

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Génie Mécanique

Option : Énergétique

Intitulé :

Etude et Simulation d'un écoulement turbulent
isotherme autour d'un obstacle

Présenté par :

➤ **Ben Yahia Mohammed**

Soutenu le : 30/06/2021. Devant un jury composé de:

Houari Ameur	Pr.	Centre Universitaire Naâma	Président
Kaid Noureddine	MCA	Centre Universitaire Naâma	Encadrant
Benameur Benameur	MAA	Centre Universitaire Naâma	Examineur

Nâama – Algérie - 2021

REMERCIEMENTS

Le remerciement infini avant tous est à dieu le plus puissant qui m'a comblé des bienfaits de l'Islam et de la Science. Et m'avoir guidé vers le bon chemin de la lumière et de savoir.

Je tiens à remercier vivement mon encadreur, Monsieur « **Noureddine kaid** » pour son suivi, son assistance et ses conseils précieux le long de ma formation. Je tiens aussi à lui exprimer mes profonds respects et j'avais tout l'honneur que j'étais son élève.

Je remercie vivement Monsieur « **Houari Ameur** » d'avoir accepté la présidence du jury de cette mémoire, sa présence m'honore grandement. Je le pris d'accepter mes remerciements.

Mes remerciements vont aussi à Messieurs « **Benameur Benameur** » d'avoir accepté d'examiner mon travail, qu'ils trouvent ici mes profonds respects.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Grand merci à tous

Sommaire

INTRODUCTION ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1 INTRODUCTION	1
2 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	2
3 But de travail	13
4 Plan de l'étude	13

CHPITRE 1 : DESCRIPTION GENERALE

1.1 GENERALITES	14
1.2 La Turbulence.....	14
1.3 Les caractéristiques de la turbulence.....	15
1.4 La transition laminaire-turbulent.....	16
1.5 Nombre de Reynold (Re)	16
1.6 La couche limite	17
1.7 Caractéristique de la couche limite.....	17
1.8 Notion de portance et traînée	19
1.9 Forces agissant sur l'obstacle	20
1.9.1 La traînée.....	23
1.9.2 La portance.....	25

CHPITRE 2 : FORMULATION MATHEMATIQUE

2 Introduction.....	27
2.1 Equations de transport.....	27
2.1.1-Equation de continuité.....	27
2.1.2-Equations de quantité de mouvement (de Navier Stokes).....	27
2.1.3 Équations de continuité moyennée	29
2.1.4 Équation de quantité de mouvement moyennée	30
2.2 Modèle de turbulence k- ϵ	30
2.2.1 Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k	31
2.2.2 Equation de transport du taux de dissipation ϵ de l'énergie cinétique turbulent	31
2.3 Equation général de transport.....	32

CHAPITRE 3 : RESOLUTION PAR COMSOL

3.1 Introduction.....	34
3.2 COMSOL	34
3.2.1 Géométrie.....	35
3.2.2 Conditions aux limites	36
3.2.3 Les paramètres.....	37
3.2.4 Maillage	38

CHAPITRE 4 : RESOLUTION ET DISCUSSION

4 Introduction.....	39
4.1 Premier Cas (L'écoulement autour d'un obstacle cercle)	39
4.1.1 Différents régimes de l'écoulement autour d'un cylindre ou cercle	39
4.1.2 Simulation numérique	41
4.1.2.1 Champ de vitesse	41
4.1.2.2 Ligne de courant	44
4.1.2.3 Commentaires (Champ de vitesse).....	45
4.1.2.4 Champ de pression	45
4.1.2.5 Commentaires (Champ de pression)	46
4.1.2.6 Energie cinétique turbulente	47
4.1.2.7 Viscosité dynamique turbulente	48
4.1.2.8 Commentaire (Energie cinétique turbulente).....	48
4.1.2.9 la force de trainée et portance.....	49
4.2 Deuxième cas (L'écoulement autour d'un obstacle Cercle, Carrée, ellipse)	50
4.2.1 Simulation numérique	50
4.2.1.1 Champ de vitesse.....	50
4.2.1.2 Ligne de courant	53
4.2.1.3 Commentaires (Champ de vitesse).....	54
4.2.1.4 Champ de pression	54
4.2.1.5 Commentaires (Champ de pression)	55
4.2.1.6 Energie cinétique turbulente	56
4.2.1.7 Commentaires (Energie cinétique turbulente)	57
4.2.1.8 Viscosité dynamique turbulente	58
4.2.1.9 la force de trainée et portance.....	59
CONCLUSION	60
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE	62

Résumé

Ce travail de mémoire, a pour but étudier les phénomènes hydrodynamiques qui se construisent lorsqu'un écoulement turbulent rencontre un obstacle fixe.

