

Visa du chef département l'Institut des
Sciences et Technologies

Signature:.....

Date:.....

Étude numérique d'écoulement turbulent autour d'un cylindre circulaire

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

Encadreur: Dr.KAHIL.Y

Signature:

Date:

Examineur: Dr.KHERRIS .S

Signature:

Date:

Réalisé par :

Étudiante : Aidoud Abd El kader

Signature :

Date :

Membres du jury

M .ZEBAR .M

Dr .KAHIL.Y

Dr. KHERRIS .S

MAA

MCB

MCA

Président

Encadreur

Examineur

Remerciement

Nous tiens tout d'abord à remercier chaleureusement notre encadreur Dr. Yacine KAHIL, pour nous avoir soutenus et guidés tout au long de ce mémoire. Nous le remercions particulièrement pour la confiance qu'il m'a accordée, pour ses conseils judicieux, sa rigueur scientifique et pour les conditions qu'il nous a su instaurer et qui ont contribué au succès de ce travail.

Nous tiens également à adresser mes remerciements aux membres du jury pour nous avoir fait l'honneur de passer notre travail en revue et d'avoir pris le temps de lire ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux êtres les plus chers de ma vie; mes parents qui n'a pas cessé de m'encourager pour donner le meilleur de moi-même. A mes très chers frères et sœurs, ainsi que à toute ma grande famille. A la mémoire de mon très cher amis, que Dieu le tout puissant accorde sa sainte miséricorde et l'accueille dans son vaste paradis. A toutes les enseignantes et enseignants qui ont contribué à ma formation, du seuil du primaire jusqu'à l'université. A tout le personnel du département des sciences & technologies. Je tiens à le dédier aussi à mes amis sans exception, et à tous ceux qui sèment le bonheur dans mon chemin.

ABDELKADER

SOMMAIRE

Introduction général	01
Chapitre 1.Introduction et étude bibliographique.....	02
Introduction.....	03
1.1Revue bibliographique.....	03
1.2 Objectifs de projet.....	06
1.3 Organisation du manuscrit.....	07
Conclusion	07
Chapitre 2 .Méthode numérique et modélisation de la turbulence	08
2.1 Introduction	09
2.1.1Les caractéristiques du phénomène	09
2.1.2Les deux points de vue sur la turbulence.....	09
2.1.3 La transition du laminaire au turbulent	10
2.1.4 Quelques notions sur les instabilités et les tourbillons.....	11
2.1.5 La cascade de Kolmogorov.....	11
2.2Simulation numérique des écoulements turbulents	12
2.2.1 équations à résoudre.....	12
2.2.2 choisir discrétisation.....	14
2.2.3 Une affaire de compromis.....	14
2.3 Les principales modélisations de la turbulence	15
2.3.1 La simulation numérique directe (DNS).....	15
2.3.2 La simulation des grandes échelles (LES).....	15
2.3.3 La modélisation des équations de Navier Stokes moyennées (RANS).....	16
Modèle k-ε standard.....	16
Modèles Turbulence SST K-Omega.....	18
2.4 Discrétisation spatiale.....	19
Conclusion.....	20
Chapitre 3. Validation du cas a un cylindre a faible nombre de Reynold	21
Introduction.....	22
3.1 Description du cas et d´détails des calculs.....	22
3.2 Présentation des logiciels du calcul	23
3.2.1 linux : Ubuntu.....	23
3.2.2 Gmsh.....	23
3.2.3 code de calcul <i>Code_Saturne</i>	24

3.2.4 Salomé.....	25
3.2.5 Grace.....	26
3.2.6 EnSight.....	27
3.3 Résolution Numérique.....	28
3.3.1 Caractéristique de poste de traitement	28
Conclusion	30
Chapitre 4. Résultats et Discussion	31
Introduction	32
4.1 Analyse et discussion des résultats	32
4.1.1 étude sensibilité de maillage.....	32
4.1.2 Analyse les graphes du cas étude (cas 2) et comparaison avec expérimentales publiées.....	34
Conclusion.....	38
Conclusion générale	39

Liste des figures

Fig. 3.1 – Domaine de calcul pour un cylindre circulaire, XY (vue latérale) et XZ	22
Fig. 3.2 – version linux	23
Fig. 3.3 – version Gmsh	24
Fig. 3.4 – version <i>Code_Saturne</i>	25
Fig. 3.5 – version Salomé	26
Fig. 3.6 – version Grace	27
Fig. 3.7 – création la géométrie Domaine de calcul pour un cylindre circulaire	28
Fig. 3.8 – génération du maillage - raffinement moyen	29
Fig. 3.9 – génération du maillage - raffiné	29
Fig. 4.1 – les Profils des vitesses moyenne en déférences cas pour X	33
Fig. 4.2 – Profils de vitesse moyenne pour différentes X/D positions dans la zone de sillage. ---- : LES , ° : EXP KAHIL . ♦ : Exp Lourenco et Shih [11],..... :Exp DNS WissinkèRodi [15]. (à Vitesse moyenne longitudinale (U/U_0)).	34
Fig. 4.3 – Profils de vitesse moyenne pour différentes X/D positions dans la zone de sillage ___ : LES , ° : EXP KAHIL . ♦ : Exp Lourenco et Shih [11],..... :Exp DNS WissinkèRodi [15]. (à Vitesse moyenne transversale (V/U_0)).	34
Fig. 4.4– Différents champs de l'écoulement cas 2	35
Fig. 4.5 – Différents champs de l'écoulement expérimentales publiées LES	37
Fig. 4.6– vecteurs de courant du champ de vitesse moyenne	38
Fig. 4.7 – Lignes de courant du champ de vitesse moyenne	38

Nomenclatures

C_p	coefficient de pression moyen	
C_{pbase}	coefficient de pression de base	
D	diamètre d'un cylindre	[m]
f	Fréquence	[hz]
f_z	fréquence dominante de lâché de tourbillons	
k	énergie turbulente	[m ² .s ⁻²]
L	longueur du cylindre	[m]
L_R	longueur de recirculation	[m]
L/D	distance adimensionnelle longitudinale entre les centres des cylindres	
P_0	pression de référence	[pa]
P	pression dynamique	[pa]
P/D	distance adimensionnelle entre les centres des cylindres	
Re	nombre de Reynolds basé sur la vitesse amont et le diamètre d'un cylindre (=U ₀ D/ν)	
Re_τ	nombre de Reynolds turbulent basé sur la vitesse de frottement a la paroi	
S	tenseur du taux de déformation	
St	nombre de Strouhal	(fD/U ₀)
t	Temps	[s]
T/D	distance adimensionnelle transversale entre les centres des cylindres	
U_0	vitesse de l'écoulements à l'entrée	[m.s ⁻¹]
u_i	composantes du vecteur vitesse	[m.s ⁻¹]
u_τ	vitesse de frottement à la paroi	[m.s ⁻¹]
U_R	vitesse de recirculation	[m.s ⁻¹]
$\overline{u'_i u'_j}$	composantes du tenseur de Reynold	[m ² .s ⁻²]
x_i	composante i d'un point	[m]
g_i	composante i de l'accélération de la pesanteur (gravité)	[m/s ²]

$\delta\rho$	variation relative de la masse volumique (induisant la force de flottabilité), [pa]	
	$\delta\rho = \rho - \rho_0$	
R_{ij}	composante du tenseur de Reynolds	[m ² .s ⁻²]

Symboles grecs

α	angle d'incidence de l'écoulement	
δ_v	échelle de longueur visqueuse	
ξ	dissipation turbulente	[m ² .s ⁻³]
η	échelle de longueur de Kolmogorov	[m]
θ_{sep}	angle du point de séparation	
θ_{stag}	angle du point de stagnation	
ν	viscosité cinématique	[m ² .s ⁻¹]
ν_t	viscosité cinématique de sous maille	[m ² .s ⁻¹]
ρ	masse volumique	[kg.m ⁻³]
τ_{ij}	composantes du tenseur des contraintes visqueuses	
Δ	taille du filtre implicite	
Δt	pas de temps	
μ	viscosité dynamique	[kg.m ⁻¹ .s ⁻¹]
∇	divergence	[m ⁻¹]
u	vecteur vitesse	[m.s ⁻¹]
u, v, w	fluctuation du vecteur vitesse	[m.s ⁻¹]
ω	Verticité = $\nabla \times u$	[s ⁻¹]
$\partial t, \partial x$	dérivée partielle	[s ⁻¹ , m ⁻¹]
$\Delta = \nabla^2$	laplacien	[m ⁻²]
$uu = u_i u_j$	produit tensoriel	
$SS = S_{ij} S_{ji}$	produit tensoriel contracté	
∇u	tenseur des gradients de vitesse	[s ⁻¹]
$E_{(\kappa)}$	spectre énergétique en module	[m ² .s ⁻²]
z	direction normale aux surfaces libres	[m]

x, y	directions tangentielles aux surfaces libres	[m]
u_i	notation indicielle des fluctuations de vitesse	m.s^{-1}
ξ_{ij}	pseudo-dissipation	$[\text{m}^2.\text{s}^{-3}]$

Indices

dyn dynamique

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

CFL Courant Friedrich Levy

CPU Central Processing Unit

CAE computer aided engineering

CSM Computational Structural Mechanics

Introduction générale

La compréhension des écoulements a connu un essor gigantesque au cours du siècle qui est précédé s'achevé. En effet, l'homme a d'abord brillamment appliqué les outils du raisonnement scientifique à la compréhension des phénomènes complexes qui caractérisent les écoulements des fluides, avec des précurseurs comme STROUHAL, REYNOLDS et STOKES au XIX^{ème} siècle. Ceux-ci ont été suivis au début du XX^{ème} siècle par des scientifiques intéressés par des applications utiles à l'avancée de l'ère industrielle, comme KARMAN [1]. Pour des applications à vocation moins pacifiques au milieu du siècle. L'apparition de l'ordinateur a révolutionné cette compréhension en apportant la possibilité de "modéliser", c'est-à-dire de regarder les écoulements à travers la loupe des modèles issus des théories. Ceci a permis aux méthodes expérimentales de se développer en se spécialisant sur les points en marge des hypothèses servant de base aux modèles. Ce triple regard théorie-simulation-expérience, et le dialogue qui s'est instauré entre les trois, a ainsi autorisé l'appréhension d'un problème d'une complexité jamais atteinte celui de la turbulence. La compréhension progressive des phénomènes associés à la turbulence a remis en question un certain nombre d'hypothèses couramment faites, aussi bien en mécanique des fluides numérique ou expérimentale, qu'en statistique, biologie, météorologie, ou plus directement encore par son association à l'étude des phénomènes dits "chaotiques", créant ainsi des ponts à double-sens avec un grand nombre d'autres disciplines scientifiques. Alors que l'être humain est arrivé à un niveau assez élevé de compréhension de ces phénomènes, dont toutefois de nombreux aspects lui échappent encore, il se rappelle alors son désir de contrôler son environnement, et se prend à rêver de contrôler ces écoulements à son avantage. Si l'idée du contrôle des écoulements n'est pas nouvelle, celle-ci était jusqu'à une date récente restée à un stade d'évolution assez grossier. Les bribes de connaissance relatives à la dynamique des écoulements accumulées au cours de cette dernière moitié de siècle permettent d'envisager des méthodes de contrôle beaucoup plus sophistiquées et surtout plus efficaces. C'est une voie dans laquelle se sont engouffrés ensemble les théoriciens, les numériciens et les expérimentateurs. C'est dans cette voie que s'inscrit ce projet. Le domaine du contrôle des écoulements étant au moins aussi vaste que le nombre d'écoulements différents à contrôler.

Chapitre 1

Introduction et étude bibliographique

Introduction

L'étude d'écoulement autour d'un cylindre est un problème classique de la mécanique des fluides. Dans le cas incompressible, les études autant numériques qu'expérimentales sont très nombreuses. On présente aussi quelques travaux qui se sont intéressés à l'écoulement autour d'un cylindre

1.1 Revue bibliographique

Les écoulements autour d'un cylindre circulaire font l'objet d'un large volume d'investigations expérimentales et numériques, comme reflété par

En 1987 Norberg [2] fait une Effets du nombre de Reynolds et de faible intensité flux sans turbulence sur l'écoulement autour d'un cylindre circulaire. il fait une large classification du comportement de l'écoulement autour d'un cylindre isolé est donnée et cela pour différents régimes en fonction du nombre de Reynolds. L'écoulement autour d'un cylindre peut être classifié comme : sous critique, critique et super - critique. Pour des petits nombres de Reynolds, l'écoulement est bidimensionnel et comprend une zone de recirculation stable derrière le cylindre. Lorsque le nombre de Reynolds augmente, ces zones de recirculations deviennent instables et les lâchés tourbillonnaires commencent apparaitre (appelés allée de Von Karman).

En 1996 Williamson [3], fait une étude dynamique des vortex dans le sillage du cylindre. An Annual Review de Mechanics Fluide .il est fait structures à partir de $Re \approx 49$ A un nombre de Reynolds proche de 194, l'écoulement dans la zone de sillage devient tridimensionnel. Quand le nombre de Reynolds devient plus grand, l'instabilité change avec l'apparition des petites structures dans le sillage Le nombre de Reynolds sous-critique allant de 300 à 2.105 est d'intérêt particulier pour les investigateurs d'échelles cohérentes et le transport turbulent, car c'est dans cette gamme que la transition à la turbulence se fait naturellement. Cet écoulement est caractérisé par le fait que la couche limite tout au long de la surface amont du cylindre est entièrement laminaire. Juste derrière en aval du cylindre, deux couches de cisaillement bidimensionnelles laminares peuvent être trouvées, ce qui correspond à la séparation des couches limites le long de la surface haute et basse du cylindre. Quelque part en aval du point de séparation, les couches libres de cisaillement qui s'enroulent en alternance, deviennent tridimensionnelles et subissent une transition vers la turbulence. Comme résultat, une allée tourbillonnaire turbulente est formée derrière la zone de transition. Pour les données expérimentales dans la région proche du sillage et pour un nombre de Reynolds de 3900

En 1993 L. M. Lourenco et C. Shih [4] . fait une Caractéristiques du plan turbulent sillage proche d'un cylindre circulaire, une étude de vélocimétrie par images de particules .ils ont fait études expérimentales et numériques réalisées pour le cas du cylindre circulaire, on cite les suivantes qui sont utilisées pour comparaison dans le présent travail : Parnaudeau qui ont fait leur étude pour $Re = 3900$, expérimentalement (fil chaud et PIV) et numériquement (LES). L'étude est

concentrée sur les statistiques de la turbulence ainsi que sur les spectres d'énergie dans la région du sillage jusqu' à 10 fois le diamètre en aval du cylindre. Ce travail reste à ce jour le plus précis pour ce type d'écoulement

