

Visa du chef département l'Institut des  
Sciences et Technologies

Signature:.....

Date:.....

## Étude numérique d'écoulement turbulent autour de deux cylindres côte à côte

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme  
de Master académique  
en «*Installations Énergétiques*»

Encadreur: Dr. KAHIL Y.

Signature: .....

Date: .....

Réalisé par :

Étudiante : Routal Abdelkader

Signature : .....

Date : .....

*Membres du jury*

*M.TALEB H B*

*MAA     President*

*M.BAGHDAD M*

*MCB     Examineur*

*M.KAHIL Y*

*MCB     Encadreur*

## **Remerciement**

Un grand merci au bon dieu de m'avoir guidé vers le bon chemin de la lumière et du savoir.

Je tiens à remercier vivement mon encadreur **Dr. Yacine KAHIL**, pour son suivi, son assistance et ses conseils précieux le long de ce travail.

Nos remerciement vont aussi aux :

Les membres de jury pour avoir accepté de participer au jury ainsi l'attention qu'ils ont porté à ce travail.

Je ne saurais oublier tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont prodigué leurs encouragements et m'ont offert leurs soutiens.

## **Dédicace**

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mon cher père*

*Ma chère mère*

*Ma chère grand-mère*

*et mes chères sœurs*

*Mon frère belkacem et toute ma famille*

*Mes chers amis*

*Tous qui ont participé de près ou de loin dans l'élaboration de ce travail.*

*Tous nos collègues de la promotion énergétique 2017.*

# SOMMAIRE

Remerciements	
Dédicaces	
Sommaire	
Liste des figures et des tableaux	
Nomenclature	
Introduction général.....	09
<b>Chapitre 01 : Synthèse bibliographique.....</b>	<b>11</b>
1.1 Synthèse bibliographique.....	12
Conclusion.....	15
<b>Chapitre 02 : Turbulence et formulation mathématique.....</b>	<b>16</b>
Introduction.....	17
2.1 Généralités sur la turbulence.....	17
2.2 Les méthodes principales de calcul de la turbulence.....	17
2.2.1 La simulation numérique directe (DNS).....	17
2.2.2 La simulation des grandes échelles (LES).....	18
2.2.3 La modélisation par la moyenne des équations de Navier-Stoks (RANS).....	18
2.2.3.1 Modèle k-ε standard.....	19
2.2.3.2 Modèle k- ω oméga .....	20
2.2.3.3 Modèles K-Omega SST .....	21
2.3 Méthodes numériques .....	22
2.3.1 La méthode des différences finis .....	22
2.3.2 La méthode des éléments finis .....	22
2.3.3 La méthode des volumes finis.....	23
Conclusion .....	23
<b>Chapitre 03 Etude des cas.....</b>	<b>24</b>

Introduction.....	25
3.1 Description des cas et détails des calculs .....	25
3.1.1 Cas d'un cylindre circulaire .....	25
3.1.2 Cas de deux cylindres circulaires en côte à côte.....	27
3.2 Résolution Numérique.....	29
3.2.1 Présentation du système d'exploitation Linux.....	29
3.2.2 Présentation du mailleur GMSH .....	30
3.2.3 Présentation du code de calcul Code_Saturne .....	31
3.2.4 Logiciel de post-traitement EnSight.....	31
3.2.5 Logiciel de graphique Grace .....	32
Conclusion.....	33
<b>Chapitre 04 Résultats et Discussion .....</b>	<b>34</b>
Introduction.....	35
4.1 Analyse et discussion des résultats .....	35
4.1.1 Cas d'un cylindre .....	35
A) - Étude de sensibilité de maillage .....	35
4.1.2 Cas de deux cylindres .....	40
Conclusion.....	42
Conclusion générale .....	43
Bibliographie.....	44
Résumé .....	46

## Liste des figures et des tableaux

Fig. 3.1	Domaine de calcul pour un cylindre circulaire, XY (Vue latérale) et XZ (Vue de dessus)	25
Fig.3.2	Génération des différents cas du maillage d'un cylindre	27
Fig. 3.3	Domaine de calcul pour deux cylindres côte à côte	28
Fig.3.4	Génération des différents cas de maillage de deux cylindres côte à côte	28
Fig. 3.5	Système d'exploitation Linux	29
Fig. 3.6	Logiciel de maillage GMSH	30
Fig. 3.7	Code de calcul Code_Saturne	31
Fig. 3.8	Logiciel de post-traitement EnSight	32
Fig. 3.9	Logiciel de graphique Grace	33
Fig.4.1	Historique de la vitesse longitudinale capté par les sondes pour différents cas.	35
Fig.4.2	Profil de vitesse moyenne longitudinale le long de la ligne médiane ( $Y/D=0$ )	36
Fig.4.3	Profil de vitesse moyenne longitudinale suivant les lignes transversales ( $X/D=1.06, 1.54$ et	37
Fig.4.4	2.02) Profil de vitesse moyenne transverse suivant les lignes ( $X/D=1.06, 1.54$ et 2.02)	37
Fig.4.5	Différents champs de l'écoulement pour le cas d'un cylindre circulaire	39
Fig. 4.6	Différents champs de l'écoulement de l'étude numérique LES	39
Fig.4.7	Historique de la vitesse longitudinale capté par les sondes pour différents cas	40
Fig.4.8	Les différents champs de l'écoulement pour le cas de deux cylindres côte à côte	41
Fig.4.9	Champs de vitesse instantané avec le phénomène de changement de mode	42
Tab. 1	valeurs des constantes du modèle K-omega SST	22
Tab. 1	Les différents paramètres de maillage d'un seul cylindre	27
Tab. 2	les différents paramètres de maillage de deux cylindres	29

## Nomenclature

L	Dimension caractéristique de la géométrie	[m]
$L_R$	longueur de recirculation	[m]
L/D	Distance adimensionnelle longitudinale entre les centres des cylindres	
P	Pression instantanée	[Pa]
$p'$	Pression fluctuante	[Pa]
Re	Nombre adimensionnel de Reynolds	
$R_{ij}$	Composante du tenseur de Reynolds	[ m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$S_{ij}$	Tenseur de déformation	[1/s]
T/D	Distance adimensionnelle transversale entre les centres des cylindres	
T	Temps	[s]
$u_i$	Composante de la vitesse fluctuante suivant la direction i	[m/s]
$u_\tau$	Vitesse de frottement à la paroi	[m/s]
$U_0$	Vitesse de l'écoulement à l'entrée	[m/s]
$\overline{u'_i u'_j}$	Composantes du tenseur de Reynold	[ m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> ]
$U_R$	Vitesse maximale de retour	[m/s]
$\mu$	Viscosité dynamique	[kg/m.s]
$\nu_t$	Viscosité cinématique turbulente	[m <sup>2</sup> /s]
$\omega$	Dissipation spécifique	[1/s]
$x_i$	Composante i d'un point	[m]
$y^+$	Distance par rapport à la paroi	
$\rho$	Masse volumique	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\varepsilon$	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente par unité de masse	[m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> ]
$\delta\rho$	Variation relative de la masse volumique (induisant la force de flottabilité, $\delta\rho = \rho - \rho_0$ )	

## **Indices**

Min Minimum

Sep Séparation

Stag Stagnation

SM sous maille

## **Abbreviations**

CFD Computational Fluids Dynamics

DNS Direct Numerical Simulation

LES Large Eddy Simulation

RANS Reynolds Average Navier Stokes

RMS the Root Mean Square

CPU Central Processing Unit

CAE computer aided engineering

CSM Computational Structural Mechanics

SGS SubGrid Scale model

NW le sillage étroit

WW le grand sillage

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

Les écoulements autour des objets est un phénomène qui se produit fréquemment dans la pratique et nécessaire pour la conception mécanique et thermique de nombreux systèmes en engineering comme : avions, automobiles, bâtiments, composant électroniques, les aubes de turbines et les obstacles cylindrique à section carrée et circulaire. L'identification et l'étude des phénomènes hydro et aérodynamiques qui surgissent dans le sillage d'un obstacle restent un sujet d'intérêt dans divers domaines.

Dans ce travail on a réalisé une étude numérique d'écoulements turbulents autour d'un et deux cylindres côte à côte. Le but principal est de comprendre le comportement de ces écoulements et d'expliquer les phénomènes physiques qui apparaissent dans ces configurations.

Notre mémoire se compose d'une introduction générale et quatre chapitres et d'une conclusion générale. Il est organisé comme suit :

- Le premier chapitre comporte une synthèse bibliographique de certains travaux passés.
- Le deuxième chapitre offre une vue générale de la turbulence, la formulation mathématique d'équation moyenné de Navier-Stokes et les modèles de turbulence utilisés dans cette étude.
- Le troisième chapitre comprend une description des cas étudiés et les logiciels utilisés dans ce travail.
- Dans le dernier chapitre on regroupe tous les résultats obtenus et leurs discussions.

# **Chapitre 01**

## **Synthèse bibliographique**

## 1.1 Synthèse bibliographique

Les écoulements turbulents autour de deux cylindres en côte à côte ont fait l'objet de plusieurs études numériques et expérimentales. Parmi eux on trouve :

**En 2002** ZHOU et al. [1] ont étudié le sillage turbulent de deux cylindres circulaires côte à côte. Dans leur travail, ils ont étudié expérimentalement les structures turbulentes et le transport d'impulsion dans le sillage de deux cylindres circulaires côte à côte. Trois fils ont été utilisés pour mesurer les variations de vitesse et de température. Les mesures ont été effectuées à des distances derrière les cylindres à  $x/d = 10, 20$  et  $40$  à un nombre de Reynolds de  $5800$  (basé sur le diamètre  $d$  et la vitesse d'écoulement libre  $u_\infty$ ). A un espacement entre les centres des cylindres  $T/d = 1,5$ , les résultats obtenus par  $x/d = 40$ , montre qu'une seule allée de tourbillon. Par conséquent le vortex associés au tourbillon intérieur est dissipé plus vite que celui qui est lié avec le tourbillon extérieur. Ils ont également mesuré le mouvement cohérent de diverses quantités de moyennes de Reynolds.

**En 2003** Chen et al. [2] ont mené une Simulation numérique des écoulements turbulents derrière le sillage deux cylindres en côte à côte. Dans leur étude, la formation et le mouvement des tourbillons derrière deux cylindres en côte à côte sont étudiées à l'aide du modèle de simulation des grandes échelles (LES). La solution pour les équations de Navier-Stokes en trois dimensions est obtenue en utilisant une méthode de volumes finis avec un arrangement de maillage non structuré d'éléments hexaèdres. L'objectif de la présente enquête est d'imaginer la dynamique du sillage aux nombre de Reynolds  $Re = 750$  à deux espacements différents entre les cylindres : grand rapport  $T/d = 3$  et rapport intermédiaires  $T/d = 1.7$ . Les résultats des LES ont révélé que pour  $T/d = 3$ , une formation de sillage symétriques derrière les cylindres. Deux allées de tourbillons distinctes sont propagées en aval. Cependant, pour  $T/d = 1.7$ , en raison de la proximité des deux cylindres, l'écoulement entre les deux cylindres a été dévié, formant un sillage étroit et un grand sillage derrière les cylindres. Il a également été révélé succinctement que la déviation de l'écoulement de l'intervalle a tendance à "basculer", En passant d'un côté à l'autre en étant dévié vers le haut à un instant spécifique et vers le bas plus tard.

**En 2007** Alam et Zhou [3] ont fait une étude sur l'écoulement autour de deux cylindres circulaires en côte à côte très rapprochés. Dans leur étude, la structure d'écoulement autour de deux cylindres circulaires côte à côte est étudiée à  $T/d = 0,1-0,2$  ( $T$  est l'espacement entre les cylindres et  $d$  est le diamètre du cylindre), où l'écart entre les cylindres a une influence significative sur l'augmentation de la moyenne en temps de la portance sur les cylindres. Deux structures d'écoulement distinctes sont identifiées à  $T/d = 0,1$  et  $0,2$  sur la base de la mesure de la pression moyennée en temps. L'écoulement d'intervalle forme une bulle de séparation dans la région de base d'un cylindre à  $T/d=0,1$  mais se sépare des cylindre sans plus de réinsertion à  $T/d= 0,2$ . A  $T/d$

= 0,13 cette bulle se produit spontanément et brusquement, ce qui provoque une variation de la force de portance (lift) moyenne sur le cylindre entre différentes valeurs discrètes.

**En 2008** Shao et Zhang [4] ont mené une simulation de grandes échelles (LES) et effectué une étude d'écoulement au-delà de deux cylindres circulaires côte à côte à un nombre de Reynolds de 5800, basé sur la vitesse d'écoulement libre et le diamètre des cylindres. Le rapport du pas transversal  $T/D$  est varié de 1,5 à 3. Les deux cylindres sont légèrement chauffés et la petite quantité de chaleur peut être traitée comme un scalaire inactif.

**En 2011** Kahil et al. [5] ont fait une simulation des grandes échelles de l'écoulement autour d'un cylindre unique et deux cylindres en côte à côte à des nombres de Reynolds sous-critique. Pour un seul cylindre, le nombre de Reynolds basé sur le diamètre et la vitesse du courant libre est 3900. Une étude de sensibilité complète a été réalisée sur la base de la longueur d'extrusion dans le sens de l'envergure, le raffinement de la grille en proche paroi, le schéma de convection et le modèle sous-maille (SGS). Il a été constaté que la solution moyenne n'est pas influencée par la longueur d'extrusion au-delà de 4 diamètres ou de 1% jusqu'à remontage automatique. Cependant, déraffiner le maillage dans la direction normale à la paroi ou désactiver le modèle d'échelle sous-maille a conduit à des effets drastiques sur la longueur de recirculation et sur le champ de vitesse. L'écoulement autour de deux cylindres en cote à cote a été testé pour une gamme de pas d'espacement de ( $T/D = 1.0, 1.25 \leq T/D \leq 5.0$ ) à un nombre de Reynolds de 3000. Pour le pas intermédiaire à des rapports de diamètre ( $1.25 \leq T/D \leq 1.75$ ), des fréquences multiples délestage ont été détectées avec une déviation biaisée d'écoulement du sillage. En outre, cette déviation d'écoulement biaisé a été jugée bistables (deux modes stables), à savoir un changement de direction par intermittence d'un côté à l'autre, Il a été constaté que ce comportement est conforme aux mesures expérimentales rapportées. Cependant, pour les cas d'espacements plus élevés ( $T/D \geq 2$ ), un comportement de sillage symétrique avec un tourbillon anti-phase a été observé.