Pour avoir plus d'information sur le phénomène de l'écoulement bidimensionnel en turbulent pour un fluide incompressible sans transfert de chaleur, une étude a été entamé par simulation numérique. Pour gérer l'écoulement turbulent, on a employé le modèle de turbulence k- ϵ en utilisant le code de calcul Comsol.

Le premier but de cette étude c'est l'influence d'un changement de nombre de Reynolds et sans changement de la section d'obstacle (cercle). Cette étude, nous a conduit à s'intéresser en premier lieu, au champ dynamique des vitesses, au champ de pression et les profils des coefficients de frottement et ceci pour le régime employés. En second lieu, nous avons visualisé le phénomène de Van Karman en aval de l'obstacle.

Deuxième but c'est l'étude l'influence d'un changement géométrique d'obstacle (cercle, carrée, ellipse) et sans changement les paramètres d'écoulement. On note la variation du coefficient de frottement le long de la génératrice du corps, les champs de vitesse moyenne, la zone de production de l'énergie cinétique turbulente ont tous été captés par la présente simulation.

Mots clés : écoulement turbulent, obstacle cercle, carrée, ellipse, Comsol.

Abstract

This dissertation aims to study the hydrodynamic phenomena that arise when a turbulent flow encounters a fixed obstacle.

To have more information on the phenomenon of two-dimensional turbulent flow for an incompressible fluid without heat transfer, a study was started by numerical simulation. To manage the turbulent flow, the k- ϵ turbulence model was employed using the Comsol computer code.

The first goal of this study is the influence of a change in Reynolds number and without change in the obstacle section (circle). This study led us to be interested in the first place, in the dynamic field of speeds, in the pressure field and the profiles of the friction coefficients and this for the speed employed. Second, we visualized the Van Karman phenomenon downstream from the obstacle.

Second goal is to study the influence of a geometric change of obstacle (circle, square, and ellipse) and without change of flow parameters. We note the variation of the coefficient of friction along the generatrix of the body; the fields of average speed, the zone of production of the turbulent kinetic energy were all captured by this simulation.

Keywords: turbulent flow, obstacle circle, square, ellipse, Comsol.

الخلاصة

تهدف هذه الرسالة إلى دراسة الظواهر الهيدروديناميكية التي تنشأ عندما يواجه التدفق المضطرب عقبة ثابتة. للحصول على مزيد من المعلومات حول ظاهرة التدفق المضطرب ثنائي الأبعاد لسائل غير قابل للضغط بدون انتقال للحرارة ، بدأت دراسة عن طريق المحاكاة العددية. لإدارة التدفق المضطرب تم استخدام نموذج $k - \epsilon$ المضطرب باستخدام كود الكمبيوتر *Comsol*

الهدف الأول من هذه الدراسة هو تأثير التغيير في رقم رينولدز وبدون تغيير قسم العائق (الدائرة). قادتنا هذه الدراسة إلى الاهتمام في المقام الأول بالمجال الديناميكي للسرعات ومجال الضغط وملامح معاملات الاحتكاك وهذا بالنسبة للسرعة المستخدمة. ثانيًا ، تصورنا ظاهرة فان كارمان في اتجاه مجرى المائع من العقبة.

الهدف الثاني هو دراسة تأثير التغيير الهندسي للعائق (دائرة، مربع، الشكل البيضاوي) وبدون تغيير معاملات التدفق نلاحظ تباين معامل الاحتكاك على طول شبكة توليد الجسم، وحقول متوسط السرعة ومنطقة إنتاج الطاقة الحركية المضطربة جميعًا من خلال هذه المحاكاة.

كلمات مفتاحية التدفق المضطرب.حاجز دائرة. مربع. الشكل البيضاوي.