En 2007 Md. Mahbubar Rahman et al [5] .Fai une enquête numérique de instable flow passé a cylindre circulaire utilisation 2-d méthode de volume fini. Ils ont fait Les caractéristiques dynamiques des champs de pression et de vitesse instationnaire laminaires et turbulentes sillages incompressibles derrière un cylindre circulaire sont étudié numériquement et analysé physiquement. Les équations, écrites dans la formulation de pression de vitesse sont résolus en utilisant la méthode des volumes finis 2D. le mécanisme initial pour la formation de tourbillons est démontrée et les forces du corps sont instables évalué. L'écoulement turbulent pour $Re = 1000$ & 3900 sont simulés en utilisant $k-\epsilon$ standard, modèles SST turbulence réalisable et $k-\omega$ $k-\epsilon$. Les capacités de ceux-ci modèles de turbulence pour calculer portance et la traînée coefficients sont également vérifiées. Le fréquences des traînées et de portance oscillations obtenues théoriquement concordent bien avec la Résultats expérimentaux. Les coefficients de pression et de traînée pour différents Reynolds numéros ont également été calculés et comparés avec expérimentale et autre numérique résultats. En raison de la convergence plus rapide, 2-D méthode des volumes finis se trouve très prospective pour un écoulement turbulent ainsi que le flux laminaire

En 2008 J.G. Wissink et W. Rodi [6]fait une Etude numérique du sillage proche d'un cylindre circulaire .ils ont fait Une série de simulations numériques directes (DNS) de l'écoulement incompressible autour d'un cylindre circulaire à $Re = 3300$ - sur la base de la vitesse de champ lointain et le diamètre du cylindre D - ont été effectuées. Après prenant un décalage dans la direction de compte par fractions, les résultats ont été jugés en bon accord avec les données expérimentales obtenues à un peu plus élevé nombre de Reynolds $Re = 3900$. L'augmentation de la taille de l'envergure du domaine de calcul de $l_z = 4D-8D$ a été constaté qu'une incidence marginale sur les profils des statistiques de la turbulence dans le sillage du cylindre, bien que, même dans la simulation avec $l_z = 8D$ l'autocorrélation d'envergure u ne converge pas complètement à zéro vers les côtés du calcul domaine. Les statistiques d'élimination moyenne ont montré l'existence de couches de cisaillement immédiatement en aval du cylindre, qui trouve son origine dans les couches limites le long de la surface supérieure et inférieure du cylindre. Comme les couches de cisaillement retroussées, une production importante de l'énergie cinétique de turbulence a été observée à l'intérieur des rouleaux de flux de recirculation. A $x/d = 6$ instantanés du champ d'écoulement ont été recueillies. À cet emplacement, tourbillons individuels - jeter de la couche de cisaillement supérieure et inférieure, respectivement, derrière le cylindre – pourrait encore être identifié. Les données de sillage recueillies seront utilisées pour étudier l'influence des grandes structures méandres cohérentes sur la promotion du transfert de chaleur laminaire le long d'un corps situé en aval du cylindre

En 2011Y. Kahil et all [7].fait une Simulation des grandes échelles de l'écoulement autour unique et deux side-by-side cylindres à des nombres de Reynolds subcritique. Ils ont fait L'écoulement autour des cylindres infinis simples et deux side-by-side est numériquement modélisé à l'aide grande simulation dynamique Smagorinsky de Foucault (LES). Pour le seul cylindre, le nombre de Reynolds basé sur le diamètre et la vitesse du courant libre est 3900. Une étude de sensibilité complète était réalisée sur la base de la longueur d'extrusion dans le sens de l'envergure sage, le raffinement de la grille sur le mur ,le système de convection, et l'échelle sous-grille (SGS) modèle. On a trouvé que la solution moyenne est non influencée par la longueur d'extrusion au-delà de 4 diamètres ou de 1% jusqu'à remontage automatique. Cependant, Coarsening le maillage dans la paroi direction normale ou éteindre le modèle à l'échelle sous-réseau a conduit à des effets drastiques sur la longueur de recirculation et sur le champ de vitesse sous-jacente. Le côté par côté deux cylindres ont été testés pour une gamme de pas de rapports de diamètre ($T/D=1.0$, $0.125 \leq T/D \leq 5.0$) à un nombre de Reynolds de 3000. Pour le terrain intermédiaire à des rapports de diamètre ($1.25 \leq T/D \leq 1.75$),des fréquences multiples délestage ont été détectés avec une déviation d'écoulement de sillage biaisée. En outre, cette déviation d'écoulement biaisé a été jugée bistables, à savoir, il change la direction (feuilletées) par intermittence d'un côté à l'autre. Ce problème a été trouvée être compatible avec rapportée des mesures expérimentales. Au cours de la bascule d'un mode stable à l'autre, l'intermittente écart de tourbillons est révélée être plus forte que pour un mode stable, en phase tourbillons. Toutefois, pour les cas de ratio de hauteur plus élevée ($T/D \geq 2$), un sillage symétrique comportement avec tourbillons anti-phase a été observée

En 2012 Dmitry A. Lysenko, Ivar S. Ertesvåg, Kjell Erik Rian[8] .fait une Grand-Eddy Simulation de l'écoulement sur un cylindre circulaire au nombre de Reynolds 3900 Utilisation de la Boîte à outils OpenFOAM-Décembre 2012. Ils ont fait Le débit sur un cylindre circulaire à nombre de Reynolds 3900 et nombre de Mach 0,2 a été prédit numériquement en utilisant la technique de simulation des grandes échelles. Les calculs ont été effectués avec un type O grille curviligne de la taille de 300 x 300 x 64. Les simulations numériques ont été réalisées en utilisant une méthode de volumes finis de second ordre avec des systèmes central de différence pour le rapprochement des termes convectifs. Un Smagorinsky classique et un k-équation dynamique des modèles à l'échelle sous-grille viscosité de Foucault ont été appliquées. L'intervalle de temps d'intégration pour l'échantillonnage des données a été étendu jusqu'à 150 vortex périodes excréation dans le but d'obtenir un champ d'écoulement moyen totalement convergé. Les résultats numériques présents se sont révélés être en bon accord avec les données expérimentales existantes et grandes échelles des résultats de simulation obtenus précédemment. Cela donne une indication sur la pertinence et la précision de la technique de simulation des grandes échelles sélectionnée mis en œuvre dans la boîte à outils OpenFOAM

En 2015 B. N. Rajani et al [9] .fait une LES des flux circulaire Cylindre à $Re = 3900$ passé .ils ont fait Transitionnel flux passé un cylindre circulaire dans le régime subcritique inférieur ($Re = 3900$) a été analysée en utilisant la simulation des grandes échelles (LES) couplé à Smagorinsky et modèles à l'échelle du réseau de sous dynamiques. Ces simulations ont été effectuées au moyen d'un multibloc parallèle volume fini structuré code qui est basé sur l'algorithme SIMPLE. Les prédictions sont validées par rapport détaillées de mesure données pour moyenne, ainsi que des quantités de turbulence. La prédiction présente LES, en général d'accord raisonnablement bien avec les données de mesure dans la région proche de sillage, mais dévie de la mesure données dans le sillage loin région qui peut être due à la résolution grossière de la grille dans cette région. L'influence du modèle SGS sur les quantités d'écoulement moyennes, ainsi que sur les structures d'écoulement sont également discuté.

En 2016 C.G. Mingham et al [10].fait une simulation de Foucault Détaché de l'écoulement turbulent autour de la place et circulaire. Ils ont fait cylindres on Cartes iancutcells cylindres carrés et circulaires dans les écoulements turbulents en trois dimensions sont étudiées numériquement en utilisant les LES et des modèles de turbulence DES. Un but de la présente étude est de mettre en œuvre les turbulences LES et DES modèles dans une méthode de volumes finis centrés sur les mailles (FVM) développé pour résoudre les équations de Navier-Stokes sur les cellules cartésiennes coupées. L'approche de la cellule de coupe cartésienne est connu pour être robuste pour des problèmes dans géométriquement domaines complexes avec des limites fixes ou mobiles. Aux fins de la validation de la modèle numérique présente, le flux de courant passé cylindres carrés et circulaires fixes à modérée Reynolds numéros est testé en premier. La comparaison des résultats calculés avec des données expérimentales indique que le DES les modèles sont supérieurs aux modèles ERP et RANS classiques. Le deuxième but de la présente étude est de évaluer les performances des différents modèles de turbulence RANS DES fondées. Au moyen de la comparaison DES résultats obtenus avec l'équation 0 longueur de mélange, une équation S-A et 2-k- ω équation basée modèles pour l'écoulement sur le même cylindre circulaire, certaines recommandations sont proposées. Selon la présente étude, en termes de précision de la 1-équation S-Un modèle basé DES est très prometteur. À côté de cela, si le coût de calcul est la principale préoccupation, le modèle basé DES 0-équation de mélange longueur pourrait être une option idéale, la réalisation d'un bon équilibre entre la précision et l'efficacité

1.2 Objectifs de projet

Parmi les nombreux approches de la turbulence des fluides nous allons étudier celles qui donnent lieu à des méthodes de prédétermination effectives des écoulements turbulents cisailés par un calcul numérique, méthodes qui pouvant permettre l'étude des écoulements en situation réelle . En absence de théorie prédictive générale des phénomènes turbulents, les approches pratiques font appel à des méthodes de modélisation et de simulation. Toutefois, avant de traiter des

configurations avec plusieurs tubes, il faut mettre l'accent sur des configurations plus simples telles que l'écoulement autour d'un cylindre. C'est ce qu'on a réalisé dans ce travail qui est orienté vers la modélisation, utilisant les modèles RANS

Le but principal de notre étude concerne le comportement des écoulements autour de cylindre

1.3 Organisation du manuscrit

Dans le présent travail, plusieurs chapitres sont présents. En commence par une introduction générale et une revue bibliographie puis l'objective du projet dans le premier chapitre. Une vue d'ensemble du modèle de turbulence utilisé ainsi que l'aspect numérique dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre présente l'étude du cas d'un écoulement autour d'un seul cylindre. et théorique du code de calcul Code _Saturne sont présentes et les déférence logiciels Utilisé dans le calcul. Nous présenterons tout d'abord une description du cas et nous finissons par une présentation des résultats et leur discussion dans le quatrième chapitre. Enfin, nous terminerons sur une conclusion générale ainsi que des perspectives et recommandations pour les futures recherches.

Conclusion

L'ensemble des généralités de l'étude bibliographie nous a permis d'avoir la bonne compréhension d écoulements autour d'un cylindre tels que l'historique et mode de classification, afin d'assurer une grande précision et la méthodologie correct pour aborder ce type d'écoulement et d'obtenir des résultats optimal

Chapitre: 02

Méthode numérique et modélisation de la turbulence

2.1 Introduction

La turbulence est un phénomène présent de manière très facilement visible dans la nature :

- dans l'air : les affales de vent, les mini-tornades dans le désert, le panache de fumée des grandes cheminées, turbulence atmosphérique (tourbillons de taille >1000 km)...
- dans la terre l'espace : l'atmosphère externe de Jupiter

Il est également très présent dans les écoulements industriels :

- dans les voitures, des camions, dans les moteurs , pompes

2.1.1 Les caractéristiques du phénomène

La turbulence désigne l'état de l'écoulement d'un fluide, liquide ou gaz, dans lequel la vitesse présente en tout point un caractère tourbillonnaire : tourbillons dont la taille, la localisation et l'orientation varient constamment. Les écoulements turbulents se caractérisent donc par une apparence très désordonnée, un comportement difficilement prévisible et l'existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles. De tels écoulements apparaissent lorsque la source d'énergie cinétique qui met le fluide en mouvement est relativement intense devant les forces de viscosité que le fluide oppose pour se déplacer. A l'inverse, on appelle laminaire le caractère d'un écoulement régulier. La découverte et l'étude de la turbulence est très ancienne, elle a été faite par exemple par Léonard de Vinci¹. Le comportement complexe des écoulements turbulents est la plupart du temps abordé par la voie statistique. On peut ainsi considérer que l'étude de la turbulence fait partie de la physique statistique. Pour traduire le fait que, dans un écoulement, les forces d'inertie l'emportent sur les forces de viscosité, un nombre de Reynolds convenablement choisi doit être supérieur à un certain seuil. Ce seuil varie en fonction de l'application. Pour l'étude de la turbulence en milieu naturel, il est préférable d'utiliser le nombre de Richardson plutôt que celui de Reynolds, car ce dernier considère la densité du fluide comme constante, ce qui n'est pas vrai dans le cas des écoulements compressibles. Une propriété classiquement mise en avant d'un écoulement turbulent réside dans un processus appelé cascade d'énergie : la division des grands tourbillons en tourbillons plus petits permet un transfert d'énergie des grandes échelles vers les petites échelles. Ce processus est limité par l'effet de la dissipation moléculaire, qui empêche les variations de vitesse trop importantes. En pratique, ce transfert d'énergie n'est pas à sens unique, le phénomène d'appariement tourbillonnaire (en anglais *backscatter*) permettant le transfert ponctuel de petites structures tourbillonnaires (qui fusionnent) vers une ou plusieurs structures plus grandes.

2.1.2 Les deux points de vue sur la turbulence

Certaines grandeurs macroscopiques sont bien reproductibles. Par exemple :

- traînée et portance d'une voiture dans une soufflerie donnée
- débit d'une conduite à haut Reynolds
- puissance d'un moteur à combustion
- température maximale des disques de frein

- durée de persistance du sillage d'un avion de ligne
- portance et traînée d'un avion

Les scientifiques ont alors deux points de vue possibles :

- soit chercher à moyenniser directement la turbulence, à lisser le phénomène : c'est le point de vue statistique. On cherche uniquement les grandeurs moyennes, et l'énergie cinétique turbulente moyenne. C'est une vision "figée" ou "rationnelle" de la turbulence, souvent celle des Numériciens.
- soit chercher à extraire la cohérence dans la turbulence : c'est le point de vue des "structures cohérentes". On cherche alors l'évolution des structures qui persistent au milieu du chaos, celles qui vont déterminer la physique de l'écoulement. C'est une vision instationnaire, fluctuante et plus expérimentaliste de la turbulence.

2.1.3 La transition du laminaire au turbulent

Le nombre de Reynolds a été introduit par Osborne Reynolds en 1883. Il compare les termes de convection (non linéaires) aux termes de dissipation visqueus

$$Re = \frac{UL}{\nu} = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (01)$$

Au fur et à mesure où le nombre de Reynolds augmente, on observe un changement de topologie de l'écoulement qui correspond à la transition laminaire / turbulent. Le nombre de Reynolds critique Re_c correspond à ce passage, il est en général de l'ordre de 1000. Il prend des valeurs différentes selon le type d'écoulement. Quand $Re \ll 1$ les termes non linéaires (la convection) sont masqués par la diffusion visqueuse, les équations se rapprochent donc d'équations linéaires. Quand $Re \gg 1$, les termes non linéaires deviennent prépondérants, et l'approximation linéaire n'est plus possible.

- pour un écoulement de Poiseuille (écoulement dans un tube) (1841), au-delà de $Re = 2000$, les quantités ne dépendent plus du nombre de Reynolds. Le frottement est proportionnel à U^2 au lieu de $\mu U/D$ dans le cas laminaire.
- pour un écoulement de Couette (écoulement entre deux plans infinis) : $Re_c = 1000$
- pour une couche limite sur plaque plane, on utilise le nombre de Reynolds basé sur l'épaisseur de couche limite δ ,

$$Re = U\delta/\nu \quad (02)$$

. Pour $Re_\delta < 520$, la couche limite se développe suivant un profil de Blasius en $\delta = \sqrt{x}$. Pour $520 < Re_\delta < 2000$ [11], on a une zone de transition dans laquelle se développent des ondes dites de Tollmien-Schlichting. Au-delà, des petites échelles apparaissent et on parle alors de couche limite pleinement développée. Le nombre de Reynolds correspondant basé sur la distance x depuis le

démarrage de la couche limite est de $Re_x = 106$ environ. Dans un écoulement d'air à $10m/s$, la couche limite devient pleinement turbulente à environ $1m$ du bord d'attaque.

