diamètre intérieur de la conduite en (m)

V : Vitesse moyenne d'écoulement en (m/s)

ρ : Masse volumique du fluide en (kg/m³)

μ : Viscosité dynamique en (Pa.s)

ν : Viscosité cinématique en (m² /s)

- Nombre de strouhal :

Lorsqu'un fluide s'écoule autour d'un cylindre circulaire, et que le nombre de Reynolds dépasse 47, des tourbillons commencent à se former de façon alternée derrière le cylindre. Cette formation est périodique et sa fréquence peut être décrite de manière simplifiée à l'aide du nombre de Strouhal

$$s_t = \frac{f_v D}{U}$$

$$f_v = \frac{1}{T}$$

- Coefficient de trainée et de portance :

D'un point de vue phénoménologique, lorsqu'un corps se déplace dans un fluide immobile, ou de manière équivalente, lorsque le fluide s'écoule autour d'un objet solide, une force s'exerce sur ce dernier. Comme illustré à la figure, la composante de cette force perpendiculaire à la direction de l'écoulement est appelée portance (FL), tandis que la composante parallèle à l'écoulement est désignée sous le nom de trainée (FD). [4]

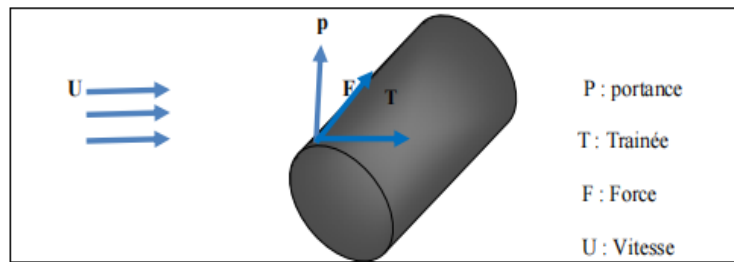


Figure 1-8 : système des forces aérodynamiques s'exercent sur un cylindre

Les coefficients représentant respectivement les composantes longitudinale et transversale de la force exercée par le fluide sur le cylindre sont les suivants :

- **Coefficient de trainée**

Noté C_D , est un nombre sans dimension qui quantifie la résistance d'un objet à l'écoulement d'un fluide (comme l'air ou l'eau). Il est défini comme :

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} U_{\infty}^2 A}$$

- **Coefficient de portance :**

Le coefficient de portance (noté généralement C_L) est un nombre sans dimension qui quantifie la capacité d'un profil aérodynamique (comme une aile ou une pale) à générer une force de portance lorsqu'il est soumis à un écoulement d'air. Il dépend de plusieurs facteurs, notamment de l'angle d'attaque, de la forme du profil, de la viscosité de l'air et du nombre de Reynolds.

Il est défini par la relation :

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{\rho}{2} U_{\infty}^2 A}$$

- **La couche limite :**

La couche limite est la région de l'écoulement d'un fluide proche d'une paroi solide, dans laquelle les effets de la viscosité sont significatifs. Dans cette zone, la vitesse du fluide passe progressivement de zéro à la paroi (condition de non-glissement) à une valeur proche de la vitesse de l'écoulement libre en dehors de la couche limite. L'épaisseur de la couche limite dépend des propriétés du fluide, de la géométrie de la paroi et du régime d'écoulement

(laminaire ou turbulent). Ce concept est fondamental en mécanique des fluides pour comprendre les phénomènes de frottement, de traînée et de transfert de chaleur.

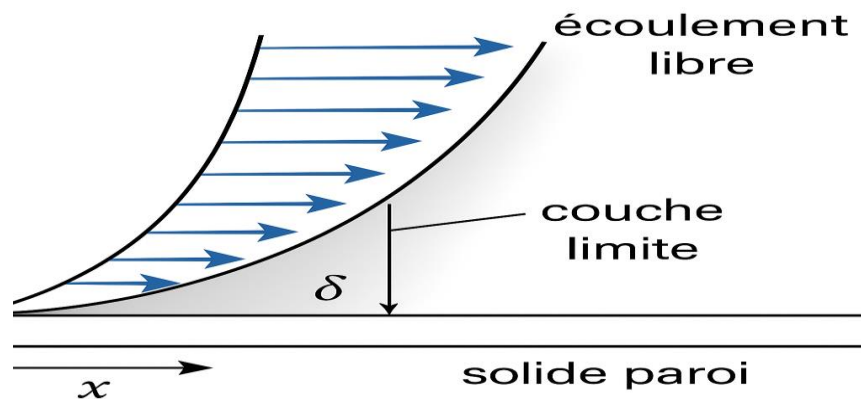


Figure 1-9 : la couche limite

- Profil de vitesse :

Le profil de vitesse décrit la variation de la vitesse d'un fluide en fonction de la position dans une section donnée d'un écoulement. Il est particulièrement important dans les écoulements visqueux où la vitesse varie entre zéro (à la paroi, à cause de la condition de non-glissement) et une valeur maximale (souvent au centre de l'écoulement dans un conduit). Le profil de vitesse dépend du régime de l'écoulement (laminaire ou turbulent), de la géométrie et des conditions aux limites.

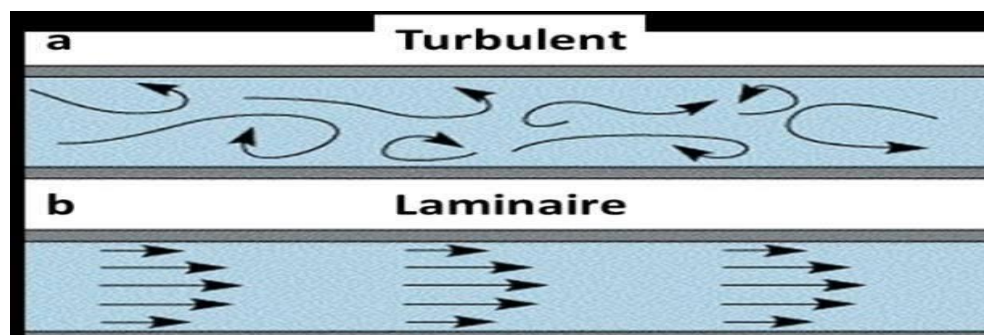


Figure 1-10 : Profil de vitesse

- Point de séparation :

Le point de séparation est l'endroit où la couche limite se détache de la paroi, lorsque la vitesse tangentielle devient nulle, généralement sous l'effet d'un gradient de pression adverse. Ce phénomène cause une inversion locale de l'écoulement. Sur des surfaces courbes comme un

cylindre circulaire, cette séparation n'est pas due à la géométrie mais au développement naturel de la couche limite sous l'effet du champ de pression.

- **Couche de cisaillement :**

Les couches de cisaillement désignent des régions du fluide caractérisées par un gradient de vitesse élevé, engendrant des contraintes de cisaillement importantes. Elles apparaissent notamment lorsqu'il existe une différence de vitesse entre deux zones adjacentes d'un écoulement, ce qui provoque des efforts internes dus aux frottements visqueux. Dans le cas d'un écoulement autour d'un cylindre, deux couches de cisaillement libres se forment de chaque côté de l'obstacle, entre la veine fluide principale et la région de sillage, où la vitesse est quasi nulle. Ces couches peuvent évoluer vers des régimes instables et conduire à la formation de tourbillons. [5]

- **Zone de recirculation :**

La zone de recirculation désigne une région dans un écoulement fluide où le fluide s'écoule en sens inverse par rapport à l'écoulement principal, formant souvent des tourbillons ou des boucles de courant. Elle se forme généralement derrière des obstacles (comme un cylindre, une plaque, etc.) lorsque le fluide se sépare de la surface de l'obstacle à cause de la perte d'adhérence (séparation de la couche limite). [6]

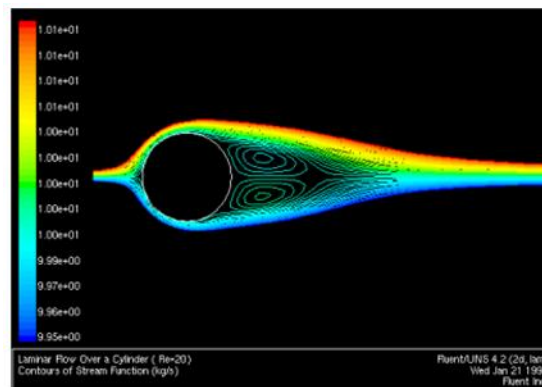


Figure 1-11 : La zone de recirculation d'un fluide laminaire autour un cylindre

1-5 Analyse bibliographique des recherches portant sur l'écoulement autour de cylindres :

Bechefar, youcef [7] : Ce travail présente l'impact de la rugosité sur le comportement hydrodynamique du fluide sur un cylindre rainuré de forme convexe, en examinant l'influence de la forme et de l'amplitude de la rainure sur le flux moyen. Des études numériques directes de l'écoulement bidimensionnel autour d'un cylindre rainuré de forme convexe sont effectuées à un nombre de Reynolds allant jusqu'à 100...

Batoul Fatima Zohra [8] : Le domaine d'étude de l'écoulement autour des obstacles fixes est très vaste, l'écoulement autour d'un cylindre avec rainure c'est le cas qu'on a choisi pour l'étude de notre projet de fin de cycle. Une résolution numérique de système des équations qui régissent ce modèle est faite par le code FLUENT qui est basée sur la méthode des volumes finis pour un écoulement bidimensionnel d'un fluide incompressible avec un régime laminaire $Re=100$ sans transfert de chaleur pour deux cylindres avec une variation de l'angle de la rainure en U . Notre but est de comparer les résultats trouvés de cylindres avec rainures en 60° et 90° avec celle de cylindre simple ; et de comparer entre les contours de vitesse, de pression et les lignes de courant et pour déterminer le nombre de Strouhal et le coefficient de portance dans le cas non stationnaire de chaque cylindre. Les résultats obtenus avec la simulation sont satisfaisantes et encourageantes ; ainsi que les influences sur la structure de l'écoulement bien observée.

Bens dira et al [9] : L'étude se concentre sur l'analyse de l'écoulement autour d'un cylindre positionné à proximité d'une paroi rigide, dans un cadre bidimensionnel. Le fluide est supposé incompressible, le régime est laminaire et aucun transfert thermique n'est pris en compte. La simulation numérique a été réalisée à l'aide du logiciel ANSYS CFX, en adoptant la méthode des éléments finis pour résoudre les équations de conservation. Les investigations ont porté sur une plage étendue de nombres de Reynolds (allant de 10 à 700) ainsi que sur différentes séparations entre le cylindre et la paroi (10D, 15D et 20D).

Pierre Sagaut [10] : L'étude numérique d'écoulements instationnaires décolles internes et externes de fluide visqueux incompressible a été effectuée par la technique de simulation des grandes échelles. On a résolu pour cela les équations de Navier-stokes exprimées en variables vitesse-pression sur des maillages cartésiens. La résolution des équations est basée sur une discrétisation effectuée à l'aide d'une méthode hybride différences finies/éléments finis précise à l'ordre deux en espace et à l'ordre un en temps, sur un maillage non-décalé. La stabilité de la méthode est augmentée par l'utilisation d'un schéma décentré d'ordre trois pour une partie du terme de convection, après sa réécriture sous une forme semi-conservative. Différents modèles de sous-maille ont été éprouvés, et un nouveau modèle, appelé modèle d'échelles mixtes, mieux adapté au traitement des écoulements décolles et transitionnels est proposé. Des résultats et des comparaisons avec l'expérience sont présents. L'écoulement interne derrière une marche

descendante est considérée en bi- et tri-dimensionnel. L'écoulement externe autour d'un cylindre à section carrée est traité en tri-dimensionnel

EL KHOUJA, NAZEK [11] : Parmi les approches avancées de modélisation des écoulements viscoplastiques, une étude s'est intéressée à l'écoulement stationnaire d'une pâte granulaire (comme le béton) autour d'un barreau en translation. Pour modéliser ce comportement, les auteurs ont proposé une nouvelle loi appelée LVF (p_0) (Loi Viscoplastique Frictionnelle), une forme modifiée de la loi de Bingham dont le seuil de plasticité dépend de la pression locale et d'une pression de référence p_0 . La résolution numérique s'appuie sur une méthode de domaine fictif avec multiplicateur de frontière, combinée à un algorithme de point fixe basé sur la méthode d'Uzawa. La méthode est validée par comparaison avec une solution analytique de type Couette. Les simulations montrent que, selon la valeur de p_0 , le comportement du matériau peut se rapprocher de celui d'un fluide de Bingham, avec des différences notables en termes de dissipation d'énergie. Il est observé qu'il existe une valeur critique $p_{0,c}$ à partir de laquelle la dissipation devient plus faible que celle du fluide de Bingham équivalent.

CARLIER, JULIEN [12] : Des mesures PIV du sillage en aval d'un cylindre circulaire à $Re_D = 3900$ sont comparées à des données issues de simulations aux grandes échelles (SGE), dans lesquelles le cylindre est modélisé à l'aide de la méthode de forçage direct. Ces nouveaux résultats, complets et assortis d'un bon niveau de confiance, présentent une excellente concordance entre les données numériques et expérimentales en ce qui concerne les statistiques turbulentes. Les écarts observés avec certains résultats de la littérature sont également discutés.

AMARA, OUSSAMA [13] : L'objectif de ce mémoire est d'étudier le phénomène Hydrodynamique d'un écoulement d'air autour d'un obstacle carré, ainsi que l'effet de l'angle d'inclinaison sur la structure de l'écoulement. Une simulation numérique est effectuée dans le but de tester l'efficacité du code de calcul industriel "FLUENT" qui est basé sur la méthode des volumes finis, et l'étude a conclu que le changement d'angle est d'une grande importance sur la forme de l'écoulement. Nous avons également comparé les résultats obtenus (coté dynamique) avec les résultats des expériences menées par Blair in et NOR, et nous avons obtenu des bons résultats.

FERREIRA PEREZ, SAUL [14] : Dans le contexte des interactions fluide-structure, ce stage a consisté en l'analyse physique d'un écoulement instationnaire autour d'une configuration de deux cylindres en tandem à nombre de Reynolds élevé, au moyen de simulations numériques. À l'aide des modèles de turbulence au premier ordre par approche statistique et du code de calcul NSMB, une première étude en 2D en statique a été menée. Ce cas test est assimilable de manière simplifiée à un train d'atterrissage. Une attention spéciale est portée sur l'instabilité de

Von Kármán qui sera mise en évidence à travers des analyses spectrales des forces aérodynamiques ainsi que sur l'interaction du sillage du cylindre amont sur le cylindre aval et la physique mise en jeu. Les résultats obtenus seront confrontés aux résultats expérimentaux du centre de recherche « NASA-Langley Research Center ». Dans une deuxième partie, une étude en 2D en dynamique, en laissant le cylindre aval libre de se mouvoir dans la direction perpendiculaire à l'écoulement sera réalisée. En changeant les paramètres caractéristiques d'amortissement et raideur du cylindre, le but sera de connaître la fréquence dominante de la réponse, délimiter l'intervalle de vitesse réduite pour lequel un phénomène d'accrochage en fréquence se produit entre l'oscillation du cylindre et l'émission des tourbillons, ainsi que d'étudier l'amplitude de la réponse du cylindre aval en fonction de la vitesse réduite. Le mouvement du cylindre et du domaine fluide sera pris en compte grâce à la formulation ALE (Arbitrary Lagrangian Eulerian). Mots clés : interaction fluide-structure, cylindres tandem, instabilité de Von Kármán, vitesse réduite, accrochage en fréquence.

DIDIER, ERIC [15] : L'écoulement autour de deux cylindres circulaires en tandem de diamètre D est simulé numériquement, pour un nombre de Reynolds de 100. L'écoulement est laminaire et bidimensionnel. Une méthode de résolution totalement couplée permet de résoudre les équations de Navier–Stokes. La distance critique entre les cylindres est précisément définie entre $3,95D$ et $4,0D$. La moyenne et la fluctuation des efforts ainsi que la fréquence de lâcher des vortex changent brutalement pour cet écartement.

DORADOUX, ADRIEN [16] : Les méthodes de domaines fictifs permettent de simuler numériquement des écoulements autour de structures complexes et/ou mobiles à l'aide de maillages simples. L'objet solide est alors « immergé » dans un domaine de calcul englobant le fluide et le solide. Dans un premier temps, on étudie une méthode de pénalisation, qui consiste à ajouter un terme dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement du fluide afin d'imposer la vitesse du solide. Grâce à des développements asymptotiques, on obtient une estimation de l'erreur induite par cette approche lorsque le solide est en mouvement. Ce procédé est ensuite couplé avec un schéma de projection vectorielle permettant d'imposer la contrainte d'incompressibilité. La convergence du schéma ainsi obtenu, vers les équations de Navier-Stokes, est établie. Dans un second temps, une approche originale capable de traiter des écoulements multiphasiques est développée : la méthode de porosité variable. L'idée principale est de considérer le solide comme un milieu sans masse. La discrétisation des bilans massiques de chaque phase est alors modifiée, de sorte que le volume total occupé par l'ensemble des phases fluides soit égal au volume laissé libre par le solide. Cette méthode est validée

numériquement sur un ensemble varié de cas test comprenant es écoulements monophasiques incompressibles et compressibles ainsi que des écoulements diphasiques.

1-6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons découvert les notions essentielles liées aux fluides et à leur comportement. Après avoir défini les propriétés physiques comme la masse volumique, la densité et la viscosité, nous avons étudié les différents types d'écoulements et leurs régimes. Enfin, l'écoulement autour d'un cylindre a été introduit, ce qui prépare le terrain pour les analyses plus détaillées dans les chapitres suivants.

Chapitre 2

Formulation mathématique et calcul numérique

2-1 Introduction :

Ce chapitre présente la démarche utilisée pour simuler numériquement l'écoulement autour de deux cylindres avec des ailettes. On y introduit les équations fondamentales (Navier–Stokes), les méthodes numériques utilisées, ainsi que les outils de calcul comme le logiciel CFX. Le domaine d'étude, le maillage, et les conditions aux limites y sont également décrits.

2-2 Formulation mathématique :

L'étude de l'écoulement autour de deux cylindres munis d'ailettes nécessite la résolution des équations fondamentales de la mécanique des fluides pour un fluide incompressible et newtonien. Ces équations comprennent principalement l'équation de continuité, qui exprime la conservation de la masse, et les équations de Navier–Stokes, qui traduisent la conservation de la quantité de mouvement. Elles sont exprimées en deux dimensions (2D) dans notre cas, et prennent en compte la viscosité du fluide ainsi que les effets inertiels. Ces équations étant non linéaires et couplées, leur résolution analytique devient difficile, d'où le recours aux méthodes numériques pour obtenir une solution approchée.

2-2-1 Equations de transport :

Les équations qui régissent l'écoulement bidimensionnel d'un fluide

Incompressible sont :

- Equation de conservation de masse (continuité) :

La conservation de la masse dans un écoulement est représentée par l'équation de continuité, dont la forme mathématique est :

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

Où la masse volumique et le vecteur vitesse

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

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

- Equation de quantité de mouvement :

La loi de conservation de la quantité de mouvement, exprimée par les équations de Navier-Stokes, traduit la loi fondamentale de la dynamique appliquée à un fluide newtonien. Elle s'écrit comme suit : [17]

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

Dans le cadre de notre étude en deux dimensions, les équations de la quantité de mouvement selon les directions x et y s'écrivent comme suit [36] :

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \end{aligned}$$

2-3 Résolution numérique :

La transition d'un problème formulé en termes d'équations aux dérivées partielles vers une représentation discrète s'appuie sur des fondements éprouvés de l'analyse numérique. Trois approches majeures sont classiquement employées pour cette discrétisation : la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis. Chacune de ces méthodes propose un cadre spécifique d'approximation du problème continu en vue de sa résolution numérique.

2-3-1 Méthode des différences finie :

En analyse numérique, la méthode des différences finies constitue une approche fréquemment utilisée pour approximer les solutions des équations aux dérivées partielles. Elle repose sur la résolution d'un ensemble d'équations (appelé schéma numérique) établissant des relations entre les valeurs d'une fonction inconnue en différents points proches les uns des autres. Cette méthode est souvent privilégiée en raison de sa simplicité de mise en œuvre. Elle se déroule généralement en deux phases : la première consiste à remplacer les opérateurs de dérivation par leurs équivalents discrets via les différences finies ; la seconde consiste à analyser la convergence du schéma lorsque l'espacement entre les points de maillage tends vers zéro.

Le principe de base repose sur la discrétisation du domaine d'étude en un réseau de points (ou nœuds), dont la densité permet d'approcher avec précision la forme du domaine. Ensuite, on applique un développement local en chaque nœud, ce qui conduit à un système d'équations algébriques dont le nombre correspond au nombre d'inconnues à déterminer. [18]

2-3-2 Méthode des éléments finie :

La méthode des éléments finis (MEF) est une technique de calcul numérique très répandue pour analyser des phénomènes physiques complexes. Elle consiste à diviser un domaine continu en un ensemble de petits éléments simples sur lesquels les équations sont résolues localement. Cette méthode est largement utilisée dans divers domaines de l'ingénierie tels que l'automobile, l'aéronautique, le naval, l'énergie et le génie civil. Elle permet aux ingénieurs de simuler le comportement d'un système, de tester différentes configurations, et d'optimiser les performances tout en réduisant les coûts et le nombre de prototypes physiques. La MEF offre ainsi un gain considérable en temps et en ressources. Toutefois, les résultats obtenus restent des approximations numériques qu'il est nécessaire de valider par des essais expérimentaux. Sa capacité à gérer des géométries complexes et à s'adapter à différents types de sollicitations en fait une méthode incontournable, d'autant plus qu'elle est aujourd'hui renforcée par la puissance des outils informatiques modernes. [19]

2-3-3 Méthode des volumes finie :

La méthode des volumes finis est une technique numérique utilisée pour résoudre les équations différentielles partielles, notamment celles issues de la mécanique des fluides. Elle repose sur la conservation des grandeurs physiques (masse, quantité de mouvement, énergie, etc.) à l'échelle de petits volumes de contrôle décomposant le domaine étudié. Contrairement à d'autres méthodes comme les différences finies, la MVF intègre les équations sur chaque volume, ce qui garantit une conservation locale des flux. Les flux sortants d'un volume sont les flux entrants des volumes voisins, ce qui en fait une méthode bien adaptée aux problèmes de convection, de diffusion ou d'écoulement complexe. La discrétisation s'effectue généralement à l'aide de maillages structurés ou non structurés, permettant une bonne flexibilité géométrique. Grâce à sa robustesse et sa précision, elle est largement utilisée dans les codes industriels de simulation numérique, notamment en dynamique des fluides (CFD). [20]

2-4 Le maillage :

Afin de résoudre numériquement les équations qui décrivent l'écoulement des fluides, il est nécessaire de représenter le domaine de calcul par un ensemble fini de points ou de volumes. Ce processus est appelé maillage (mesh ou grid en anglais). Un maillage divise le domaine physique en un grand nombre de petites cellules, sur lesquelles les équations de conservation (masse, quantité de mouvement, énergie) sont appliquées. La qualité du maillage influence fortement la précision et la stabilité de la solution numérique.