**En 2015** Thapa et al. [6] ont étudié numériquement l'écoulement autour de deux cylindres circulaires identiques dans des arrangements côte à côte avec angles d'attaque droit et oblique. L'étude met l'accent sur l'effet de l'angle d'attaque du flux et du rapport d'espacement entre les deux cylindres sur l'écoulement du tourbillon et les forces hydrodynamiques des cylindres. Pour un angle d'attaque d'écoulement oblique, le nombre de Reynolds basé sur la composante de vitesse perpendiculaire à l'angle du cylindre défini comme le nombre normal de Reynolds  $Re_N$  et celui basé sur la vitesse totale est défini comme le nombre de Reynolds total  $Re_T$ . Des simulations sont réalisées pour deux nombres de Reynolds de  $Re_N=500$  et  $Re_T = 500$ , deux angles d'attaque de flux de  $\alpha = 0^\circ$  et  $45^\circ$  et quatre rapports d'écart  $G/D = 0.5, 1, 3$  et  $5$ . L'écoulement d'écart biaisé pour  $G/D = 0.5$  et  $1$  et l'écoulement d'écart bistable d'un coté à l'autre pour  $G/D = 1$  est observé pour  $\alpha = 0^\circ$  et  $45^\circ$ . Pour un nombre de Reynolds normal constant de  $Re_N = 500$ , les coefficients moyens de traînée et de portance à  $\alpha = 0^\circ$  sont très proches de ceux à  $\alpha = 45^\circ$ . La différence entre la

moyenne quadratique (the root mean square – RMS) à  $\alpha = 0^\circ$  et celle à  $\alpha = 45^\circ$  est d'environ 20% pour les grands rapports d'écart de 3 et 5. De petits écarts de 0.5 et 1, les RMS des coefficients de portance à  $\alpha = 0^\circ$  et  $\alpha = 45^\circ$  sont semblables les uns aux autres. Les simulations montrent que l'accord dans les coefficients de force entre les angles d'attaque  $0^\circ$  et  $45^\circ$  du flux pour un nombre de Reynolds normal constant est meilleur que celui d'un nombre de Reynolds total constant. Cela indique que le nombre de Reynolds normal devrait être utilisé dans la mise en œuvre du principe d'autonomie (c-à-d, l'autonomie des coefficients de force sur l'angle d'attaque du flux). L'effet du nombre de Reynolds sur l'écoulement bistable est étudié en simulant l'écoulement pour  $Re_N = 100-600$ ,  $\alpha = 0^\circ$  et  $45^\circ$  et  $G/D = 1$ . L'écoulement pour  $G/D = 1$  se révèle bidimensionnel à  $Re_N = 100$  et faible en trois dimensions à  $Re_N = 200$ . Alors que bien défini biaisé, l'écoulement peut être identifié pour  $Re_N = 300-600$ , l'écoulement d'écart pour  $Re_N = 100$  et 200 change de direction biaisé trop souvent pour permettre l'écoulement stable biaisé pour se développer.

**En 2016** Pang et al. [7] ont fait une étude de simulation numérique de l'écoulement autour de deux cylindres circulaires côte à côte par la méthode de tourbillon IVCBC (vorticité instantanée des conditions limites conservées). Cette méthode a été appliquée pour étudier les coefficients hydrodynamiques et les schémas de l'écoulement autour de deux cylindres circulaires dans des arrangements en côte à côte avec intervalles  $T/D = 1.1 - 7$  et à un nombre de Reynolds élevé  $Re = 6 \times 10^4$ . Le cas de référence du flux visqueux autour d'un cylindre circulaire a d'abord été réalisé pour valider la nouvelle méthode de tourbillon. Ensuite, des simulations du flux autour de deux cylindres circulaires côté à côté ont été effectuées. Un nouveau schéma a été proposé pour distinguer le grand sillage (WW) et le sillage étroit (NW). A en juger par la direction d'un certain point dans l'intervalle de vitesse d'écoulement, les coefficients hydrodynamiques et les nombres Strouhal ont été soigneusement étudiés en fonction des rapports d'intervalle. Au total, cinq types de flux ont été identifiés. Au cours de l'enquête sur l'écoulement biaisé, une fréquence intermédiaire entre les fréquences de sillage étroit et de grand sillage a été trouvée et approchée à celle d'un seul cylindre. Les résultats montrent un bon accord avec les données expérimentales et numériques précédemment publiées.

**En 2016** Carini et al. [8] ont étudié numériquement l'instabilité secondaire de l'écoulement autour de deux cylindres en côte à côte. Dans leur étude, l'espacement non dimensionnel fixe est  $g = 0,7$  et la plage des nombres de Reynolds est  $60 < Re \leq 90$ . Le modèle d'écoulement bidimensionnel est caractérisé par une instabilité asymétrique du sillage (par rapport à l'axe de symétrie horizontal) et l'écart est dévié alternativement vers l'un des cylindres. Un tel comportement a été attribué par d'autres auteurs à une bi-stabilité du flux, et donc appelé changement de mode. Au contraire, les simulations effectuées dans le présent document fournissent de nouvelles preuves que, à un faible nombre de Reynolds le changement de mode se développe grâce à une instabilité de lâché de tourbillons synchronisés en phase entre le sillage des deux

cylindres. Ce nouveau scénario est confirmé et expliqué au moyen d'une enquête de stabilité linéaire global de l'écoulement de base périodique en phase.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre ont a présenté une synthèse bibliographique de quelques chercheurs qui ont réalisé leurs études sur l'écoulement turbulent autour de deux cylindres côte à côte, ce qui a permis de bien situer la problématique du sujet.

**Chapitre 02**

**Turbulence et formulation  
mathématique**

## Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les modèles physiques utilisés dans l'étude des écoulements turbulents incompressibles, puis rappelé les équations de base ainsi que les diverses modélisations possibles, et ainsi nous présenterons quelques modèles de turbulence.

### 2.1 Généralités sur la turbulence

La plupart des écoulements qu'on trouve dans la nature sont turbulents. Pour l'instant, une définition de la turbulence est difficile. Cependant la communauté scientifique s'est mise d'accord sur les caractéristiques des écoulements turbulents qui sont difficilement prévisibles avec des fluctuations de vorticité tridimensionnelles, instables et diffusives. De plus, ces écoulements présentent un spectre d'énergie à large bande [5].

En 1883, le physicien Osborne Reynolds a pu expliquer la transition de l'écoulement laminaire de l'eau vers la turbulence en expérimentant des couleurs avec de l'eau dans un tube. De cette façon, il a obtenu le résultat que le début de la turbulence dans l'eau commence à une certaine vitesse d'eau. En utilisant son expérience et en changeant la vitesse de l'eau, il a pu déduire son nombre, appelé nombre de Reynolds, symbolisé par  $Re$  est défini par  $Re = \frac{UL}{\nu}$ , où  $U$  et  $L$  représentent respectivement une vitesse et une échelle de longueurs caractéristiques de l'écoulement, et  $\nu$  est la viscosité cinématique du fluide.

### 2.2 Les méthodes principales de calcul de la turbulence

Il existe trois principales méthodes pour étudier numériquement la turbulence et qui sont :

#### 2.2.1 La simulation numérique directe (DNS)

La Simulation Numérique Directe (*Direct Numerical Simulation*, DNS) consiste à résoudre toutes les échelles de l'écoulement sans aucune hypothèse sur la modélisation de l'écoulement hormis les lois de comportement du fluide. Toutes les échelles spatiales de la turbulence sont résolues : des échelles dissipatives microscopiques de Kolmogorov jusqu'à l'échelle intégrale ( $L$ ) contenant l'énergie cinétique. La taille de l'échelle de Kolmogorov est donnée par  $\eta = (\nu^3/\varepsilon)^{\frac{1}{4}}$  avec  $\varepsilon$  est le taux d'énergie cinétique dissipée. Le nombre de mailles requis par une DNS pour résoudre toutes les échelles est donc dicté par la taille requise par les plus petites mailles et est proportionnel à  $Re^{\frac{9}{4}}$ . A titre indicatif pour un écoulement à un nombre de Reynolds de  $10^4$ , le nombre de mailles requis est de l'ordre de  $10^9$ . Les écoulements industriels restent donc pour la plupart hors d'atteinte des capacités informatiques actuelles. La DNS permet néanmoins de comprendre la dynamique de la turbulence et d'évaluer beaucoup de quantités inaccessibles

expérimentalement. Elle est également utilisée pour obtenir des solutions numériques de références utiles pour le développement de modèles de turbulence [9].

### 2.2.2 La simulation des grandes échelles (LES)

La LES résout les équations pour les grandes échelles de l'écoulement en ne modélisant que les mouvements à petites échelles. Le temps de calcul est significatif, mais cette technique de calcul est moins onéreuse que la DNS. L'idée maitresse de ces simulations est d'identifier, par la résolution directe, les caractéristiques de grande taille de l'écoulement en modélisant que des mouvements de petite échelle. Pour tenir compte des phénomènes de taille inférieure à celle de maille, il faut utiliser un modèle de sous maille, le plus couramment utilisé est celle de Smagorinsky en 1963, qui repose sur une hypothèse de longueur de mélange [10].

### 2.2.3 La modélisation par la moyenne des équations de Navier-Stokes (RANS)

Cette méthode est basée sur l'approche moyennée des équations de Navier-Stokes. Les équations moyennées de Navier-Stokes (RANS) représentent les équations de transport pour les grandeurs moyennes de l'écoulement seulement, avec une modélisation de toutes les échelles de turbulence. Les termes faisant intervenir les fluctuations sont soit modélisés, soit calculés en utilisant des équations de transport. Les termes inconnus supplémentaires introduits doivent être modélisés pour assurer la fermeture du système [11].

Ce type d'approche (RANS) est couramment utilisé pour des applications industrielles à cause de son faible cout de calcul et de l'adéquation entre le niveau d'approximation et les résultats attendus. RANS est obtenue en moyennant en temps la continuité et les équations de Navier-Stokes régissant l'écoulement incompressible visqueux [12].

Dans le cas d'un fluide incompressible, les équations de continuité et de conservation de la quantité de mouvement s'écrivent :

•Equation de continuité (conservation de la masse) :

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (01)$$

•Équation de quantité de mouvement [QDM]

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i \delta \rho + u \Delta u_i \quad (02)$$

$\downarrow$                        $\downarrow$                        $\downarrow$                        $\downarrow$                        $\downarrow$   
 accélération            convection            grad.pression            flottabilit            diffusion

Pour la simplicité, on suppose  $\rho$  constant

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \Delta \bar{u}_i \quad (03)$$

On pose (le tenseur de Reynolds)

$$R_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}$$

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu S_{ij} - R_{ij}) \quad (04)$$

Avec (le tenseur du taux de déformation):

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) \quad (05)$$

Les valeurs propres de la matrice des  $a_{ij}$  sont notées  $\lambda_i$ . Pour mémoire, voici les équations de Navier-Stokes complètes : l'équation de continuité et les trois équations de transport de la quantité du mouvement [13]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (06)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (07)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (08)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (09)$$

En utilise pour cette étude la méthode RANS et il y a plusieurs modèles qui sont disponibles. Les modèles les plus courants sont :

### 2.2.3.1 Modèle k-ε standard

Le modèle K-epsilon est l'un des modèles de turbulence les plus courants, bien qu'il ne fonctionne pas bien dans les cas de gradients de pression défavorables importants [14].

C'est un modèle à deux équations, c'est-à-dire qu'il comprend deux équations de transport supplémentaires pour représenter les propriétés turbulentes du flux. Cela permet à un modèle à deux équations de tenir compte des effets de l'histoire comme la convection et la diffusion de l'énergie turbulente.

La première variable transportée est l'énergie cinétique turbulente, k. La seconde variable transportée dans ce cas est la dissipation turbulente, ε epsilon. C'est la variable qui détermine l'échelle de la turbulence, tandis que la première variable, k, détermine l'énergie dans la turbulence. [15]. Celui de Launder et Sharma est généralement appelé le modèle standard "Standard" K-epsilon. L'impulsion originale pour le modèle K-epsilon était d'améliorer le modèle de longueur de mélange, ainsi que de trouver une alternative à la prescription algébrique d'échelles de longueur turbulente dans des flux de complexité modérée à élevée.[16]

Pour l'énergie cinétique turbulente k

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{u_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho \epsilon \quad (10)$$

Pour la dissipation  $\epsilon$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \frac{u_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (11)$$

$u_i$  Composant de vitesse dans la direction correspondante

$E_{ij}$  Représente le composant du taux de déformation

$u_t$  Représente la viscosité turbulente

$$u_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

$$C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.00, \sigma_\epsilon = 1.30, C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92.$$

#### Avantages du modèle k- $\epsilon$

- Permet d'utiliser des raffinements raisonnables en paroi (maillages Hauts Reynolds)
- Modèle rapide (deux équations de convection/diffusion en plus)
- Simplicité des conditions aux limites

#### Inconvénients du modèle k- $\epsilon$

- Mauvaise prise en compte de mailles trop proches de la paroi
- Mauvaise prédiction des décollements/recollements (sous-estimation des longueurs de recirculation)

#### 2.2.3.2 Modèle k- $\omega$ oméga [17]

Le modèle K-Omega comporte deux variantes qui seront décrites dans ce document section ; le modèle K-Omega standard et le modèle de transport par contraintes de cisaillement (SST). Ces deux modèles utilisent des équations de transport similaires pour k et  $\omega$ , mais le modèle SST diffère du modèle standard comme suit :

- Il y a un changement progressif par rapport au modèle standard k-omega dans la région intérieure de la couche limite au modèle k-epsilon dans la partie extérieure de la couche limite.
- Afin de tenir compte des effets de transport des principales tensions de cisaillement turbulentes le modèle SST incorpore une équation de viscosité turbulente modifiée.

Pour l'énergie cinétique turbulente k

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} ((\rho k u_i)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{u_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - y_k + S_k \quad (12)$$

Pour taux spécifique de dissipation

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}((\rho\omega u_i)) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{u_i}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + G_\omega - y_\omega + S_\omega \quad (13)$$

$y_k$  et  $y_\omega$  représentent la dissipation de  $k$  et  $\omega$  en raison de la turbulence.  $\sigma_k$  et  $\sigma_\omega$  sont les nombres turbulents Prandtl (constantes dans ce cas, égal à 2) pour  $k$  et  $\omega$  respectivement et  $S_\omega$  et  $S_k$  sont des termes sources définis par l'utilisateur.