- pour une couche de mélange (écoulement qui résulte du mélange de deux fluides injectés à deux vitesses différentes), le nombre de Reynolds critique basé sur la vitesse moyenne $(U_2-U_1)/2$ et sur l'épaisseur de couche de mélange $\delta(x)$ est $Re_x = 2500$ environ [11].

2.1.4 Quelques notions sur les instabilités et les tourbillons

Le nombre de Strouhal (1870) est le nombre principal à connaître pour l'étude des structures cohérentes dans un écoulement turbulent. Il représente la fréquence principale de l'écoulement, rendue sans dimension par la dimension D de l'obstacle et par la vitesse de l'écoulement U_0 :

$$St = \frac{fU_0}{D} \quad (03)$$

C'est ce nombre qui est regardé en premier pour caractériser un lâcher de tourbillons ou un phénomène périodique ayant lieu dans un écoulement turbulent. Vous trouverez ici un aperçu de quelques phénomènes qui apparaissent de manière récurrente dans les écoulements turbulents, et qui sont étudiés avec minutie pour la compréhension de la physique de l'écoulement[12].

- les spirales de Kelvin-Helmholtz : dans des couches de mélange ou dans les couches cisillées. Les tourbillons grossissent en s'éloignant et s'apparient deux par deux
- l'allée de Van Karman (1911) : en aval d'un cylindre à section circulaire ou à section carrée
- les tourbillons longitudinaux : les tourbillons 2D (comme des spaghettis crus) se déstabilisent, en s'éloignant de l'obstacle, dans la 3ème direction comme des serpents, et se rapprochent les uns des autres par endroits. A ces endroits, il se forme des plus petits tourbillons dans le sens de l'écoulement (le sens longitudinal), qui forment des liens entre les tourbillons principaux.
- les tourbillons en épingle à cheveux : il s'agit de structures caractéristiques de la couche limite pleinement développée, ils se détachent de la paroi en se relevant de plus en plus à mesure que la couche limite se développe.

2.1.5 La cascade de Kolmogorov

A l'opposé de cette observation des structures cohérentes des écoulements turbulents, il existe une théorie qui a contribué de façon majeure dans la compréhension de la turbulence : la théorie de Kolmogorov (1941). Elle repose sur une vision "statistique" de la turbulence. Elle dit que les tourbillons dans l'écoulement ont une taille comprise entre les deux taille limites suivantes

- la plus grande échelle de l'écoulement L (imposée par la géométrie de l'écoulement, par exemple typiquement le diamètre d'un cylindre, le diamètre d'une cheminée, ou encore la hauteur d'une voiture),
- la plus petite échelle de l'écoulement η : imposée par la viscosité du fluide ; cette échelle est appelée échelle de Kolmogorov, ou échelle de dissipation visqueuse. L'ordre de grandeur entre L et η est le suivant :

$$\frac{L}{\eta} = Re^{9/4} \quad (04)$$

La théorie de la "cascade" énergétique prédit que les tourbillons reçoivent de l'énergie des échelles plus grandes qu'eux, et la transmettent ensuite aux échelles plus petites qu'eux, et ainsi de suite jusqu'à la plus petite échelle présente dans l'écoulement, l'échelle η . On parle de production d'énergie lorsque les grosses structures sont générées - par un décollement par exemple - et de dissipation d'énergie lorsque les tourbillons disparaissent complètement en aval de l'obstacle. Lorsque la production d'énergie est égale à la dissipation d'énergie, on parle de turbulence "en équilibre"[13].

2.2 Simulation numérique des écoulements turbulents Avant d'entreprendre une simulation numérique des écoulements turbulents, il faut tâcher de répondre aux questions suivantes :

Quelles équations résoudre ? quelle discrétisation utiliser ?

Quel modèle de turbulence choisir ?

2.2.1 Équations à résoudre

Les équations aux dérivées partielles linéaires du second ordre peuvent se regrouper en trois catégories en fonction du signe et de la valeur des coefficients présents devant les dérivées d'ordre.

On symbolise l'équation de la façon suivante :

$$a_{ij}(x) \frac{\partial^2 f}{\partial x_i \partial x_j} + \sum b_j(x) \frac{\partial f}{\partial x_j} + c(x)f + d(x) = 0 \quad (05)$$

Équation de Navier-Stokes pour un fluide Newtonien incompressible et faiblement dilatable (hypothèse de Boussinesq)[14]

•Équation de quantité de mouvement (QDM)

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i \delta \rho + \mu \Delta u_i \quad (06)$$

•Équation de continuité

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0 \quad (07)$$

On applique la moyenne à la QDM

$$\frac{\partial \overline{\rho u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{\rho u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + g_i \delta \overline{\rho} + \mu \Delta \overline{u_i} \quad (08)$$

Pour la simplicité, on suppose ρ constant

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u_i u_j}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{p}}{\partial x_i} + \nu \Delta \overline{u_j} \quad (09)$$

On pose (le tenseur de Reynolds)

$$R_{ij} = \overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (v S_{ij} - R_{ij}) \quad (11)$$

$$\text{On peut aussi écrire: } \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (v S_{ij} - R_{ij}) \quad (12)$$

Avec (le tenseur du taux de déformation):

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

Les valeurs propres de la matrice des a_{ij} sont notées λ_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 : [15]

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) \quad (15)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) \quad (16)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (17)$$

On distingue trois types d'équations en fonctions des signes des valeurs propres λ_i : les équations elliptiques, hyperboliques et paraboliques.

- les équations elliptiques : toutes les λ_i sont du même signe. Exemple : équation de Laplace

$$\nabla^2 T = 0 \quad (18)$$

- les équations hyperboliques : une valeur propre est du signe opposé à toutes les autres. Exemple : équation des ondes,

$$\left(\frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} - C_0^2 \nabla^2 p' \right) = 0 \quad (19)$$

- les équations paraboliques : une valeur propre est nulle, toutes les autres sont du même signe. Exemple : équation de la diffusion, $\partial T / \partial t = a \nabla^2 T$ [16].

Les équations de Navier Stokes sont donc de type différent selon les cas :

- en instationnaire : elles sont paraboliques

- en stationnaire : elles sont elliptiques

- à Reynolds infini (Euler) : elles sont hyperboliques

- en compressible supersonique : elles sont hyperboliques

Les outils numériques (schémas numériques temporels et/ou spatiaux, type de discrétisation) pour résoudre chaque type d'équation sont très différents. Il est donc nécessaire de choisir le code de calcul en fonction du type d'équation à résoudre.

2.2.2 choisir discrétisation

Il existe trois principaux types de discrétisation d'un maillage en mécanique des fluides.

- les différences finies (18ème siècle) : elles fonctionnent bien sur des maillages réguliers, et permettent d'atteindre des précisions d'ordre élevé ; elles ne permettent pas de s'assurer que les flux intégraux sont conservés, et ne permettent pas de traiter des géométries complexes.
- les volumes finis : on utilise la forme intégrale des équations sur chaque volume élémentaire. Cela garantit donc la conservation des flux. Cela permet de traiter des géométries complexes mais il est plus difficile d'augmenter l'ordre des schémas
- les éléments finis : on introduit une fonction test (un polynôme d'ordre faible), on intègre les équations et on minimise les résidus. Cela permet de traiter des géométries complexes (maillages composés de tétraèdres), et la validité mathématique des équations est bien démontrée.

2.2.3 Une affaire de compromis

La simulation des écoulements turbulents est donc un compromis entre de nombreux éléments

- le choix du modèle de turbulence
- la complexité de la géométrie
- le délai d'obtention de la solution
- les contraintes numériques (schémas et maillages)
- la précision des schémas
- le coût de stockage des données
- le temps de calcul
- la stabilité du calcul...etc.

En fonction des données recherchées, de l'enjeu du calcul et du temps dont on dispose pour faire le calcul, on est obligé de faire de nombreux choix et des hypothèses simplificatrices :

- géométrie simplifiée plutôt que complète (exemple : joints de portières...)
- résolution de l'écoulement moyen plutôt qu'instationnaire.
- conditions aux limites simplifiées plutôt que réelles
- choix d'un modèle de turbulence plus ou moins précis et plus ou moins coûteux en temps de calcul
- choix des schémas numériques et des maillages disponibles dans le code de calcul...ect.

2.3 Les principales modélisations de la turbulence

Il existe trois principales méthodes de modélisation d'un écoulement turbulent : la simulation numérique directe, dans laquelle on cherche à représenter la totalité des phénomènes physiques, la simulation des grandes échelles, dans laquelle on représente seulement les plus gros tourbillons en fonction du temps, et la simulation moyennée dans laquelle on représente seulement l'écoulement moyen.

2.3.1 La simulation numérique directe (DNS)

Cette méthode permet de résoudre directement les équations de Navier-Stokes sans aucune modélisation. Elle présente ainsi l'avantage de donner accès à toutes les quantités instantanées considérées dans l'écoulement

Tous les mouvements doivent être résolus par cette méthode, la taille de maille doit donc être inférieure à l'échelle de dissipation. Le nombre de mailles est alors important. Ceci a pour conséquence des temps de calcul extrêmement longs, et d'autant plus longs que la vitesse de l'écoulement est élevée². La capacité et la performance des calculateurs actuels ne cessent de progresser mais ne permettent pas encore de sonder des écoulements complexes et à hautes vitesses à partir de cette méthode. Néanmoins, celle-ci permet de mieux comprendre les comportements turbulents dans des configurations simples, mais aussi dans certains cas de valider les modèles de turbulence issus de la modélisation statistique. Une alternative à cette méthode est de simuler uniquement les grandes échelles et de

Modéliser³ les petites : LES.[17]

2.3.2 La simulation des grandes échelles (LES)

Afin d'augmenter le nombre de Reynolds des simulations numériques, la simulation des grandes échelles (LES pour Large Eddy Simulation) ne résout que les échelles de l'écoulement supérieures à une taille de coupure donnée.

On suppose qu'en dessous de cette taille, la turbulence est isotrope et que les tourbillons peuvent être modélisés par une viscosité turbulente supplémentaire. Cette approche est apparue dans les années 1970 et permet à l'heure actuelle d'effectuer des calculs relativement réalistes à des nombres de Reynolds.[18]

La DNS et la LES sont très prometteuses car la perte d'informations est minimale pour la première (seules les contributions moléculaires sont filtrées), un peu plus importante pour la deuxième. Cependant, le coût d'un calcul est inversement proportionnel à la précision obtenue. Pour cette raison, dans des configurations industrielles, ces deux méthodes sont inutilisables, et on leur préférera les méthodes statistiques exposées dans la suite du document.

2.3.3 La modélisation des équations de Navier Stokes moyennées (RANS)

Cette approche consiste à ne simuler que l'écoulement moyen en temps. Toutes les fluctuations sont filtrées et on modélise ces fluctuations par l'action d'une viscosité turbulente. Les deux types de moyenne possible sont les suivantes :

- moyenne d'ensemble : on effectue N fois la même expérience (c'est-à-dire le même écoulement dans la même soufflerie) et on moyenne les données obtenues
- moyenne temporelle : on effectue une expérience pendant un temps très long et on moyenne les données obtenues [16].

Si le temps de moyenne est suffisamment long, en principe les moyennes temporelles sont indépendantes du temps. En revanche si le temps de moyenne est court (pas de temps petit devant le phénomène principal), les moyennes temporelles restent dépendantes du temps. Les moyennes d'ensemble peuvent également être dépendantes du temps, par exemple pour un écoulement à une fréquence principale périodique.

Lorsque les moyennes temporelles et d'ensemble ne coïncident pas, on dit que le système n'est pas ergodique : lorsque le système évolue lentement par exemple, ou lorsque la moyenne temporelle sera différente en fonction de conditions initiales différentes.

Lorsque les moyennes d'ensemble et les moyennes temporelles sont indépendantes du temps et égales, on dit que le processus est "statistiquement stationnaire".

En utilisant pour cette étude méthode RANS et il y a plusieurs modèles sont disponibles dans cette méthode par exemple :

2.3.3.1 Modèle k en général

Les deux autres modèles (k-omega standard et SST) donnent principalement des résultats plus cohérents que ceux apportés par le modèle Spalart-Allmaras. La plupart des résultats qui sont décrits dans la suite du rapport sont alors obtenues à l'aide de ces deux modèles. Ces deux types de résolutions ont des formes similaires avec des équations de transport pour les variables k et oméga.

2.3.3.2 Modèle k-ε standard

Launder et Spalding (1975) est le modèle le plus couramment utilisé dans Computational Fluid Dynamics (CFD) pour modéliser les caractéristiques d'écoulement moyennes pour des conditions d'écoulement turbulent. Il est un modèle à deux équations qui donne une description générale de la turbulence au moyen de deux équations de transport (PDE). L'impulsion initiale le modèle K-epsilon était d'améliorer le modèle de mélange de longueur, ainsi que de trouver une alternative à la prescription algébriquement échelles de longueur turbulente modérée à grande complexité des flux

Pour l'énergie cinétique turbulente k

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho K u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_t}{\sigma_K} \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + 2u_t E_{ij} E_{ij} - \rho \xi \quad (20)$$

2.3.3.3 Pour la dissipation ξ

$$\frac{\partial(\rho\xi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\xi u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{u_t}{\sigma_\xi} \frac{\partial \xi}{\partial x_j} \right] + C_{1\xi} \frac{\xi}{K} 2u_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\xi} \rho \frac{\xi^2}{K} \quad (21)$$

$$C_1 = \max\left(0.43, \frac{n}{n+5}\right), n = s \frac{k}{\xi}, S = \sqrt{2s_{ij}s_{ij}} \quad (22)$$

2.3.3.4 Modélisation Turbulent Viscosité:

$$\mu_t = \rho C_u \frac{K^2}{\xi} \quad (23)$$

Ou

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{KU^*}{\xi}} \quad (24)$$

$$U^* = \sqrt{s_{ij}s_{ij} + \check{\Omega}_{ij}\check{\Omega}_{ij}} \quad (25)$$

$$\check{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\xi_{ijk} \omega_k$$

$$\check{\Omega}_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k \quad (26)$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}w), w = \frac{S_{IJ}S_{JK}S_{KI}}{S^3}, \check{S} = \sqrt{s_{ij}s_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$

où $\overline{\Omega}_{ij}$ est le tenseur moyen de vitesse de rotation vu dans un repère tournant avec la vitesse angulaire ω_k . Les constantes de modèle A_0 et A_s sont donnés par:

$$A_0 = 4.04, \quad A_s = \sqrt{6} \cos \phi$$

Model Constants

$$C_{1e} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.2$$

2.3.3.5 Avantages du modèle k- ξ :

- Modèle simple à implanter dans un code industriel non-structuré
- Modèle rapide (deux équations de convection/diffusion en plus)
- Simplicité des conditions aux limites
- Permet d'utiliser des raffinement raisonnables en paroi (maillages Hauts Reynolds)

2.3.3.6 Inconvénients du modèle k- ξ

- Non prise en compte de l'anisotropie de l'écoulement
- Non prise en compte du non-alignement entre le tenseur de Reynolds et le tenseur du taux de déformation

- Surproduction aux points d'impact (jet impactant par exemple) et production toujours positive
- Mauvaise prédiction des décollements/recollements (sous-estimation des longueurs de recirculation)
- Prédiction du mouvement moyen (c'est le cas de tous les modèles RANS) → les problèmes de fatigue thermique et d'interaction fluide/structure ne peuvent se contenter de ces informations.
- Mauvaise prédiction des décollements/recollements (sous-estimation des longueurs de recirculation)
- Prédiction du mouvement moyen (c'est le cas de tous les modèles RANS) → les problèmes de fatigue thermique et d'interaction fluide/structure ne peuvent se contenter de ces informations
- Mauvaise prise en compte de mailles trop proches de la paroi

2.3.3.7 Modèles Turbulence SST K-Omega

Le modèle de turbulence k-oméga SST est un modèle de Foucault à deux équations de viscosité qui est utilisé pour de nombreuses applications aérodynamiques. Il 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 du mur 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.