Il existe plusieurs types de maillages :

- Maillages structurés : les cellules sont organisées régulièrement, avec une topologie de type quadrillage (par exemple, des quadrilatères ou des cubes)
- Maillages structurés : les cellules sont organisées régulièrement, avec une topologie de type quadrillage (par exemple, des quadrilatères ou des cubes).
- • • Maillages hybrides : combinaison de maillages structurés et non structurés dans différentes parties du domaine.

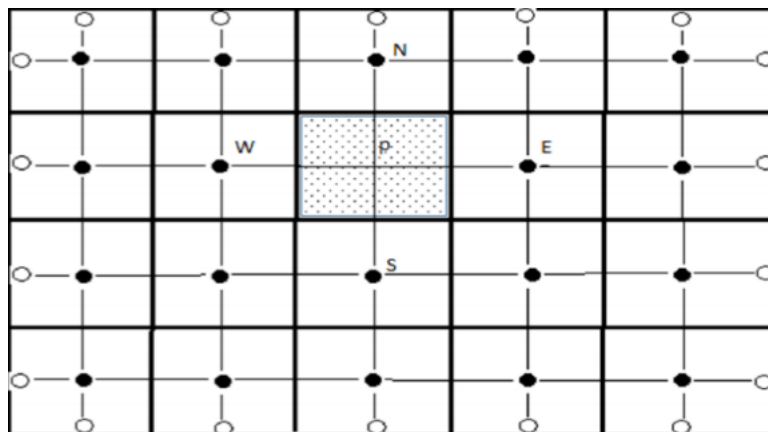


Figure 2-1 : Schéma du maillage

2-4-1 Nœuds et éléments :

Dans le cadre de la modélisation numérique, les équations de conservation sont reformulées sous une forme discrète, en les appliquant à des sous-domaines finis du domaine global, appelés éléments ou mailles. À chaque élément sont associés des nœuds de discrétisation, qui représentent les points où les équations discrètes sont résolues. La localisation de ces nœuds dépend du schéma de discrétisation utilisé : ils peuvent être positionnés aux sommets, au centre ou sur les faces des éléments. L'ensemble constitué des éléments et des nœuds forme ce que

l'on appelle le maillage, obtenu par un découpage géométrique précis du domaine de calcul. Ce maillage joue un rôle fondamental dans la précision et la stabilité des solutions numériques, car il conditionne la manière dont les équations physiques sont approximées sur l'ensemble du domaine.

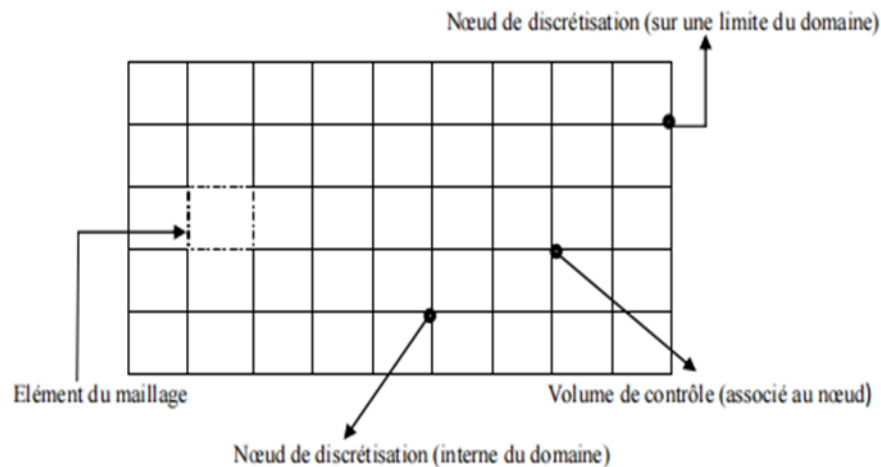


Figure 2-2 : illustration de la notion de maillage.

2-4-2 Géométrie et topologie :

La figure 2.3 illustre la configuration géométrique adoptée pour cette étude. Le domaine d'écoulement est un canal de section rectangulaire, de longueur $50D$ et de hauteur $25D$, où D désigne le diamètre des cylindres. Deux obstacles cylindriques identiques, équipés d'ailettes, sont placés côte à côte, parallèlement à la paroi inférieure du canal. Le premier cylindre est positionné à une distance de $16,5D$ de l'entrée du domaine, tandis que la sortie se situe à $33,5D$ en aval du second cylindre. Cette disposition permet d'analyser l'interaction des écoulements générés par les deux obstacles ainsi que l'effet des ailettes sur la dynamique du fluide en espace confiné.

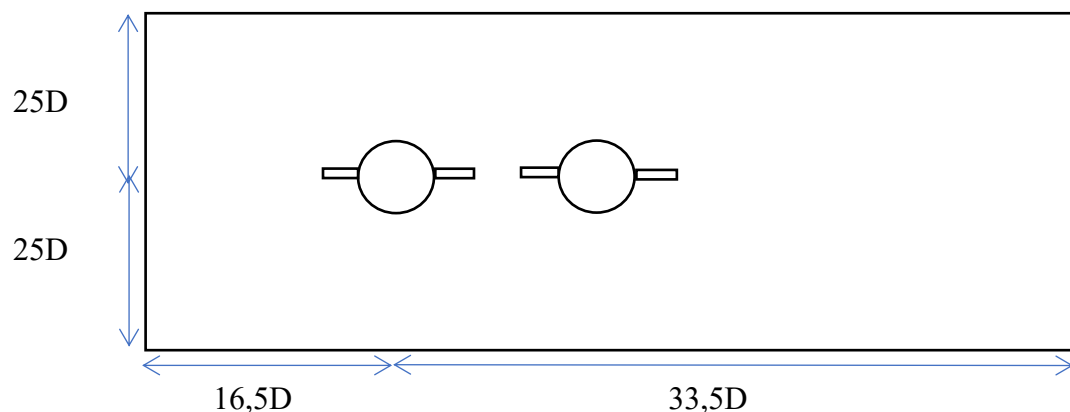


Figure 2-3 : dimension de domaine de calcul

2-4-3 Connectivité :

La connectivité correspond aux relations qui existent entre les sommets des éléments d'un maillage. Un maillage est qualifié de structuré lorsque les nœuds appartenant à une même catégorie (dans le domaine, sur les bords ou aux coins) possèdent tous un même nombre de voisins, ou sont liés à un même nombre d'éléments. Dans ce cas, leur connectivité est régulière et uniforme. En revanche, pour un maillage non structuré, cette connectivité varie : le nombre de voisins peut différer d'un nœud à l'autre, ce qui entraîne une organisation locale irrégulière.

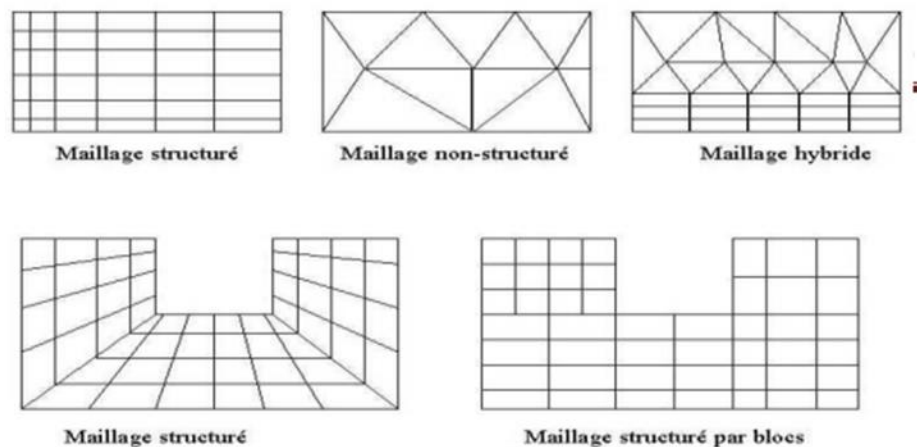


Figure2-4 : les différentes structures de maillage

2-5 Description général du problème :

L'étude de l'écoulement autour d'obstacles cylindriques est un sujet classique mais toujours d'actualité en mécanique des fluides, notamment en raison de ses nombreuses applications industrielles, telles que les échangeurs de chaleur, les structures offshore, ou encore les systèmes de refroidissement.

Dans ce travail, on s'intéresse à la simulation numérique de l'écoulement autour de deux cylindres disposés horizontalement, avec ou sans ailettes. L'objectif est d'analyser l'influence de la présence des ailettes ainsi que la variation de la distance entre les deux cylindres sur le comportement de l'écoulement.

Pour cela, des simulations sont réalisées à l'aide du logiciel ANSYS CFX, en considérant plusieurs configurations : cylindres nus et cylindres munis d'ailettes, avec différentes distances

d'espacement. Ces simulations permettront de visualiser les lignes de courant, les distributions de vitesse et de pression, ainsi que d'évaluer l'impact des ailettes sur la traînée, la turbulence et le transfert de quantité de mouvement.

Ce type d'analyse est essentiel pour l'optimisation des systèmes fluidiques, car il permet mieux comprendre les phénomènes d'interaction fluide-structure et d'améliorer l'efficacité des dispositifs techniques dans lesquels ces géométries sont rencontrées.

2-5-1 les conditions aux limites :

Dans le cadre de cette étude, le domaine de simulation est défini comme une zone rectangulaire de dimensions $50D \times 100D$, conçue pour accueillir deux cylindres alignés horizontalement, chacun équipé d'ailettes réparties symétriquement. Ces cylindres sont positionnés de manière à permettre une interaction fluide entre leurs structures et l'écoulement principal.

Spécification des conditions aux limites :

• Condition à l'entrée (Entrée du fluide) :

L'écoulement entrant est supposé uniforme, stationnaire et dirigé horizontalement, avec un profil de vitesse constant donné par :

$$u_1 = U_0, \quad u_2 = 0$$

La vitesse U_0 est déterminée à partir du nombre de Reynolds $Re = 200$, en tenant compte des propriétés suivantes du fluide :

$$\rho = 997 \text{ kg/m}^3, \quad \mu = 8,899 \cdot 10^{-4} \text{ Pa.s}, \quad D = 0.02 \text{ m}$$

D'où :

$$U_0 = \frac{Re \cdot \mu}{\rho \cdot D}$$

• Conditions en sortie (Exutoires) :

Trois ouvertures de sortie sont prévues, où sont appliquées des conditions de type convection libre, permettant à l'écoulement de quitter le domaine sans perturbations artificielles. Cela correspond à :

$$\frac{\partial u_1}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u_2}{\partial x} = 0, \quad P = P_a \text{ tm}$$

• Surfaces des cylindres et des ailettes :

Les parois des cylindres ainsi que leurs ailettes sont considérées comme des surfaces solides sans glissement, ce qui implique une vitesse nulle au contact :

$$u_1 = 0, \quad u_2 = 0$$

La figure ci de sous illustre les conditions :

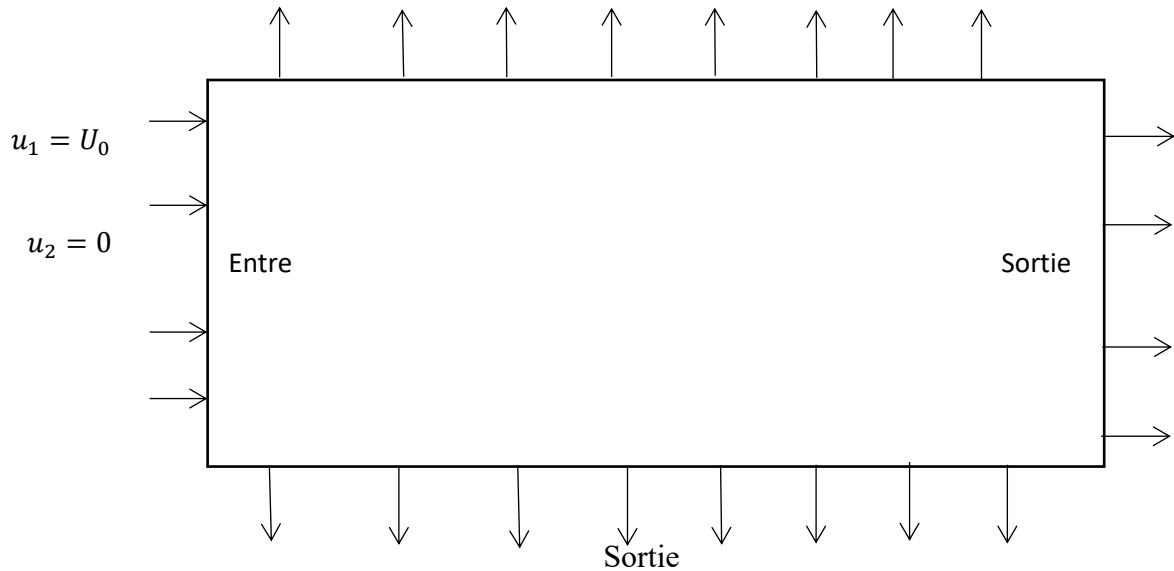


Figure 2-5 : les conditions aux limites

2-5-2 Méthodologie de simulation numérique avec ANSYS CFX :

La méthodologie de simulation numérique avec ANSYS CFX repose sur une démarche structurée permettant de modéliser efficacement un écoulement fluide. Elle comprend plusieurs étapes clés allant de la définition de la géométrie jusqu'à l'analyse des résultats obtenus.

-Géométrie

Pour générer un maillage de type quadrilatéral, il est nécessaire de bien définir les surfaces du domaine. Une géométrie propre et structurée permet un maillage plus régulier et mieux adapté à la simulation.

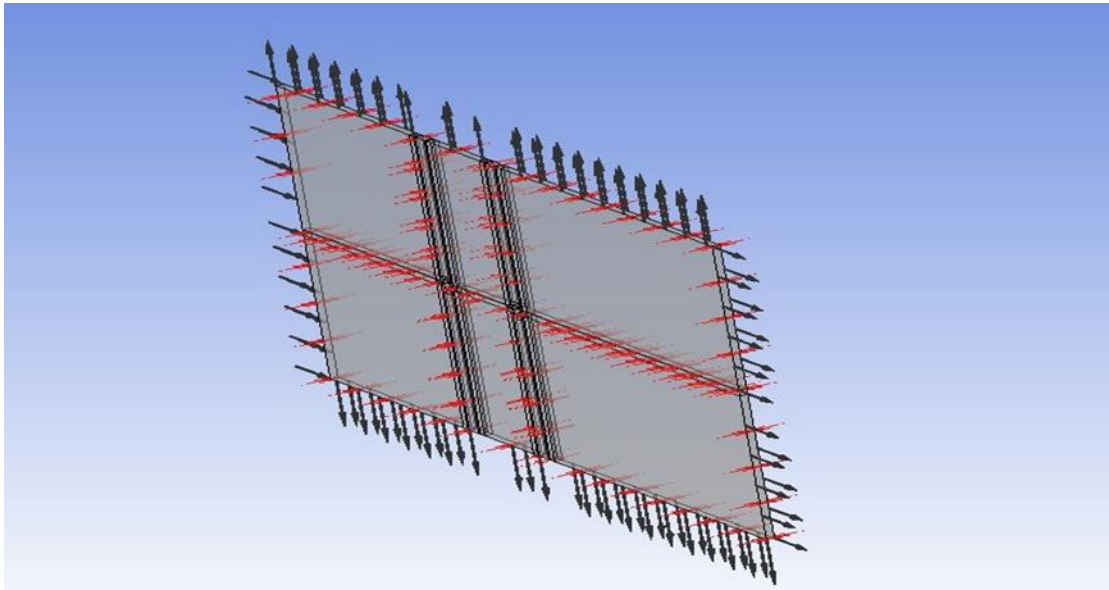


Figure 2-6 : Géométrie du domaine

- Maillage :

La création du maillage constitue une étape essentielle dans toute simulation numérique. Elle suit un processus bien défini, adapté à la complexité de la géométrie et aux phénomènes physiques étudiés. Voici les principales étapes suivies :

1. Préparation de la géométrie :

La première phase consiste à construire une géométrie propre, sans entités parasites, afin de faciliter la génération d'un maillage cohérent.

2. Définition des tailles locales du maillage :

Des zones spécifiques, comme les alentours des cylindres et des ailettes, nécessitent un raffinement local en raison des forts gradients de vitesse ou de pression.

3. Choix du type de maillage :

En fonction de la géométrie, on opte pour un maillage structuré, non structuré ou mixte. Chaque type présente des avantages selon les régions étudiées.

4. Affinage dans les zones critiques :

L'ajout de mailles plus fines est indispensable près des parois solides, afin de capturer correctement les effets de la couche limite.

5. Insertion de couches prismatiques :

Pour mieux représenter l'écoulement visqueux près des surfaces, des couches prismatiques sont souvent ajoutées perpendiculairement aux parois.

6. Contrôle de qualité :

Il est essentiel de vérifier certains critères de qualité du maillage, comme l'orthogonalité, le skewness et le rapport d'aspect, pour garantir la stabilité numérique.

7. Génération et exportation du maillage :

Une fois toutes les conditions remplies, le maillage est généré, puis exporté vers le solveur utilisé (CFX). [21]

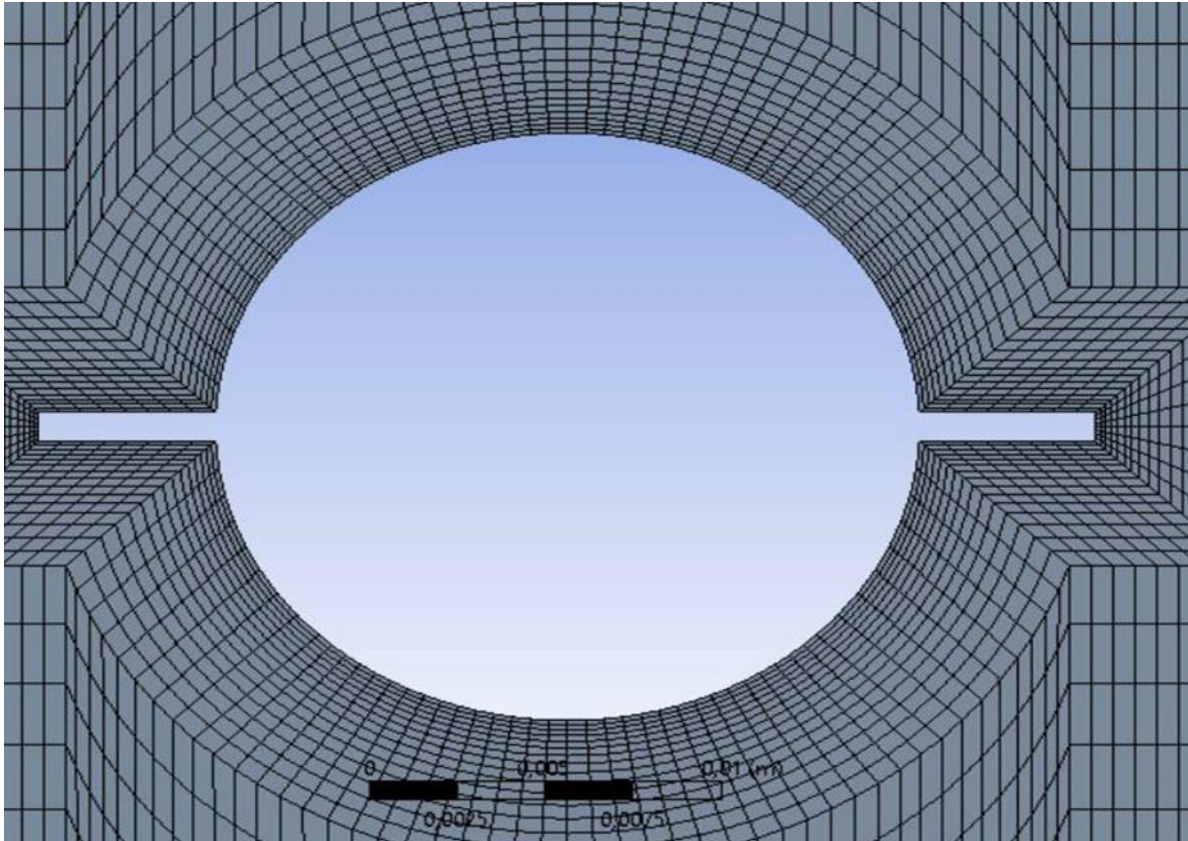


Figure 2-7 : modèle de maillage

- Configuration :

Voici les étapes générales de la configuration dans ANSYS CFX, après avoir généré le maillage et importé la géométrie :

1-Définition du domaine :

Outline	Domain: Default Domain	Material: Water
---------	------------------------	-----------------

Details of **Water**

Basic Settings		Material Properties
Option	General Material	
Thermodynamic Properties		
Equation of State		
Option	Value	
Molar Mass	18.02 [kg kmol ⁻¹]	
Density	997.0 [kg m ⁻³]	
☒ Specific Heat Capacity		
Option	Value	
Specific Heat Capacity	4181.7 [J kg ⁻¹ K ⁻¹]	
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/K]	
Transport Properties		
Radiation Properties		
☒ Buoyancy Properties		
Option	Value	
Thermal Expansivity	2.57E-04 [K ⁻¹]	

Figure 2-8 : propriété des fluides

Définir les conditions aux limites :

- **Inlet (entrée)** : vitesse ou débit, température...
- **Outlet (sortie)** : pression, sortie libre...
- **Parois (walls)** : conditions de glissement ou non, température fixe.