### 2.2.3.3 Modèles K-Omega SST [18]

Le modèle de turbulence k-oméga SST (SHEAR STRESS TRANSPORT) est un modèle à deux équations de viscosité qui est utilisé pour de nombreuses applications industrielles. C'est un modèle hybride combinant le Wilcox k-omega et les modèles k-epsilon. Une fonction de mélange,  $F_1$ , active le modèle Wilcox près de la paroi et le modèle k-epsilon dans le flux libre. Cela garantit que le modèle approprié est utilisé dans l'ensemble du champ d'écoulement:

- Le modèle k-oméga est bien adapté pour simuler les écoulements dans la sous-couche visqueuse.
- Le modèle k-epsilon est idéal pour prédire le comportement de l'écoulement dans les régions loin de la paroi.

#### Energie Cinétique Turbulente

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = p_k - B^* k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_w v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (14)$$

#### Taux Spécifique de Dissipation

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = a S^2 - B \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + \sigma_w v_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \quad (15)$$

#### F1 (Fonction de fusion)

$$F_1 = \tan \left[ \left[ \min \left[ \max \left( \frac{\sqrt{k}}{B \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4 \sigma_{\omega 2} k}{C D_{k \omega} y^2} \right] \right]^4 \right] \quad (16)$$

Note:  $F_1 = 1$  à l'intérieur de la couche limite et 0 dans le flux libre.

Avec  $C D_{k \omega} = \max \left( 2 \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial \omega}{\partial x_i}, 10^{-10} \right)$ , et  $y$  est la distance la plus proche à la paroi.

La viscosité turbulente est définie par :

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)} \quad (17)$$

$S$  est la mesure invariante de la vitesse de déformation et  $F_2$  est une deuxième fonction de mélange

$$F_2 = \tan \left[ \left[ \max \left( \frac{2 \sqrt{k}}{\beta \omega y}, \frac{500 \nu}{y^2} \right) \right]^2 \right] \quad (18)$$

Un limiteur de production  $P_K$  est utilisé dans le modèle K-Omega SST pour prévenir l'accumulation de la turbulence dans les régions de stagnation ;

$$P_K = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (19)$$

Tableau 1-valeurs des constantes du modèle K-omega SST

$\beta$	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\sigma_{k1}$	$\sigma_{\omega 1}$	$\alpha_2$	$\beta_2$	$\sigma_{k2}$	$\sigma_{\omega 2}$
0.09	5	3	0.85	0.5	0.44	0.0828	1	0.856

Avec  $\alpha = \alpha_1 F + \alpha_2 (1 - F)$

Ce modèle a un avantage majeur : il peut traiter indifféremment des maillages bas et haut Reynolds. Ceci est très attrayant pour les configurations industrielles dans lesquelles on maîtrise difficilement les raffinements à la paroi. [19]

### 2.3 Méthodes numériques [20]

Lors d'études numériques en mécanique des fluides, ce sont les équations de Navier-Stokes qui sont modélisées. De nombreuses méthodes existent pour résoudre ces équations à l'aide de techniques numériques. On note :

- La méthode des différences finis.
- La méthode des éléments finis.
- La méthode des volumes finis.

#### 2.3.1 La méthode des différences finis

La méthode des différences finies consiste à remplacer les dérivées apparaissant dans le problème continu par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage.

Avantages : grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul.

Inconvénients : limitation de la géométrie des domaines de calculs, difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l'inconnue.

#### 2.3.2 La méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle (comme minimisation de l'énergie, en général) dans un espace de dimension infinie. La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeurs en certains points (les nœuds du maillage).

**Avantages** : traitement possible de géométries complexes, détermination plus naturelle des conditions aux limites, possibilité de démonstrations mathématiques de convergence.

**Inconvénients** : complexité de mise en œuvre et coût en temps de calcul et en mémoire.

### 2.3.3 La méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis est caractérisée par son avantage à satisfaire la conservation de masse, de quantité de mouvement et de l'énergie dans tous les volumes finis ainsi dans tout le domaine de calcul. Elle facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations de conservation telle que le terme source par exemple. La méthode consiste à partager le domaine de calcul en plusieurs volumes où chaque volume entoure un nœud. En utilisant différents schémas d'approximations, on peut intégrer les termes des équations différentielles modélisant sur chaque volume de contrôle où les valeurs et les quantités sont stockées aux nœuds du volume de contrôle. Ces équations algébriques produites expriment la conservation des quantités pour le volume de contrôle et pour tout le domaine de calcul [21].

Dans ce cas nous avons choisi la méthode des volumes finis, pour la résolution des différents termes intervenant dans les équations de Navier-Stokes.

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes méthodes numériques et les modèles de turbulence utilisés dans notre étude.

# **Chapitre 03**

## **Étude des cas**

## Introduction

Ce chapitre est consacré à la conception de la géométrie des deux cas étudiés, un cylindre circulaire et deux cylindres en côte à côte.

En plus de la génération du maillage, une présentation des outils numérique utilisés dans ce travail est donnée tel-que GMSH, Code\_Saturne, Grace et ENSIGHT.

### 3.1 Description des cas et détails des calculs

#### 3.1.1 Cas d'un cylindre circulaire

La figure 3.1 représente le domaine de calcul pour un cylindre circulaire fixe infini avec  $Re_{D,U_0}=3900$ . La longueur minimale d'extrusion dans la direction d'envergure ( $Z$ ) utilisée pour tous les cas est  $LD$ . Les dimensions du domaine de calcul sont  $25D \times 20D \times LD$  dans la direction de l'écoulement ( $X$ ), transverse ( $Y$ ) et d'envergure ( $Z$ ) respectivement. La longueur en amont du cylindre pour toutes les simulations est fixée à  $10D$ , ce qui est suffisamment élevé pour ce genre de configurations [22]. A l'entrée, une vitesse uniforme sans turbulence artificielle est imposée. En haut ( $Y_{max}$ ) et en bas ( $Y_{min}$ ), les conditions de surface sont considérées comme symétriques, alors que la périodicité est utilisée dans la direction d'envergure. Le domaine de calcul dans les deux plans  $XY$  et  $XZ$  est montré dans la figure 3.1.

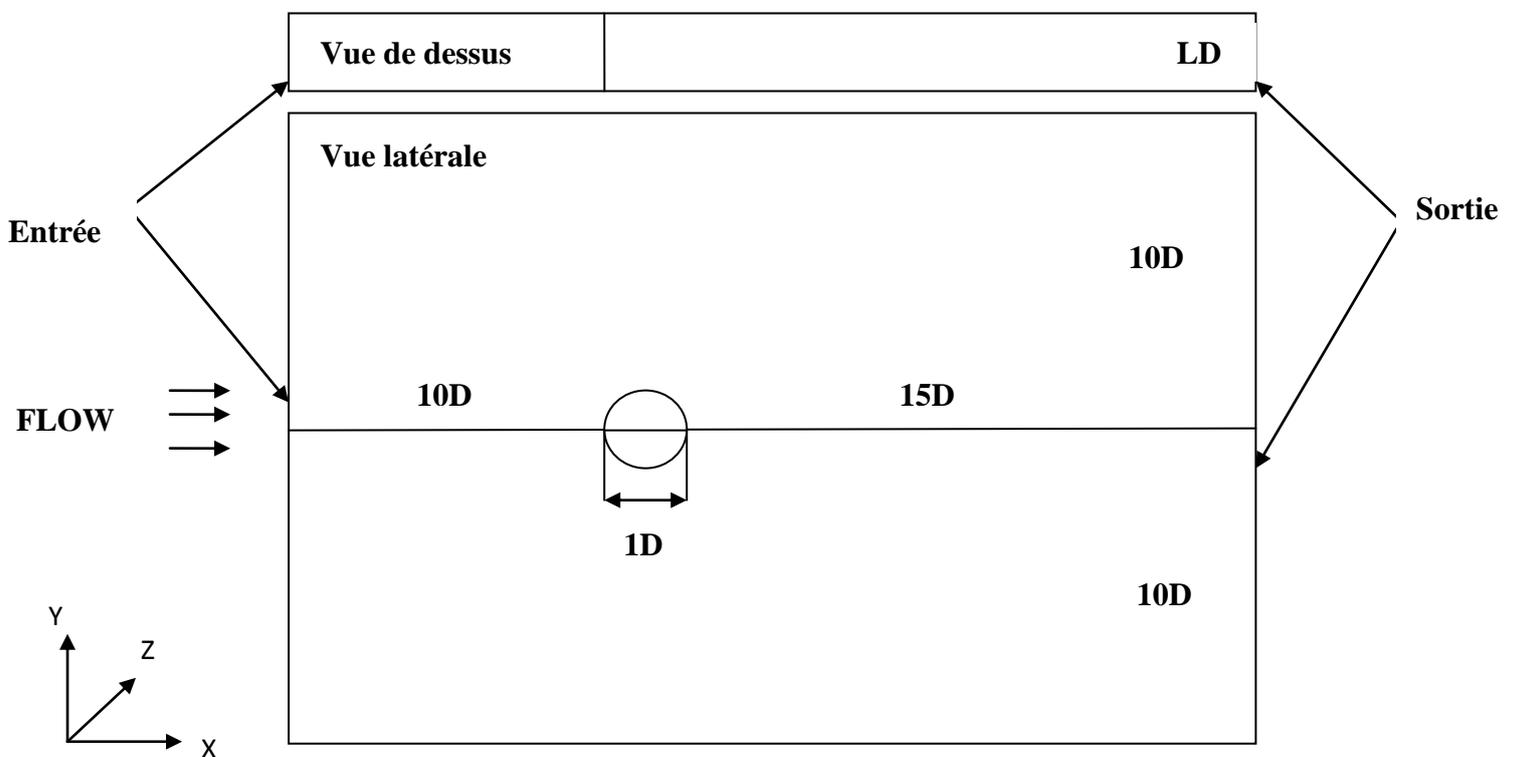
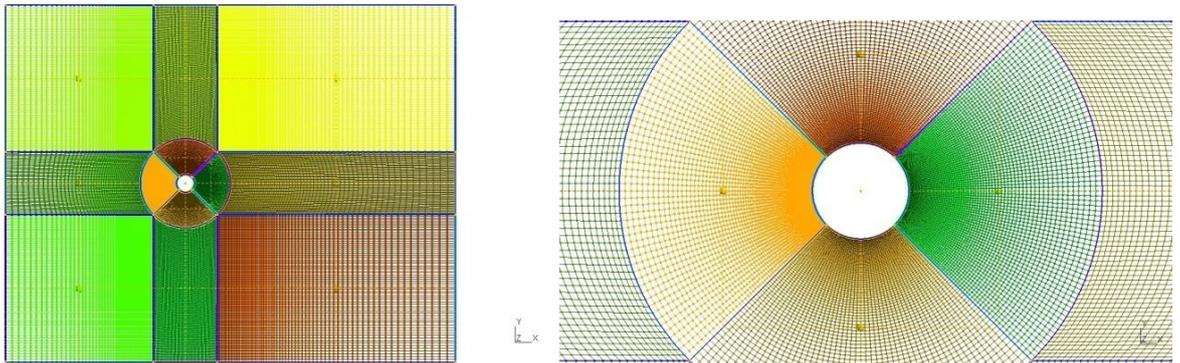


Fig. 3.1 – Domaine de calcul pour un cylindre circulaire, XY (Vue latérale) et XZ (Vue de dessus)

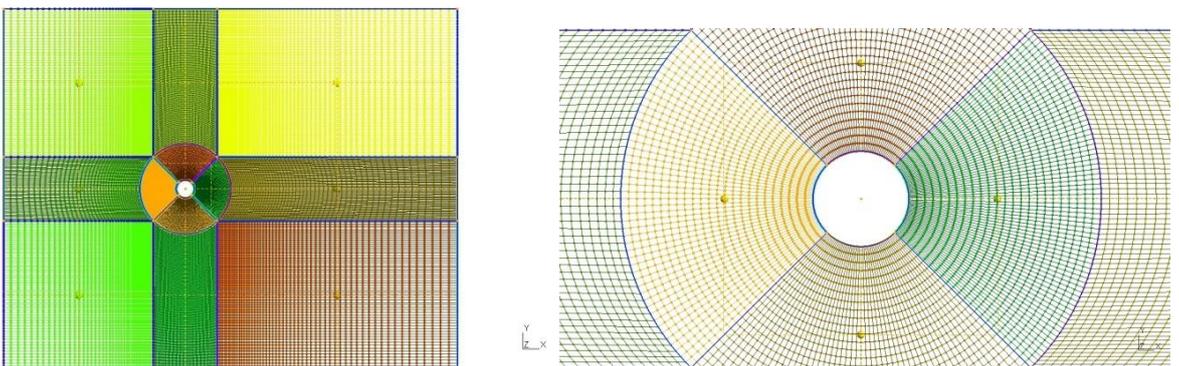
Pour créer le maillage, nous utilisons un programme sous Linux (Ubuntu). Le maillage a été réalisé par le logiciel Gmsh et les figures ci-dessous montrent la géométrie et les différentes configurations du maillage selon les facteurs de progression.

Pour bien adapter notre maillage afin d'avoir des résultats proche des études expérimentales, on a réalisé une étude de sensibilité de maillage. Cette étude consiste à comparer quatre types de maillages [Cas A1, Cas A2, Cas B1, Cas B2].

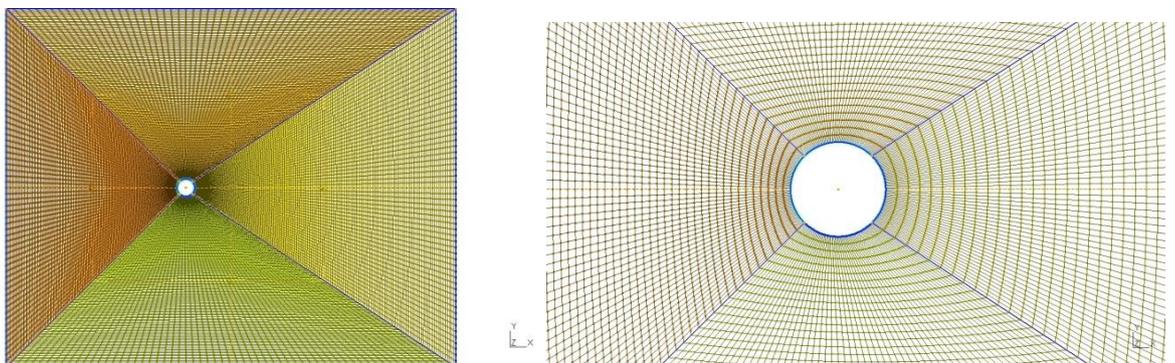
Cas A1



Cas A2



Cas B1



Cas B2

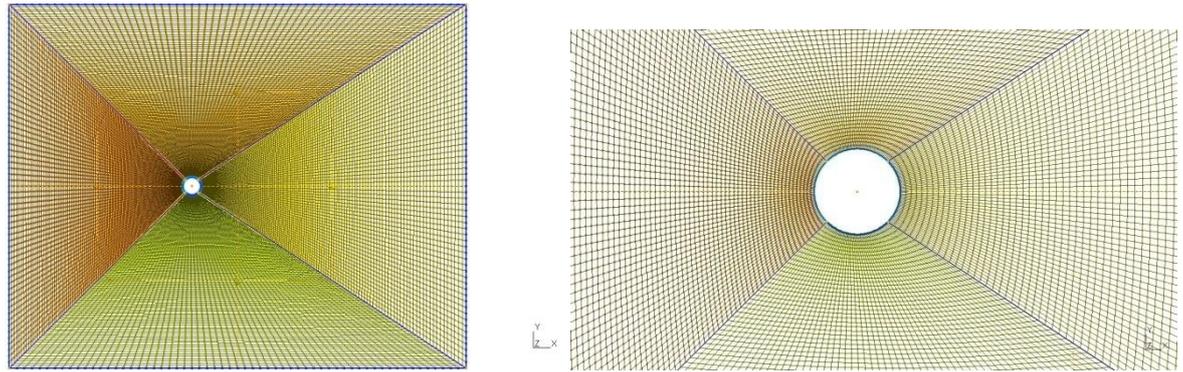


Fig.3.2- Génération des différents cas du maillage d'un cylindre.