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

2.3.3.8 Equations directeurs SST k-oméga

Turbulence Kinetic Energy

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = p_k - B^* kw + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \sigma_w v_t) \frac{\partial k}{\partial x_j}] \quad (27)$$

Dissipation spécifique Taux

$$\frac{\partial w}{\partial t} + U_j \frac{\partial w}{\partial x_j} = aS^2 - Bw^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} [(v + \sigma_w v_t) \frac{\partial w}{\partial x_j}] + 2(1 - F_1) \sigma_{w2} \frac{1}{w} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial w}{\partial x_i} \quad (28)$$

F1 (Fonction Blending)

$$F_1 = \tanh\left\{\left[\min\left(\max\left(\frac{\sqrt{k}}{B^*w_y}, \frac{500v}{Y^2w}\right), \frac{4\sigma W_2 k}{CD_{kw}Y^2}\right)\right]^4\right\} \quad (29)$$

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

$$CD_{KW} = \max\left(2\rho\sigma_w^2 \frac{1}{w} \frac{\partial k}{\partial x_i} \frac{\partial w}{\partial x_i}, 10^{-10}\right) \quad (30)$$

La viscosité cinématique de Foucault

$$V_T = \frac{a_1 k}{\max(a_1 w, SF^2)} \quad (31)$$

F2 (fonction second mélange)

$$F_2 = \tanh\left[\left(\max\left[\frac{2\sqrt{k}}{B^*w_y}, \frac{500V}{y^2w}\right]\right)^2\right] \quad (32)$$

P_K (limiteur de production)

$$P_K = \min\left(T_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j}, 10B^*kw\right) \quad (33)$$

2.4 Discrétisation spatiale

La méthode des volumes finis est très utilisée dans les calculs numériques pour les applications industrielles, vu sa facilité de mise en œuvre et sa robustesse numérique avec les équations de Navier-Stokes. Cette dernière se fonde sur la division du domaine en volumes de contrôle sur lesquelles les équations sont intégrées. Pour plus de détails sur la méthode des volumes finis. L'équation générale de transport pour une variable scalaire peut être écrite sous forme intégrale

$$\int_v \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dv + \int_v \frac{\partial}{\partial x_j} (\partial u_j \phi) dv = \int_v \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) dv + \int_v s dv \quad (34)$$

En utilisant le théorème de Gauss, la divergence des intégrales de volume peut être transformée en intégrales de surface, qui peuvent être écrites comme :

$$\int_v \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dv + \int_A (\partial \phi u_j n_j) dA = \int_A \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} n_j \right) dA + \int_v s dv \quad (35)$$

Les intégrales de volume sont approximées par le produit de la valeur au centre de gravité de cellule SI et le volume de la cellule V.

$$\int_V S dV = S_i V \quad (36)$$

Conclusion

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

Chapitre : 03

**Etude du cas a un cylindre à
faible nombre de Reynold**

Introduction

L'écoulement autour d'un cylindre circulaire est un cas simple mais utile pour plusieurs applications concernant les écoulements autour d'obstacles. Ce cas classique regroupe toute la complexité recherchée, spécialement dans la région où la turbulence est générée (sillages et couches de cisaillement). La bibliographie donnée en première chapitre est centrée sur des configurations contenant un cylindre isolé.

3.1 Description du cas et d'détails des calculs

La figure 3.1 représenté 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 (Parnaudeau et al. [15]). 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.

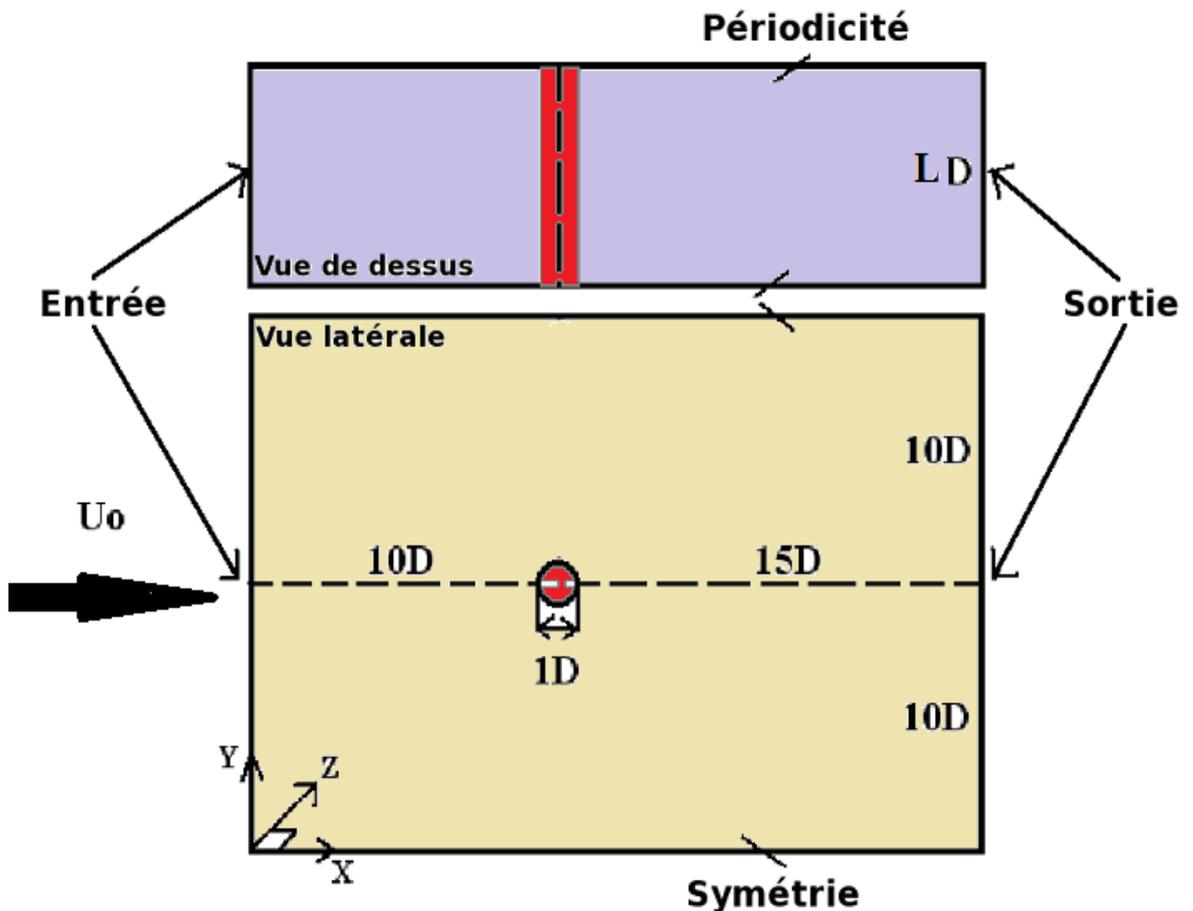


Fig. 3.1 – Domaine de calcul pour un cylindre circulaire, XY (vue latérale) et XZ

3.2 Présentation des logiciels du calcul

Nous avons utilisé plusieurs logiciels pour notre étude et sont les suivants :

3.2.1 Système d'exploitation Linux-Ubuntu

(Prononciation [u.bun.tu], « ou-boun-tou » en français) est un système d'exploitation open source basé sur la distribution Linux Debian. Son nom provient d'un ancien mot bantou qui signifie « je suis ce que je suis grâce à ce que nous sommes tous ». Dans le même ordre d'esprit, les utilisateurs sont encouragés à étudier son fonctionnement, le modifier, l'améliorer et enfin de le redistribuer.

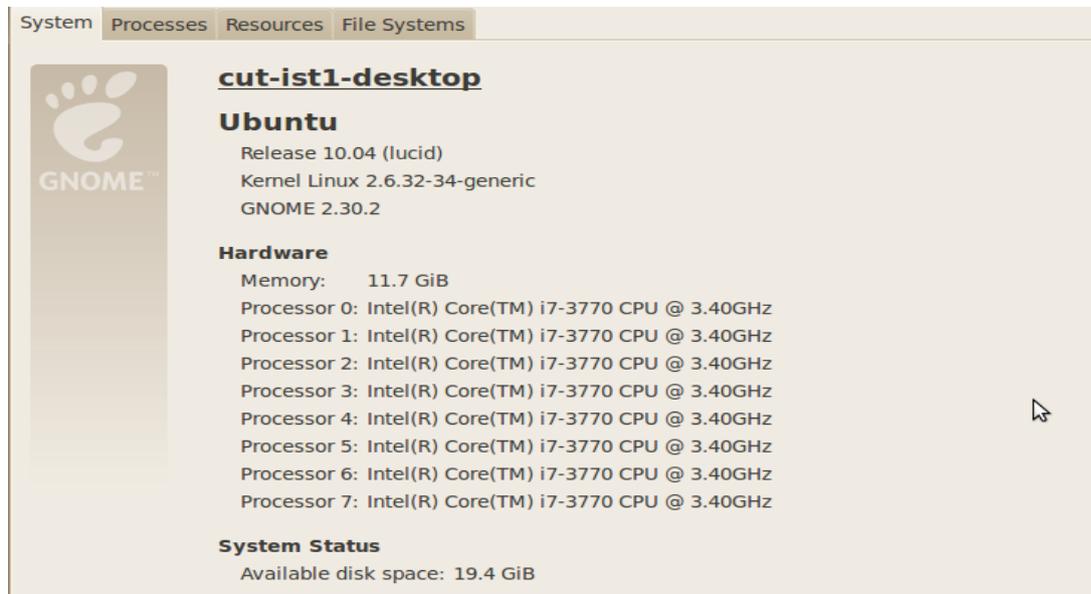


Fig. 3.2 – version linux

3.2.2 Logiciel de maillage gridmesh ‘GMSH’

Est un logiciel de maillage par éléments finis développé par Christophe Geuzaine et Jean-François Remacle, publié sous une licence GPL (avec une licence LGPL pour permettre l'utilisation et la liaison avec des logiciels externes) etc'estunlogiciel libre. Gmsh contient 4 modules :

- un module de géométrie,
- un module de maillage,
- un module solveur,
- un module de post-traitement.

Gmsh dispose d'une capacité à prendre en compte des équations paramétriques simples dans son pré-traitement, et d'un système de visualisation efficace dans son mécanisme de post-traitement

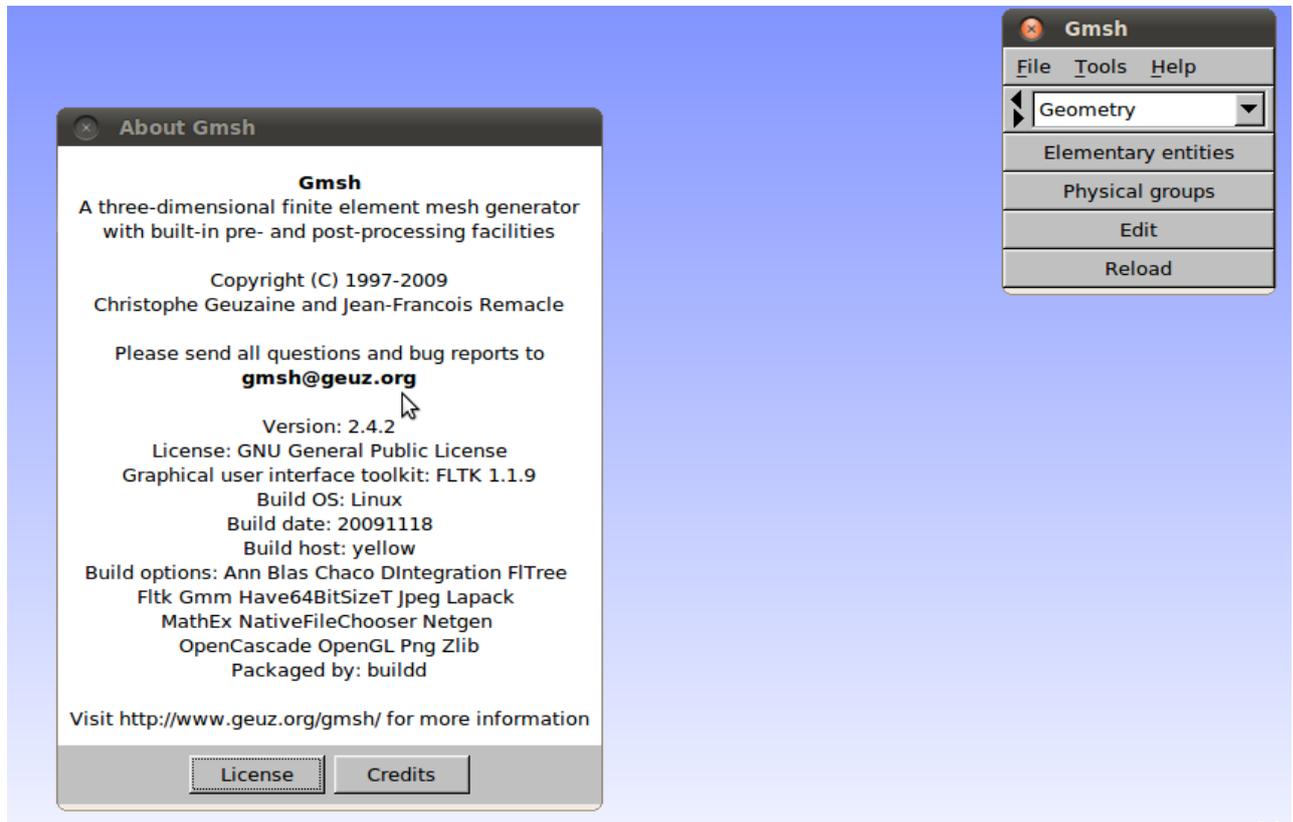


Fig. 3.3 – version Gmsh

3.2.3 Le code de calcul Code_Saturne

Code_Saturne est un logiciel libre de simulation informatique en mécanique des fluides. Développé depuis 1997 par la division Recherche et Développement d'EDF, il a été placé sous la GNU GPL en mars 2007