NOMENCLATURE

Notations latines

S	<i>surface</i>	m^2
D	<i>Diamètre</i>	m
V	<i>Vitesse</i>	m / s
Re	<i>Nombre de Reynolds</i>	
F_d	<i>Force de trainée</i>	N
C_d	<i>Coefficient de trainée</i>	
F_L	<i>Force de portance</i>	N
C_L	<i>Coefficient de portance</i>	
L	<i>Longueur</i>	m
H	<i>Hauteur</i>	m
X_i	<i>Coordonnées</i>	
U	<i>Vitesse selon x</i>	m / s
V	<i>Vitesse selon y</i>	m / s
P	<i>Pression</i>	N / m^2
P'	<i>Fluctuation de pression</i>	N / m^2
P_0	<i>Pression statique</i>	N / m^2
$U_{i(i=1,2,3)}$	<i>Composante la vitesse instantanée suivant la direction i</i>	m / s
$\overline{U}_{i(i=1,2,3)}$	<i>Composante la vitesse moyenne suivant la direction i</i>	m / s
$u'_{i(i=1,2,3)}$	<i>Composante la vitesse fluctuante suivant la direction i</i>	m / s
K	<i>énergie cinétique turbulente</i>	m^2 / s^2
G_k	<i>Terme de production de l'énergie cinétique turbulente</i>	$kg / m.s^3$
$\overline{u_i u_j}$	<i>Tension de Reynolds</i>	m^2 / s^2

Notations grecques

ε	<i>Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente</i>	m^2 / s^3
μ	<i>viscosité dynamique</i>	kg / ms
μ_t	<i>viscosité dynamique turbulente</i>	kg / ms
ν	<i>viscosité cinématique</i>	m^2 / s
ν_t	<i>viscosité cinématique turbulente</i>	m^2 / s
ρ	<i>Masse volumique</i>	kg / m^3
$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$	<i>Nombres de Prants</i>	
τ_{ij}	<i>Tenseur de contrainte</i>	
Γ_ϕ	<i>Coefficient de diffusion</i>	

Liste des figures

Figure 1.1: Variation d'une des composantes de la vitesse pour des écoulements (a) Laminaire et (b) turbulent en un point P.

Figure 1.2 : Comparaison des profils de vitesse dans un tube à écoulement (a) laminaire et (b) turbulent.

Figure 1.3 : Transition laminaire-turbulent.

Figure 1.4 : Couche limite sur un obstacle.

Figure 1.5 : Écoulement autour d'un cylindre.

Figure 1.6 : Ecoulement autour d'un cylindre.

Figure 1.7 : Écoulement autour d'un profil d'aile.

Figure 1.8 : L'Efforts de pression et de frottement sur un élément dS.

Figure 1.9 : La force de pression et la force de frottement dans un élément de surface dans Un Objet immergée.

Figure 3.1 : Géométrie de localisation des obstacles.

Figure 3.2 : conditions aux limites.

Figure 3.3 : (a) Maillage pour un obstacle cercle, (b) carrée, (c) ellipse à 2D et nombre Reynolds 4000.

Figure 4.1 : contours du champ de vitesse d'après nombre Reynolds (a)100, (b) 2000, (c)4000.

Figure 4.2 : profil de vitesse d'un écoulement autour d'un obstacle cercle, avec trois cas de Nombre Reynolds (a)100, (b) 2000, (c)4000.

Figure 4.3 : Ligne du champ de vitesse d'après nombre Reynolds (a)100, (b) 2000, (c)4000.

Figure 4.4 : Ligne courant du champ de vitesse d'après nombre Reynolds (a)100, (b) 2000, (c)4000.

Figure 4.5 : Ligne du champ de pression d'après nombre Reynolds (a)100, (b) 2000, (c)4000.

Figure 4.6 : contours d'énergie cinétique turbulente d'après nombre Reynolds (a)100, (b) 2000, (c)4000.

Figure 4.7 : contours Viscosité dynamique turbulente d'après nombre Reynolds (a)100, (b) 2000, (c)4000.

Figure 4.8 : contours du champ de vitesse d'un écoulement turbulent autour d'un obstacle (a)cercle, (b) carrée, (c)ellipse.

Figure 4.9 : Profil de vitesse d'un écoulement turbulent autour d'un obstacle (a)cercle, (b) Carrée, (c)ellipse.

Figure 4.10 : Ligne du champ de vitesse d'un écoulement turbulent autour d'un obstacle (a)cercle, (b) carrée, (c)ellipse.

Figure 4.11 : Ligne courant du champ de vitesse d'un écoulement turbulent autour d'un Obstacle (a)cercle, (b) carrée, (c)ellipse.

Figure 4.12 : Ligne du champ de pression d'un écoulement turbulent autour d'un obstacle (a)cercle, (b) carrée, (c)ellipse.

Figure 4.13 : contours d'énergie cinétique turbulente d'un écoulement turbulent autour D'un Obstacle (a)cercle, (b) carrée, (c)ellipse.

Figure 4.14 : contours Viscosité dynamique turbulente d'un écoulement turbulent autour D'un obstacle (a)cercle, (b) carrée, (c)ellipse.

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Quelques exemples de traînée de pression et de frottement.