Tableau 1- Les différents paramètres de maillage d'un seul cylindre

	Cas A1	Cas A2	Cas B1	Cas B2
<b>Y+</b>	2	16	26	13
<b>Nombre de cellules</b>	51656	30208	29280	29280
<b>Nombre d'itérations</b>	10000	10000	10000	10000

### 3.1.2 Cas de deux cylindres circulaires en côte à côte

Dans ce cas, nous présentons une forme composée de deux cylindres côte à côte ( $Re_{D,U0} = 3900$ ) avec un espacement entre les cylindres ( $L/D = 1.5$ ), La longueur d'extrusion dans la direction d'envergure ( $Z$ ) utilisée pour tout les cas est  $LD$ . Les dimensions du domaine de calcul sont  $25D \times 20D + 1.5D \times LD$ , respectivement dans la direction de l'écoulement ( $X$ ), transverse ( $Y$ ) et d'envergure ( $Z$ ). La longueur en amont du cylindre pour toutes les simulations est fixée à  $10D$ , à l'entrée, une vitesse uniforme (sans turbulence) est imposée. En haut ( $Y_{max}$ ) et en bas ( $Y_{min}$ ), les conditions de surface sont considérées comme symétriques alors que la périodicité est utilisée dans la direction d'envergure. Le domaine de calcul dans les deux plans  $XY$  et  $XZ$  est montré dans la figure 3.3.

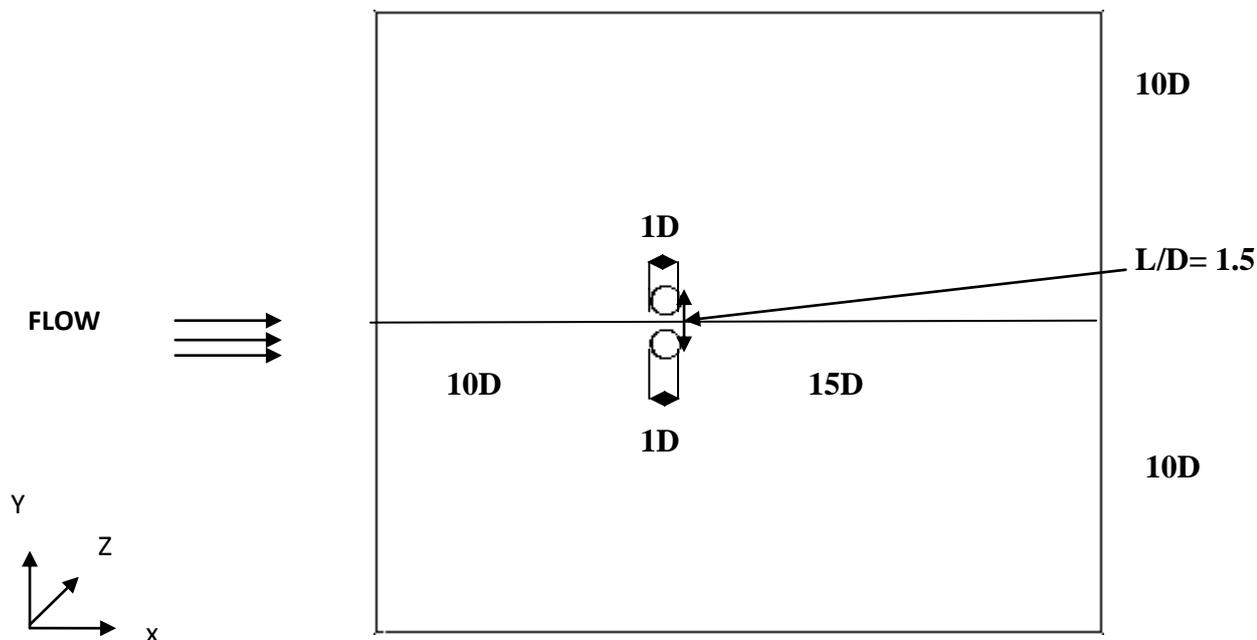
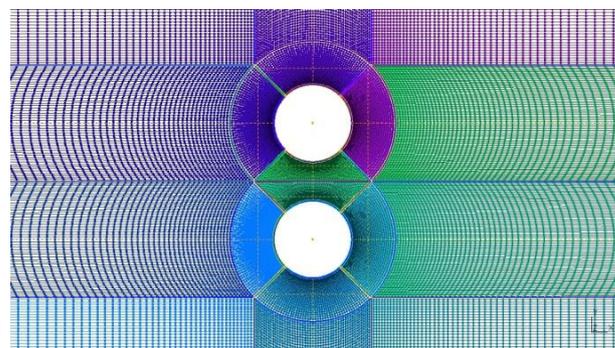
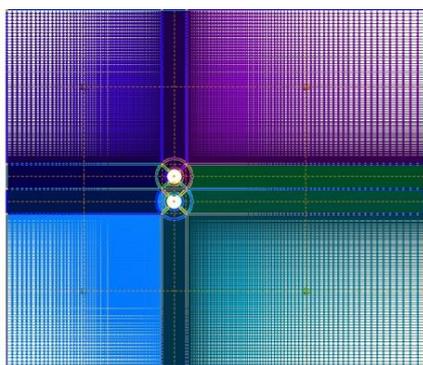


Fig. 3.3 – Domaine de calcul pour deux cylindres côte à côte

Les figures ci-dessous montrent la géométrie des différents maillages de deux cylindres côte à côte. On a deux types de maillages à comparer [Cas C1, Cas D1],

Cas C1



Cas D1

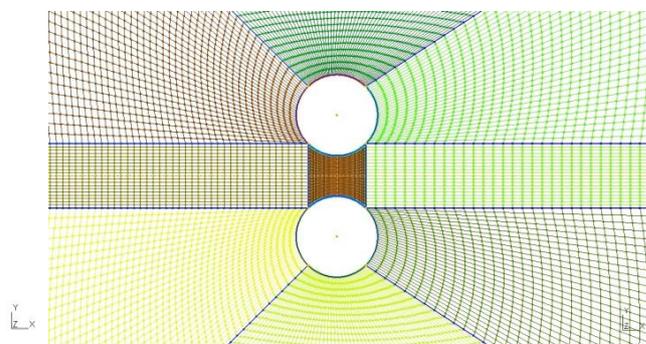
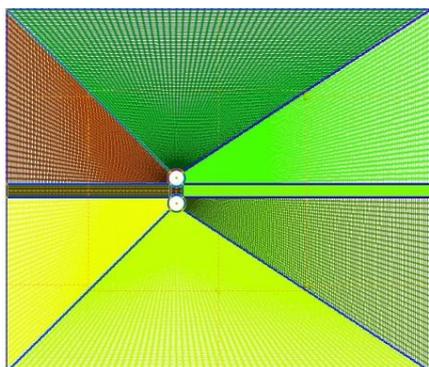


Fig.3.4- Génération des différents cas de maillage de deux cylindres côte à côte

**Tableau 2- les différents paramètres de maillage de deux cylindres**

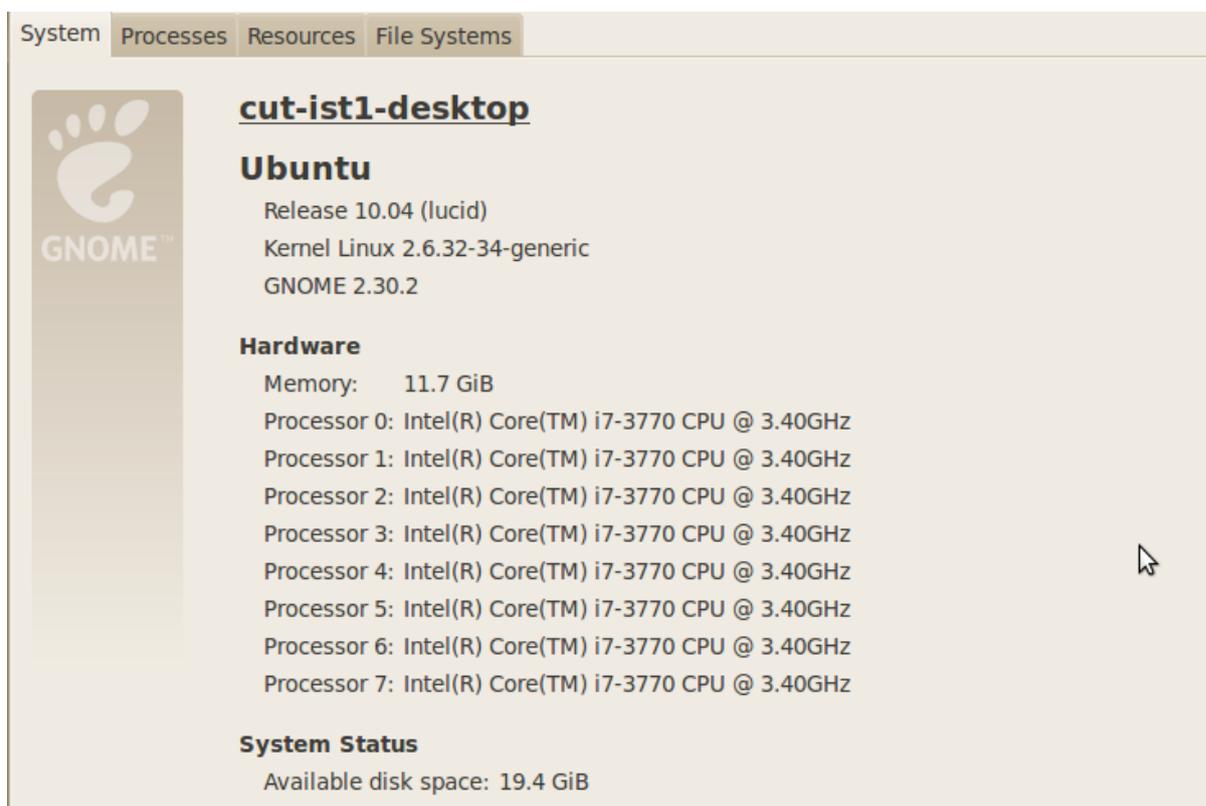
	Cas C1	Cas D1
<b>Y+</b>	18	25
<b>Nombre de cellules</b>	80240	35360
<b>Nombre d'itérations</b>	10000	10000

### 3.2 Résolution Numérique

La génération du maillage est réalisée par le logiciel GMSH et pour le lancement de calcul on a utilisé le code de calcul Code\_Saturne et enfin pour le traitement des résultats, on a employé le logiciel EnSight et pour tracer les profils on utilise le logiciel de graphique Grace. Ces logiciels sont gratuits (open source sous Linux).

#### 3.2.1 Présentation du système d'exploitation Linux [23]

Linux est un système d'exploitation libre et moderne : multitâches, multi-utilisateurs, sécurisé et possédant une interface graphique. Comme tout système d'exploitation, Linux sert d'interface entre l'utilisateur et les composants électroniques de l'ordinateur. Son développement a commencé en août 1991, sous l'initiative du Finlandais Linus Torvalds.



**Fig. 3.5 – Système d'exploitation Linux**

### 3.2.2 Présentation du mailleur GMSH [24]

GMSH est un logiciel de maillage 2D ou 3D. C'est un logiciel libre qui peut fonctionner sur les systèmes d'exploitation les plus utilisés (Max OS X, Linux et Windows).

Gmsh est un outil qui peut être utilisé directement en mode graphique ou purement en ligne de commande. En effet, en mode graphique, la génération des différents objets s'accompagne de la génération d'un fichier texte d'extension .geo qui contient la définition de l'ensemble des objets géométriques. Par ailleurs, comme son nom l'indique, Gmsh est utilisé pour générer des maillages au format msh. GMSH est composé de plusieurs modules, correspondant aux étapes de la chaîne de calculs :

Le module géométrie,

Le module maillage,

Le module solveur,

Le module de post-traitement.

Pour travailler avec GMSH, il est possible de l'utiliser en ligne de commande (par des scripts) ou à travers une interface graphique. L'utilisation de GMSH par des scripts, permet son insertion dans des chaînes de calculs de grandes tailles. De même, en utilisant les scripts, il est possible de modifier un grand nombre de paramètres des modules de GMSH.