Basé sur une approche volumes finis co-localisés qui accepte des maillages de tout type (structuré, structuré par bloc, non structuré, hybride, conforme, non conforme...) et contenant tout type d'élément (tétraèdre, hexaèdre, pyramide, polyèdre quelconque...), Code_Saturne permet de modéliser les écoulements incompressibles ou dilatables, avec ou sans turbulence ou transfert de chaleur. Des modules dédiés sont disponibles pour des physiques particulières comme le transfert de chaleur par rayonnement, la combustion (gaz, charbon pulvérisé, fioul lourd...), la magnétohydrodynamique, les écoulements compressibles, les écoulements polyphasiques (approche Euler/Lagrange avec couplage inverse), ou bien des extensions à des applications spécifiques. Plusieurs modèles sont disponibles dans Code_Saturne, à savoir :

- 1- Laminaire
- 2- Longueur de mélange
- 3- k-epsilon
- 4- k-epsilon à production linéaire
- 5- k-omega SST
- 6 -Rij-epsilon standard (LRR)
- 7- Rij-epsilon (SSG)

8- v2f (phi-model)

9- LES (Smagorinsky)

10 -LES (Dynamique)

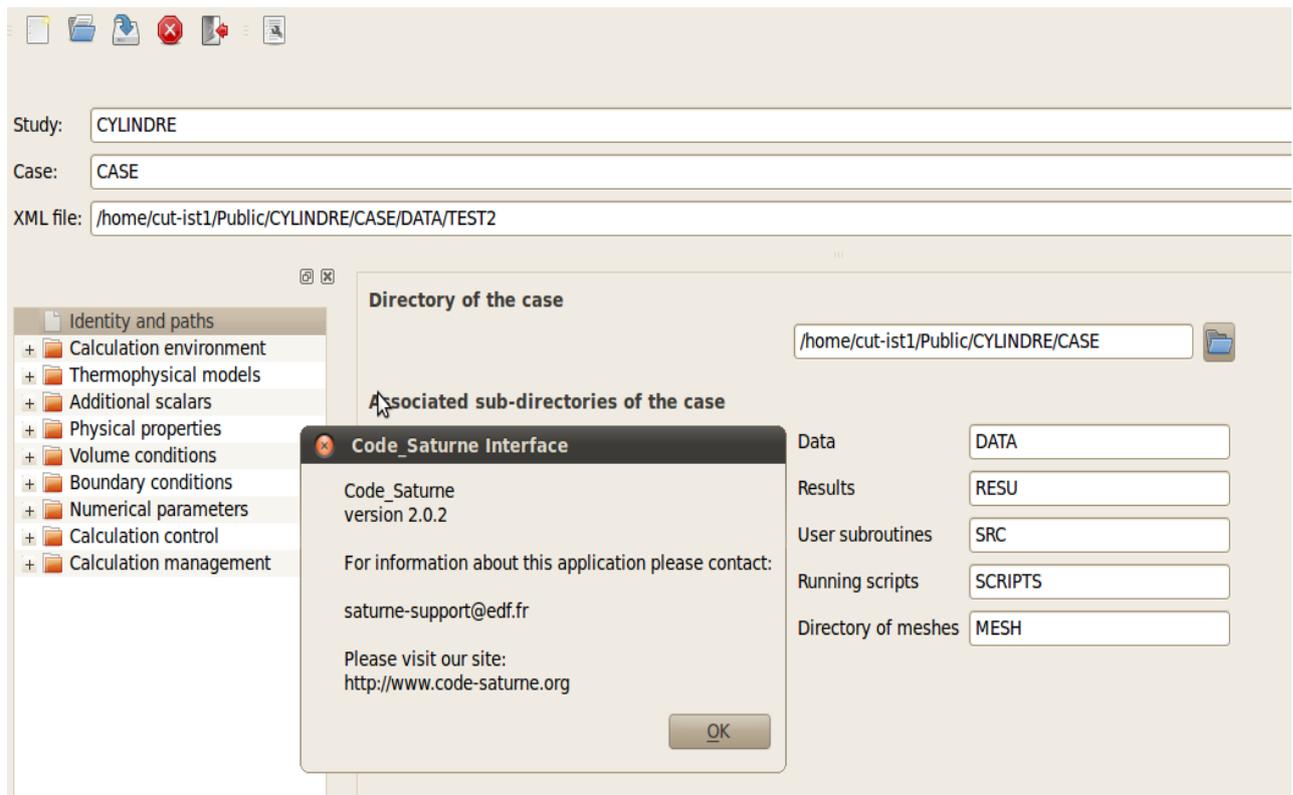


Fig. 3.4 – version Code_Saturne

3.2.4 Logiciel de post-traitement SALOME

SALOME est un logiciel open-source constituant une plateforme générique qui propose des outils de pré/post-traitement et de couplage de codes de calcul pour la simulation numérique. SALOME est basé sur une architecture ouverte et flexible.

- SALOME peut être utilisé comme une application "standalone" permettant :
- de produire des modèles de CAO,
- de générer des maillages de cette CAO,
- de préparer des calculs numériques,
- de lancer via le superviseur un schéma de calcul,
- et de post-traiter les résultats de ces calculs.

SALOME peut aussi être utilisé comme une plateforme d'intégration de codes de calcul numérique afin de créer une nouvelle application constituée des composants de base de SALOME et des codes intégrés dans cette plateforme.

Autres fonctionnalités

Modules principaux :

- Kernel : gestion des composants distribués, gestion d'une "study", services principaux
- GUI : interface graphique utilisateur

- Geometry (module GEOM) : créer, éditer, importer/exporter les modèles CAO
- Mesh (module SMESH) : création de maillages de modèles CAO en utilisant un algorithme de maillage standard ou un générateur de maillage externe (plugin)
- Med : gestion des fichiers MED (modèle d'échange de données de la plate-forme)
- Post-processor (module VISU) : visualiseur spécifique pour analyser les résultats de solveurs (scalaires, vectoriels)
- YACS : module de supervision de couplage de code

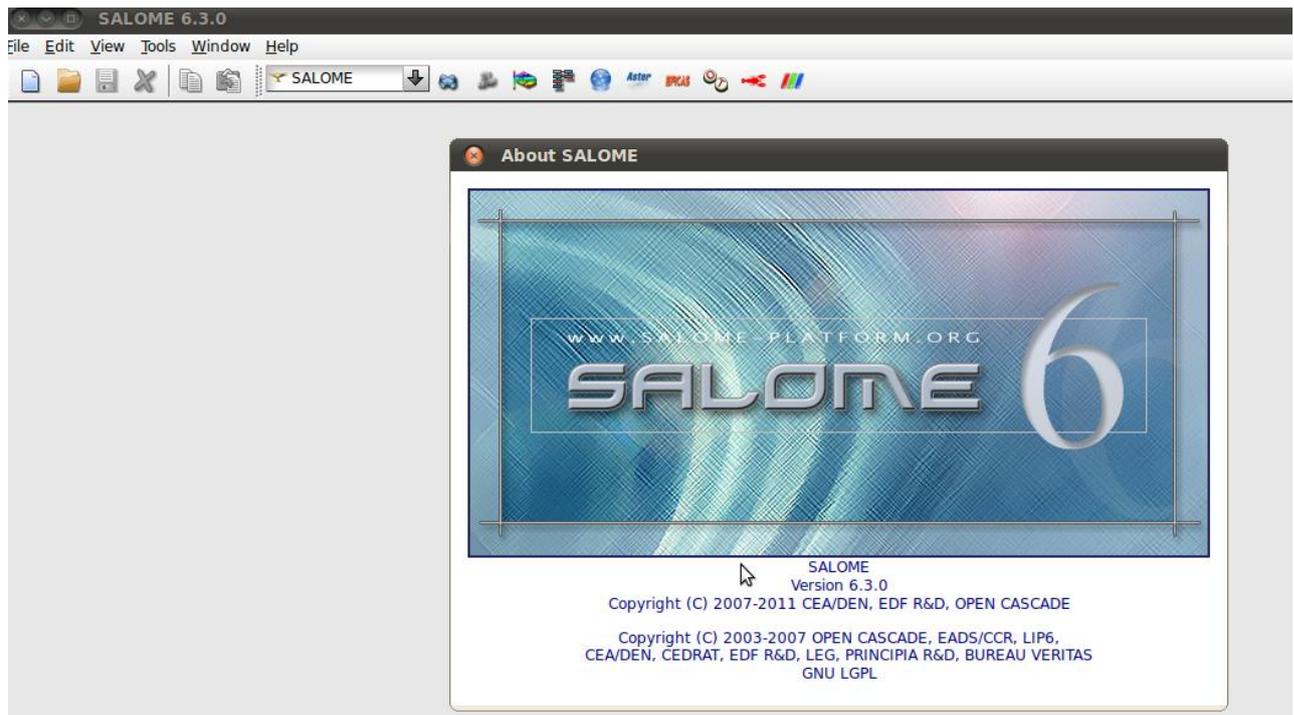


Fig. 3.5 – version Salomé

3.2.5 Logiciel de graphique Grace

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.

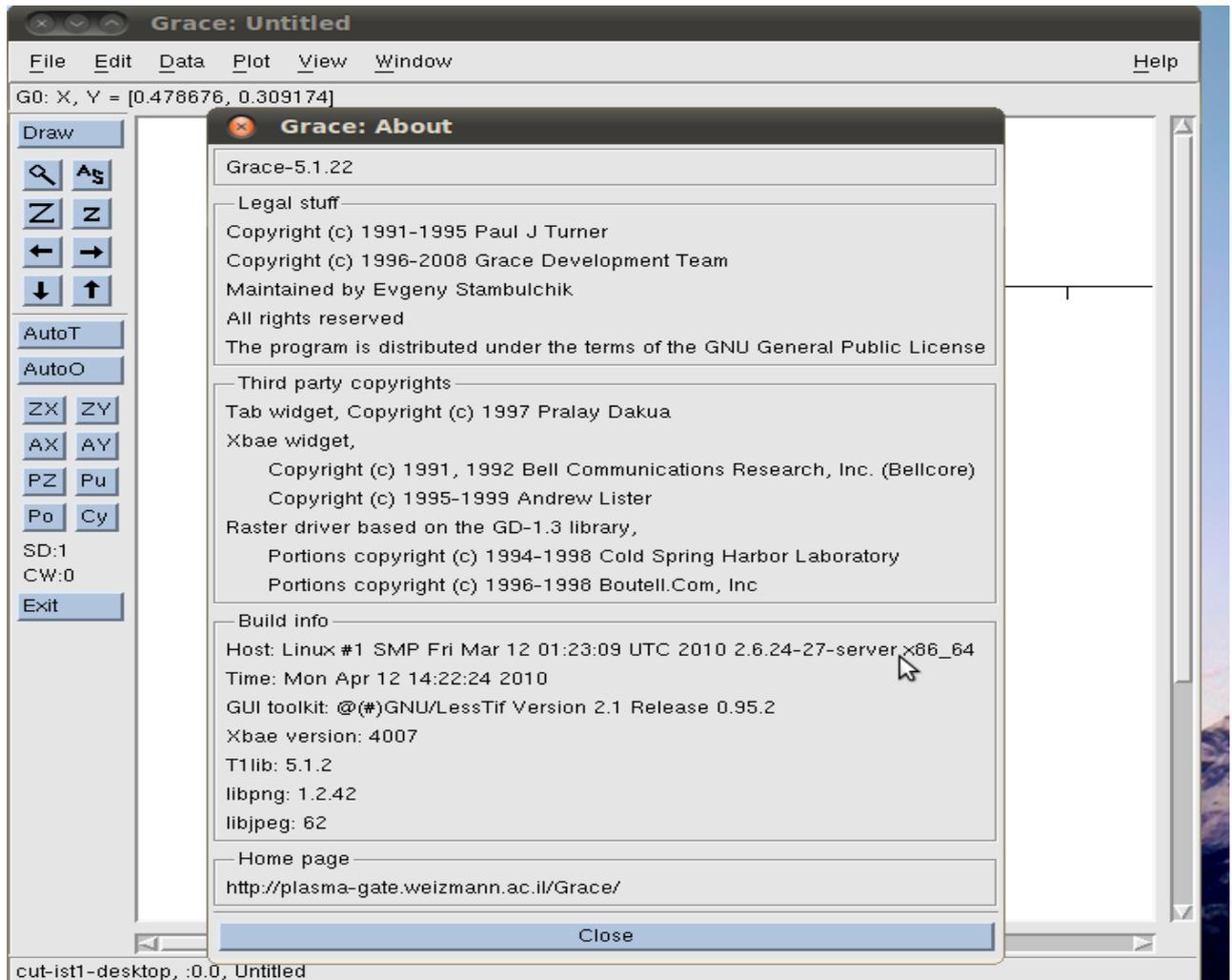


Fig. 3.6 – version Grace

3.2.6 Logiciel de post-traitement EnSight

Est un logiciel permettant de visualiser, d'analyser et de communiquer des données à partir de simulations et ou des expériences informatiques.

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 CAE (ingénierie assistée par ordinateur) processus.

3.3 Résolution Numérique

La modélisation numérique ou simulation de la géométrie et génération de maillage dans ce travail sont réalisés à l'aide de logiciel GMSH. Pour le lancement du calcul ont a utilisé le code de calcul Code_Saturne. Et finalement on a utilisé logiciel SALOME qui est basé sur une architecture libre et flexible faite de composants réutilisables et les fichiers exécutables. Ce logiciel est gratuit (open source Under Linux).