Tableau 1.2: Quelques valeurs du coefficient de traînée en fonction de la forme de

L'obstacle et du nombre de Reynolds (b est la largeur des profils, A est la Surface apparente au vent, l'écoulement est toujours dirigé de la gauche Vers la droite).

Tableau 2.1 : Coefficients du modèle de turbulence K- ϵ .

Tableau 2.2 : Termes des grandeurs transportés.

Tableau 3.1 : Les paramètres d'un écoulement turbulent autour d'un obstacle.

INTRODUCTION ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1 INTRODUCTION

Les écoulements autour des objets est un phénomène qui se produit fréquemment dans la pratique. Ils sont indispensables dans la conception mécanique et thermique de nombreux systèmes en engineering comme : avions, automobiles, bâtiments, composant électroniques, les aubes de turbines et les formes géométriques 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 d'actualité dans divers domaines. Donc, le sillage autour des obstacles est d'un intérêt important dans la pratique. En effet la connaissance des structures turbulentes générées derrière ces obstacles et leurs différents régimes est d'une utilité primordiale dans la conception des ouvrages exposés aux écoulements de fluides. Le choix de l'étude des obstacles cercle et carré et ellipse, résulte de leurs simplicités géométriques permettant d'avoir des facilités expérimentales et numériques.

L'identification et l'étude des phénomènes hydro-aérodynamiques qui surgissent dans le sillage d'un obstacle restent un sujet d'intérêt d'actualité dans divers domaines. Donc, la formation de sillage est d'un intérêt important dans la pratique. En effet, la connaissance des structures turbulentes générées derrière ces obstacles et leurs différents régimes est d'une utilité primordiale dans la conception des ouvrages exposés aux écoulements des fluides.

Beaucoup de travaux de recherches ont été réalisés pour modéliser l'écoulement autour des obstacles. Pour cela, plusieurs expériences dans le domaine ont été réalisées et confrontées aux méthodes numériques. Pour cette dernière une large gamme de méthodes mathématiques ont été développées afin de s'approcher de la réalité de l'écoulement et de fournir le maximum d'information qui peuvent se produire. Pour notre cas, on a utilisé simulation avec CFD (comsol), qui représente un outil de simulation numérique fort de grande qualité afin de simuler un écoulement turbulent isotherme autour d'un obstacle. Ce programme de calcul trouve de plus en plus de place dans différents domaines d'industrie surtout dans l'option des écoulements de fluide et transfert de chaleur.

2 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

1-Fragos (2007) [1] : Ont étudié L'écoulement turbulent bidimensionnel sur un obstacle monté en surface est étudié comme une expérience numérique qui se déroule dans une soufflerie. Les équations transitoires de Navier - Stokes sont résolues directement avec des éléments finis de Galerkin. Le nombre de Reynolds défini par rapport à la hauteur de la soufflerie est de 12 518. Des schémas de lignes de courant instantanés sont représentés qui donnent une image complète des phénomènes d'écoulement. Les spectres d'énergie et d'ensrophie donnent la double cascade de turbulence bidimensionnelle et la décroissance de la loi de puissance -1 de l'ensrophie. Les valeurs moyennes des vitesses et des fluctuations quadratiques moyennes sont comparées aux résultats expérimentaux disponibles. D'autres caractéristiques statistiques de la turbulence telles que les coefficients d'autocorrélation eulériens, les coefficients longitudinaux et latéraux sont également calculées. Enfin, les diagrammes d'oscillation des fluctuations de vitesse calculées donnent le comportement chaotique de la turbulence.

2-Veyssel Atli(1988) [2] : Ont étudié Le champ d'écoulement autour d'un obstacle bidimensionnel de différentes hauteurs immergé dans une couche limite turbulente sur une surface plane a été étudié expérimentalement à une vitesse de flux libre de 10 m s^{-1} . Tout d'abord, la topologie du champ d'écoulement a été analysée qualitativement en appliquant la technique de visualisation de l'écoulement de l'huile de surface, puis les profils de vitesse moyenne et de turbulence ont été obtenus en amont et en aval de l'obstacle à l'aide d'un système d'anémomètre à fil chaud. Il a été observé que la hauteur relative de l'obstacle, en termes d'épaisseur de la couche limite de référence et par conséquent le nombre de Reynolds basé sur la hauteur de l'obstacle, sont les paramètres affectant non seulement la topologie du champ d'écoulement mais aussi la structure de turbulence.