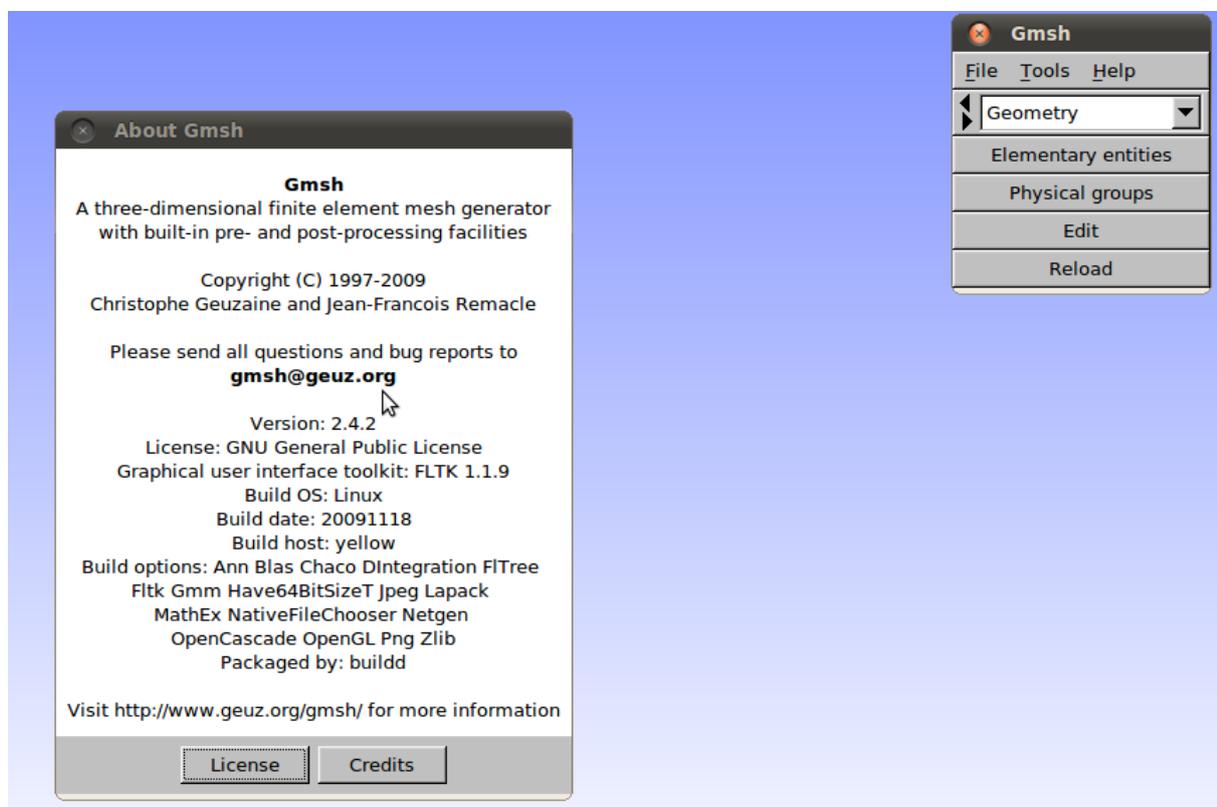


Fig. 3.6 – Logiciel de maillage GMSH

### 3.2.3 Présentation du code de calcul Code\_Saturne [25]

Code\_Saturne est un logiciel libre de mécanique des fluides (CFD : Computational Fluids Dynamics) développé depuis 2007 par EDF. La résolution des équations utilisé par Code\_Saturne ce fait par la méthode des volumes finis. Il peut être téléchargé gratuitement pour une utilisation sur des machines sous Linux. la résolution des équations de Navier-Stokes, de transport et de chaleur fourni par le logiciel nous intéressera particulièrement dans le cadre de notre projet.

Ci-dessus, l'interface graphique de Code\_Saturne, claire et simple d'utilisation.

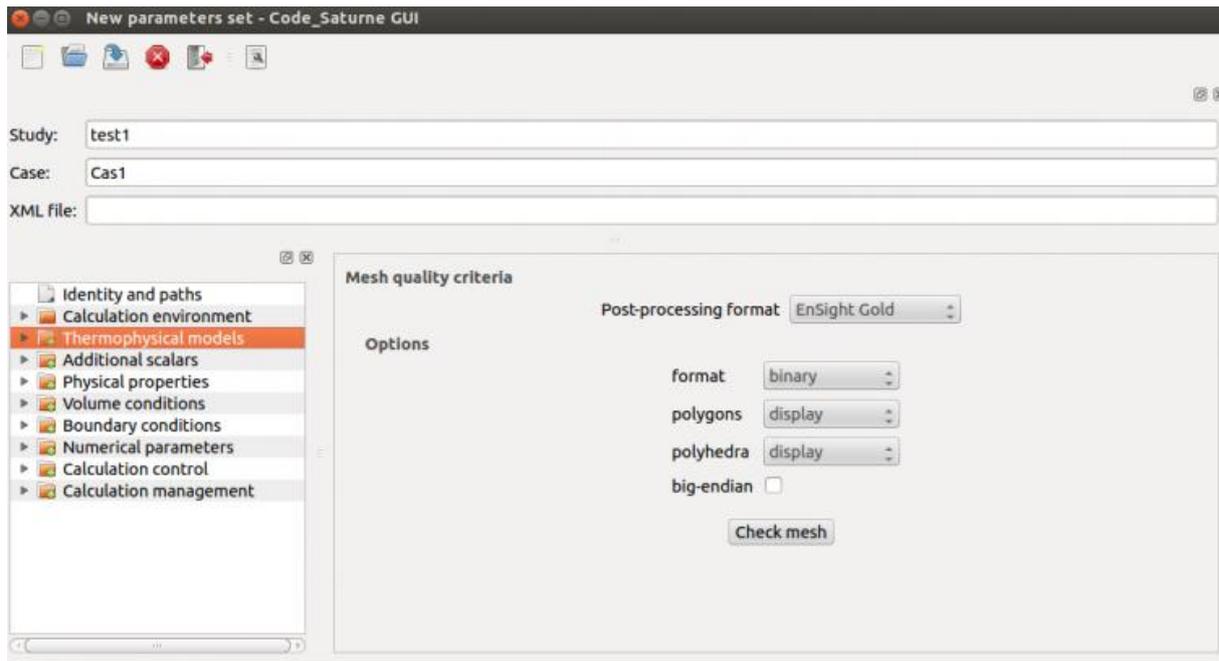


Fig. 3.7 – Code de calcul Code\_Saturne

### 3.2.4 Logiciel de post-traitement EnSight [26]

EnSight est un logiciel pour visualiser, analyser et données communicantes de simulations informatiques et/ou expériences. Les principaux marchés pour EnSight sont l'automobile, l'aérospatiale, la défense, la combustion, la production d'énergie, de la fabrication de haute technologie, et d'autres marchés qui nécessitent une très grande précision dans la modélisation de la physique sur ordinateur.

Il est le plus souvent utilisé pour la dynamique des fluides numériques (CFD) et d'autres processus

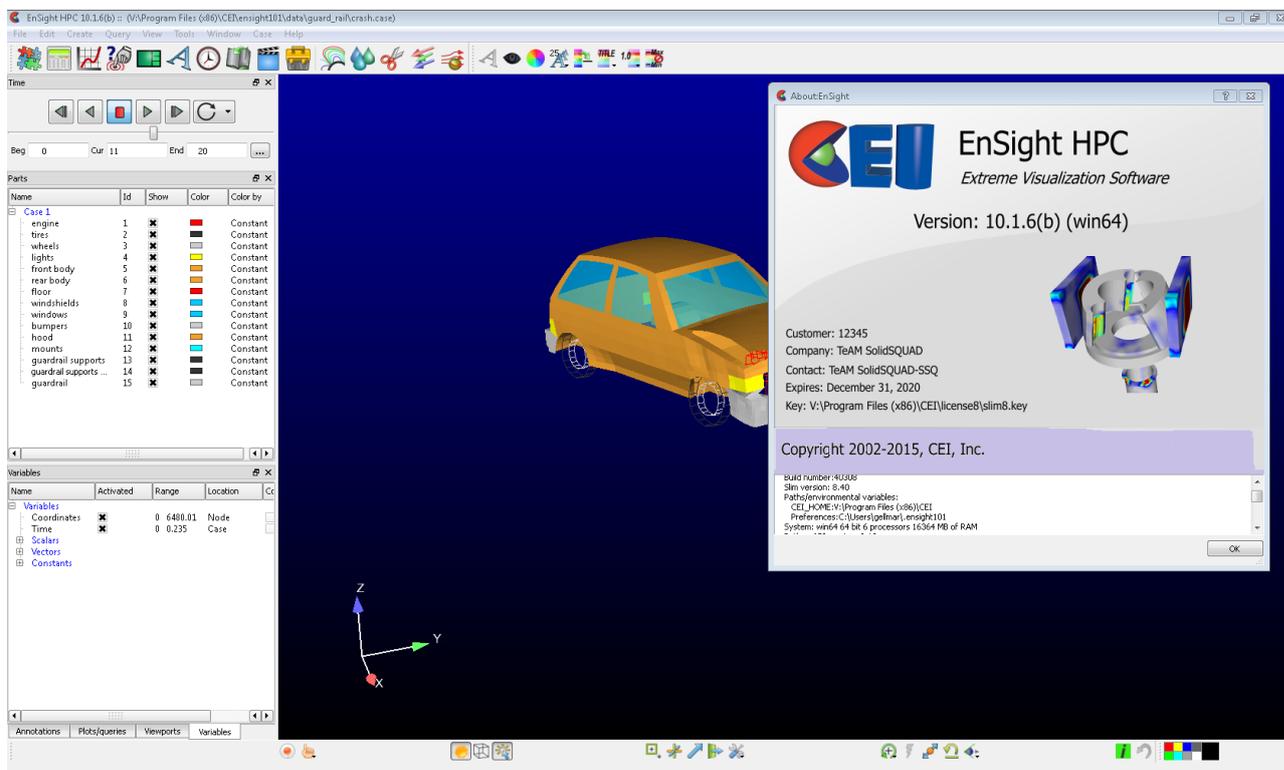
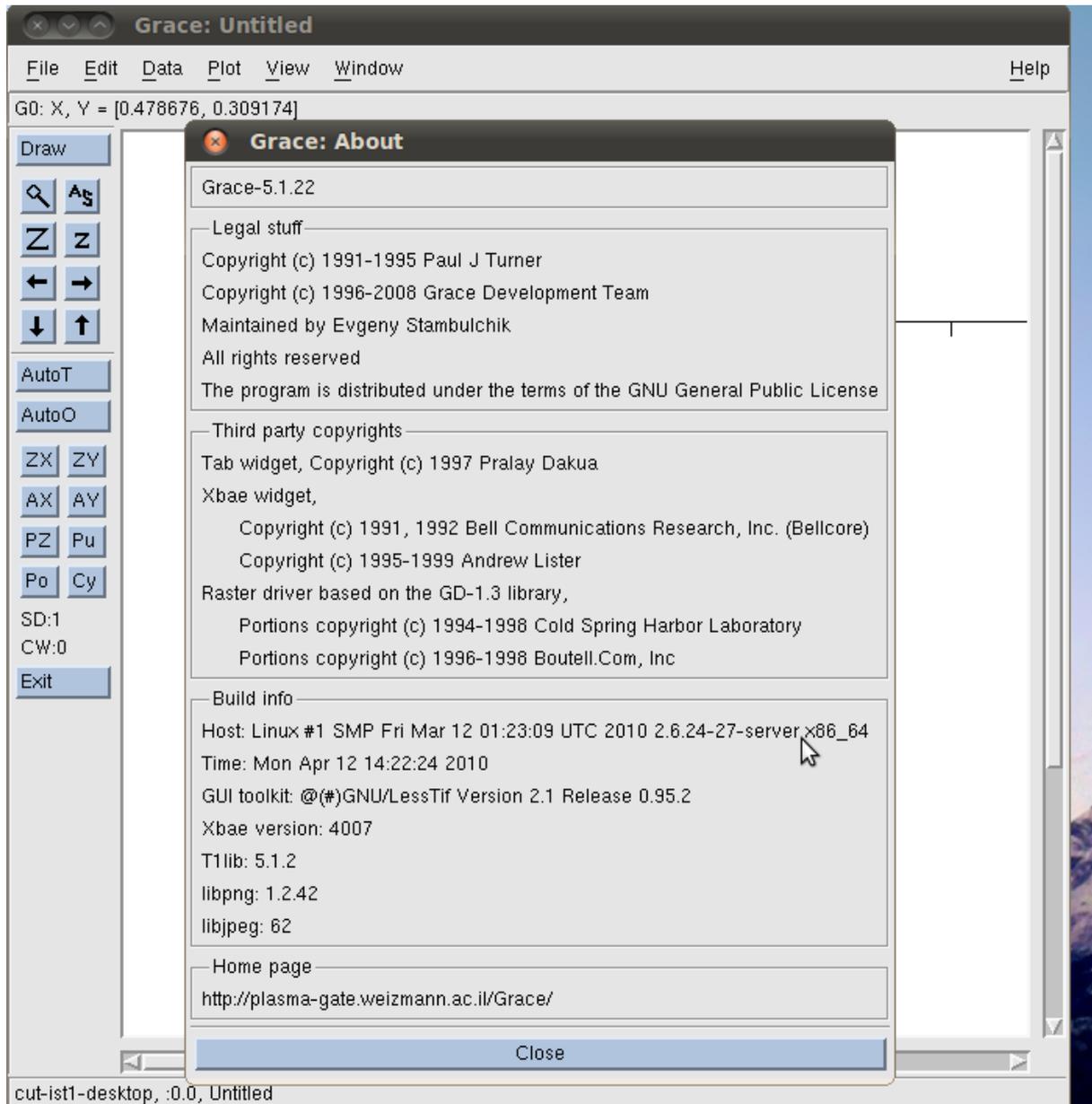


Fig. 3.8 – Logiciel de post-traitement EnSight

### 3.2.5 Logiciel de graphique Grace [27]

Grace est un logiciel de graphique en 2D acceptant en entrée n'importe quel fichier ASCII multicolonne ou Netcdf 1D, il permet de configurer précisément le résultat final voulu. Absolument tous les paramètres d'un graphique en 2D sont présents : 256 couleurs, 10 types de motifs 'built-in' et la possibilité d'utiliser n'importe quel caractère de police comme motif, caractères grecs et mathématiques inclus, 9 types de lignes, axes entièrement configurables, légendes, taille physique du graphique etc. Les graphiques sont exportables en différents formats : ps, png, jpg, svn, mif, pnm. Le réglage de la résolution est laissé aux soins de l'utilisateur permettant d'exporter des graphiques de qualité "publication". Possibilité de sauvegarder les graphiques au format Grace (\*.agr) ou alors seulement des jeux de paramètres personnalisés. Il est aussi possible de tracer plusieurs graphiques différents sur un même canevas. Enfin, les utilisateurs avisés peuvent écrire des scripts permettant d'obtenir des graphiques parfaits en une ligne de commande.



**Fig. 3.9 – Logiciel de graphique Grace**

## Conclusion

Dans ce chapitre on a montré une description des deux cas étudiés (un seul cylindre et deux cylindres en côte à côte) et leurs différentes caractéristiques. Par la suite, on a présenté les logiciels utilisés pour ce travail afin de réaliser notre étude numérique.

# **Chapitre 4**

## **Résultats et Discussion**

## Introduction

Le but de cette étude étant d'observer le comportement du mouvement de l'écoulement autour d'un cylindre et de deux cylindres côte à côte, nous pouvons observer les résultats de la modélisation ci-dessous, pour un nombre de Reynolds de 3900 pour différents cas. Les différents champs moyens et instantanés sont présentés ainsi les profils de vitesses moyennes le long de l'axe du sillage sont tracés et comparés avec les données expérimentales publiées.