3.3.1 Caractéristique du poste de travail

Local case configuration:

Date: Tue 17 May 2016 01:44:32 PM CET
 System: Linux 2.6.32-34-generic
 Machine: cut-ist1-desktop
 Processor: Intel(R) Core(TM) i7-3770 CPU @ 3.40GHz
 Memory: 12006 MB
 User: cut-ist1 (CUT-IST1)
 Directory: /home/cut-ist1/tmp_Saturne/AIDOUD.CASE.05171344
 MPI ranks: 1

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

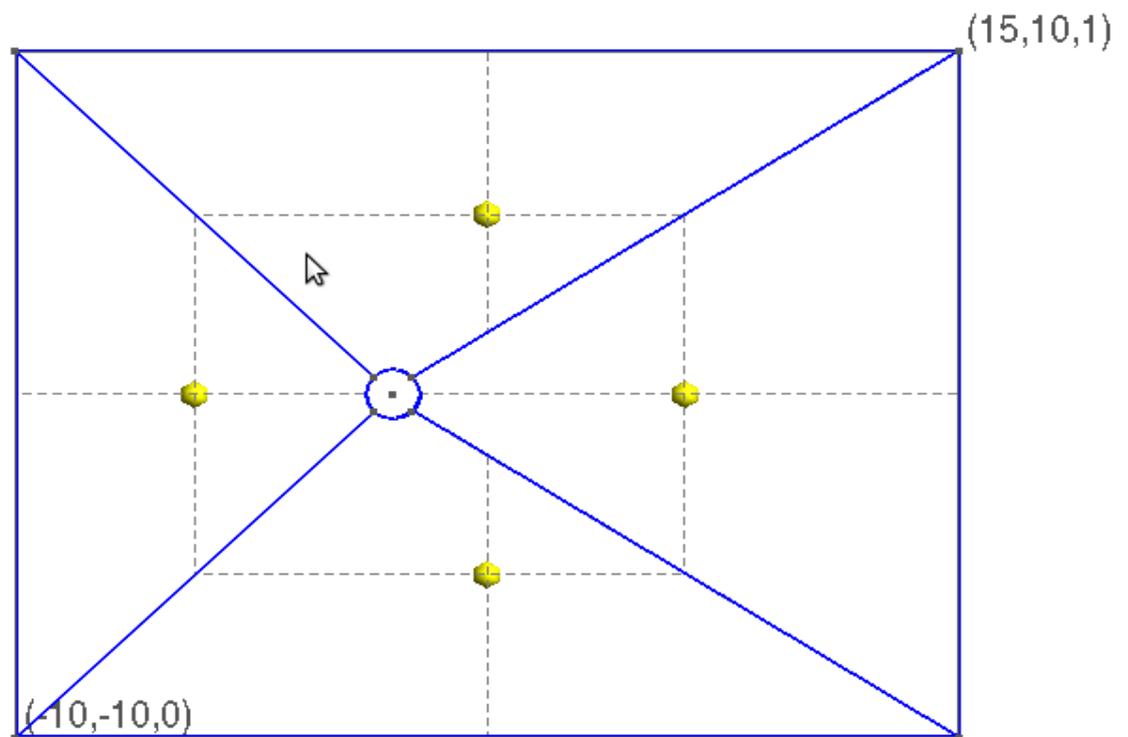


Fig. 3.7 – Domaine de calcul pour un cylindre circulaire

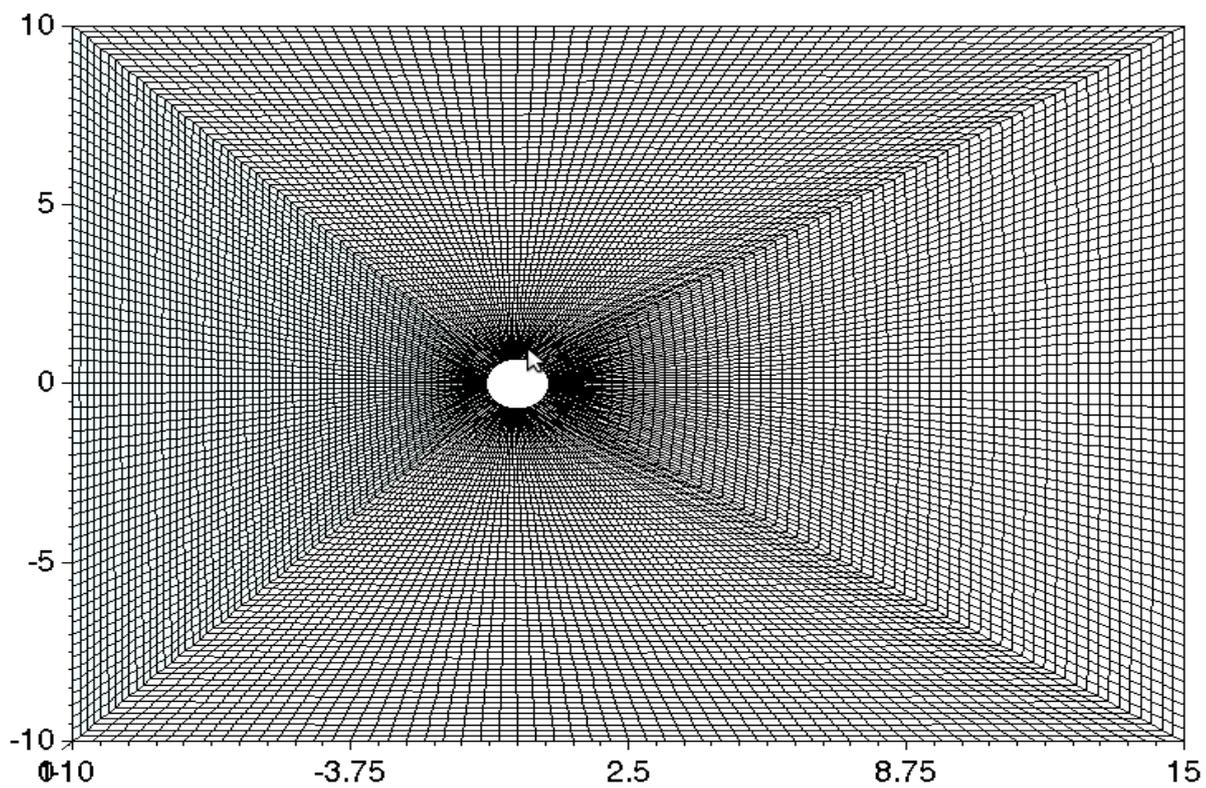


Fig. 3.8 – génération du maillage - raffinement moyen

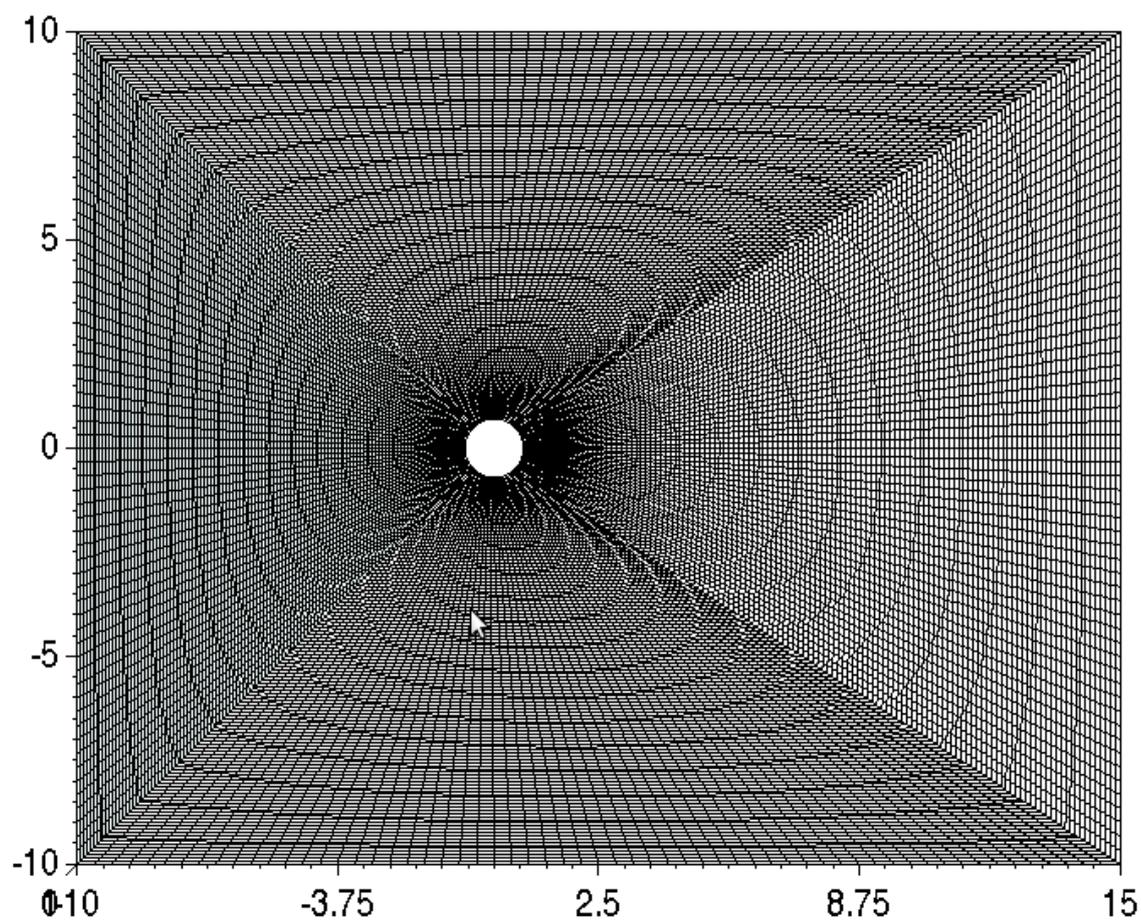


Fig. 3.9 – génération du maillage - raffiné

Conclusion

Dans ce chapitre Nous avons identifié le domaine de calcul avec différents raffinements et nous nous sommes concentrés sur les logicielles de calcul pour parvenir à un résultat précis.

Chapitre 4

Résultats et discussion

Introduction

Comme le but de cette étude était d'observer le comportement du mouvement de l'écoulement autour d'un cylindre, nous pouvons observer les résultats de la modélisation ci-dessous, pour une vitesse de 1 m/s et un nombre de Re de 3900 pour différents cas. Les profils de vitesses moyennes longitudinales le long de l'axe du sillage sont tracés et une comparaison avec les données expérimentales publiées est faite.

4.1 Analyse et discussion des résultats

4.1.1 Étude sensibilité de maillage

Pour bien adapter notre maillage afin d'avoir de résultats plus proche des études expérimentales on fait une étude de sensibilité de maillage et une comparaison entre deux cas de maillages et on a trouvé les résultats suivants :

Cas 1 : raffinement moyen

Maille renumérotation

Nombre de cellules 14400

Nombre de faces intérieures 57360

Nombre de faces limites 480

Nombre de sommets 29280

Nombre de Nœuds 29280

Nombre d'itérations 100000

Cas 2 : raffiné

Maille renumérotation

Nombre de cellules 29280

Nombre de cellules + cellules halo 87840

Nombre de cellules fantômes 58560

Nombre de faces intérieures 116880

Nombre de faces limites 480

Nombre de nœuds 59040

Nombre d'itérations 100000

Pour le cylindre circulaire à un nombre de Re de 3900, une étude de sensibilité de maillage complète a été effectuée en fonction de la résolution du domaine et les modèles de turbulence. Les profils de vitesse moyenne longitudinale le long de l'axe du sillage (à $Y/D = 0$) pour cette étude de sensibilité, sont présentés dans la figure 4.1. On observe sur cette figure qu'il n'y a presque pas de changement dans le profil de vitesse, quand on augmente la résolution de la grille.

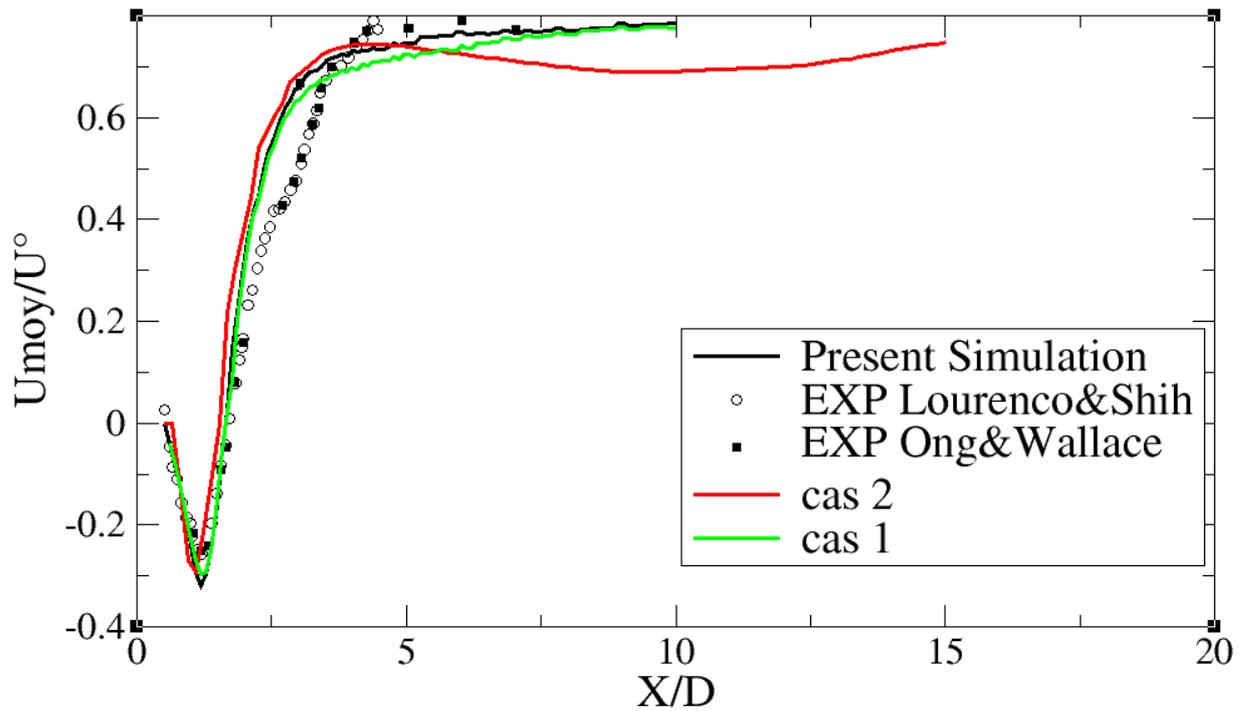


Fig. 4.1 – Les Profils de vitesses moyennes longitudinales dans le sens de l'écoulement à $Y/D=0$.

Les profils de U_{moy}/U_0 des deux cas de maillage montrent un comportement identique proche sillage et qui sont pas loin des résultats expérimentaux et qui montre une très bonne concordance. La même chose pour le 2eme cas, on remarque aussi une concordance avec les résultats expérimentaux gardant la même réaction pour cela on peut dire que le premier et le deuxième cas montre un même comportement avec le résultat de la présente étude. De ce fait, on choisit le 2eme cas par ce que il est très raffiné et donne des résultats meilleurs par report au 1er cas.

4.1.2 Analyse les graphes du cas étude (cas 2) et comparaison avec expérimentales publiées

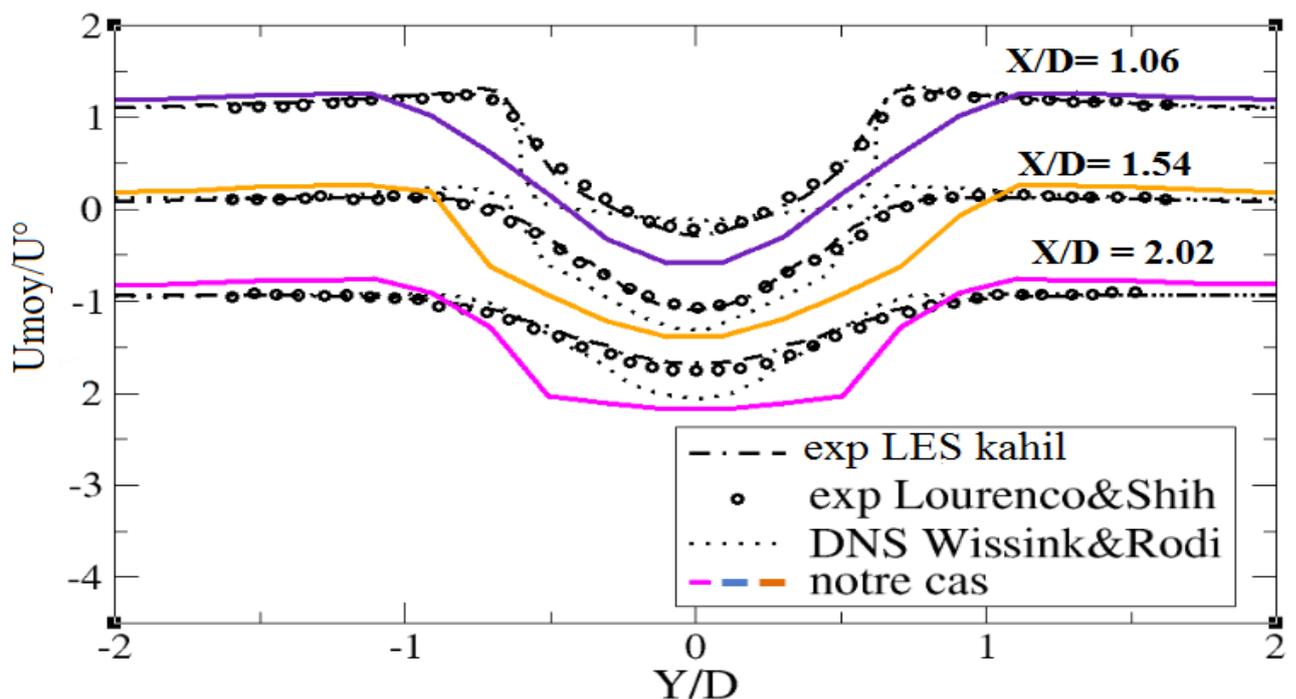


Fig. 4.2 – Profils de vitesse moyenne longitudinale pour différentes positions de X/D dans la zone de sillage. -.-.- : LES Kahil[7], \diamond :Exp Lourenco et Shih [11], : DNS Wissink et Rodi [15].