Outline	Expressions	Initialization
Details of Global Initialization in Flow Analysis 1		
Global Settings		
☐ Coordinate Frame		
Initial Conditions		
Velocity Type	Cartesian	
Cartesian Velocity Components		
Option	Automatic with Value	
U	FluidVelocity	
V	0 [m s ⁻¹]	
W	0 [m s ⁻¹]	
Static Pressure		
Option	Automatic with Value	
Relative Pressure	0 [Pa]	
Temperature		
Option	Automatic with Value	
Temperature	293 [K]	

Outline	Domain: Default Domain	Boundary: INLET
Details of INLET in Default Domain in Flow Analysis 1		
Basic Settings	Boundary Details	Sources
Plot Options		
Flow Regime		
Option	Subsonic	
Mass And Momentum		
Option	Normal Speed	
Normal Speed	FluidVelocity	
Heat Transfer		
Option	Static Temperature	
Static Temperature	293 [K]	

Figure 2-9 : les conditions initiales

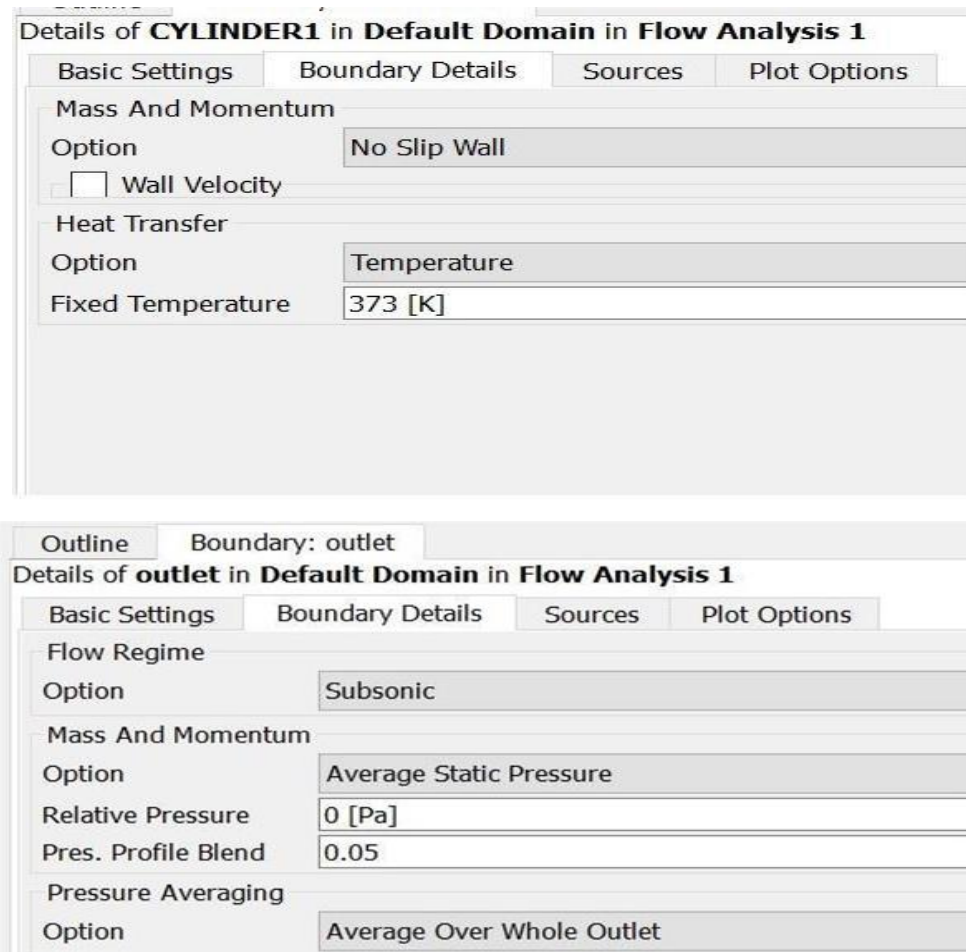


Figure 2-10 : La condition aux parois de sortie

Les expressions utilise (la figure si de sous pour un cas) :

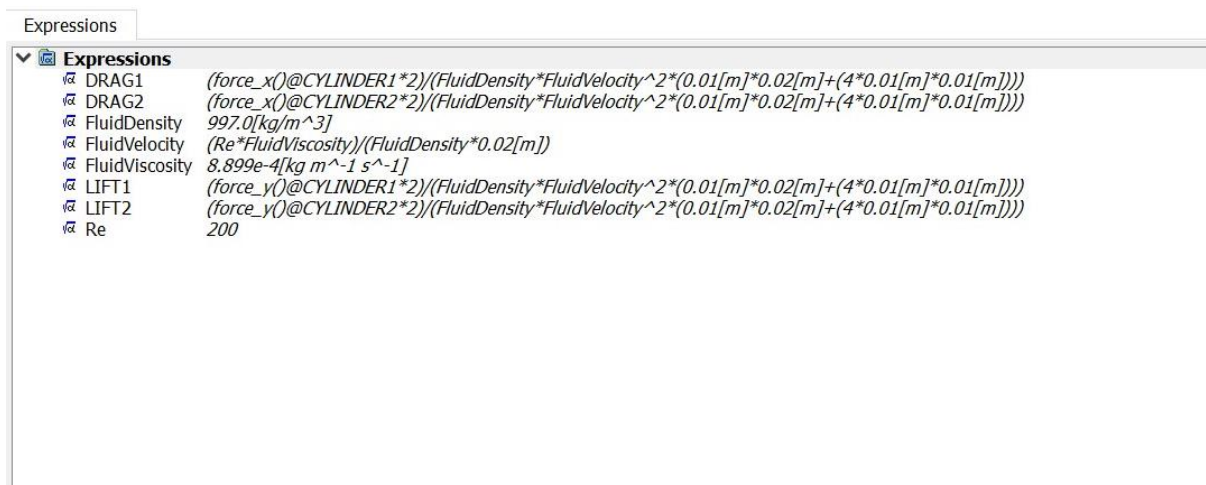


Figure 2-11 : l'expression utilise

2-5-2-4 Solution :

Cette phase correspond au lancement du solveur afin de traiter les équations différentielles partielles régissant l'écoulement (comme les équations de Navier-Stokes). Après l'imposition des conditions initiales et des paramètres numériques (type de solveur, schémas de discrétisation, critères de convergence), le solveur procède à l'itération sur l'ensemble du domaine discrétisé. L'évolution de la solution est suivie à travers l'analyse des résidus numériques, qui permettent d'évaluer la stabilité et la convergence du calcul. Une attention particulière est accordée au respect des seuils de convergence pour garantir la fiabilité des résultats.

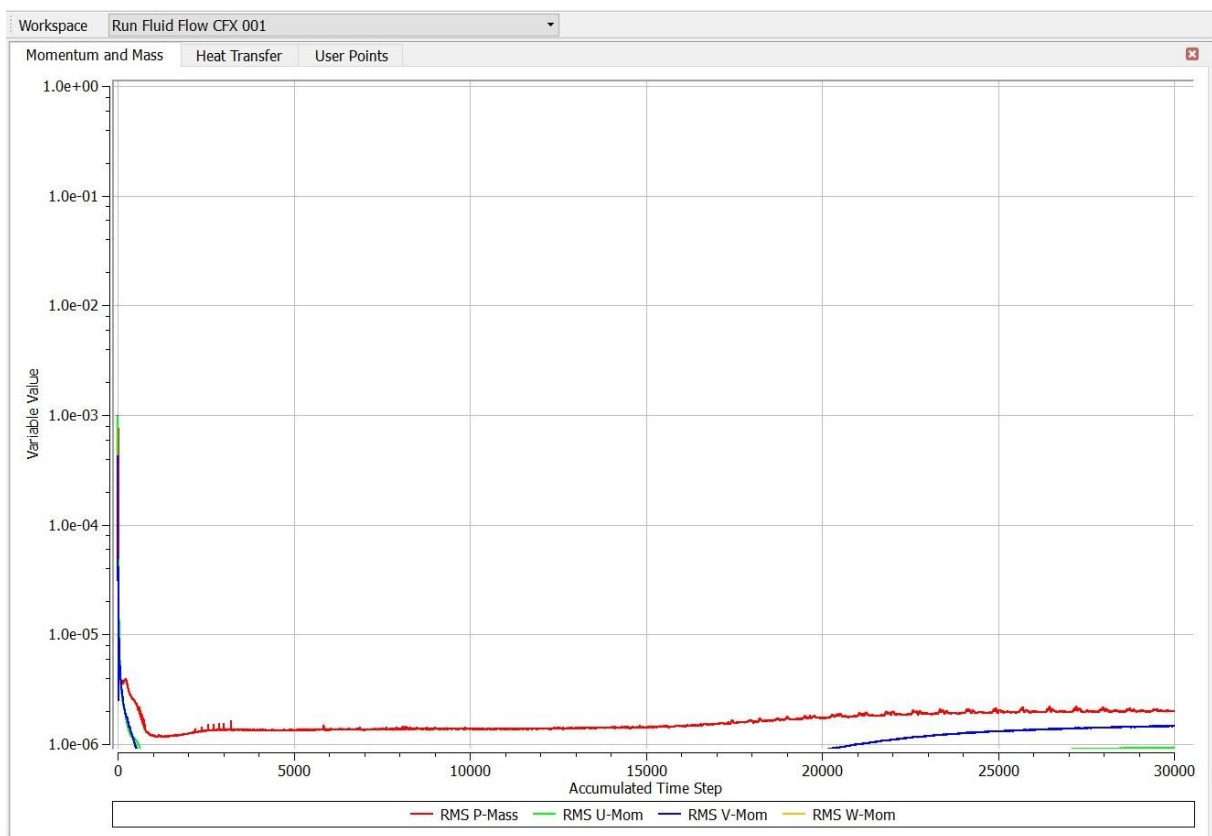


Figure 2-12 : Lancement du processus de résolution dans ANSYS

2-6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit la démarche de simulation numérique de l'écoulement autour de deux cylindres à ailettes. Après avoir introduit les équations fondamentales et les méthodes numériques de résolution, nous avons détaillé le maillage et les conditions aux limites. L'utilisation d'ANSYS CFX a été présentée comme un outil adapté à la modélisation de ce type d'écoulement complexe. Cette approche pose les bases nécessaires à l'interprétation des résultats présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre 3

Résultat et interprétation

3-1 Introduction :

Dans ce dernier chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus de notre cas d'étude bidimensionnel et mettre en évidence la capacité du code de calcul CFX, intégré dans le logiciel ANSYS 19. Ce dernier a été utilisé pour modéliser un écoulement laminaire instationnaire d'un fluide incompressible autour de deux cylindres munis d'ailettes, disposés selon un arrangement horizontal, avec des distances d'espacement variables (L/D).

L'objectif principal de cette simulation est d'analyser le comportement de l'écoulement autour de cette configuration complexe, en particulier à travers l'étude des champs de vitesses (vélocité) et de tourbillons (vorticité). Nous nous intéressons également à la moyenne des forces aérodynamiques engendrées, à savoir la force de portance et la force de traînée, pour différentes valeurs de L/D .

3-2 Validation du travail :

L'étude de convergence du maillage a été effectuée à l'aide de quatre maillages de complexité croissante, allant de 22 760 à 98 240 nœuds. Les résultats montrent que la valeur moyenne du coefficient de traînée (CD) varie légèrement entre les différents maillages, avec une stabilisation à partir du troisième maillage. Cela indique que la solution est numériquement convergente. De plus, les résultats obtenus sont cohérents avec ceux de la littérature, notamment les valeurs de CD moyennes de 1.23 [21] et 1.30 [22], ce qui confirme la validité du modèle utilisé dans cette simulation.

Tableau 3-1 : Détails du maillage et de traînée moyenne obtenue pour chaque configuration

Étude actuelle				Autre simulation	
Maillage	Nœuds	Eléments	CD moyenne	CD moyenne	CD moyenne
Maillage 1	22760	11130	1,222306327	1.23 [21]	1.30 [22]
Maillage 2	44300	21800	1,200262092		
Maillage 3	72400	35750	1,21366951		
Maillage 4	98240	48600	1,208214017		

3-3 Variation de portance moyenne (CLmoy) et trainée moyenne (CDmoy) de deux cylindres en fonction de L/D :

Tableau 3-2 : Portance moyenne (CLmoy) et trainée moyenne (CDmoy) de deux cylindres sans ailette en fonction de rapport L/D

	1.5	2	3	4	6	8
CL1	-2,88934E-05	3,13484E-05	-0,000193	0,000409	-0,000952	-0,003721
CL2	8,53655E-05	-6,90134E-05	0,002194	0,001180	-0,005665	-0,005873
CD1	1,067099	1,042671	0,998399	0,9709151	1,1441805	1,186324
CD2	-0,16405	-0,187269	-0,142265	-0,025352	2,235950	0,587671

Tableau 3-3 : Portance moyenne (CLmoy) et trainée moyenne (CDmoy) de deux cylindres avec ailette en fonction de rapport L/D

		2	3	4	6	8
Ail=0.25	CL1	8,406E-06	1,10E-05	3,625E-05	0,001017	-0,001866
	CL2	2,225E-05	-9,523E-06	0,0002918	-0,005375	0,005278
	CD1	0,50950	0,4899	0,47608	0,51565	0,54381
	CD2	-0,074068	-0,0563	-0,0290	0,2028	0,2707
Ail=0.5	CL1		1,643E-05	6,819E-06	-0,001350	-0,001313
	CL2		-2,73102E-05	8,98315E-06	0,004147114	-0,000279394
	CD1		0,319213	0,31052	0,32242	0,32173
	CD2		-0,02855	-0,01175	0,10919	0,14052
Ail=0.75	CL1		2,0221E-05	1,5288E-05	-0,00011	0,000326
	CL2		1,7379E-06	2,2388E-05	0,00086	-0,004525
	CD1		0,23372	0,22816	0,2210	0,23623
	CD2		-0,015389	-0,002807	0,02826	0,113086
Ail=1	CL1			0,0002847	1,4653E-06	7,8908E-05
	CL2			0,00275	-1,036E-05	0,00130
	CD1			0,17946	0,17403	0,17953
	CD2			0,0024351	0,0232406	0,073029

3-3-1 Variation de portance moyenne (CLmoy) en fonction de L/D :**a) Cas (aillette = 0.25) :**

Dans ce graphe, on observe que le cylindre avant (CL1), sans ailette, présente une portance moyenne nulle pour les faibles valeurs de L/D (1 à 4). Lorsque le rapport L/D augmente, en particulier à partir de L/D = 6, la portance devient légèrement négative, traduisant un début de déséquilibre dans l'écoulement. En revanche, lorsque des ailettes de longueur 0.25 sont ajoutées, ce déséquilibre est légèrement atténué. À L/D = 8, la portance négative est moins marquée qu'en l'absence d'aillette, ce qui suggère un effet stabilisateur, bien que modéré.

Concernant le cylindre arrière (CL2), sans ailette, celui-ci bénéficie au départ (L/D = 1 à 4) d'un effet de sillage positif, générant une faible portance moyenne positive. Cependant, à partir de L/D = 6, la portance chute brutalement et devient fortement négative, indiquant que le cylindre est désormais exposé à un écoulement défavorable. L'ajout des ailettes change significativement ce comportement : si leur effet est quasi nul à L/D = 6, il devient spectaculaire à L/D = 8, où la portance devient non seulement moins négative, mais carrément positive. Cela montre que même une ailette courte de 0.25 peut profondément modifier l'écoulement autour du second cylindre à grande distance.

b) Cas (aillette = 0.5) :

Dans ce deuxième graphe, la tendance est similaire pour CL1. Sans ailette, la portance moyenne reste nulle jusqu'à L/D = 4, puis devient progressivement négative. L'aillette de 0.5 joue ici un rôle plus visible qu'avec 0.25 : elle limite nettement la chute de portance à L/D = 6 et 8. On remarque que la portance reste proche de zéro même à L/D = 8, ce qui traduit un bon effet de stabilisation aérodynamique.

Quant au cylindre CL2, sans ailette, il subit encore une baisse brutale de portance à L/D ≥ 6, atteignant des valeurs très négatives. En revanche, lorsque l'aillette de 0.5 est ajoutée, le résultat est radicalement différent. À L/D = 6, la portance devient positive, ce qui est un changement complet de comportement par rapport au cas sans ailette. À L/D = 8, la portance revient autour de zéro, ce qui confirme une nette amélioration de la stabilité. Cette configuration avec une ailette de 0.5 semble donc particulièrement efficace pour corriger les déséquilibres du cylindre arrière à moyenne et grande distance.

c) Cas (aillette = 0.75) :

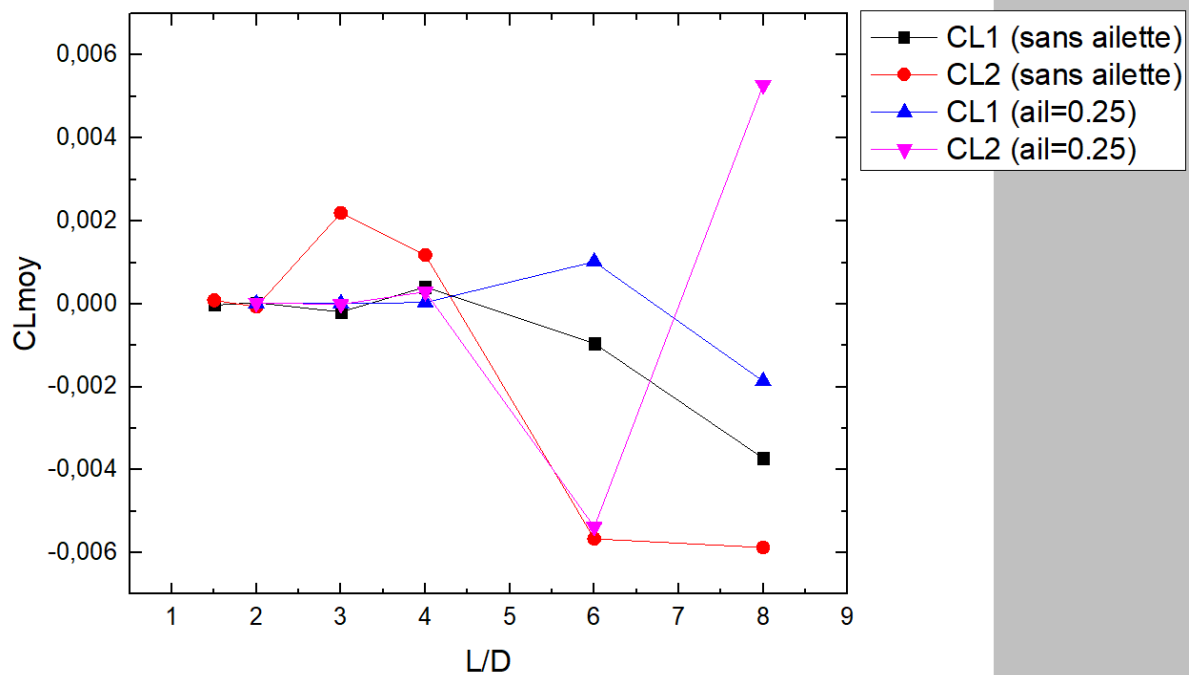
Dans le cas du cylindre CL1, les résultats montrent que l'aillette de 0.75 permet de quasiment annuler la portance négative apparue à $L/D = 6$ et 8. Sans ailette, ces valeurs étaient plus fortement négatives, mais ici, l'effet de l'aillette est visible et permet une quasi-neutralisation de la portance.

Pour CL2, sans ailette, la chute de portance à partir de $L/D = 6$ est toujours présente et brutale. L'aillette de 0.75 améliore la situation : à $L/D = 6$, la portance moyenne devient positive, ce qui traduit une modification significative de l'écoulement. Cependant, à $L/D = 8$, la portance reste encore négative, bien qu'elle soit moins importante qu'en l'absence d'aillette. Cela suggère que l'aillette de 0.75 est efficace, mais moins performante que celle de 0.5 sur les grandes distances.

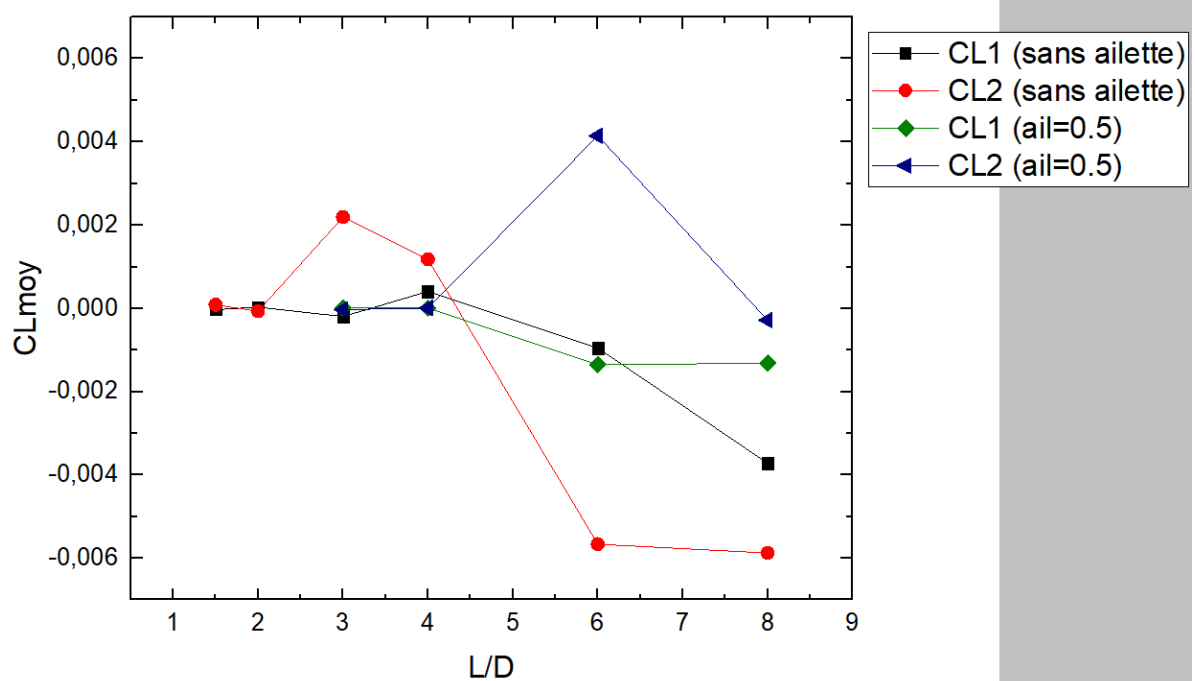
d) Cas (aillette = 1) :

Enfin, le graphe 4 confirme les tendances observées précédemment, avec des résultats encore plus intéressants pour les ailettes longues. Pour le cylindre CL1, l'effet de l'aillette de longueur 1 est très net : elle permet de stabiliser totalement la portance moyenne, même pour $L/D = 8$, là où la version sans ailette montrait une portance négative bien plus marquée. Cela indique une répartition de pression plus symétrique et donc un écoulement bien contrôlé.