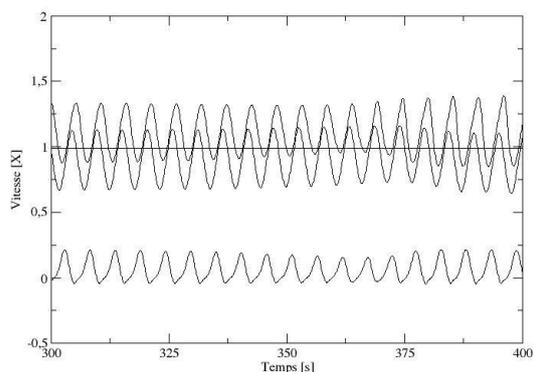
### 4.1 Analyse et discussion des résultats

#### 4.1.1 Cas d'un cylindre

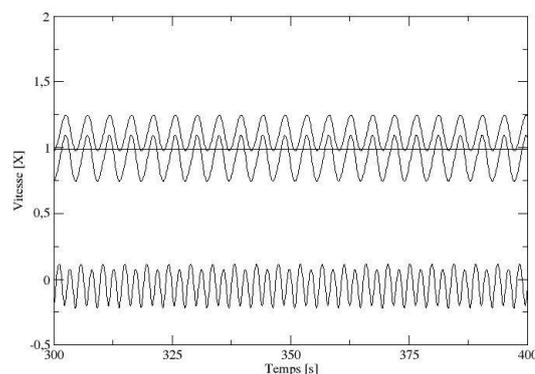
##### A) - Étude de sensibilité de maillage

Avant de discuter des résultats on montre la figure 4.1 des différents cas étudiés. Cette figure présente l'historique de la vitesse longitudinale (Vitesse[X]), capté par les sondes. Cela est utile pour montrer que notre écoulement est pleinement développé et qu'on peut commencer à moyenner :

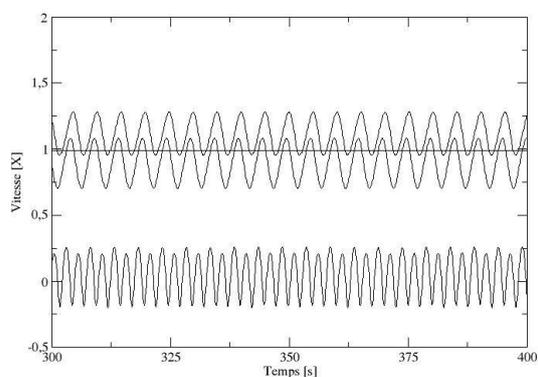
Cas A1



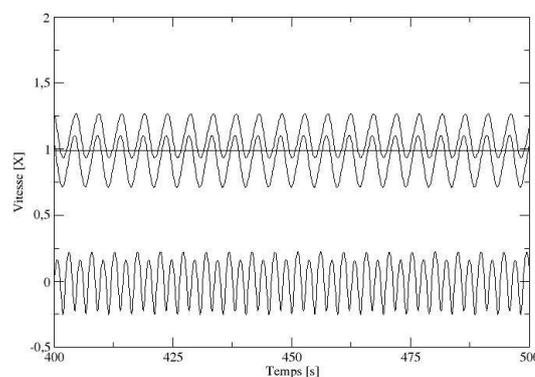
Cas A2



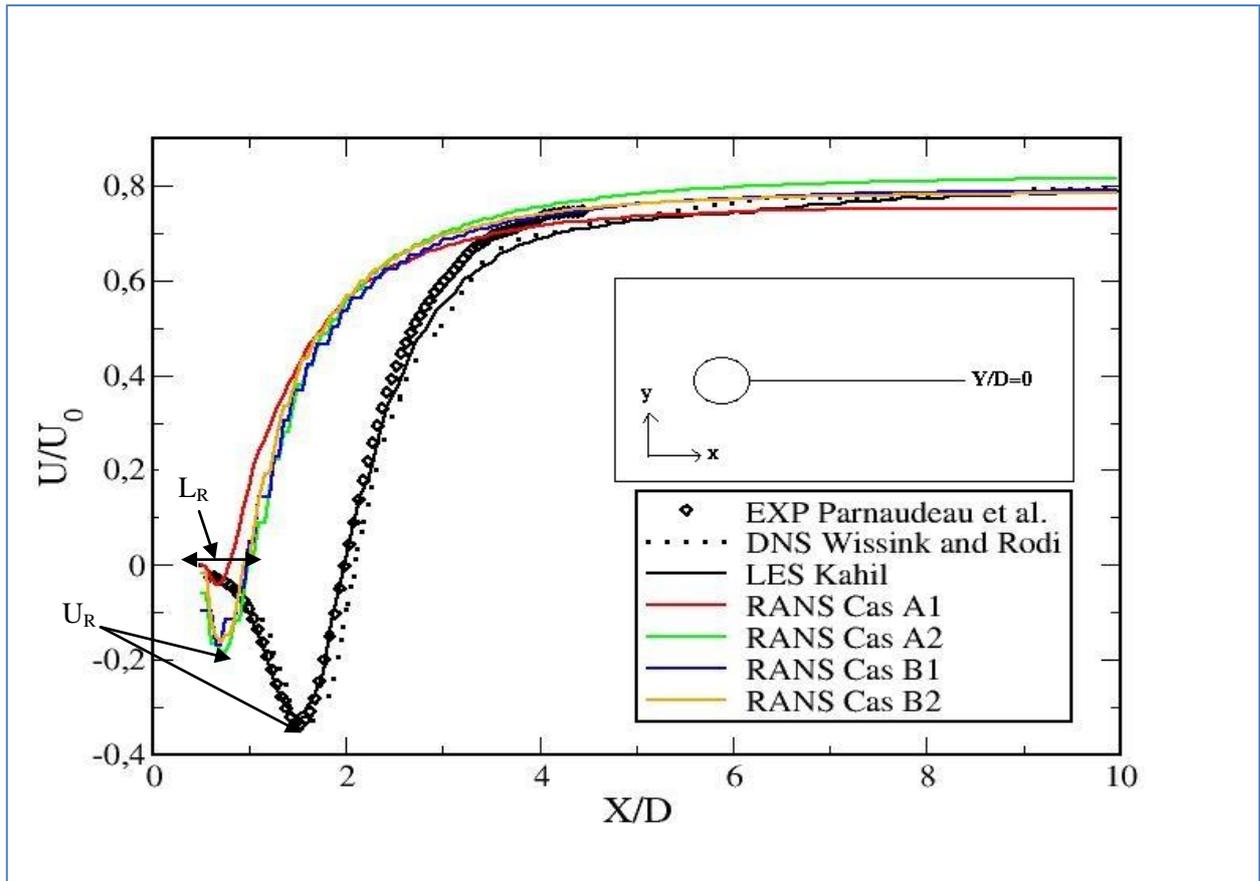
Cas B1



Cas B2



**Fig.4.1 - Historique de la vitesse longitudinale capté par les sondes pour différents cas.**



**Fig.4.2- Profil de vitesse moyenne longitudinale le long de la ligne médiane ( $Y/D=0$ )**

Sur la figure 4.2 on présente une comparaison des profils de vitesse moyenne longitudinale le long de la ligne médiane ( $Y/D = 0$ ) de nos résultats avec les données expérimentales de Parnaudeau et al [22] ainsi que les résultats de DNS Wissink et Rodi [28]. D'après le graphe, on observe qu'il n'y a presque pas de changement dans le profil de vitesse pour les cas (cas A2, cas B1 et cas B2), quand on augmente la distance à la paroi. On note que l'allure des calculs RANS et les autres résultats sont presque les mêmes en proche sillage et identique lorsque  $X/D > 3$ . Pour le cas A1, le profil de vitesse est complètement différent du reste des cas.

Concernant la longueur de recirculation ( $L_R$ ) et la vitesse maximale de retour ( $U_R$ ), on remarque une sous estimation de ces valeurs de nos résultats RANS avec les données expérimentales et numériques (LES, DNS). Ceci est compréhensible vu que les méthodes RANS sont moins précises que les autres méthodes poussées.

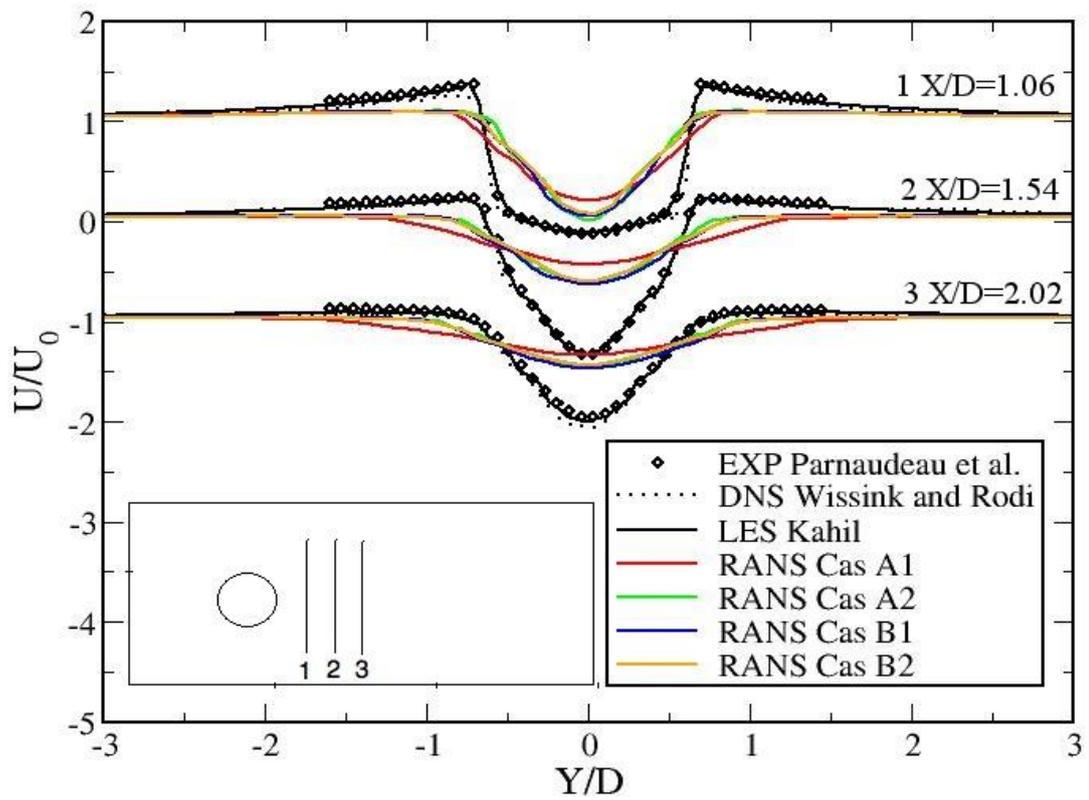


Fig.4.3- Profil de vitesse moyenne longitudinale suivant les lignes transversales ( $X/D=1.06$ ,  $1.54$  et  $2.02$ )

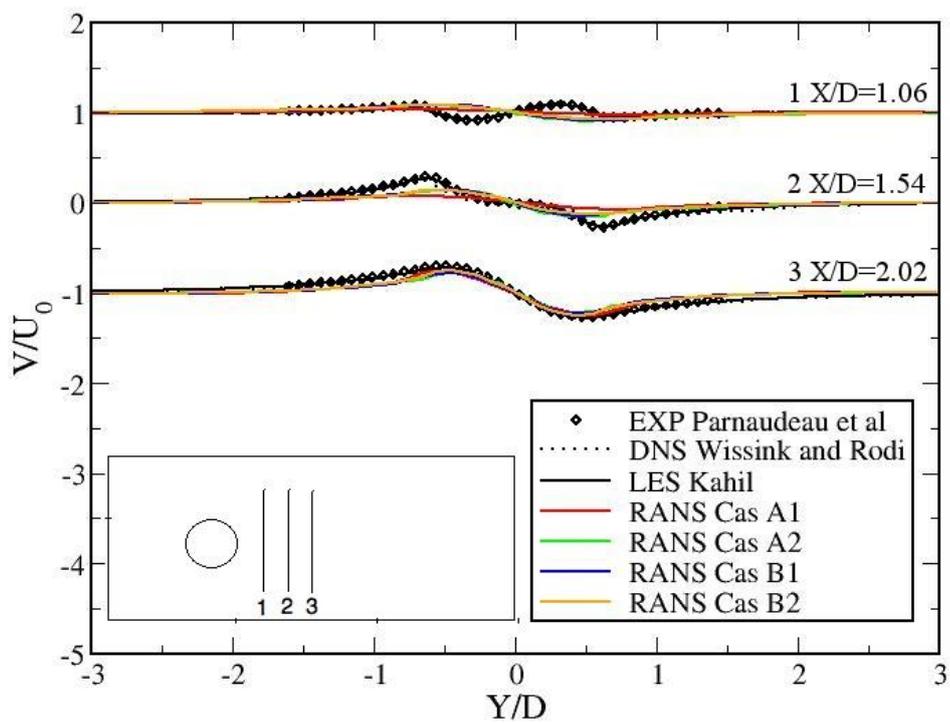
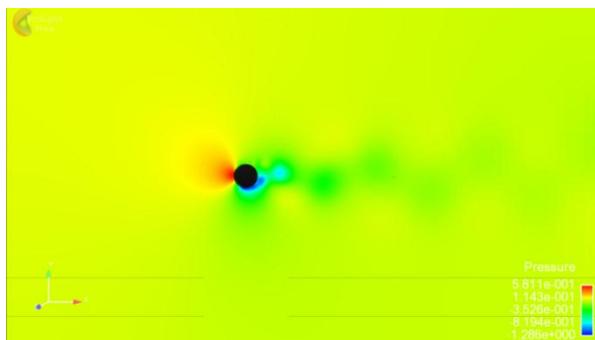


Fig.4.4- Profil de vitesse moyenne transverse suivant les lignes ( $X/D=1.06$ ,  $1.54$  et  $2.02$ )

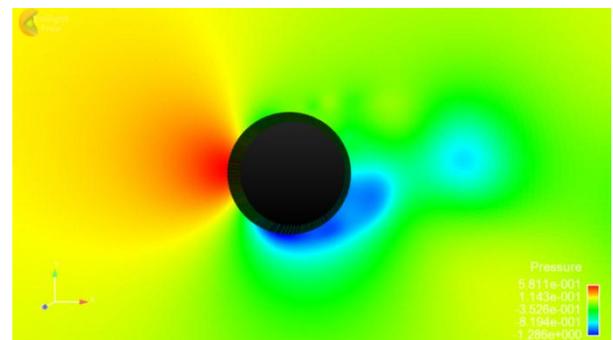
La figure (4.3) montre une comparaison des profils de vitesse moyenne longitudinale suivant les lignes transversales ( $X/D=1.06, 1.54$  et  $2.02$ ). D'après la figure on observe le même comportement des profils de vitesse de notre étude pour les trois cas (cas A2, cas B1 et cas B2) avec les autres études expérimentales et numériques. Concernant ce cas A1, les profils sont différents du reste des résultats.