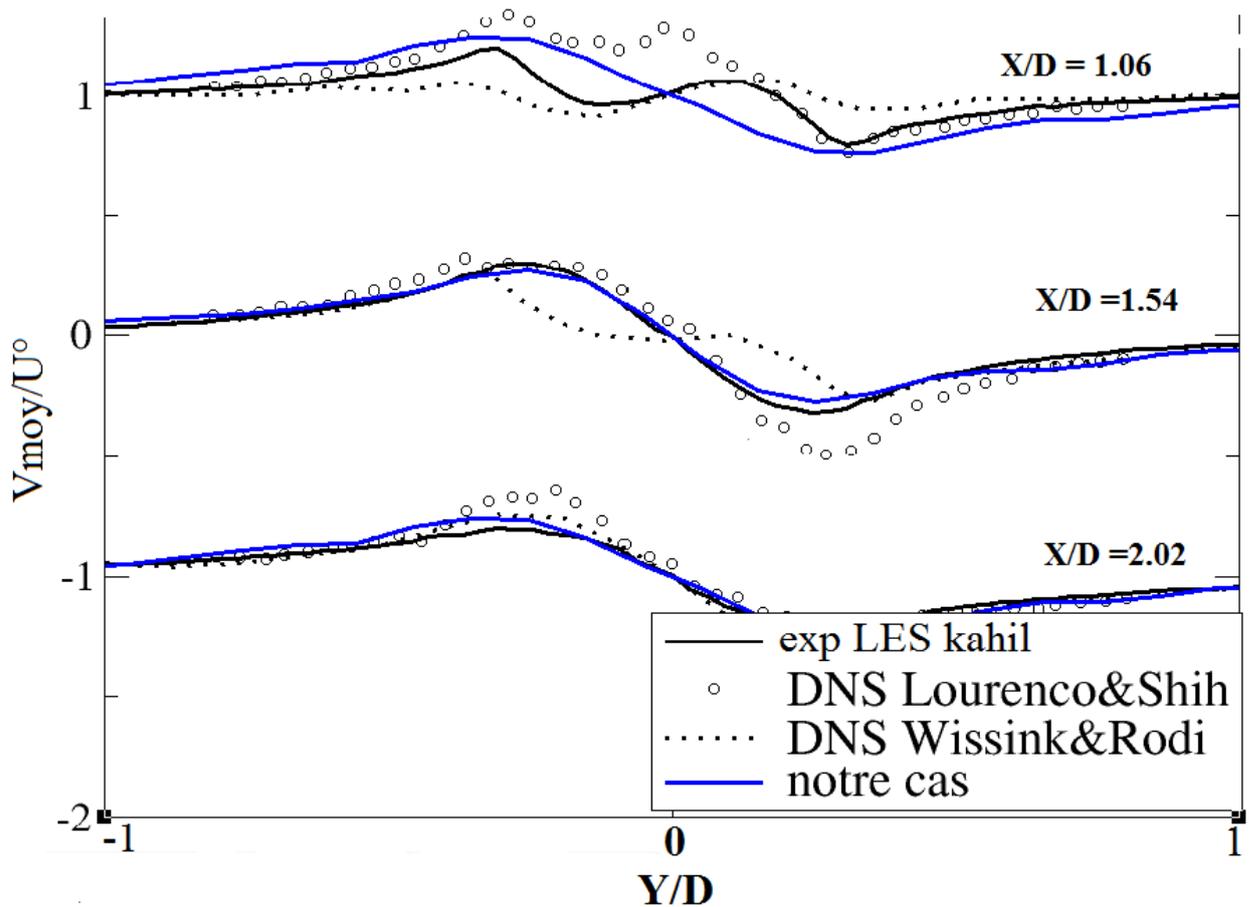


Fig. 4.3 – Profils de vitesse moyenne transversale pour différentes positions X/D dans la zone de sillage.

— : LES Kahil [7], \circ : Exp Lourenco et Shih [4], : DNS u [6].

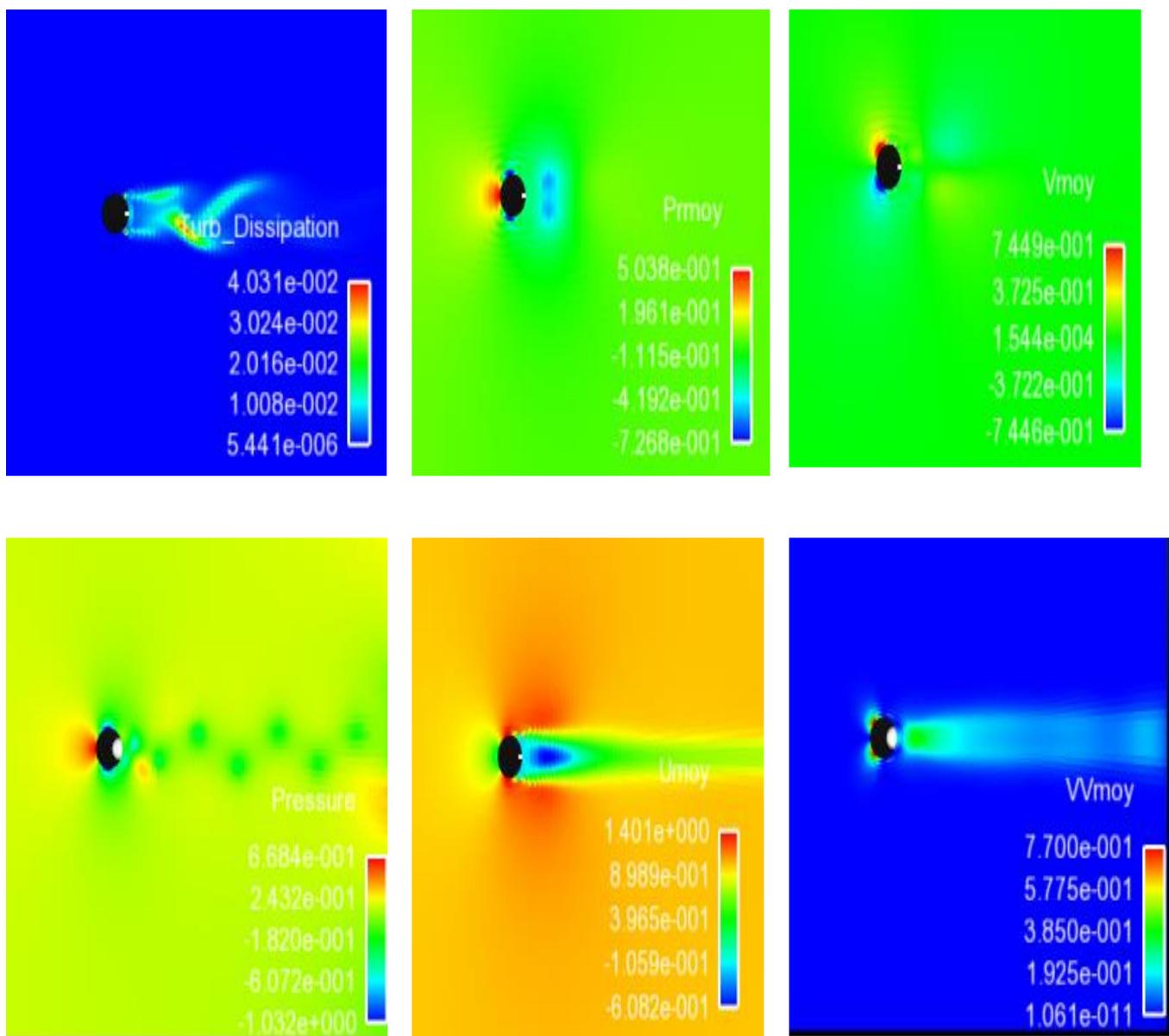
Couche dans les RANS par rapport à expérimenter) des résultats dans un très bon accord des profils moyenne u-vitesse des trois simulations avec l'expérience. La différence entre les simulations à la fois avec un décalage peut être vue pour être très petit. Par conséquent, l'effet de la plus grande envergure mode, qui est seulement résolu Simulation sur le profil moyen u-vitesse est marginale. La figure (4.3). Montre une comparaison des profils v-vitesse la moyenne RANS avec les résultats expérimentaux de Lourenco et Shih et les résultats de Wissink et Rodi à $x/d = 01.06$; 01.54 ; 02.02 . Bien que les deux DNS et LES sont en très bon accord avec une autre qui indique à nouveau la faible influence de la présence de la plus grande envergure mode pour tous les profils, la comparaison avec les données expérimentales est jugée moins favorable. Ceci, cependant, pourrait être due à des données expérimentales depuis kahil ont observé un écart similaire dans les profils v-vitesse la moyenne quand on les compare à leurs LES résultats au $Re = 3900$. Comme on peut le voit sur la figure, les résultats dès LES et le DNS ne sont pas identiques, mais sont en meilleur accord avec l'autre qu'avec l'expérience. La différence entre les LES et DNS qui est le plus prononcé $x/d = 01.06$ et pratiquement négligeable à $x/d = 02.02$ - est à nouveau attribué aux différents nombres de Reynolds utilisés dans les trois ensembles de simulations. La comparaison entre cas étude et des cas expérimentales publiées. On remarque qu'il n'y a pas de grande

différence entre notre cas d'étude et l'expérimentales mais il est presque la même avec expérimentales LES kahil avec quelques erreurs numériques dans le cas d'étude avec modélisation des équations moyennée de Navier-Stokes, en suite en trouve les différents champs de notre écoulement.

La comparaison entre cas étude et des cas expérimentales publiées

On remarque qu'il n'y a pas de grande différence entre notre cas d'étude et l'expérimentales mais il est presque la même avec expérimentales LES kahil avec quelques erreurs numériques dans le cas d'étude avec modélisation des équations moyennée de Navier-Stokes

Et en suite en trouve les différents champs ce présent travail de cas 2



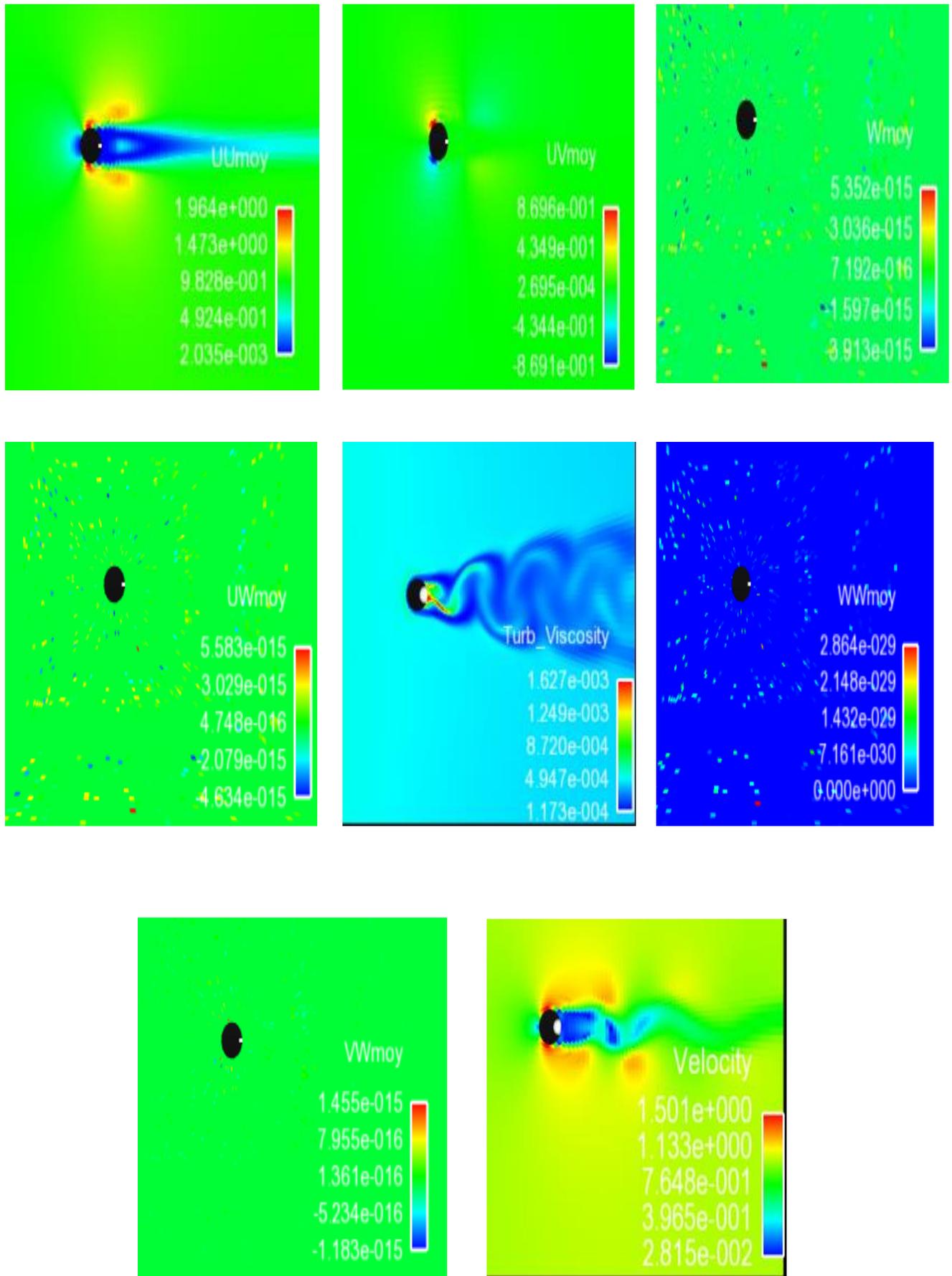


Fig. 4.4– Différents champs de l'écoulement pour le cas 2

Et en suite en trouve cas différents champs de l'écoulement de l'étude numérique(LES)