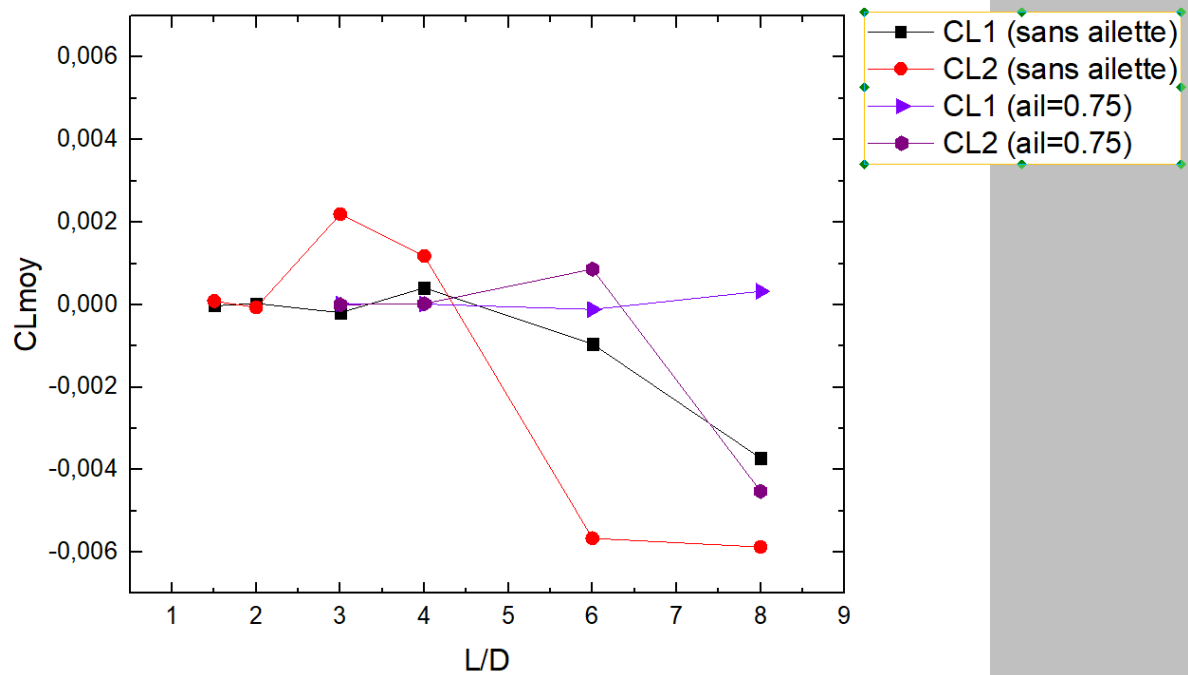
Du côté de CL2, l'effet est encore plus impressionnant. Contrairement aux configurations sans ailettes où la portance s'effondre à partir de $L/D = 6$, l'aillette de longueur 1 permet d'atteindre une portance quasiment nulle à $L/D = 6$, et même positive à $L/D = 8$. Cela signifie que le cylindre arrière retrouve une configuration aérodynamique favorable, probablement grâce à une redirection du flux induite par la géométrie des ailettes. C'est donc la configuration la plus stable et la plus performante parmi toutes celles testées.



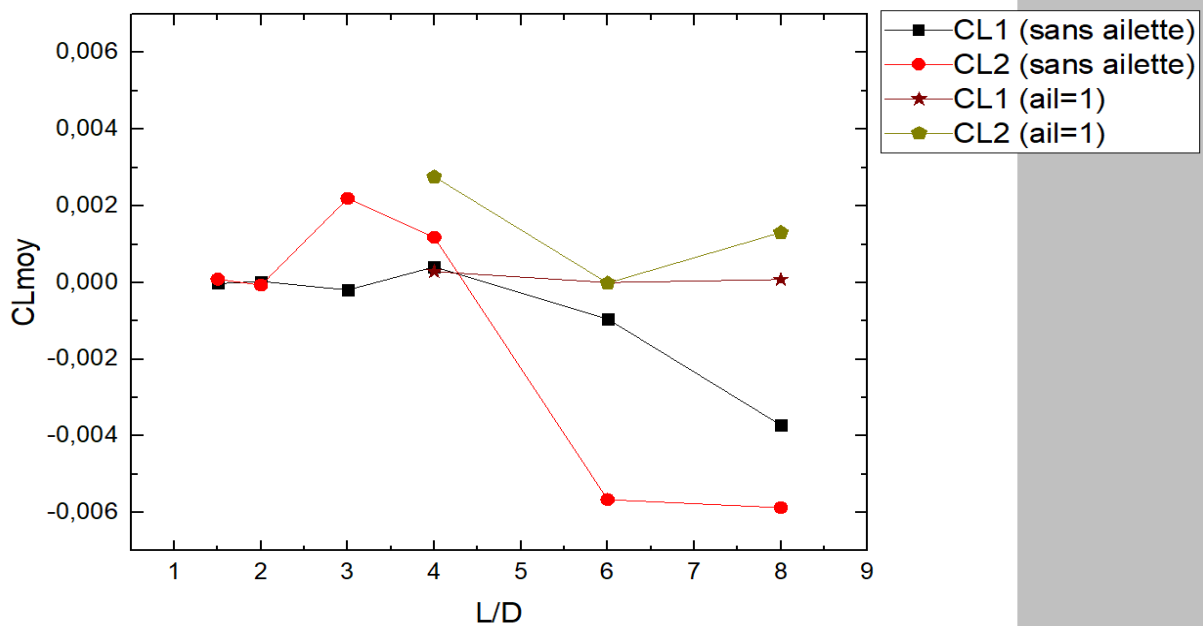
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 3-1 : la portance moyenne (CL_{moy}) de deux cylindres avec et sans ailettes en fonction de L/D

3-3-2 Variation de la traînée moyenne (CD_{moy}) en fonction de L/D :**a) Cas (aillette = 0.25) :**

Dans ce graphe, sans ailette, on observe que le coefficient de traînée moyen $CD1$ du cylindre avant reste relativement stable entre 1.0 et 1.1, indépendamment de la variation du rapport L/D . Cela traduit un écoulement relativement peu perturbé autour de ce cylindre, car il est exposé directement au flux incident. Lorsque des ailettes de longueur 0.25 sont introduites, le $CD1$ chute drastiquement à une valeur constante d'environ 0.45, soit une réduction de plus de 50 %, ce qui indique une réorganisation favorable de l'écoulement autour du cylindre amont grâce aux ailettes.

En ce qui concerne le cylindre arrière ($CD2$), sans ailette, on observe une forte augmentation de la traînée à $L/D = 6$ (~ 2.3), ce qui correspond à une zone critique où l'interaction de sillage est la plus instable. En revanche, avec des ailettes de 0.25, cette valeur maximale disparaît complètement, et la traînée reste faible et régulière (≈ 0.0 à 0.3), quelle que soit la valeur de L/D . Cette configuration démontre que les ailettes permettent de réduire fortement la traînée du second cylindre, notamment en supprimant le pic anormal de résistance observé à moyenne distance.

b) Cas (aillette = 0.5) :

Le comportement du $CD1$ sans ailette est ici encore constant et élevé (~ 1.0 à 1.1). Dès que l'aillette de 0.5 est introduite, le $CD1$ tombe autour de 0.3, ce qui traduit une amélioration aérodynamique encore plus marquée qu'avec l'aillette de 0.25. Ce résultat montre que les ailettes jouent un rôle de lissage de l'écoulement, en diminuant les zones de recirculation qui génèrent habituellement de la traînée.

Pour le cylindre arrière ($CD2$), le comportement sans ailette est toujours marqué par un pic extrême à $L/D = 6$, dépassant les 2.2. L'ajout de l'aillette de 0.5 a un effet très net : la traînée reste quasi nulle de $L/D = 1$ à 4 , puis augmente très légèrement jusqu'à 0.1 à $L/D = 8$. On remarque donc que l'aillette permet de maîtriser complètement l'évolution de la traînée, même dans les configurations de distance où l'effet de sillage aurait dû causer des instabilités.

c) Cas (aillette = 0.75) :

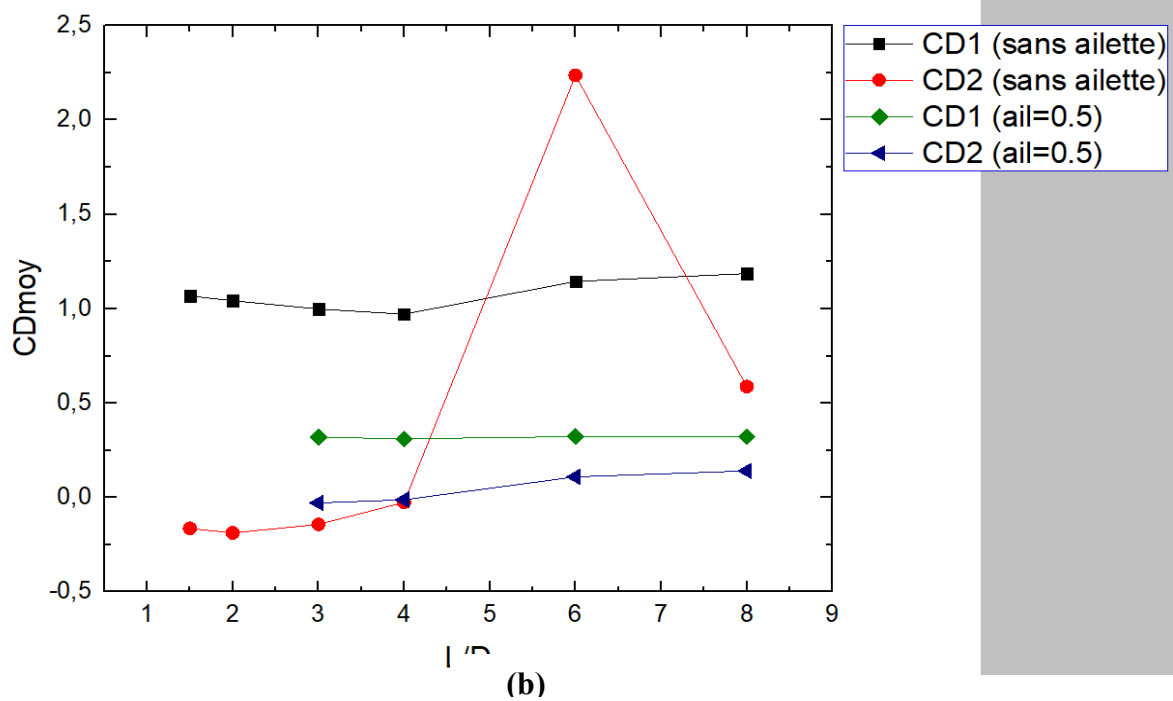
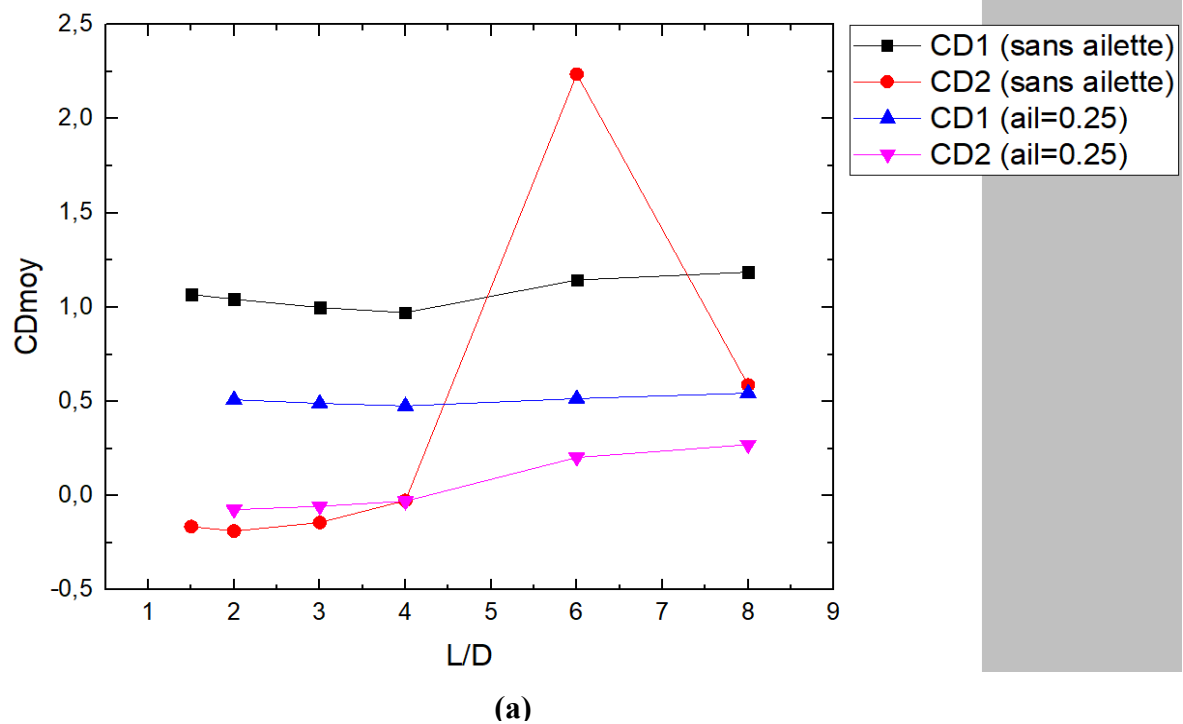
Le même comportement est observé sur CD1 : sans ailette, la traînée reste autour de 1.0, tandis qu'avec une ailette de 0.75, elle chute à environ 0.2, ce qui est la plus faible traînée moyenne obtenue jusqu'à présent. Cela montre que les ailettes plus longues peuvent réduire la traînée frontale de manière très efficace en réorganisant le flux de manière plus douce autour du cylindre avant.

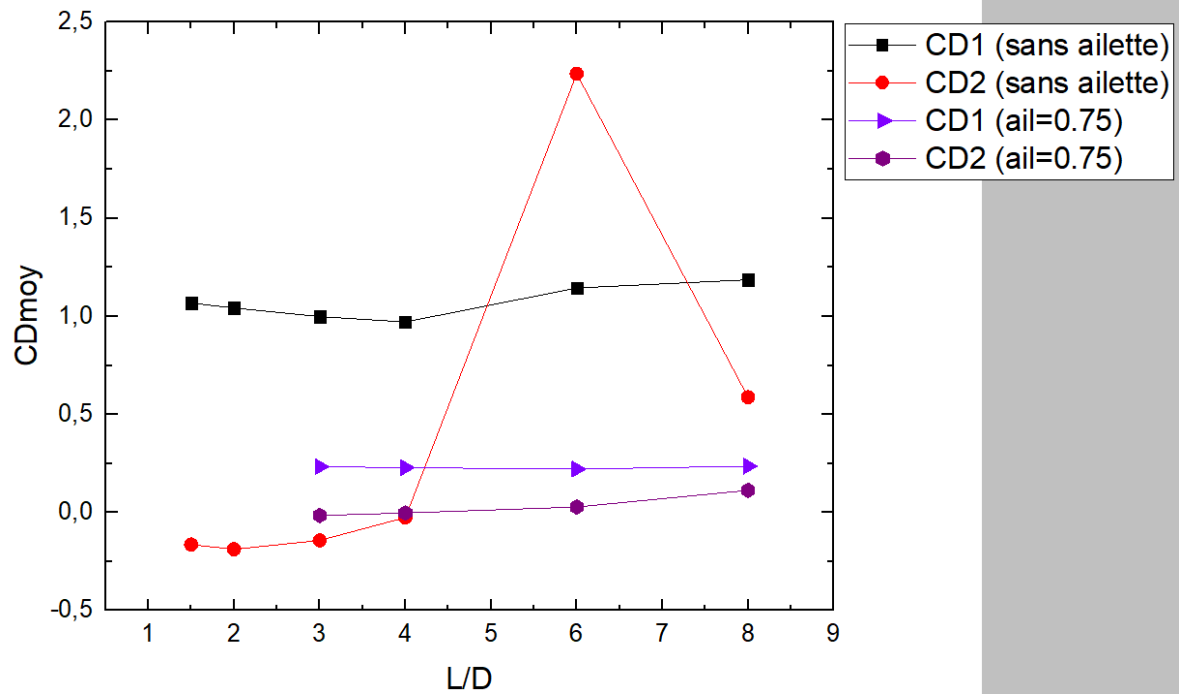
Pour CD2, l'effet est également significatif : en configuration sans ailette, la traînée s'effondre puis explose à $L/D = 6$, comme dans les autres cas. Avec l'aillette de 0.75, la traînée reste très faible (≈ 0.1) et constante. Ainsi, cette longueur d'aillette assure une stabilité parfaite, tout en minimisant la résistance. Elle est donc très performante pour les deux cylindres, avec un effet plus homogène que les longueurs précédentes.

d) Cas (aillette = 0.1) :

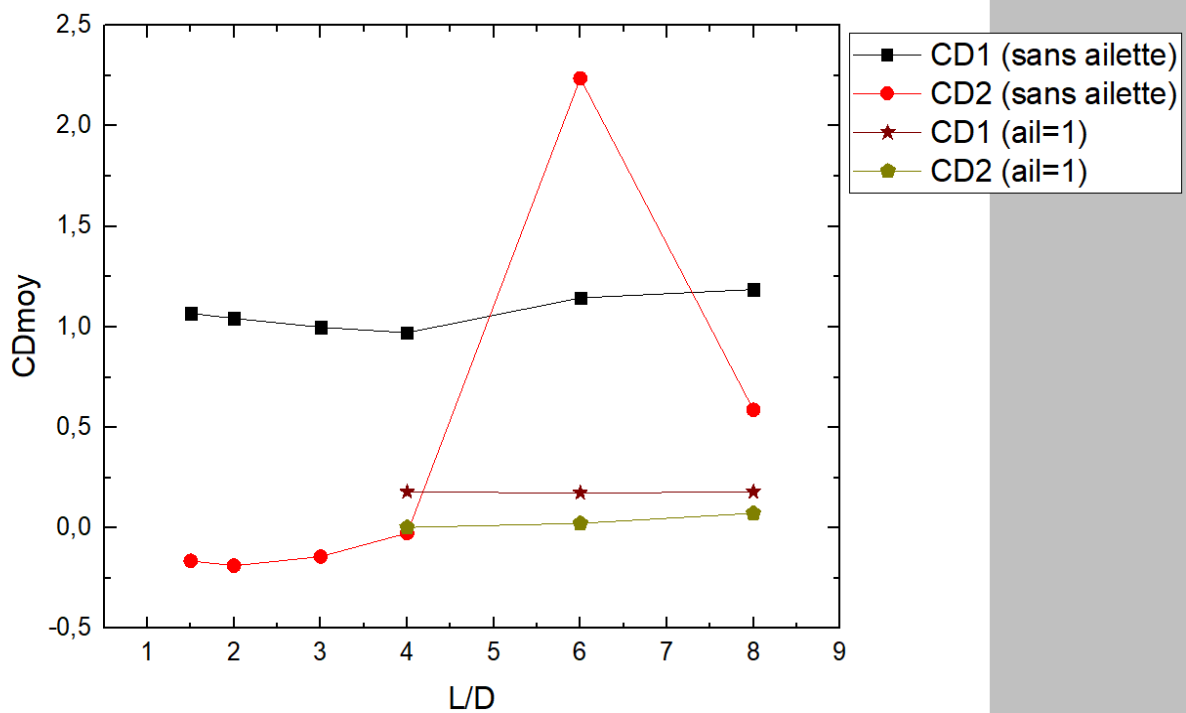
Enfin, le graphe 4 présente les résultats avec les ailettes les plus longues testées (1). La traînée du cylindre avant (CD1) passe d'un niveau élevé (1.0 à 1.1 sans ailette) à une valeur très faible (~ 0.15) avec ailette. Cela représente une réduction exceptionnelle de près de 85 %. Le flux est donc parfaitement dirigé, avec une séparation retardée et un sillage très réduit.

Du côté de CD2, on observe également une performance remarquable. Le pic de traînée à $L/D = 6$, typique de l'instabilité du sillage sans ailette, est totalement supprimé. Les valeurs de CD_{moy} pour le cylindre arrière restent inférieures à 0.1 sur toute la plage de L/D . Cette configuration est donc la plus stable et la plus hydro dynamiquement favorable, en particulier pour les grandes distances entre cylindres.





(c)



(d)

Figure 3-2 : la trainée moyenne (CD_{moy}) de deux cylindres avec et sans ailettes en fonction de L/D

3-4 Le comportement des forces hydrodynamique la force de portance (CL) et la force de trainée (CD) :

3-4-1 Le comportement de la force de portance CL :

3-4-1-1 La longueur des ailettes constante et la distance L/D variable :

Analyse comparative du comportement de la portance CL pour différentes distances L/D (sans ailette), à partir des courbes :

a) Les deux cylindres sans ailette avec différent distance L/D :

L/D = 1.5

- Très faibles oscillations au début.
- Le régime reste faiblement instable avec une amplitude modeste.

L/D = 2

- L'amplitude des oscillations augmente légèrement par rapport à L/D=1.5.
- CL reste centré autour de zéro.

L/D = 3

- Oscillations de plus grande amplitude, surtout pour CL2
- Déphasage entre CL1 et CL2 visible.
- Instabilité hydrodynamique plus marquée.

L/D = 4

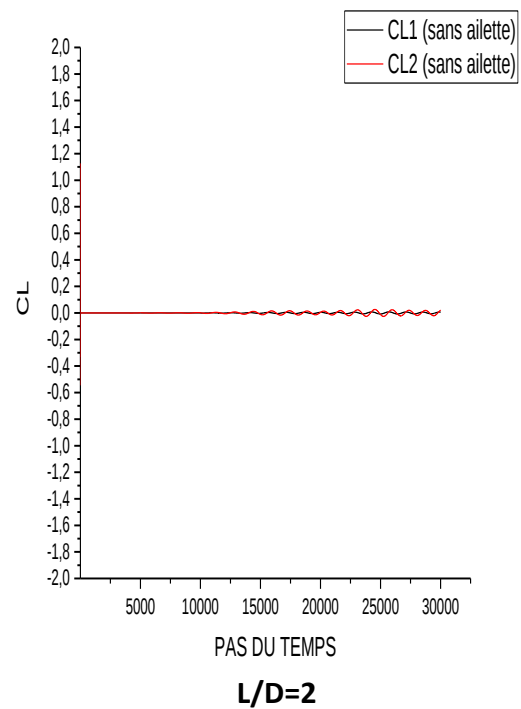
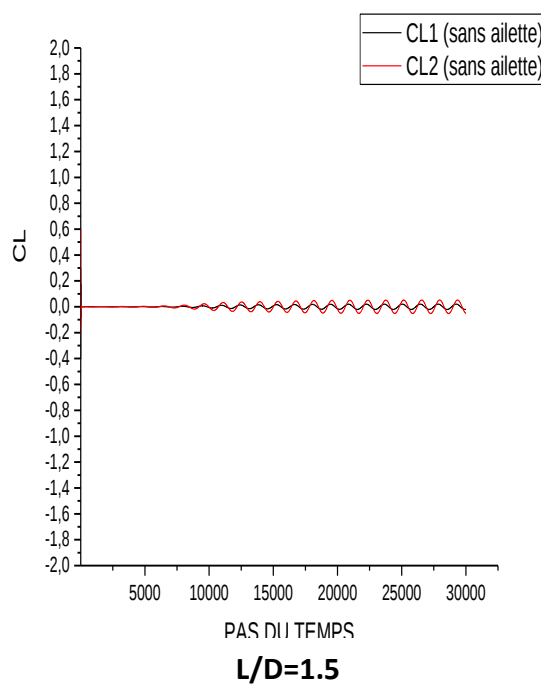
- Les deux cylindres (CL1 et CL2) oscillent de façon nettement indépendante.
- CL2 présente une fréquence plus élevée et une amplitude accentuée.