La figure (4.4) montre une comparaison des profils de vitesse moyenne transverse ( $V$ ) avec les résultats expérimentaux et numériques à  $x/d= 1.06, 1.54$  et  $2.02$ . On remarque que seul les profils à  $x/d = 2.02$  sont proches des résultats expérimentaux et numérique. Pour le reste des profils à  $x/d = 1.06$  et  $1.54$ , les résultats sont un peu éloignés.

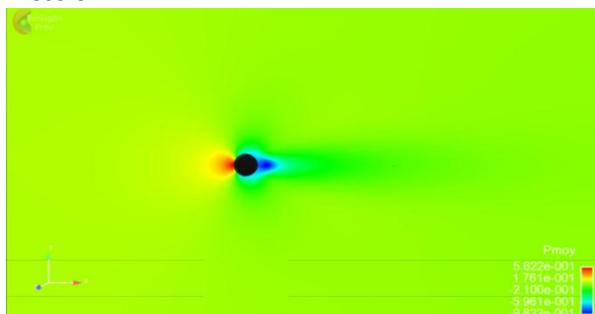
Les figures ci-dessous montrent les différents champs du cas étudiés d'un cylindre



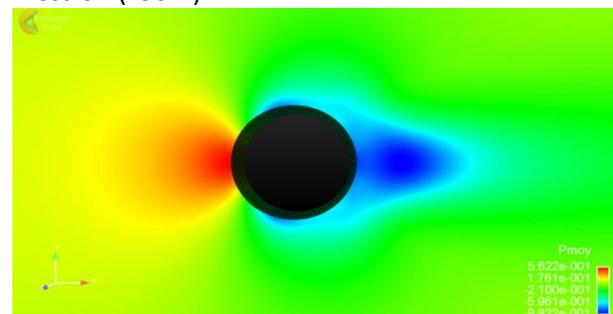
Pression



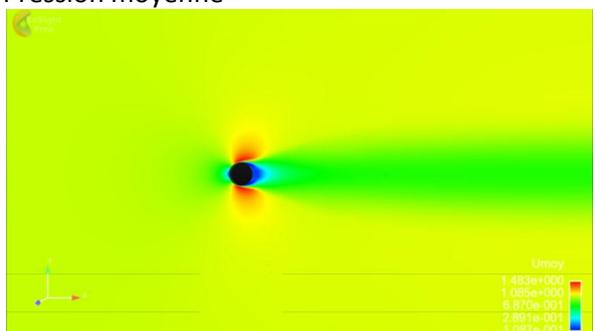
Pression (zoom)



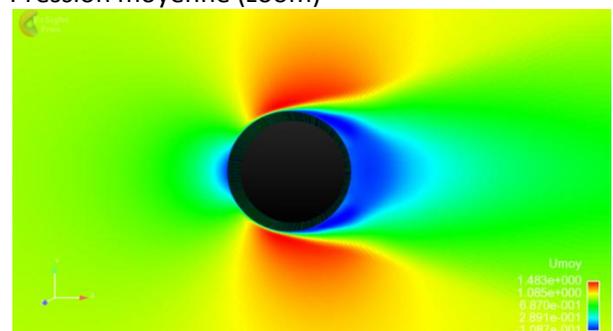
Pression moyenne



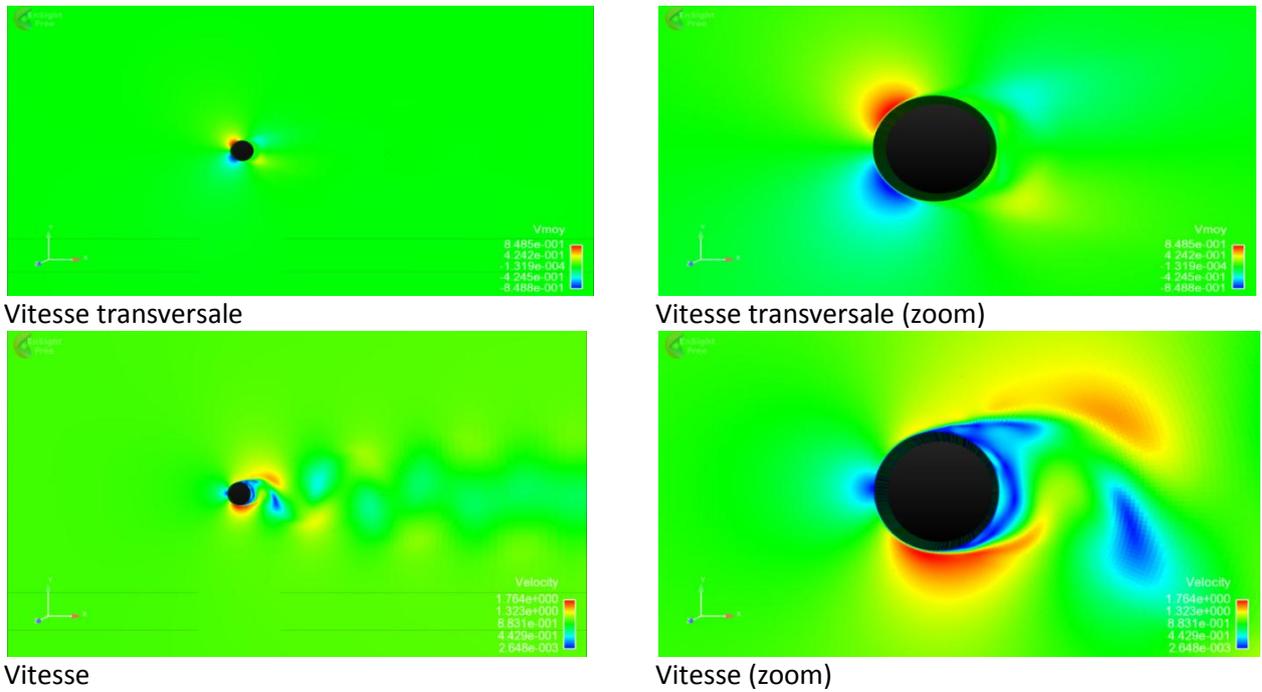
Pression moyenne (zoom)



Vitesse longitudinale

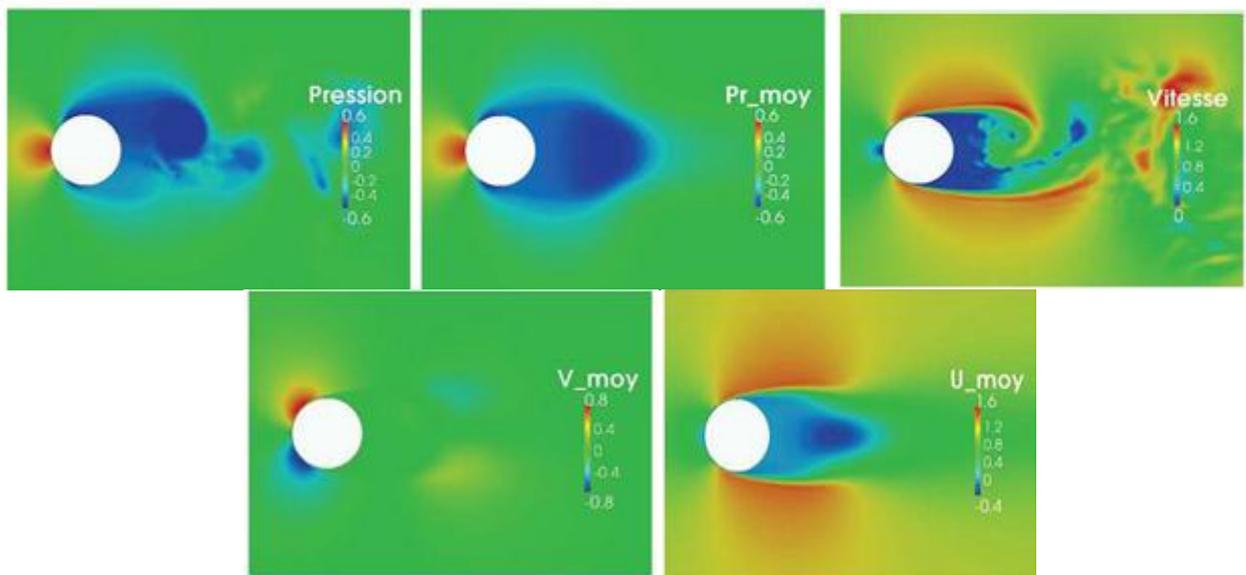


Vitesse longitudinale (zoom)



**Fig.4.5 - Différents champs de l'écoulement pour le cas d'un cylindre circulaire**

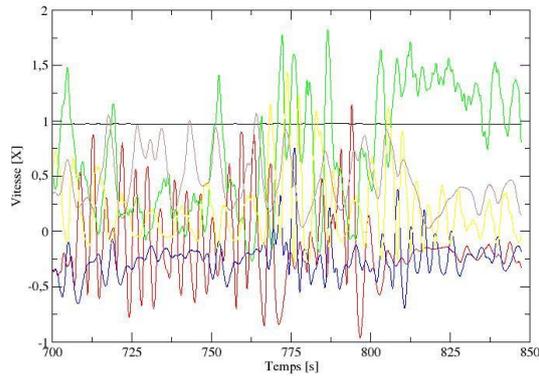
La figure 4.6 montre les différents champs de l'écoulement autour d'un cylindre pour l'étude numérique (LES) pour visualiser la différence entre les deux méthodes.



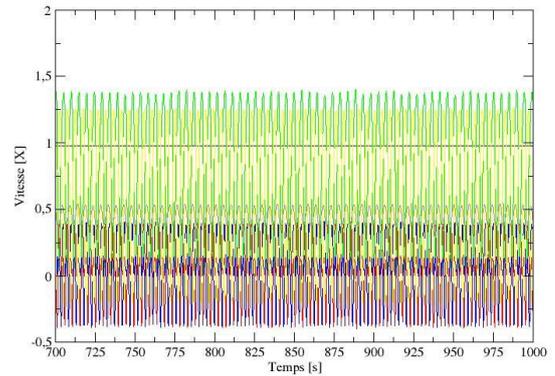
**Fig. 4.6 - Différents champs de l'écoulement de l'étude numérique LES [5]**

## 4.1.2 Cas de deux cylindres

Cas C1



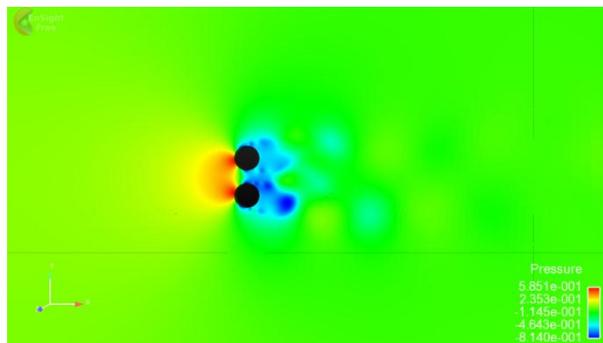
Cas D1



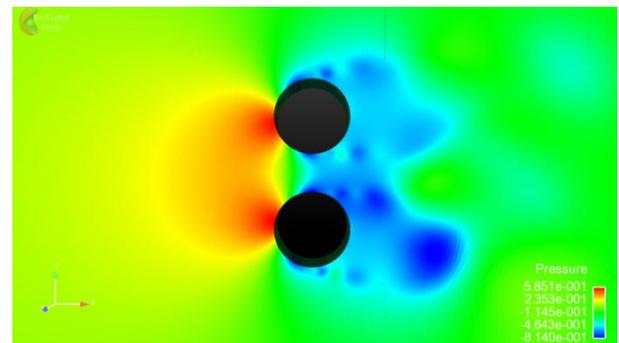
**Fig.4.7- Historique de la vitesse longitudinale capté par les sondes pour différents cas.**

La figure 4.7 représente l'historique de la vitesse longitudinale de deux cylindres. Pour le cas C1, on peut clairement voir que la perturbation est visible sur toutes les sondes. Ce changement se fait de façon non périodique et aléatoire. Cela est du à un phénomène physique qu'on expliquera par la suite. Sur la même figure on représente le cas de deux cylindres D1. Pour ce cas les perturbations sont périodiques.

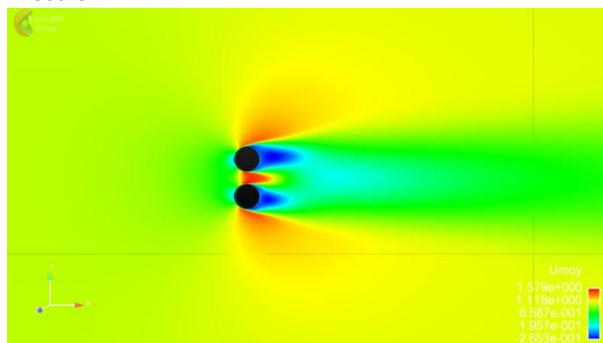
Les figures suivantes montrent les différents champs de l'écoulement pour le cas de deux cylindres côte à côte.