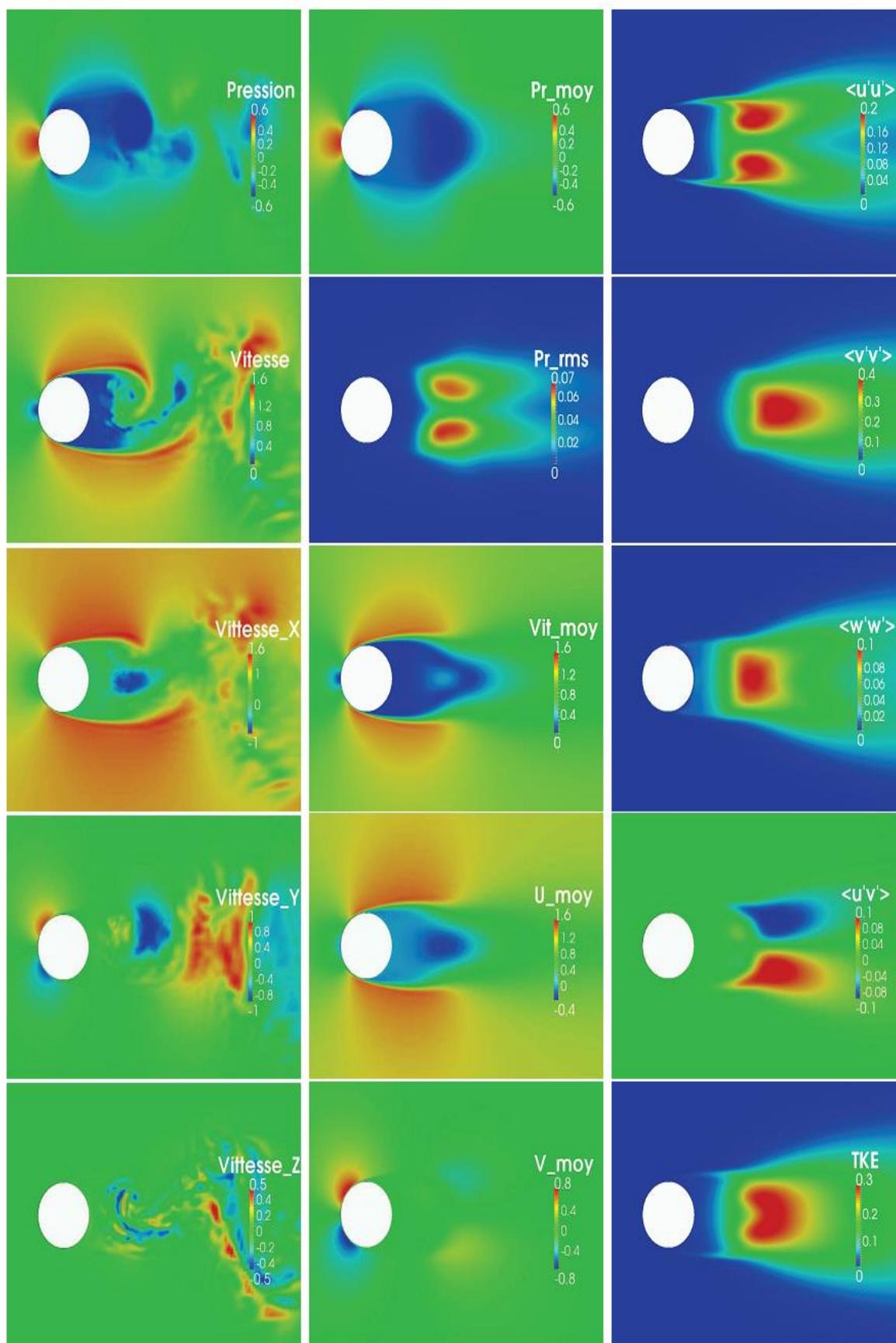


Fig. 4.5 – Différents champs de l'écoulement de l'étude numérique LES [7]

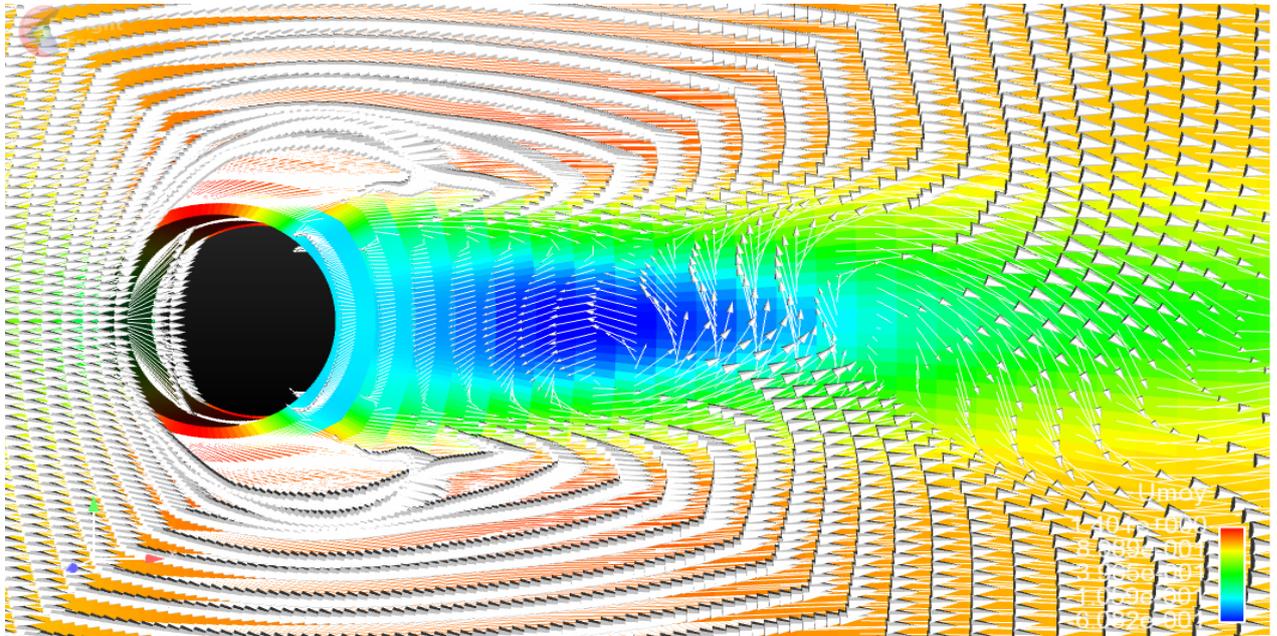


Fig. 4.6– vecteurs de courant du champ de vitesse moyenne

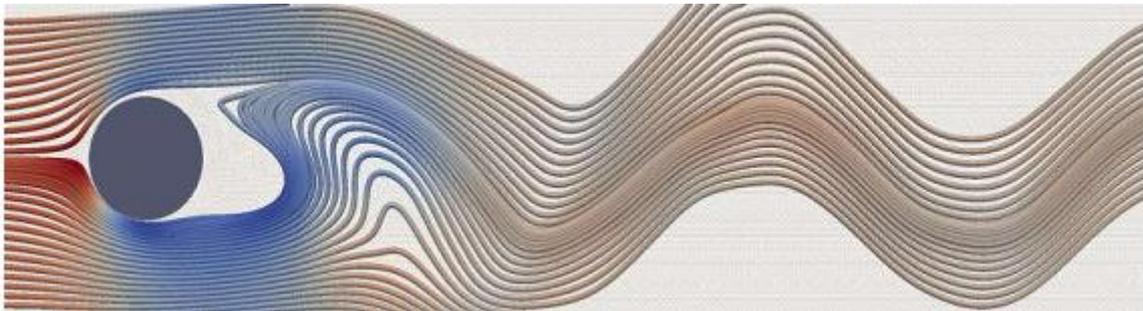


Fig. 4.7 – Lignes de courant du champ de vitesse instantanée

Dans la figure 4.6, on a regroupé toutes les quantités de l'écoulement (champ de vitesse instantanée et moyenne, pression et tensions de Reynolds plus l'énergie cinétique turbulente). et observe des turbulences présent d'arrière le cylindre ou les vecteurs de courant présentent une séparation symétrique puis les turbulences s'atténuent et on observe alors les vecteurs de courant rectilignes. On représente également sur la figure 4.7 les lignes de courant autour d'un cylindre on a regroupé toutes les quantités de l'écoulement et observe un écoulement de Von Karman ce phénomène est à l'origine de la formation d'un motif périodique de tourbillons cause par séparation instable d'un écoulement. Lorsque 'un tourbillon se détache un écoulement dissymétrique se forme autour du corps ce qui modifie la distribution des pressions cela signifie que la séparation alternée des tourbillons peut créer sur ce corps une portance périodique qui cause la vibration.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats numériques de l'écoulement autour d'un seul cylindre. Cette étude est faite dans le but de l'effet de modélisation avec le modèle RANS et de la sensibilité du maillage. Les résultats sont en accord avec les données LES et les mesures expérimentales disponibles dans la littérature.

Conclusion générale

Le travail réalisé dans ce projet concerne les simulations numériques d'écoulements turbulents autour d'un cylindre. Le but est de comprendre le comportement de l'écoulement et d'expliquer les phénomènes physiques qui apparaissent. Pour cela, on utilise la méthode de modélisation de moyenne des équations Navier-Stokes (RANS) qui permet d'obtenir le différent champ instantané et signaux moyens de l'écoulement. L'Étude détaillée du cas d'un seul cylindre est réalisée avec étude de la résolution du maillage.

Nous 'étudierons le phénomènes possibles aux a faible nombre de Reynold, comme par exemple les allées de tourbillons de vortex de Von Karman, ou bien le sillage turbulent en aval du cylindre et Une ligne de courant est une courbe de l'espace décrivant un fluide en mouvement et qui, à tout instant, possède en tout point une tangente parallèle à la vitesse des particules du fluide. Ce sont ces lignes de courant qui vont traduire le régime d'écoulement autour du cylindre (turbulent).

Ces résultats sont comparés à des données expérimentales obtenues dans des conditions similaires. Ces modélisations se focalisent sur l'étude de numérique d'un jet pulsé placé sur un cylindre circulaire plongé dans un écoulement turbulence. Cette étude a été réalisées avec un code industriel (code_ saturne) avec un modèle de turbulence R_{ij} et sensibilité du maillage qui donne de bon résultats plus proche aux données expérimentales.. Les résultats obtenus sont comparés à des données expérimentales obtenues dans des conditions similaires .

Bibliographiques

- [1] C. KASBARIAN Etude numérique pour les problèmes d'advection-diffusion - application à la modélisation d'écoulements turbulents compressibles. Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Mai 1995.
- [2] C. Norberg : Effects of reynolds number and low-intensity free stream turbulence on the flow around a circular cylinder. Publ No. 87/2, Chalmers University of Technology, Department of Applied Thermoscience and Fluid Mech., Gothenburg, Sweden, 1987.
- [3] C. H. K. Williamson : Vortex dynamics in the cylinder wake. Annual Review of Fluid Mechanics, 28:477–539, 1996.
- [4] L. M. Lourenco et C. Shih : Characteristics of the plane turbulent near wake of a circular cylinder, a particle image velocimetry study. Published in Beaudan and Moin, 1993.
- [5]. Mahbubar Rahman en all .une enquête numerique de instable flow passé a cylindre circulaire utilisation 2-d méthode de volume fini .2007
- [6] J. G. Wissink et W. Rodi : Numerical study of the near wake of a circular cylinder. International Journal of Heat and Fluid Flow, 29:1060–1070, 2008.
- [7] dr.kahil.ysimulation des grandes echelles d ecoulements turbulents autour de cylindres circulaires, l'universite paris 6 ,2011
- [8] Dmitry A. Lysenko, Ivar S. Ertesvåg, Kjell Erik Rian. Grand-Eddy Simulation de l'écoulement sur un cylindre circulaire au nombre de Reynolds 3900 Utilisation de la Boîte à outils OpenFOAM-Décembre 2012
- [9] B. N. Rajani et all.fait une LES des flux circulaire Cylindre à $Re = 3900$ passé.2015
- [10]C.G. Mingham et all. simulation de Foucault Détaché de l'écoulement turbulent autour de la place et circulaire.2016
- [11] Lesieur M., Turbulence in Fluids, 2nd rev. ed, 1993
- [12] Tennekes H., Lumley J.L. "A rst Course in Turbulence", MIT Press, 1992, 14ème édition
- [13] Schiestel R., Modélisation et simulation des écoulements turbulents, 1993
- [14] S. Benhamadouche - Cours CFD,Mécanique des Fluides Générale et de Turbulence Décembre 2005 p 1-12
- [15] Sagaut, P., Introduction à la simulation des grandes échelles pour les écoulements incompressibles[17]Patankar,Numericalheattransferand uidow, 1980, HemisphereandMcGraw Hill
- [16] Lesieur M., Comte P., Zinn-Justin J. Ed., ComputationalFluid Dynamics, Les Houches 1993, Session 59, Elsevier, 1996.
- [17] Patankar, Numerical heat transfer and uidow, 1980, Hemisphere andMcGrawHill
- [18] Fletcher, Computational Techniques for uiddynamics, Vol. 2, chap. 17"Incompressible viscousow"

Résumé

Ce projet présente une étude numérique d'un écoulement incompressible turbulent autour d'un cylindre circulaire à nombre de Reynold $Re=3900$. Nous utilisons une technique de modélisation statistique d'équation de Reynold (RANS) et un modèle de turbulence Rij - ξ SSG. 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 Salomé/Paraview/Grâce/Ensignt. La comparaison de nos résultats avec les données expérimentales montrent un bon accord.

ملخص

يعرض هذا المشروع على دراسة عددية لتدفق غير قابل للانضغاط المضطرب حول اسطوانة دائرية مع رقم رينولدز إعادة = لفهم سلوك SSG الاضطراب نموذجاً - الهدف RIJ و (RANS) 3900. نحن نستخدم تقنية النمذجة الإحصائية رينولد المعادلة تدفق ويفسر هذه الظاهرة الفيزيائية التي تظهر. من يعطي بعض التكوين المستخدم في هذه الدراسة نظام لينكس نظام التشغيل شبكة GMSH تعمل شفرة gridmesh مفتوحة المصدر التي هي في هذه البرامج التي من شأنها أن تؤدي هذا البرنامج ensight ، برامج الرسم، ويرجع ذلك في معظم paraview / يحسب، بعد تجهيز البرمجيات سالومي Code_Saturne الآخرين. لتجهيز البرمجيات نتيجة جيدة جعلت أخيراً مقارنة مع النتائج التجريبية

summary

This project presents a numerical study of turbulent incompressible flow around a circular cylinder at Reynolds number $Re = 3900$. We use a statistical modeling technique Reynold equation (RANS) and a turbulence model Rij - ξ SSG. The objective of this study is to understand the flow behavior and explain physical phenomena that appear under certain configurations. We use for our work free software Linux (open source). These software found the mesh gridmesh GMSH the Code_Saturne computer code, for one post-treatment Salomé / Paraview / Thanks / Ensignt. Comparing our results with experimental data show good agreement.

Mots clés : changement de mode, cylindre isolé, écoulement turbulent, cylindre circulaire,