L/D = 6

- Oscillations bien développées, très périodiques.
- Amplitudes de CL1 et CL2 plus élevées.
- Instabilités couplées, typiques du sillage de Von Kármán.

L/D = 8

- Système clairement instable.
- CL2 montre des pics.
- Forte influence du sillage en aval du premier cylindre sur le second.



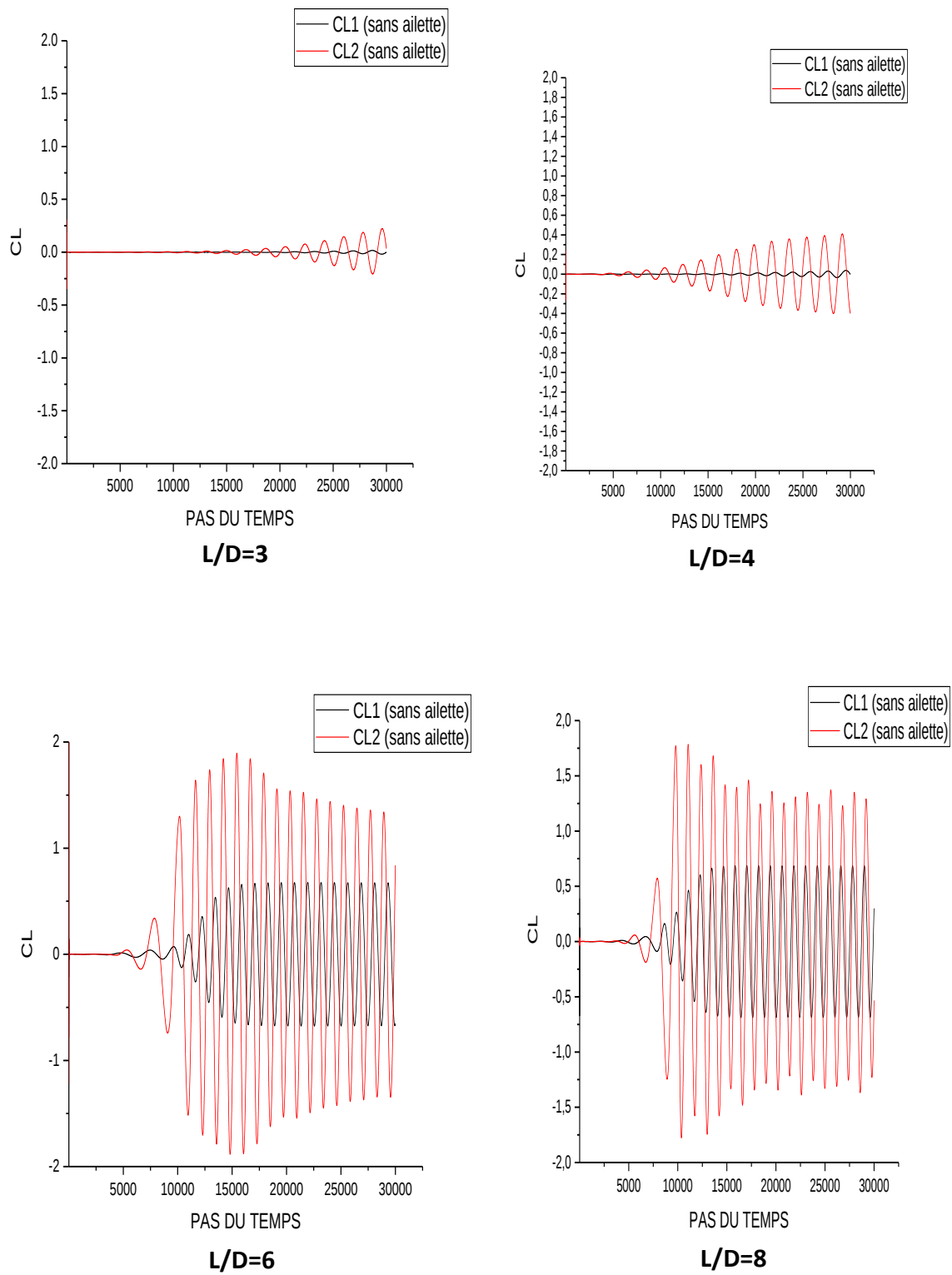


Figure 3-3 : le comportement de la portance CL en fonction de pas du temps (sans ailette)

b) Les deux cylindres avec ailette (ail=0.75) et différent distance L/D :**L/D = 3**

- Comportement parfaitement stable.
- CL1 et CL2 restent quasiment nuls pendant toute la simulation.

L/D = 4

- Stabilité maintenue comme pour L/D = 3.
- CL1 et CL2 restent autour de zéro sans signe d'instabilité.
- L'ailette empêche la séparation de l'écoulement et stabilise l'écoulement entre les cylindres.

L/D = 6

- Apparition d'oscillations modérées, principalement sur CL2 (courbe rouge).
- Le comportement reste contrôlé, avec une amplitude réduite par rapport au cas sans ailette.
- L'ailette atténue les effets du sillage mais ne les supprime pas totalement.

L/D = 8

- Oscillations régulières et bien établies sur CL1 et CL2.
- Amplitude plus faible que sans ailette, mais la dynamique tourbillonnaire est présente.

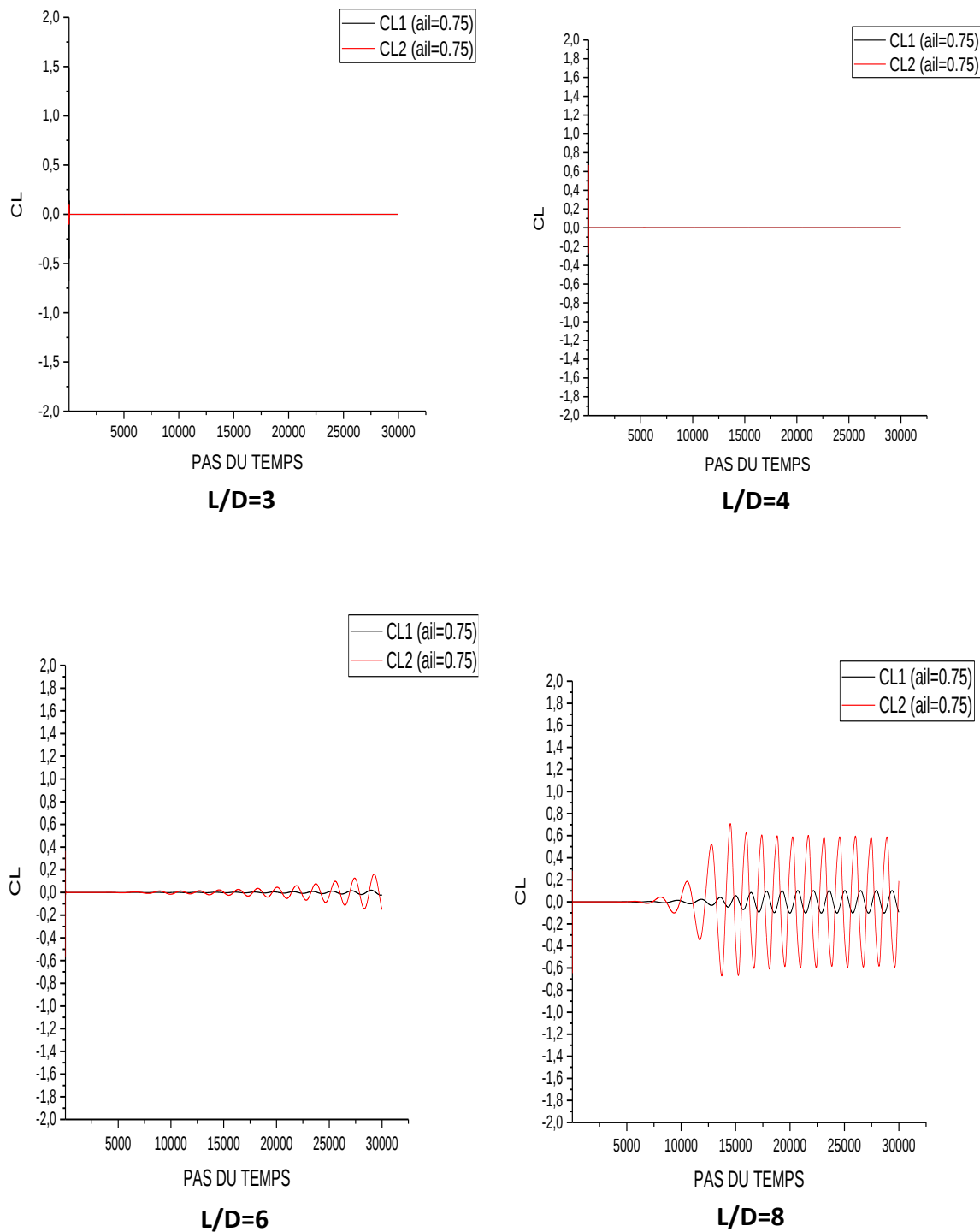


Figure 3-4 : le comportement de la portance CL en fonction de pas du temps (ail=0.75)

3-4-1-1 La longueur des ailettes variable et la distance L/D constant :

a) Les deux cylindre avec longueur des ailettes différent et L/D=2 :

-Sans ailette :

- On observe des oscillations régulières des coefficients de portance CL1 et CL2 à partir de $t \approx 10\,000$ pas de temps.
- L'amplitude reste modérée, indiquant un détachement périodique de tourbillons dans le sillage.
- Les deux courbes sont synchronisées et bien établies $\rightarrow$ régime instable mais contrôlé.

-Avec ailette (ail = 0.25) :

- Les courbes de CL1 et CL2 sont quasi nulles durant toute la simulation.
- L'oscillation est pratiquement inexistante $\rightarrow$ l'ailette a un effet de stabilisation très net.

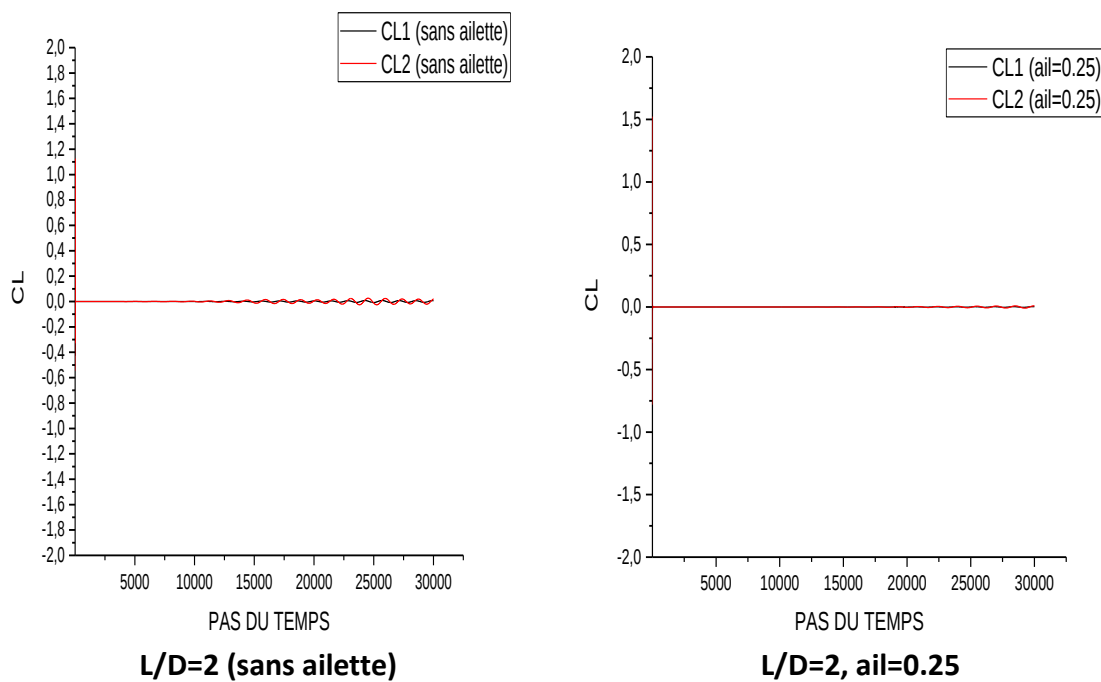


Figure 3-5 : le comportement de la portance CL en fonction de pas du temps ($L/D=2$)

b) Les deux cylindre avec longueur des ailettes différent et $L/D=4$:

Sans ailette :

- Oscillations visibles de CL (± 0.5), preuve d'instabilité.

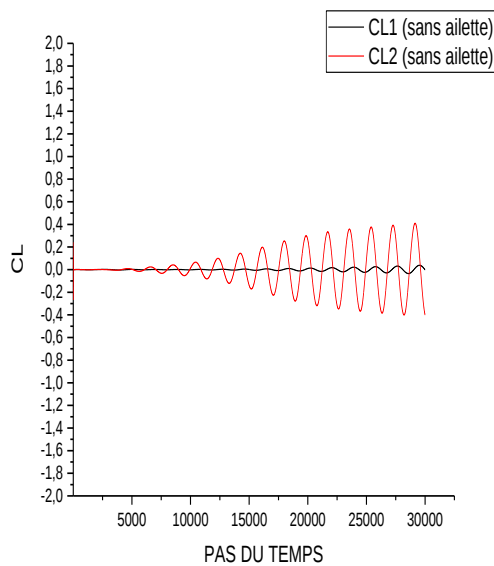
- Vortex shedding bien développé.
- Interaction aérodynamique forte entre les cylindres.

Avec ailette (ail = 0.5) :

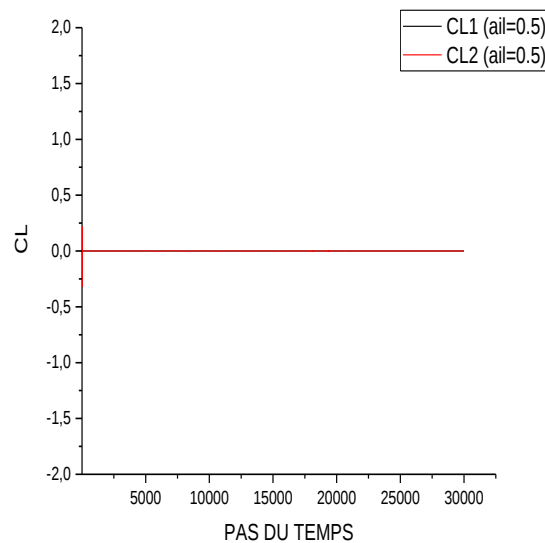
- CL reste nul et stable.
- Aucune oscillation.
- L'ailette supprime les instabilités.

Avec ailette (ail = 1) :

- CL parfaitement stable autour de 0.
- Aucune trace de vortex.
- Effet stabilisateur total.



L/D=4 (sans ailette)



L/D=4, ail=0.5

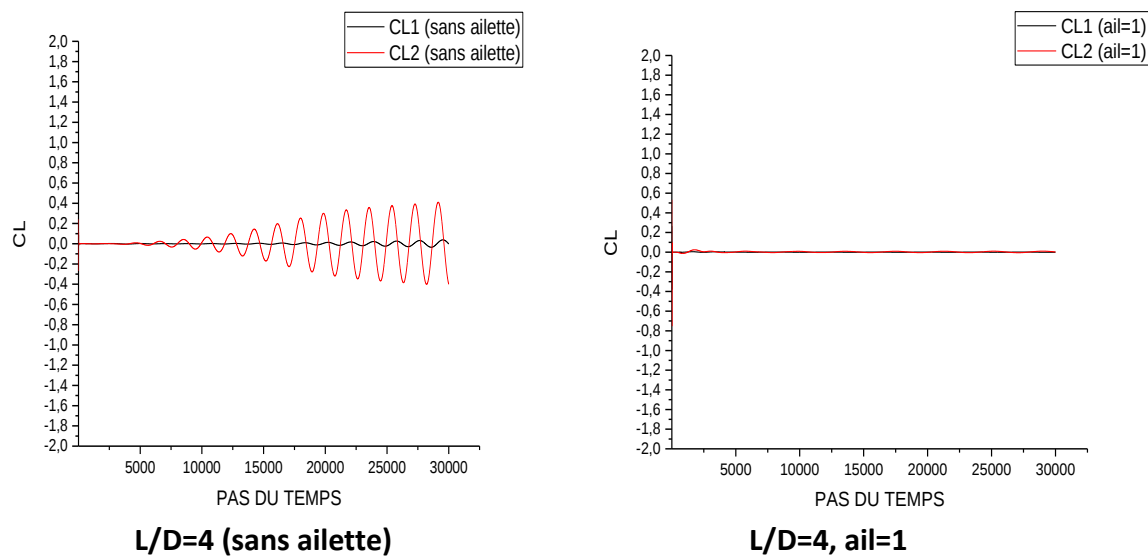


Figure 3-6 : le comportement de la portance CL en fonction de pas du temps ($L/D=4$)

c) Les deux cylindre avec longueur des ailettes différent et $L/D=6$

Sans ailette :

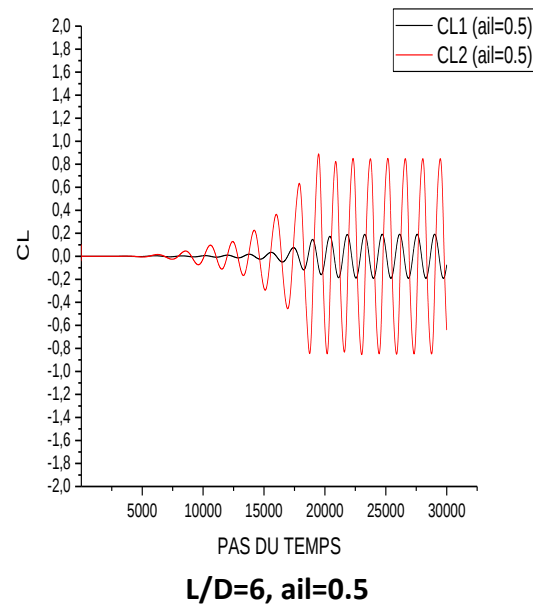
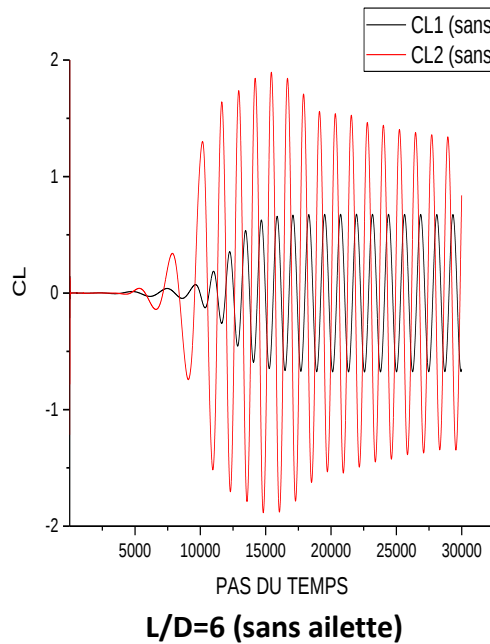
- Forte instabilité : on observe des oscillations croissantes de grande amplitude pour les deux cylindres.
- Le vortex shedding (détachement tourbillonnaire) est bien développé.
- La portance fluctue entre -2 et +2, indiquant un écoulement instable et fortement perturbé.
- Cette dynamique montre une interaction forte entre les deux cylindres, avec un couplage hydrodynamique clair.

Avec ailette (ail = 0.5) :

- Les oscillations sont présentes mais plus atténuées comparé au cas sans ailette.
- La présence de l'ailette limite les effets d'interaction entre les cylindres en modifiant le sillage.
- On note toujours une alternance périodique, mais moins agressive.

Avec ailette (ail = 1) :

- Le comportement change radicalement : quasi absence d'oscillation.
- Cela montre que l'ailette de taille importante supprime complètement le vortex shedding instable.
- Le flux devient quasi symétrique et laminaire, avec une grande **stabilité** aérodynamique.



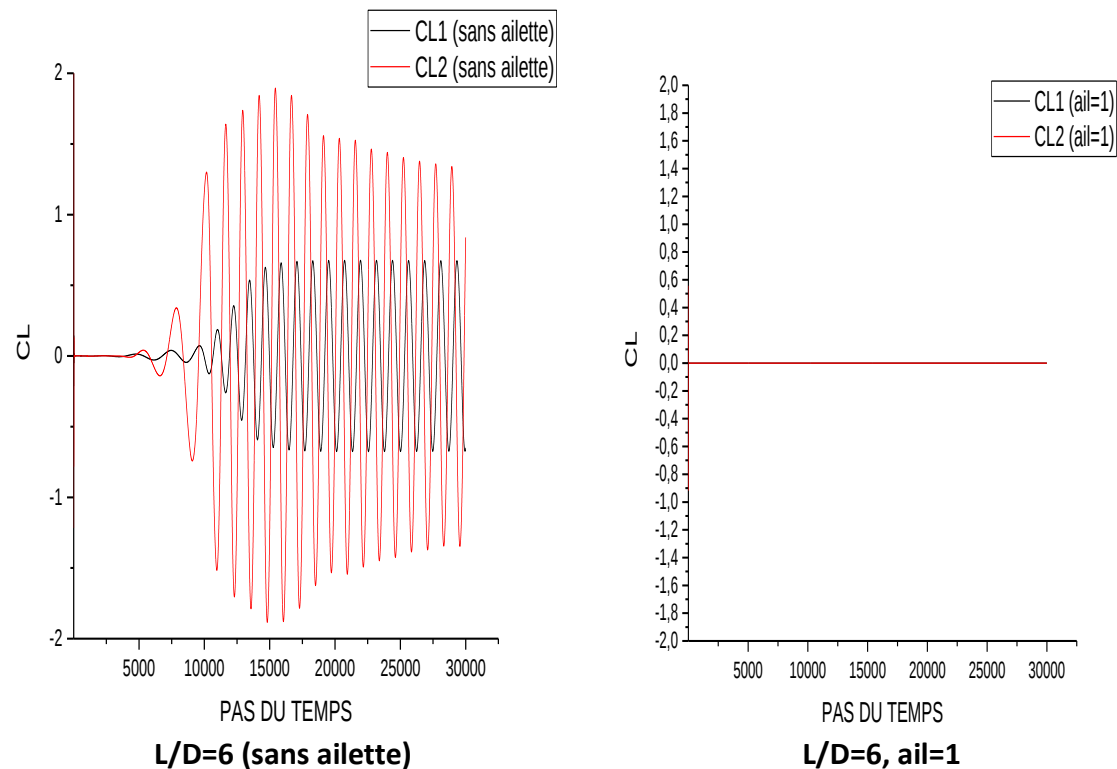


Figure 3-7 : le comportement de la portance CL en fonction de pas du temps ($L/D=6$)

3-4-2 Le comportement de la force de portance CD :

3-4-2-1 La longueur des ailettes constante et la distance L/D variable :

Analyse comparative du comportement de la trainée CD pour différentes distances L/D (sans ailette), à partir des courbes :

a) Les deux cylindres sans ailette avec différent distance L/D :

$L/D = 1.5$

- CD1 atteint rapidement une valeur stable proche de 1.05.
- CD2 est légèrement négative (~ -0.2) et reste quasi constante sans oscillations.