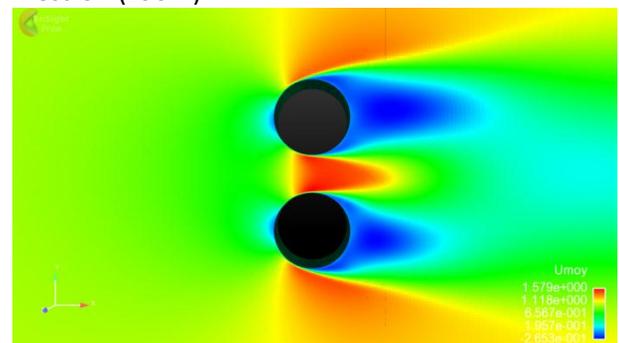
Pression



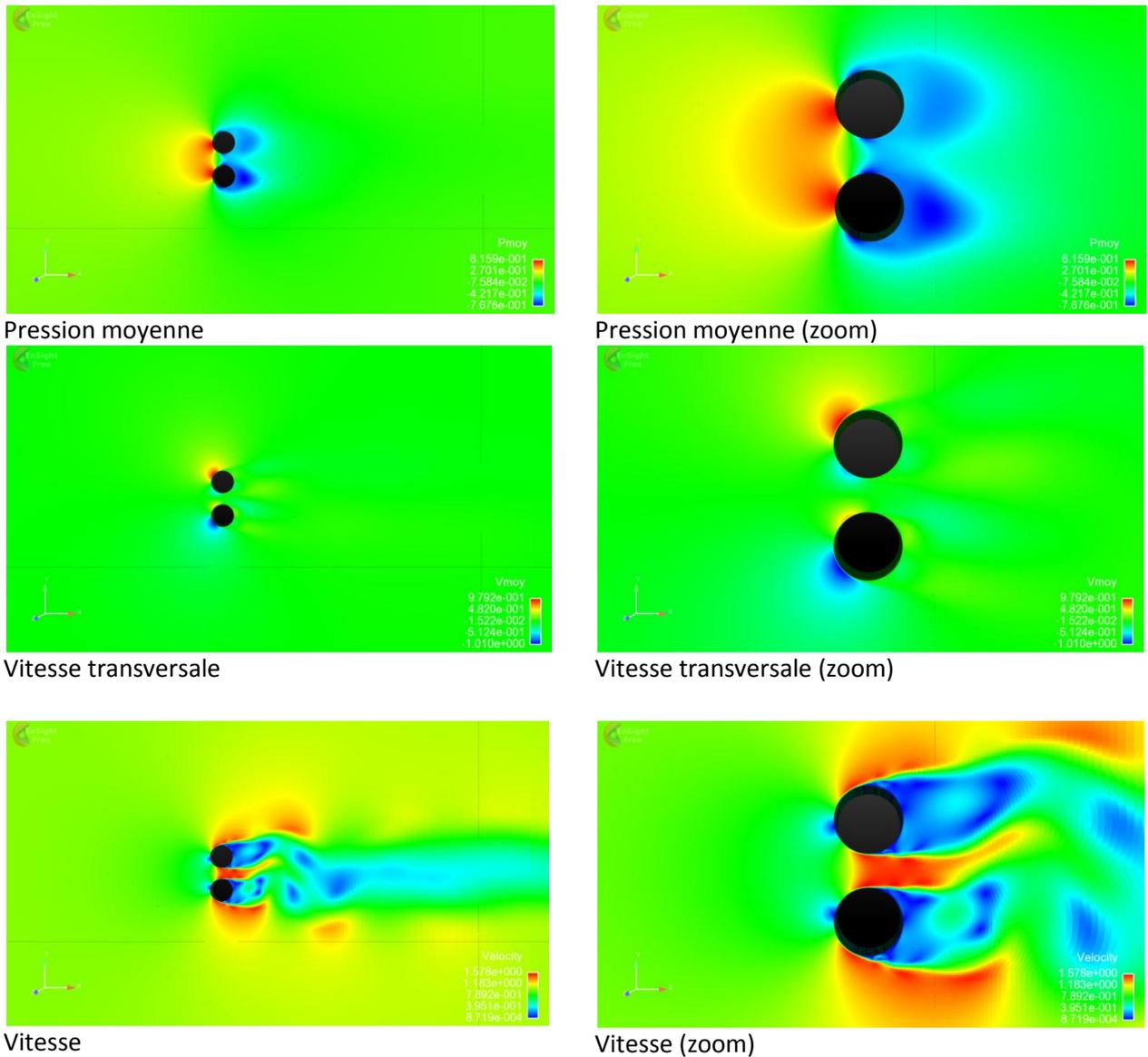
Pression (zoom)



Vitesse longitudinale

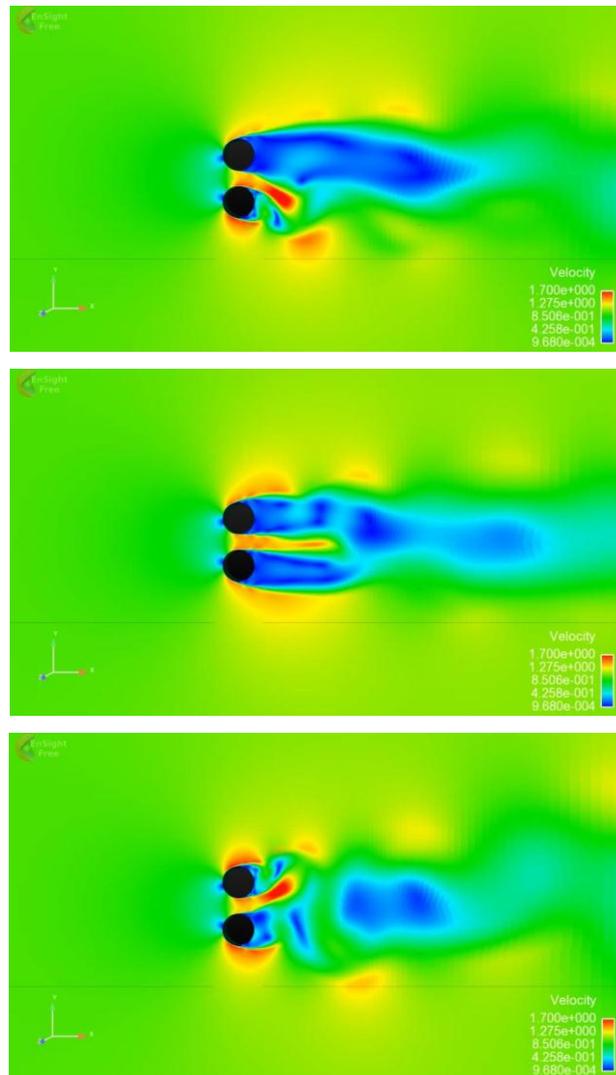


Vitesse longitudinale (zoom)



**Fig.4.8 - Les différents champs de l'écoulement pour le cas de deux cylindres côte à côte**

La figure 4.9 montre le phénomène physique appelé changement de mode (flip-over) qui se produit dans le cas d'écoulement autour de deux cylindres en côte à côte avec un espacement  $L/D=1.25$  à  $1.75$ , d'après la littérature. On peut voir clairement que pour notre cas avec espacement  $L/D = 1.5$  capte parfaitement ce phénomène de changement de mode, malgré l'utilisation de la méthode RANS, qui est considérée comme la méthode la moins précise par rapport aux méthodes expérimentales et numériques (LES et DNS).



**Fig.4.9 - Champs de vitesse instantané avec le phénomène de changement de mode**

### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats numériques de l'écoulement autour d'un seul cylindre et deux cylindres côte à côte en les comparant avec les résultats expérimentaux et numériques disponibles.

### **Conclusion générale**

Dans ce travail nous avons mené une étude numérique d'écoulements turbulents autour d'un et deux cylindres en côte à côte. L'objectif de ce travail est de connaître le comportement de ces écoulements et d'essayer d'expliquer les phénomènes physiques qui apparaissent dans ces configurations.

Pour notre étude on a utilisé la méthode RANS qui consiste à moyenner les équations Navier-Stokes, cela nous permet d'obtenir les différents champs instantanés et moyennés de l'écoulement. On a utilisé le code de calcul Code\_Saturne et le modèle de turbulence K-Omega SST pour réaliser cette étude.

D'après les résultats obtenus par la présente étude (RANS), on a remarqué que les champs de vitesses et des pressions montrent le même comportement déjà discuté dans la littérature. Concernant les profils de vitesse d'un cylindre pour certaines configurations, on remarque plus au moins, une concordance entre nos résultats et les autres données expérimentales et numériques. Pour le cas de deux cylindres en côte à côte, les résultats obtenus nous ont permis de détecter le phénomène physique appelé changement de mode (flip-over). Cette découverte n'était pas prévue au début des calculs en utilisant la méthode RANS, vu que cette méthode est considérée comme la moins précise par rapport aux autres méthodes numériques très poussées (LES et DNS).

## **Bibliographie**

- [1] Y. Zhou, H. J. Zhang and M. W. Yiu «The turbulent wake of two side-by-side circular cylinders »

- J. Fluid Mech. 458, 303 (2002).
- [2] L. Chen and J. Y. Tub, and G. H. Yeoh, «Numerical simulation of turbulent wake flows behind two side-by-side cylinders, » J. Fluids Struct. 18, 387 (2003).
- [3] Md. Mahbub Alam , Y. Zhou « Flow around two side-by-side closely spaced circular cylinders » J. Fluid and Structures 23 (2007) 799–805
- [4] J. Shao and C. Zhang, «Large eddy simulation of the flow past two side-by-side circular Cylinders » Int. J. Comp. Fluid. Dyn. 22(6), 393 (2008).
- [5] Y. Kahil and al. « Large eddy simulation of the flow around single and two side-by-side cylinders at subcritical Reynolds numbers». Physics of Fluids 23, l'universite paris 6 (2011).
- [6] Jitendra Thapa and al. «Three-dimensional simulations of flow past two circular cylinders in side-by-side arrangements at right and oblique attacks» Journal of Fluids and Structures (2015)
- [7] J.H. Pang and al. «Numerical simulation of the flow around two side-by-side circular cylindersby IVCBC vortex method». Ocean Engineering (2016 ).
- [8] Marco Carini and al. « Secondary Instability of the Flow Past Two Side-by-side Cylinders». Université de l'Italie (2016).
- [9] Yoann Jus, « Modélisation et simulation numérique de vibrations induites par écoulements autour d'obstacles cylindriques seuls ou en réseaux » Ecole doctorale Paris centre Case 188. (2011).
- [10] Mohamed, S. « Modélisation numérique d'un multi-jet turbulent libre. » Université Hassiba ben bouali, Chlef , (2009).
- [11] Thomas, J., « Modélisation et simulation des gaz de blow-by dans un décanteur automobile. » Mechanics of the fluids. Arts et Métiers ParisTech, French .( 2010)
- [12] Kahil, Y., « dépôt d'aérosol dans une conduite coudée a 90° pour un écoulement turbulent avec une approche lagrangien-RANS ». Université des Sciences et de la Technologie Mohammed Boudiaf, Oran, ALG. (2007).
- [13] Sagaut, P. « Introduction à la simulation des grandes échelles pour les écoulements incompressibles »
- [14] Wilcox, David C. «Turbulence Modeling for CFD». Second edition. Anaheim: DCW Industries, 1998. pp. 174 (1998)
- [15] Jones, W. P., and Launder, B. E. « The Prediction of Laminarization with a Two-Equation Model of Turbulence ». International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 15, 1972, pp. 301-314. (1972)
- [16] Launder, B. E., and Sharma, B. I. «Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc ». Letters in Heat and Mass Transfer, vol. 1, no. 2, pp. 131-138. (1974)
- [17] MATT CABLE, «An Evaluation of Turbulence Models for the Numerical Study of Forced and Natural Convective Flow in Atria». University Kingston, Ontario, Canada (2009)
- [18] Menter, F. R., Kuntz,M., Langtry, R., «Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model.Turbulence», Heat and Mass Transfer. ANSYS – CFX, 83714

- Otterfing, Germany; (2003).
- [19] Benhamadouche, S. «Modélisation de la turbulence pour un écoulement incompressible en RANS et en LES». Cours de Turbulence. EDF R&D/MFEE/I83 , (2010).
- [20] BOUKERMA Karima. « Etude de l'écoulement laminaire accompagne du transfert de chaleur dans une conduite rectangulaire présentant un changement de section (élargissement brusque) » l'université 20 aout55,Skikda,ALG. (2007).
- [21] KORIB Kamel, « Etude des écoulements autour des obstacles étude de simulation » Université Abou Bekr Belaid,TLEMCEN,ALG. (2012).
- [22] P. Parnaudeau, and al « Experimental and numerical studies of the flow over a circular cylinder at reynolds number 3900». Physics of Fluids, 20:085101, (2008).
- [23] « [www.mensaral.com/zip/2004\\_01\\_presentation\\_linux.pdf](http://www.mensaral.com/zip/2004_01_presentation_linux.pdf) ».
- [24] Nicolas, K., 2013.Introduction à GMSH. [www.ensta-paristech.fr/~kielbasi/docs/gmsh.pdf](http://www.ensta-paristech.fr/~kielbasi/docs/gmsh.pdf).  
Date de la dernièreconsultation du site : 23-Oct-2013.
- [25] « [hmf.enseiht.fr/travaux/.../presentation-de-code\\_saturne-et-de-salom](http://hmf.enseiht.fr/travaux/.../presentation-de-code_saturne-et-de-salom) ».
- [26] «<https://www.ensight.com>».
- [27] « <https://www.projet-plume.org/fiche/grace> ».
- [28] J. G. Wissink and W. Rodi , « Numerical study of the near wake of a circular cylinder». International Journal of Heat and Fluid Flow, 29:1060–1070, (2008).

Ce projet présente une étude numérique d'écoulement turbulent autour d'un cylindre circulaire et de deux cylindres côte à côte, Nous utilisons une technique de modélisation statistique d'équation de Reynold (RANS) et un modèle de turbulence k-oméga SST. L'objectif de cette étude est de comprendre le comportement de l'écoulement et d'expliquer les phénomènes physiques qui apparaissent dans certaines configurations. On utilise pour notre travail des logiciels gratuit sous Linux (open source). Parmi ces logiciels on trouve le mailleur gridmesh GMSH, le code de calcul Code\_Saturne, pour le post-traitement on a Grâce/Enight. et comparé les résultats obtenus avec les données numériques LES et DNS.

**Mots Clés :** changement de mode, modélisation, simulation, un cylindre, deux cylindres côte à côte

### ملخص

يقدم هذا المشروع دراسة عددية لتدفق مضطرب حول اسطوانة دائرية واثنين من الاسطوانات جنباً إلى جنب، ونحن نستخدم تقنية النمذجة الإحصائية لمعادلة رينولد (رانس) ونموذج الاضطراب k-oméga SST. والهدف من هذه الدراسة هو فهم سلوك تدفق وشرح الظواهر الفيزيائية التي تظهر في تكوينات معينة. نحن نستخدم البرمجيات الحرة تحت لينكس (المصدر المفتوح) لعملائنا. من بين هذه البرمجيات نجد le mailleur gridmesh GMSH، رمز حساب code\_Saturne، ومقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع البيانات الرقمية LES و DNS.

### Abstract

This project presents a numerical study of a turbulent flow around a circular cylinder and two cylinders side by side. We use a statistical modeling technique of Reynold's equation (RANS) and a k-omega SST turbulence model. The objective of this study is to understand the behavior of the flow and to explain the physical phenomena that appear in certain configurations. We use free software under Linux (open source) for our work. Among these softwares we find the gridmesh GMSH, code\_Saturne calculation code, for the post-processing one has Grace / Enight. and compared the results obtained with the digital data LES and DNS.

**Keywords:** change of mode. modeling, simulation, one cylinder, two cylinders side by side