$L/D = 2$

- CD1 se stabilise vers 1.0.
- CD2 reste proche de -0.25, très stable, sans signe de turbulence.

L/D = 3

- CD1 reste stable.
- CD2 montre une légère remontée en fin de simulation, signe d'un début d'instabilité.

L/D = 4

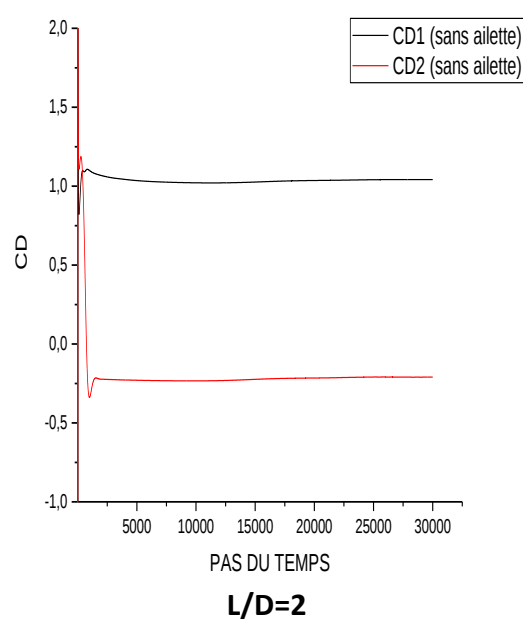
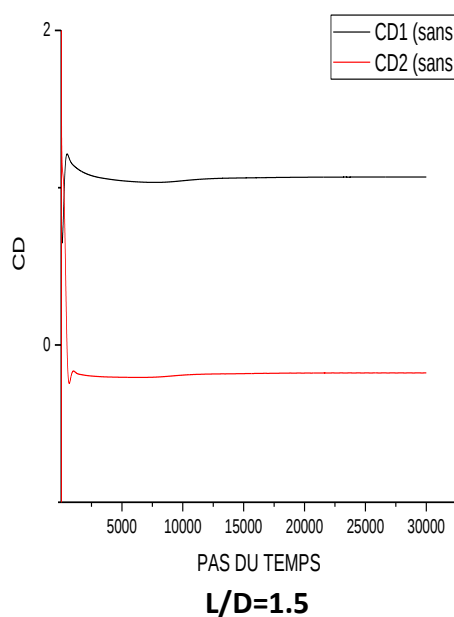
- CD1 reste constant autour de 0.95–1.0.
- CD2 commence à onduler, avec de petites oscillations croissantes.

L/D = 6

- CD1 montre une remontée lente jusqu'à ~ 1.15 , suivie d'oscillations faibles.
- CD2 devient clairement instable avec des oscillations bien visibles (~ 0.4 amplitude).

L/D = 8

- CD1 converge vers une valeur stable (~ 1.2).
- CD2 entre dans un régime périodique clair : oscillations fortes et régulières (~ 0.6 amplitude).



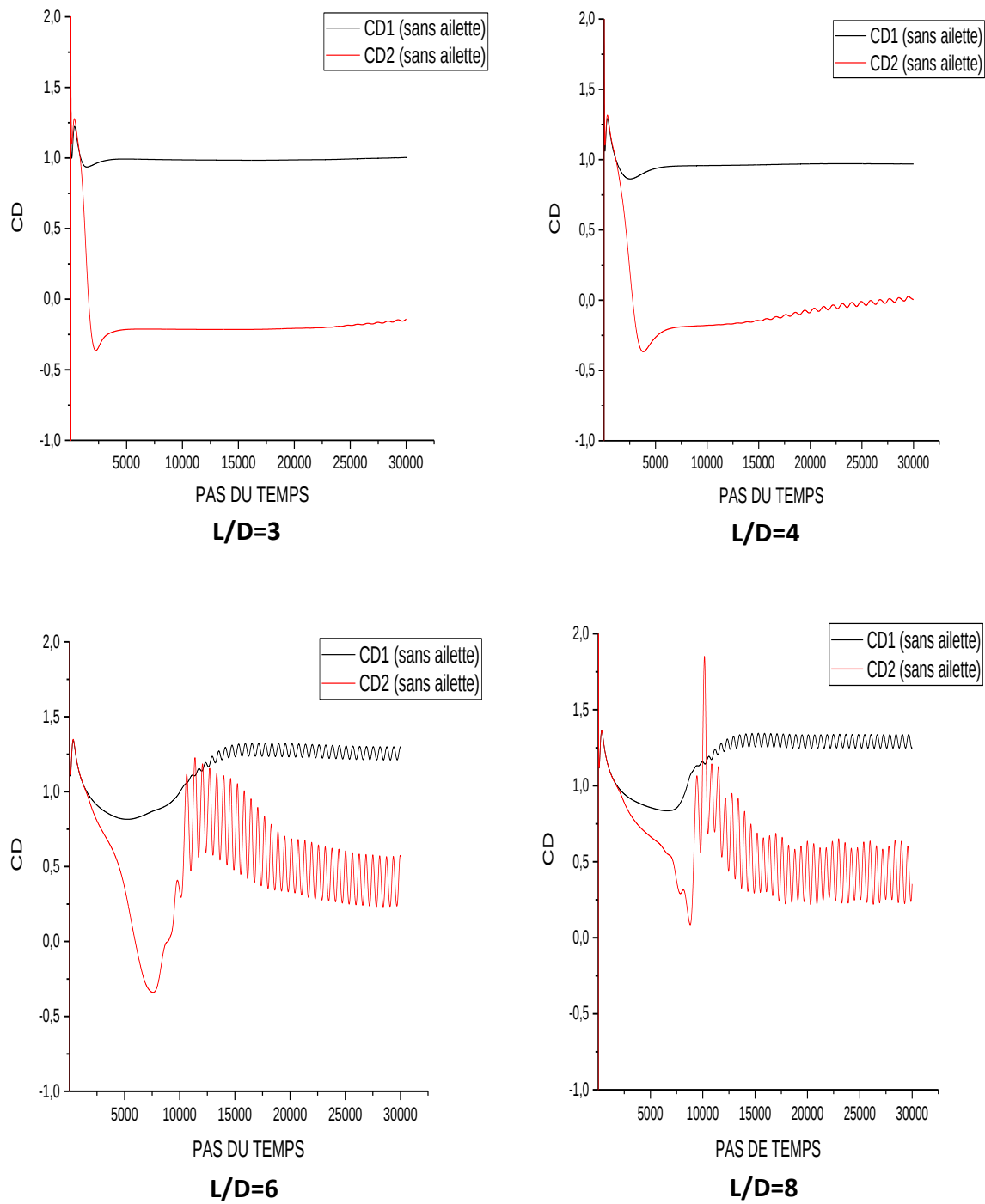


Figure 3-8 : le comportement de la trainée CD en fonction de pas du temps (sans ailette)

3-4-2-2 La longueur des ailettes variable et la distance L/D constant :

a) Les deux cylindre avec longueur des ailettes différent et $L/D=2$:

Sans ailette :

- **CD1** atteint une valeur stable proche de 1.0.
- **CD2** est légèrement négatif (~ -0.25) et reste stable.
- Le deuxième cylindre est dans l'ombre du premier, avec faible traînée mais pas d'instabilité.

Avec ailette 0.25 :

- **CD1** est nettement réduit à ~ 0.5 , soit presque 50 % de réduction.
- **CD2** passe de ~ -0.25 à ~ 0 , ce qui montre une récupération du flux d'écoulement.
- L'ailette réduit considérablement les perturbations : moins de vortex, écoulement plus symétrique.

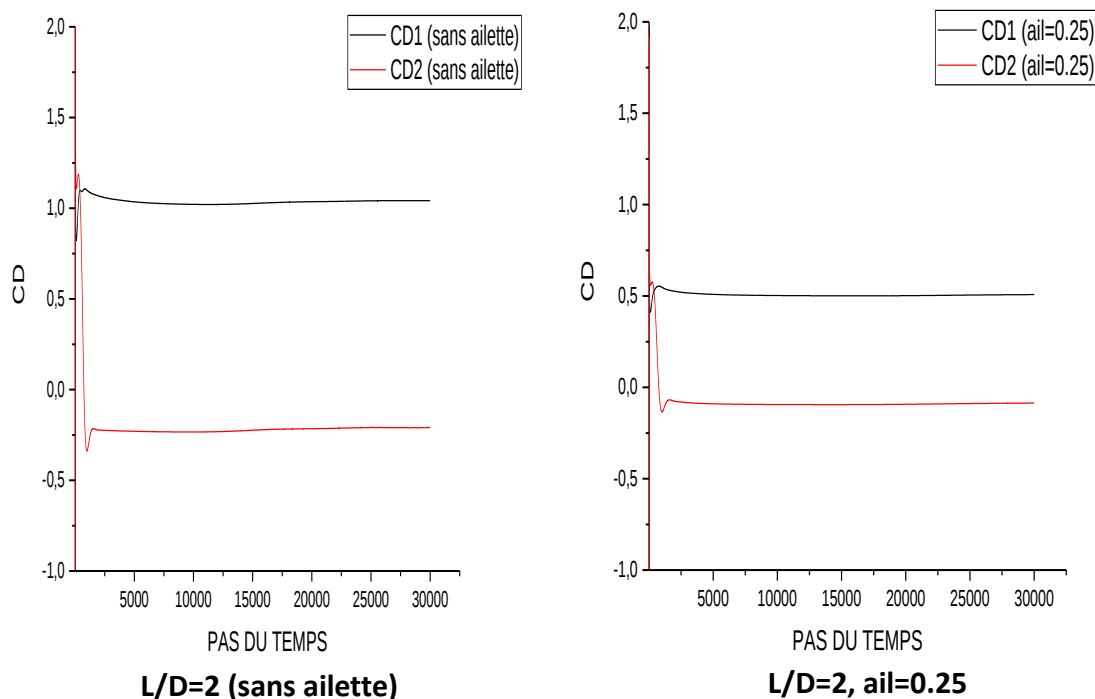


Figure 3-9 : le comportement de la traînée CD en fonction de pas du temps ($L/D=2$)

b) Les deux cylindre avec longueur des ailettes différent et $L/D=4$:

Sans ailette :

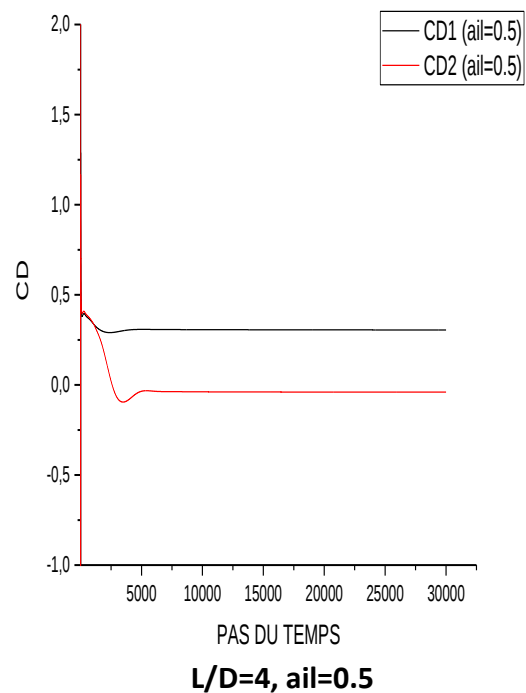
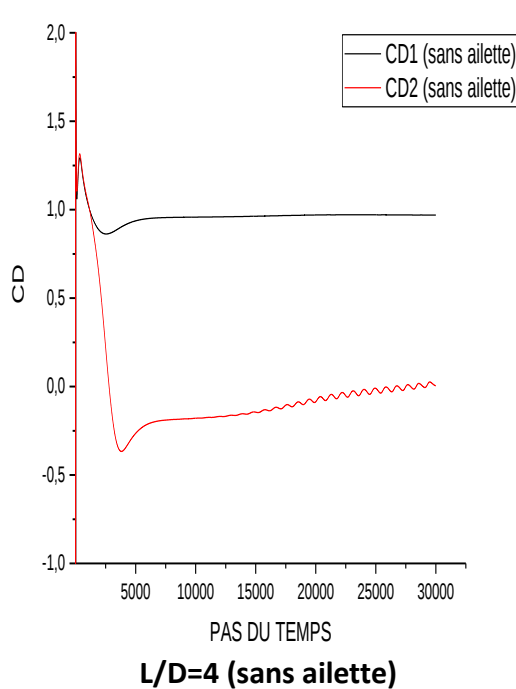
- CD1 reste globalement stable après les perturbations initiales, autour de 1.0.
- CD2 commence à osciller avec une amplitude croissante, ce qui reflète des phénomènes d'instabilités d'écoulement.

Avec ailette 0.5 :

- CD1 est significativement réduit (≈ 0.3).
- CD2 aussi est fortement atténué, proche de 0 sans oscillations visibles.

Avec ailette 1 :

- CD1 reste faible et stable ($\approx 0.2-0.3$).
- CD2 s'annule presque totalement, aucune oscillation, valeur proche de zéro.



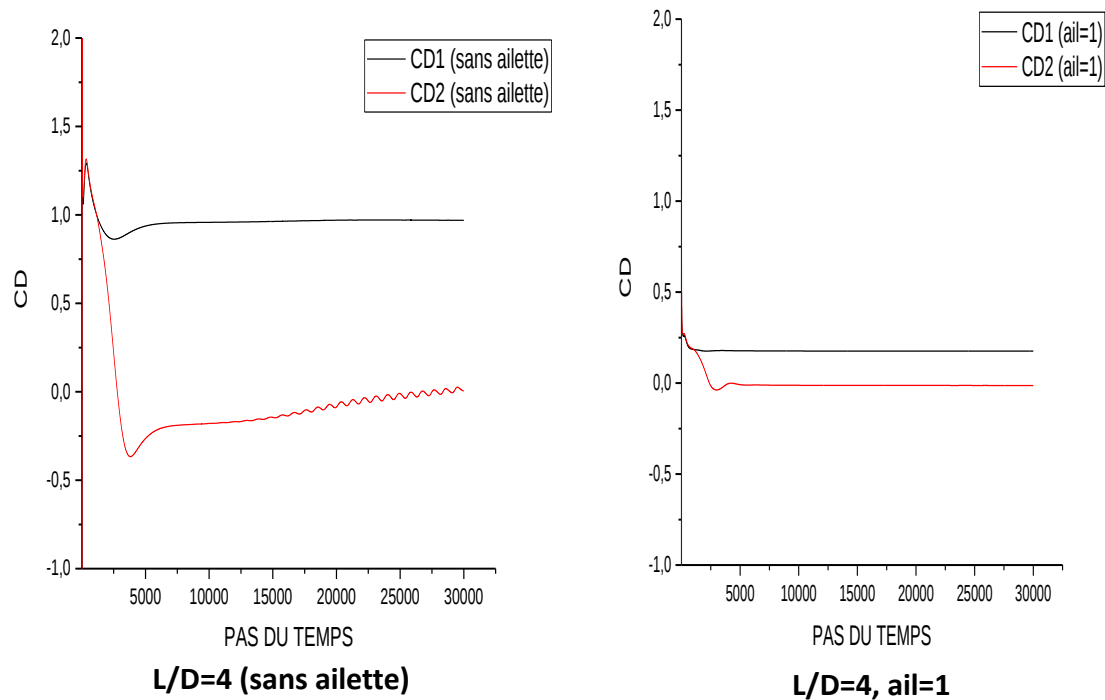


Figure 3-10 : le comportement de la traînée CD en fonction de pas du temps ($L/D=4$)

c) Les deux cylindre avec longueur des ailettes différent et $L/D=6$:

Sans ailette :

CD1 (cylindre amont) :

- Après une courte phase transitoire, la traînée se stabilise autour de 1.2 avec de fortes oscillations périodiques après $t \approx 12000$.
- Indique un régime instable avec décrochages successifs du sillage.

CD2 (cylindre aval) :

- Très instable initialement : chute jusqu'à environ -0.5 à $t \approx 6000$.
- Remonte et entre dans une phase d'oscillations rapides autour de 0.6, indiquant des interactions de sillage importantes.

Avec ailette (ail = 0.5) :

CD1 :

- Phase transitoire courte.
- Stabilisation autour de 0.35, sans oscillations visibles.
- Comparé à sans ailette (≈ 1.2), la traînée est fortement réduite.

CD2 :

- Se stabilise autour de 0.0, avec quelques faibles oscillations périodiques vers la fin.
- Bien plus stable que sans ailette (où CD2 passait de -0.5 à +0.6 de manière chaotique).

Avec ailette (ail=1) :

CD1 :

- Très faibles perturbations initiales.
- Se stabilise rapidement autour de 0.2 sans oscillations notables.
- Cela suggère que l'ailette diminue fortement la résistance à l'écoulement.

CD2 :

- Comportement similaire : réponse amortie avec une stabilisation rapide autour de 0.0, sans oscillation.
- L'écoulement est beaucoup plus régulier, avec un effet de stabilisation clair grâce à l'ailette.

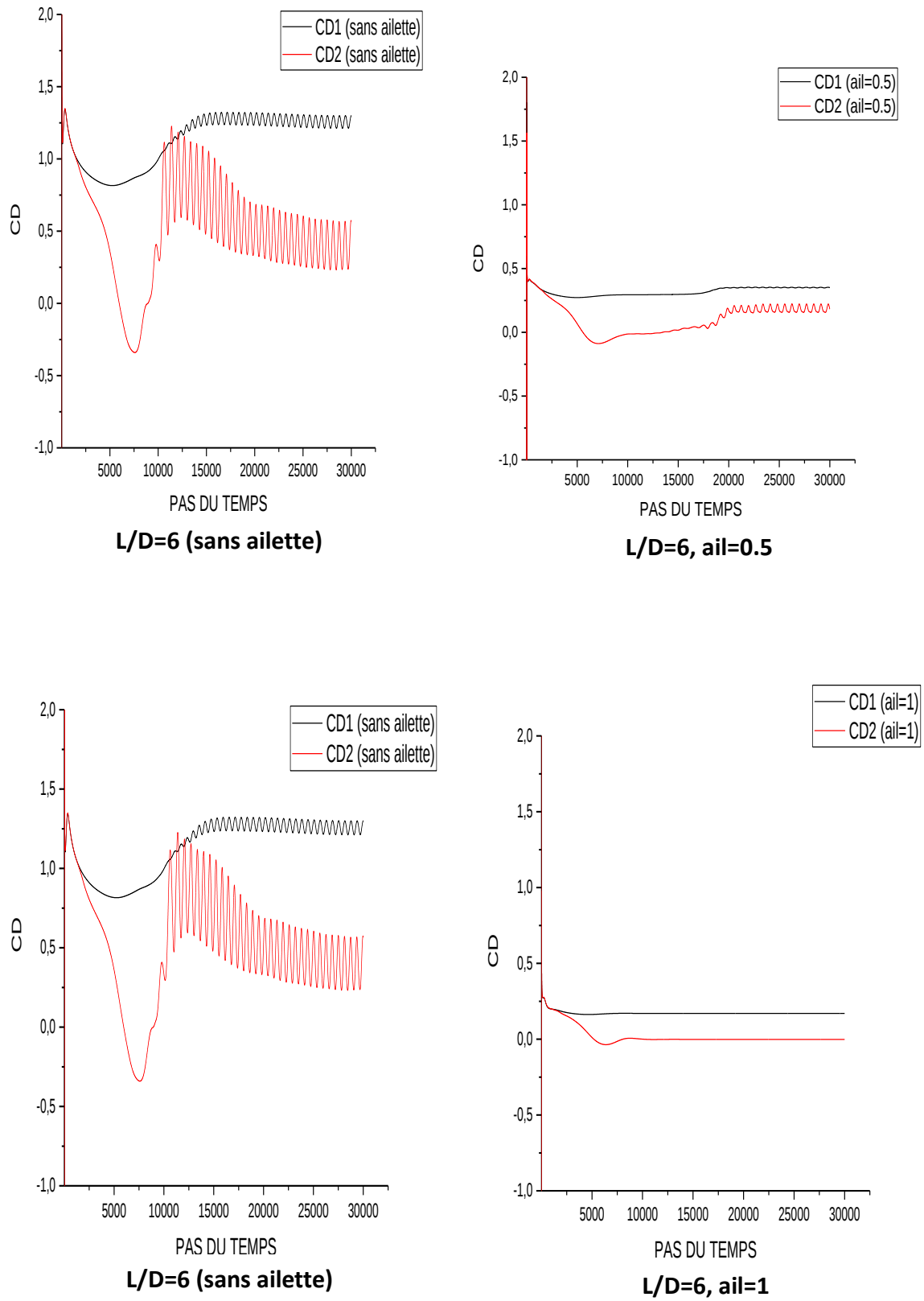


Figure 3-11 : le comportement de la trainée CD en fonction de pas du temps (L/D=6)

d) Les deux cylindre avec longueur des ailettes différent et $L/D=8$:

Sans ailette :

CD1:

- La traînée du cylindre 1 reste stable vers 1.2 après des oscillations transitoires.

CD2:

- Après une forte chute initiale, la traînée devient instable, avec de grandes oscillations atténuées mais continues.

Avec ailette (ailette = 0.5) :

CD1:

- La traînée commence autour de 0.4, descend légèrement, puis se stabilise autour de **~ 0.25** .
- Pas d'oscillations visibles après le régime transitoire.
- Interprétation : **Écoulement stable**, la présence de l'ailette diminue efficacement les perturbations à l'amont.

CD2:

- Chute rapide en début de simulation, puis une légère remontée vers **~ 0.05 à 0.1** .
- Quelques petites oscillations mais globalement très atténuées.

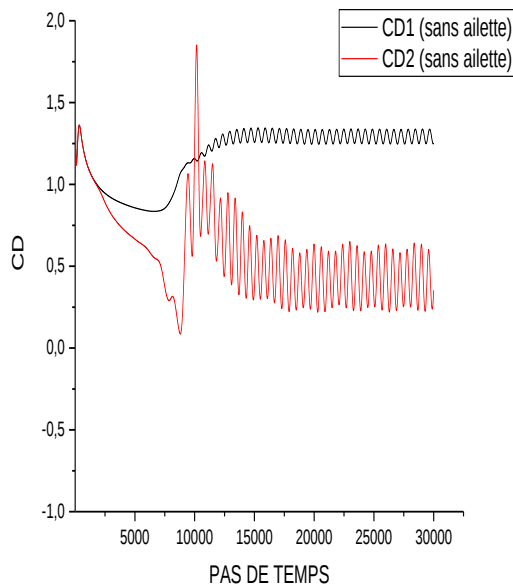
Avec ailette (ailette = 1) :

CD1:

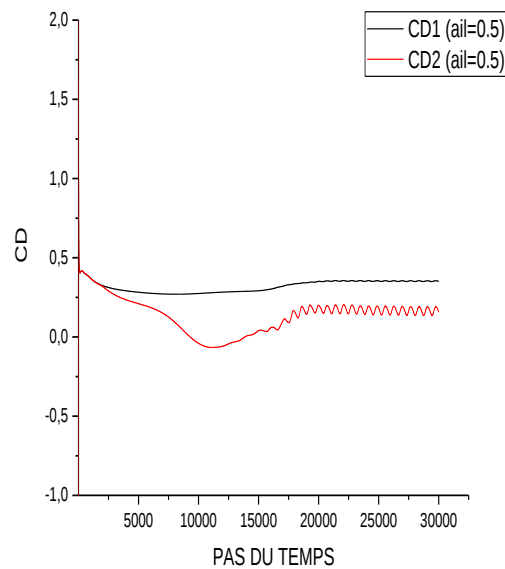
- La traînée est réduite (~ 0.2) et reste très stable après une courte phase transitoire.

CD2:

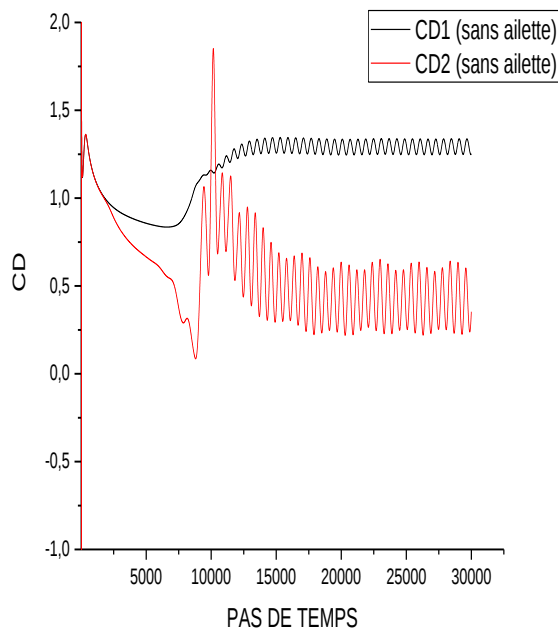
- Elle chute initialement puis reste quasi constante autour de 0.05 avec de très faibles oscillations.



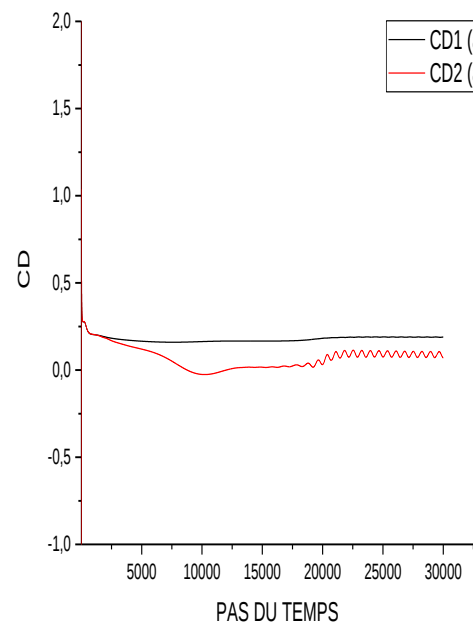
L/D=8 (sans ailette)



L/D=8, ail=0.5



L/D=8 (sans ailette)



L/D=8, ail=1

Figure 3-12 : le comportement de la trainée CD en fonction de pas du temps ($L/D=8$)

3-5 Les champs de vitesse (vélocités) :

a) $L/D=2$ et sans ailette :

t = 0.05 s :

L'écoulement est encore en phase de démarrage. Il reste symétrique et laminaire, sans présence de vortex. La vitesse est faible juste derrière les deux cylindres, formant deux zones compactes de recirculation. Aucun allongement significatif du sillage n'est encore observé. C'est un état initial stable.

t = 50 s :

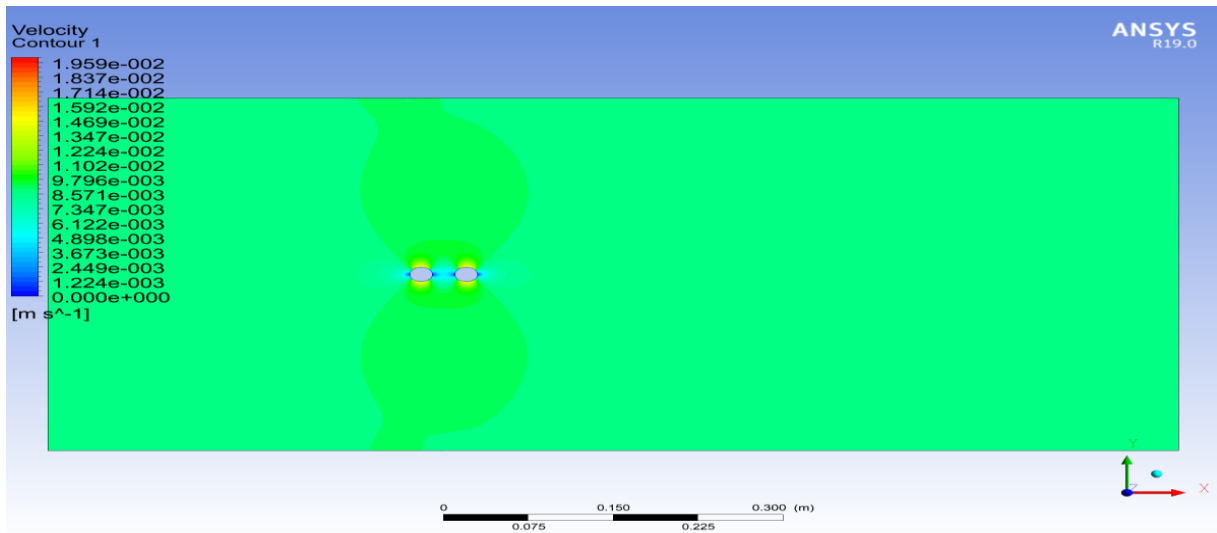
Le sillage commence à s'allonger, formant une zone de vitesse plus faible derrière les deux cylindres. L'écoulement est toujours globalement symétrique, mais les premières perturbations se dessinent. Les deux zones de recirculation fusionnent légèrement, amorçant une interaction entre les deux cylindres sans instabilité marquée.

t = 100 s :

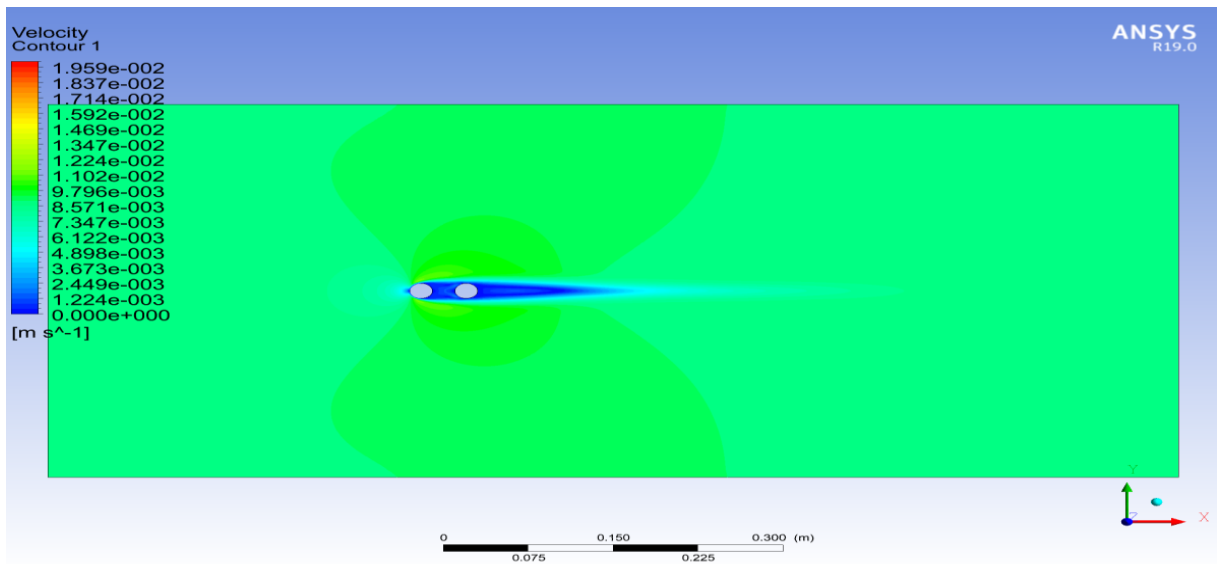
Des perturbations apparaissent dans le sillage. L'écoulement perd sa symétrie et on commence à percevoir un détachement tourbillonnaire. Le flux devient instable en aval, ce qui indique le passage d'un régime quasi-laminaire à un régime transitoire.

t = 300 s :

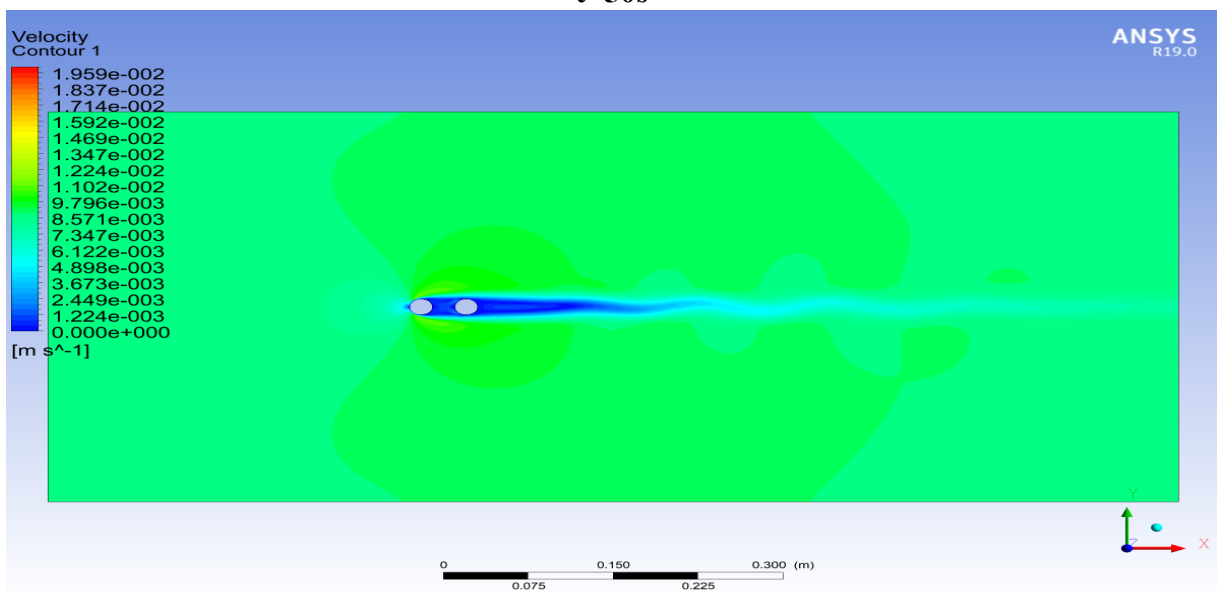
Le régime est devenu périodique et instable. Une rue de von Kármán est bien formée avec des vortex alternés qui se détachent de chaque côté. Le sillage est long, large et très perturbé. L'absence d'ailette n'amortit pas ces effets, ce qui provoque des variations fortes de trainée et de portance sur les cylindres.



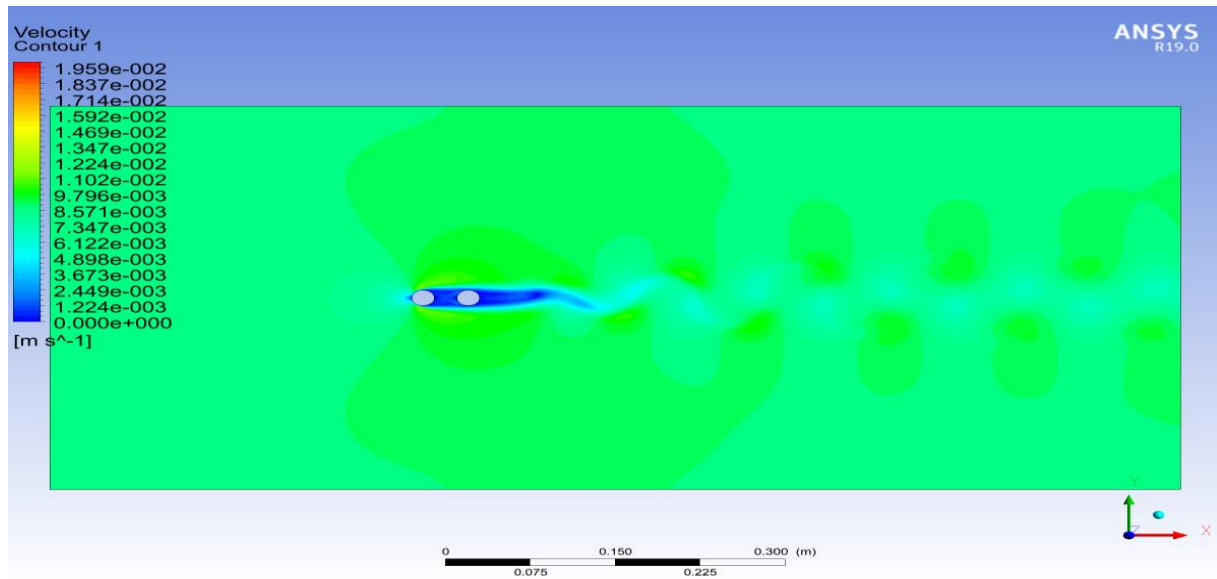
$t=0.05s$



$t=50s$



$t=100s$



t=300s

Figure 3-13 : Contours des vitesses dans différent temps ($L/D=2$ et sans ailettes)

b) $L/D=6$ et ail=0.25 :

t = 0.05 s :

L'écoulement est encore jeune et stable. On observe deux zones symétriques de basse vitesse derrière chaque cylindre, formant des bulles de recirculation. Les ailettes commencent à guider légèrement le flux, mais aucun sillage allongé ou perturbation n'est encore visible.

t = 50 s :

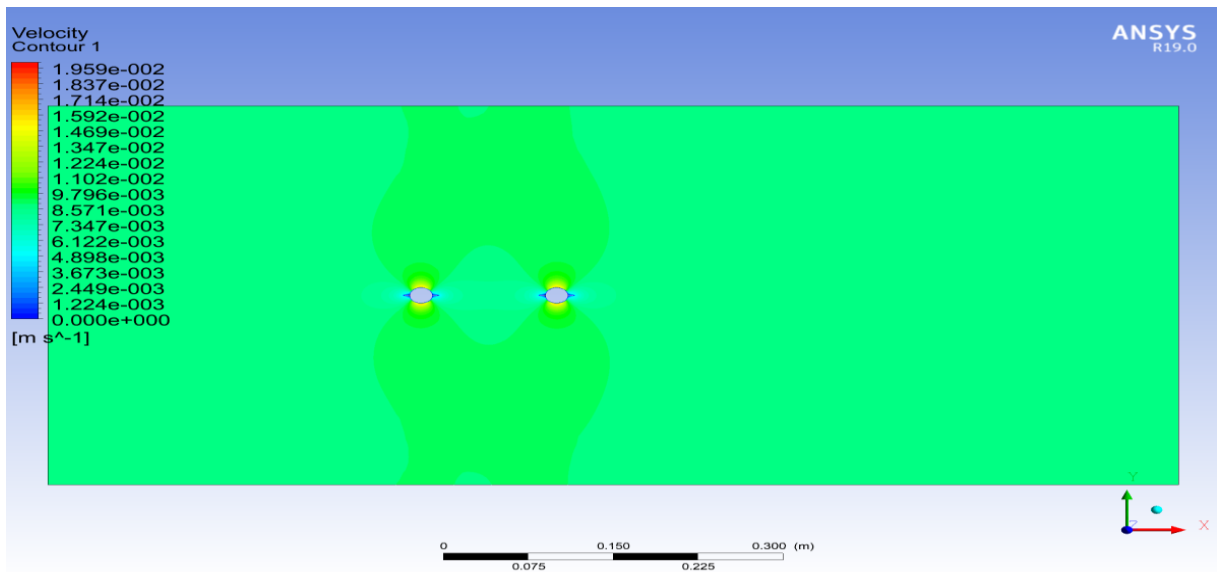
Le sillage s'est nettement allongé. Grâce aux ailettes, le flux entre les deux cylindres est plus organisé, avec une accélération centrale visible. Le sillage reste concentré et sans vortex détachés. Les ailettes jouent un rôle de stabilisation efficace à ce stade.

t = 100 s :

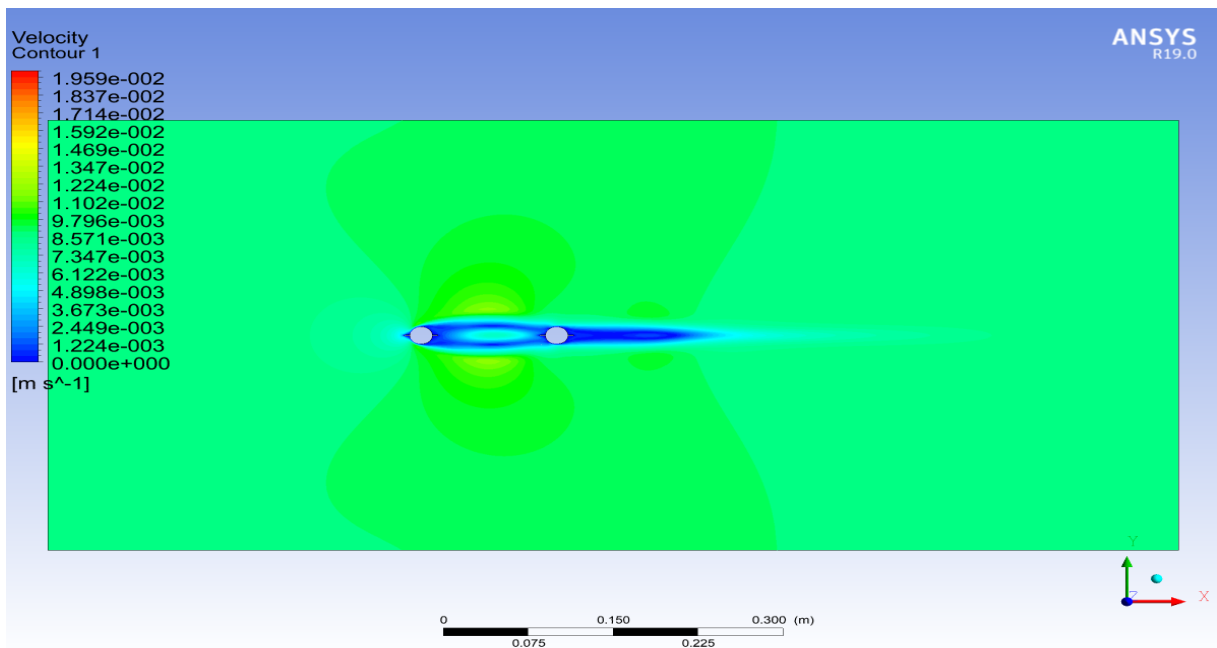
L'écoulement commence à devenir instable. On voit des ondulations apparaître en aval, signes d'un début de détachement tourbillonnaire. Les ailettes atténuent encore la propagation des instabilités, mais la symétrie initiale du sillage commence à se déformer.

$t = 300 \text{ s}$:

L'instabilité est bien développée. Une rue de von Kármán asymétrique s'est formée avec des vortex alternés derrière chaque cylindre. Les ailettes ont limité l'intensité et la largeur des vortex, mais elles n'empêchent pas totalement la transition vers un régime instationnaire. Le sillage reste cependant plus étroit que sans ailettes.



$t = 0.05 \text{ s}$



$t = 50 \text{ s}$

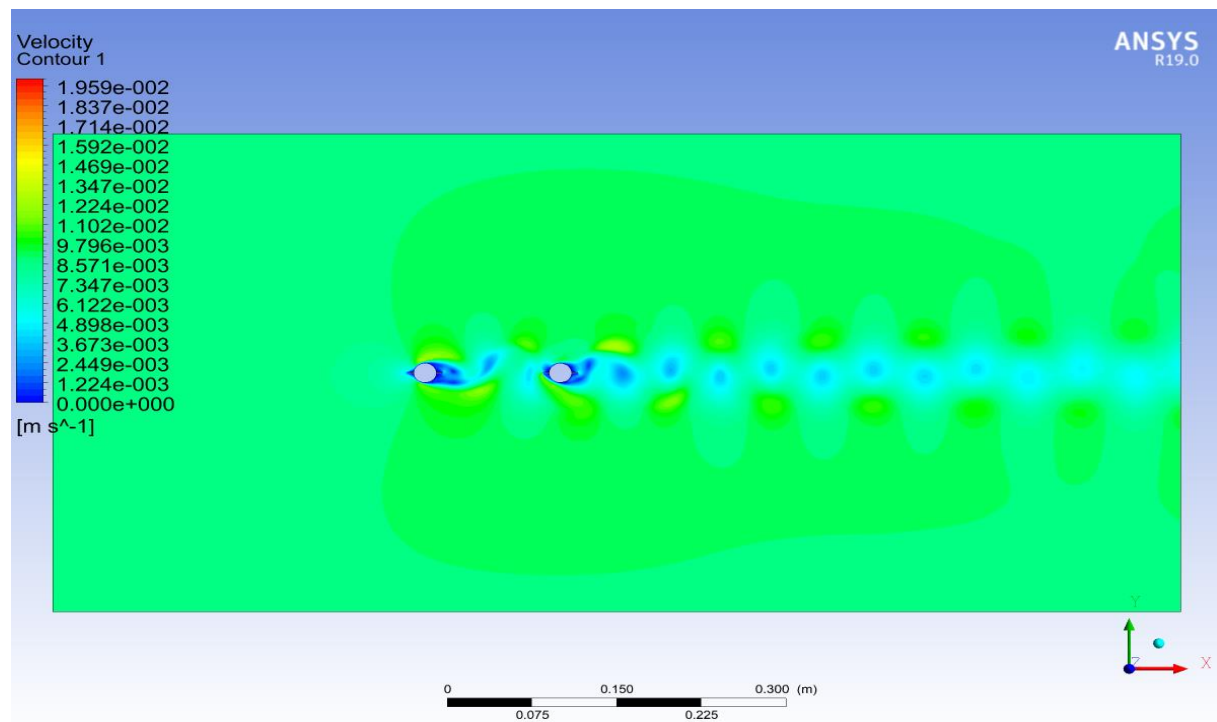
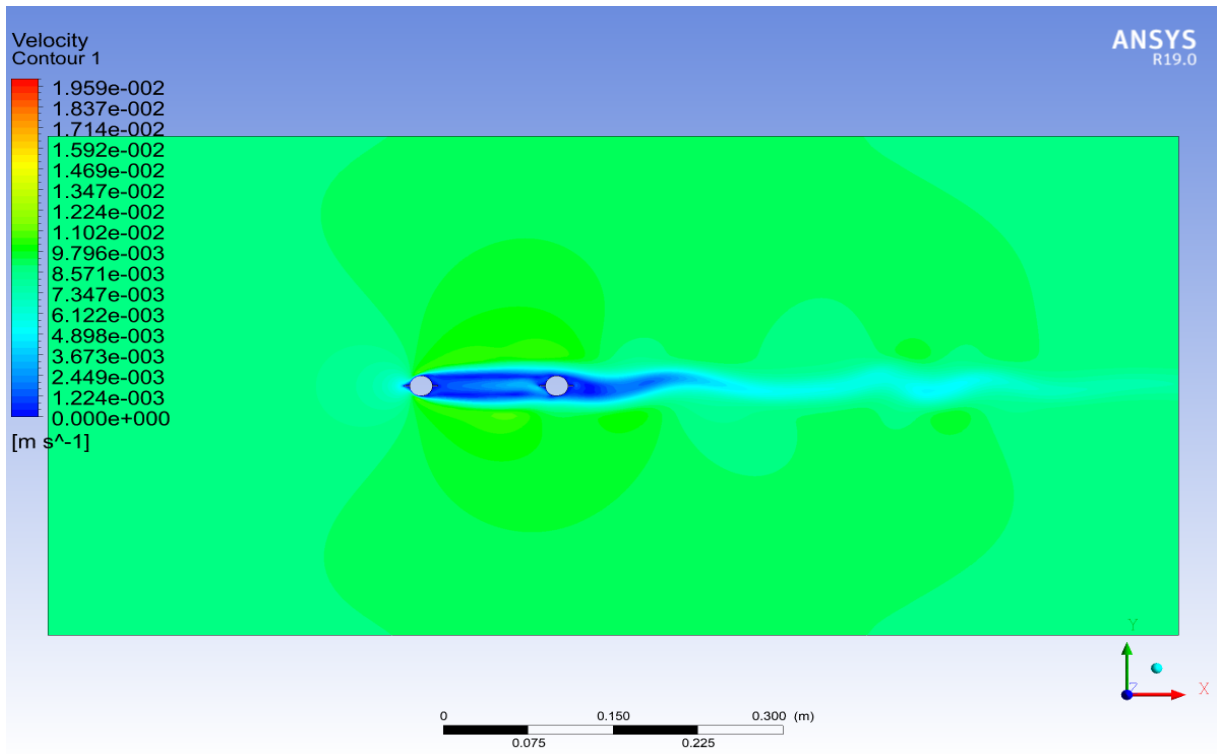


Figure 3-14 : Contours des vitesses dans différent temps ($L/D=6$ et $ail=0.25$)

c) Cas $L/D=6$ et $ail=1$:**t = 0.05 s :**

À ce stade initial, on observe la formation des zones de faible vitesse autour des cylindres. L'écoulement commence à peine à contourner les deux obstacles, et les lignes de courant sont encore symétriques. L'influence des ailettes est visible sous forme de zones de ralentissement localisées en aval immédiat des obstacles. Aucune instabilité ou sillage n'est encore développé.

t = 50 s :

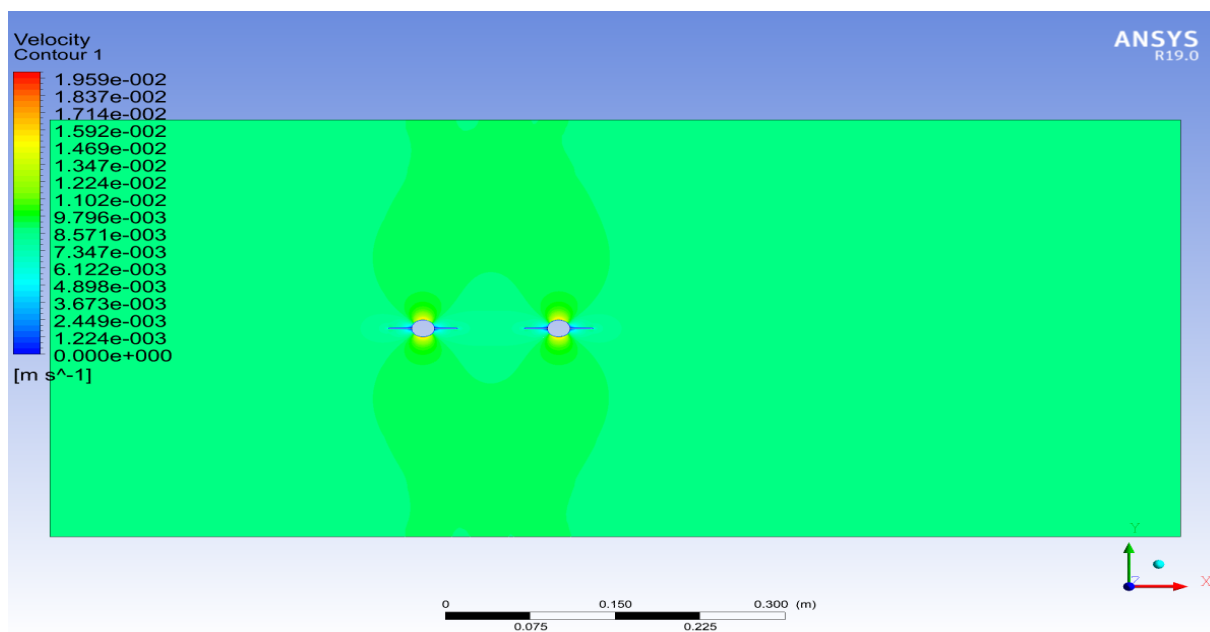
L'écoulement montre déjà une structure plus organisée. Une zone de basse vitesse (en bleu foncé) s'étend entre les deux cylindres, ce qui indique une perte d'énergie par effet de frottement ou de déviation. Les ailettes allongées semblent canaliser le flux entre les deux cylindres, créant une forme de jet confiné dirigé vers l'aval. Le sillage commence à se développer, mais il est encore stable et symétrique.

t = 100 s :

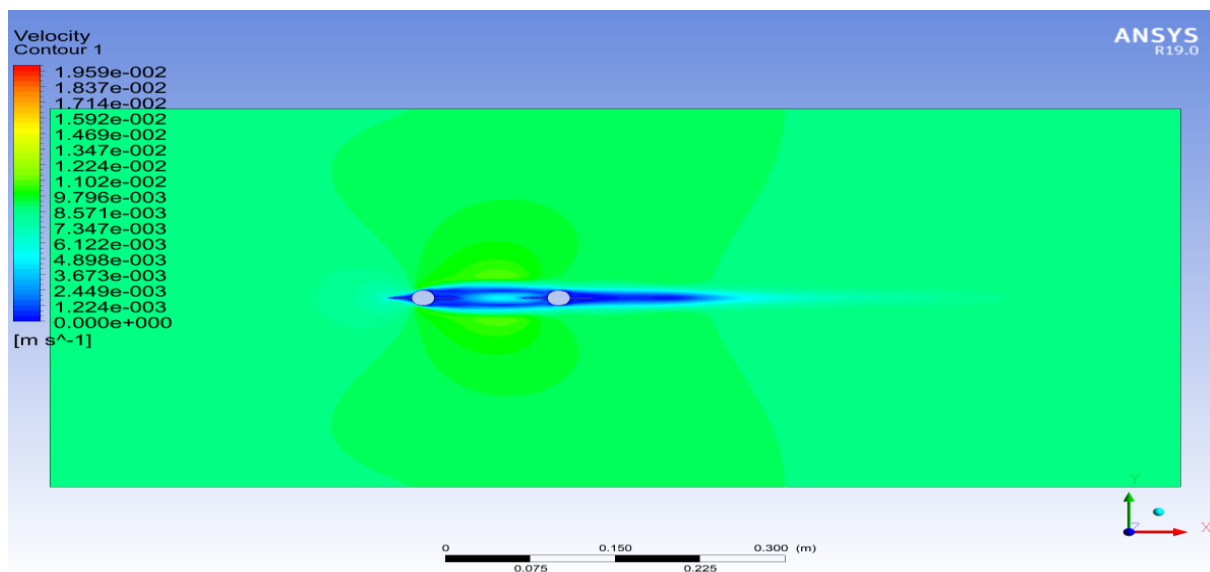
Le sillage devient plus prononcé et légèrement plus étendu, mais reste encore relativement aligné. Les zones de recirculation derrière chaque cylindre sont plus grandes, et la vitesse maximale s'est déplacée plus en aval. L'influence stabilisatrice des ailettes est notable : elles limitent les fluctuations et permettent à l'écoulement de rester structuré sur une plus longue distance.

t = 300 s :

L'écoulement devient pleinement développé. Le sillage est allongé, fin, et centré sur l'axe longitudinal, indiquant un écoulement plus laminaire. Les ailettes (de taille importante ici) jouent un rôle majeur dans la stabilisation et la canalisation du jet, réduisant significativement les turbulences. Les pertes d'énergie sont maîtrisées, ce qui améliore l'efficacité aérodynamique du système.



$t=0.05s$



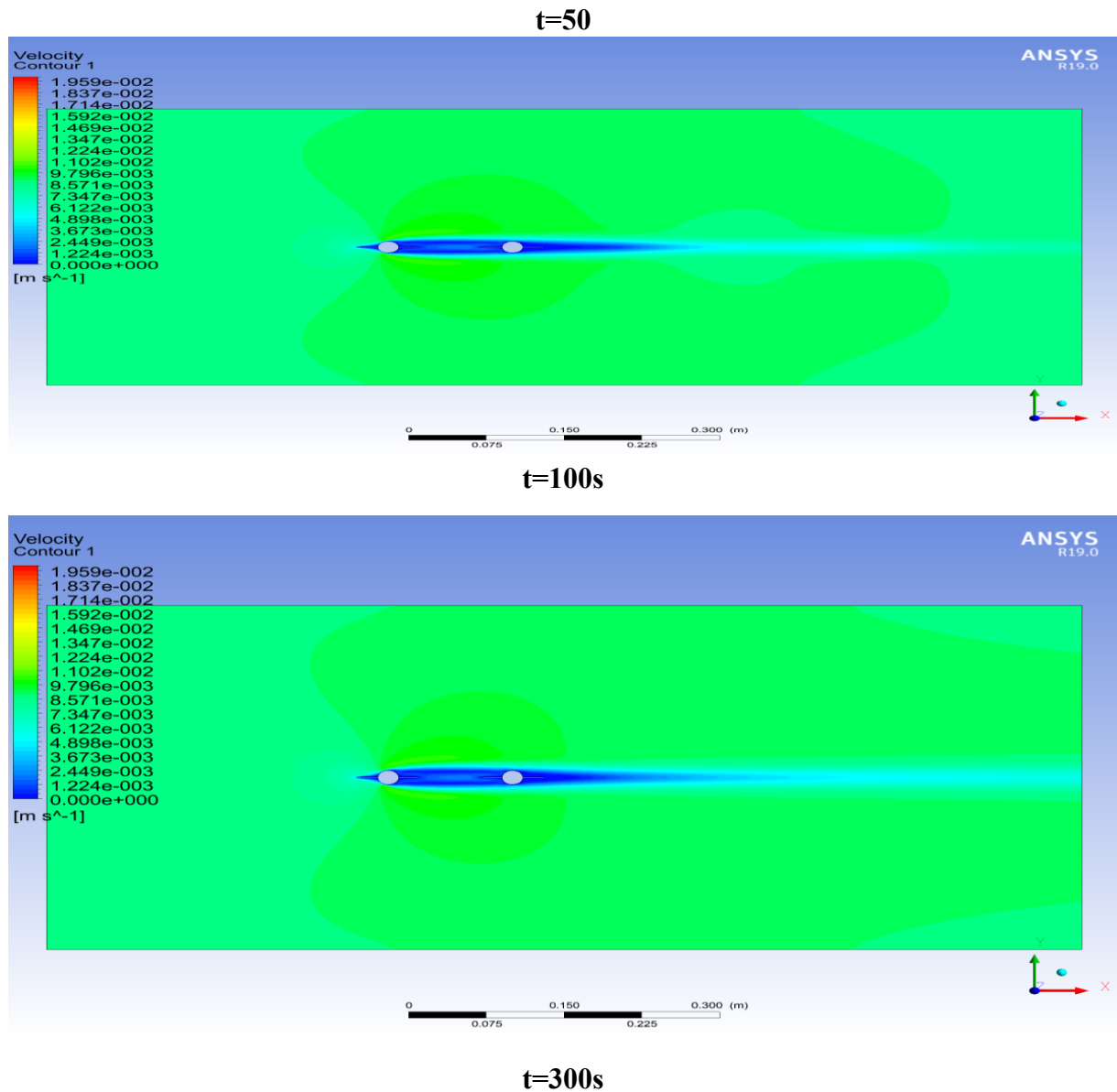


Figure 3-15 : Contours des vitesses dans différent temps ($L/D=6$ et $ailette=1$)

3-5-1 Meilleurs cas de champ de vitesse (vitesse) :

Le meilleur cas global de champ de vitesse est obtenu pour $L/D = 6$ avec **ailette = 1**, car l'écoulement est parfaitement dirigé, sans instabilités visibles, et avec une structure fluide optimisée.

3-6 Effet et rôle des ailettes dans l'écoulement autour de deux cylindres :

1- Stabilisation de l'écoulement :

Les ailettes perturbent la formation des tourbillons alternés (vortex de Von Kármán), ce qui réduit fortement les oscillations de portance (CL). Elles permettent donc de stabiliser l'écoulement, même lorsque le rapport L/D est grand.

2- Réduction de la portance moyenne (CL_{moy}) :

En l'absence d'ailettes, la portance peut devenir instable et importante à partir de $L/D=4$. Avec des ailettes, la portance moyenne redevient quasi nulle, même pour $L/D=6$ ou 8, indiquant une suppression des instabilités aérodynamiques.

3- Diminution de la traînée moyenne (CD_{moy}) :

Les ailettes modifient le chemin de l'écoulement entre les deux cylindres, réduisent les zones de recirculation derrière le cylindre aval et diminuent la traînée globale, surtout pour les grands espacements.

4- Symétrie et régularité du champ de vitesse :

Avec les ailettes, le champ de vitesse devient plus symétrique et plus fluide, ce qui témoigne d'un meilleur guidage du flux et d'une diminution des pertes d'énergie.

5- Contrôle passif efficace :

Les ailettes jouent le rôle de dispositif de contrôle passif simple mais puissant. Elles agissent sans nécessiter d'énergie externe, uniquement par leur forme et leur position, pour améliorer la performance hydro dynamique du système.

3-7 Conclusion :

Dans cette étude numérique, nous avons simulé l'écoulement autour de deux cylindres placés horizontalement, avec et sans ailettes, pour différentes valeurs du rapport L/D . L'objectif était de mieux comprendre l'impact de ce rapport et de la présence d'ailettes sur le comportement de la portance (C_L) et de la traînée (C_D), ainsi que sur la structure de l'écoulement.

Les résultats ont d'abord montré que le comportement hydro dynamique varie fortement selon L/D . Pour de petites valeurs (comme $L/D = 1.5$ ou 2), les coefficients de portance et de traînée restent faibles et stables. En revanche, pour des rapports plus élevés ($L/D = 4, 6$ ou 8), on observe des oscillations importantes, surtout sur le cylindre aval, traduisant un écoulement instable avec la formation de tourbillons alternés. L'ajout d'ailettes permet de réduire fortement ces oscillations, en stabilisant le sillage et en diminuant les efforts aérodynamiques exercés sur les deux cylindres.

Ces résultats ont été confirmés par l'analyse des champs de vitesse à différents instants. Sans ailettes, l'écoulement est perturbé, asymétrique, et marqué par des structures tourbillonnaires importantes. Avec ailettes, l'écoulement devient beaucoup plus régulier, plus symétrique, et les zones de recirculation sont nettement réduites.

Cette étude montre que la présence d'ailettes permet d'améliorer la stabilité de l'écoulement et de réduire les forces hydro dynamiques instationnaires, en particulier pour des espacements élevés. Cela peut être très utile dans des applications industrielles où la réduction des vibrations ou des charges fluctuantes est recherchée.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce travail a porté sur l'étude numérique de l'écoulement d'un fluide autour de deux cylindres circulaires disposés horizontalement, avec ou sans ailettes, à l'aide du logiciel ANSYS CFX. L'objectif principal était d'analyser l'impact de la présence des ailettes et du rapport d'espacement L/D sur les caractéristiques hydro dynamiques, telles que la portance et la traînée, ainsi que sur la stabilité de l'écoulement.

Après une revue bibliographique approfondie sur les principes fondamentaux de la mécanique des fluides et des méthodes numériques de simulation, une modélisation précise du domaine a été mise en place. La méthodologie adoptée, reposant sur la méthode des volumes finis, a permis de simuler avec fiabilité le comportement instationnaire du fluide dans différentes configurations géométriques.

Les résultats obtenus ont mis en évidence l'importance du rapport L/D et de la taille des ailettes sur les efforts hydro dynamiques. En particulier, il a été observé que l'ajout d'ailettes permet de stabiliser l'écoulement et de réduire significativement la traînée exercée sur les cylindres. Les configurations avec ailettes de taille 0.5 et 1 ont montré les performances les plus remarquables, améliorant à la fois la symétrie du flux et la distribution des forces.

Ainsi, cette étude démontre que la géométrie des obstacles a une influence directe sur l'écoulement et peut être optimisée pour améliorer l'efficacité hydro dynamique dans diverses applications industrielles. Les perspectives de ce travail pourraient inclure une extension à des régimes turbulents, des simulations 3D ou encore l'analyse thermique couplée, afin de mieux représenter les conditions réelles d'utilisation.

Référence Bibliographique

- [1] Arrhenius, S. (1917). The viscosity of solutions. *Biochemical Journal*, 11(2), 112.
- [2] Anderson, J. D. (2003). *Modern Compressible Flow: With Historical Perspective* (3rd ed.). McGraw-Hill Education.
- [3] R. Belakroum, M. Khadja, H. Zibouche. Simulation numérique du phénomène d'éclatement tourbillonnaire dans la zone de sillage d'un obstacle de section circulaire.
- [4] Anderson, J. D. (2010). *Fundamentals of Aerodynamics* (5th Ed.). McGraw-Hill Education.
Ouvrage de référence sur l'aérodynamique. Définit les coefficients de traînée (C_d) et portance (C_l), leurs équations et applications
- [5]- Schlichting, H., & Gersten, K. (2016). *Boundary-Layer Theory* (9th ed.). Springer.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-5291> [5]
- [6] R. Belakroum, M. Khadja, H. Zibouche. Simulation numérique du phénomène d'éclatement tourbillonnaire dans la zone de sillage d'un obstacle de section circulaire. [3] International Conférence on Energetics and pollution constantine .2007. [6] (Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun de Tiaret) [6]
- [7] BECHEFFAR, Y. (2023). Simulation numérique d'un écoulement autour d'un cylindre transversalement ondulé : Etude hydrodynamique (Doctoral dissertation, Université IBN KHALDOUN-Tiaret)
- [8] GUELAILIA, B. F. Z., & MERABET, S. (2019). Simulation numérique d'un écoulement laminaire autour d'un cylindre avec rainure (Doctoral dissertation, Université Ibn Khaldoun-Tiaret-).05:15.
- [9] Sagaut, P. (1995). Simulations numériques d'écoulements décollés avec des modèles de sous-maille (Doctoral dissertation, Paris 6).
- [10] El Khouja, N., Roquet, N., & Cazaciu, B. (2013, August). Simulation numérique d'un écoulement viscoplastique frictionnel autour d'un cylindre circulaire. In CFM 2013-21ème Congrès Français de Mécanique. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie. [10]
- [11] Carlier, J., Parnaudeau, P., Heitz, D., & Lamballais, E. (2005). Etude numérique et expérimentale de l'écoulement autour d'un cylindre circulaire $Re_D=3900$. In 17e Congrès Français de Mécanique (pp. 1-6) [11]
- [12] Rahali, F. (2011). Simulation numérique des écoulements autour des surfaces ailettées (Doctoral dissertation, Alger, Ecole Nationale Polytechnique).
- AIDOU, A. E. K. (2016). ETUDE NUMERIQUE D'ECOULEMENT TRUBULENT AUTOUR D'UN CYLINDRE CIRCULAIRE.[13]

- [14] **Ferreira Perez, S. (2013).** Simulation numérique et modélisation de l'interaction fluide-structure et étude vibratoire de deux cylindres en tandem à nombre de Reynolds élevé (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya). [14]
- [15] **Didier, E. (2007).** Simulation de l'écoulement autour de deux cylindres en tandem. Comptes rendus. Mécanique, 335(11), 696-701.05:16.
- [16] **Doradoux, A. (2017).** Simulation numérique d'écoulements diphasiques autour d'un solide mobile (Doctoral dissertation, Université de Bordeaux).
- [17] **Cannone, M., Meyer, Y., & Planchon, F. (1994).** Solutions auto-similaires des équations de Navier-Stokes. *Séminaire Équations aux dérivées partielles (Polytechnique) dit aussi "Séminaire Goulaouic-Schwartz"*, 1-10.
- [18] **Malec, M. (1979).** Sur une méthode des différences finies pour une équation non linéaire différentielle fonctionnelle aux dérivées mixtes. In *Annales Polonici Mathematici* (Vol. 36, No. 1, pp. 1-10). Polska Akademia Nauk. Instytut Matematyczny PAN.
- [19] **Oudin, H. (2008).** Méthode des éléments finis (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Nantes).[19]
- [21] **ANSYS,Inc ANSYS Fluent.** User's Guide Novembre 201305 :31 (Thèse de doctorat, Université Ibn Khaldoun – Tiaret)
- [19] **Oudin, H. (2008).** Méthode des éléments finis (Doctoral dissertation, Ecole Centrale de Nantes).[19]
- [20] **Delcourte, S. (2007).** *Développement de méthodes de volumes finis pour la mécanique des fluides* (Doctoral dissertation, Université Paul Sabatier-Toulouse III).
- [21] **A, J. Y. & CHANG, K. S. 1991** Shedding patterns of the near-wake vortices behind a circular cylinder. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 12, 463}474.
- [22] **Jian Deng, An-Lu Ren*, Jian-Feng Zou, Xue-Ming Shao 2006,** Department of Mechanics, Institute of Fluid Engineering, Zhejiang University, Hangzhou, 310027, People's Republic of ChinaReceived 22 March 2005; received in revised form 4 February 2006; .