3-Kazuhiko Suga(2004) [3] : ont travaillé sur Un nouvel effort pour améliorer la prédiction de la turbulence et du transfert de chaleur dans la région de recirculation derrière un obstacle par une seconde fermeture de moment est discuté. Un nouveau modèle de pression-diffusion rapide est inclus dans une seconde fermeture de moment à limite de deux composants à faible nombre de Reynolds basée sur Craft et Launder [Int. J. Heat Fluid Flow 17 (1996) 245]. Le GGDH d'ordre supérieur pour le flux de chaleur turbulent de Suga et Abe [Int. J. Heat Fluid Flow 21 (2000) 37] est utilisé pour le calcul du champ thermique. Des résultats encourageants sont obtenus à la fois pour les champs de turbulence et de transfert de chaleur, même si certaines marges à améliorer subsistent. 2004 Elsevier Inc. Tous droits réservés.

4-Cary Presser ,al(2006) [4] : ont mené une étude Pour mieux comprendre les processus physiques impliqués dans le transport des supresseurs de liquide dans les espaces encombrés, des mesures de vélocimétrie d'image de particules (PIV) ont été effectuées dans l'écoulement turbulent homogène chargé de gouttelettes, généré par la grille, sur un cylindre non chauffé et chauffé, et un arrangement de sphères en cube centré sur le corps (BCC). Le transport des gouttelettes d'eau et des particules d'aérosol a été caractérisé en

Amont et en aval de ces obstacles. Des données ont été enregistrées pour le cylindre à des températures ambiantes et élevées (à 423 K) pour estimer les effets de la surface du cylindre chaud sur le transport des gouttelettes.

Les résultats ont indiqué que de plus petites gouttelettes sont entraînées dans la région de recirculation derrière le cylindre tandis que les plus grosses gouttelettes impactent la surface du cylindre, s'accumulent et s'égouttent, et / ou rebondissent sur la surface et se dispersent dans le courant libre. L'écoulement sur le cylindre chauffé a entraîné la formation d'une couche de vapeur sur le côté aval du cylindre dans la région de cisaillement entre la zone de recirculation et le courant libre. Ainsi, la vaporisation de plus grosses gouttelettes frappant la surface chauffée du cylindre suggère une probabilité accrue de vapeur. Pour le BCC (avec un taux de blocage d'environ 64%), il y avait à la fois un transport de gouttelettes et de particules de graines autour et à travers le BCC, ainsi qu'une accumulation et des gouttes de liquide nettement plus importantes que pour le cylindre.

5- Giancarlo Alfonsi,al(2003) [5] : Ont étudié Les structures cohérentes de l'écoulement se développant autour d'un obstacle cubique monté en surface placé dans un écoulement de canal turbulent ($Re \frac{1}{4} : 40000$ basé sur la vitesse apparente et la demi-largeur du canal) sont étudiées. La technique de la décomposition orthogonale appropriée est appliquée pour extraire les structures cohérentes du flux d'une base de données obtenue à l'aide d'un code de calcul à volume fini pour l'intégration numérique des équations incompressibles de Navier – Stokes tridimensionnelles dépendant du temps; pour la modélisation de la turbulence, l'approche LES est suivie et la fermeture à l'échelle du sous-réseau RNG est utilisée. Le champ de vitesse tridimensionnel dépendant du temps est calculé et 100 pas de temps non dimensionnels de l'état statistiquement stable turbulent sont considérés. La décomposition est effectuée sur deux sous-domaines appropriés autour de l'obstacle cubique et un champ de vitesse "réduit", reflétant la contribution des fonctions propres les plus énergétiques de la décomposition, contenant jusqu'à 95% de l'énergie cinétique turbulente du champ d'écoulement d'origine, est reconstruit; les résultats sont présentés en termes de tourbillon montrant la dynamique temporelle des structures cohérentes dans les sous-domaines sélectionnés.

6-Laslandes,al(1998) [6] : Ont étudié Un modèle à deux fluides est utilisé pour prédire les écoulements dilués turbulents gaz-particules solides autour d'un obstacle. La phase gazeuse de turbulence est traitée avec le modèle k- ϵ modifié de Chen-Kim. Deux modèles de turbulence sont appliqués à la phase particulaire: le modèle A1 ou le modèle algébrique de Hinze-Tchen et le modèle k-1. Le premier modèle suppose qu'il existe un équilibre local entre le mouvement fluctuant des particules et la turbulence des gaz, tandis que le second modèle décrit les propriétés turbulentes des particules en considérant l'effet de la convection, de la diffusion, de la production et de la destruction de la turbulence des particules via l'équation $ak-1$, où k-1 est l'énergie cinétique des particules. Ces modèles sont implantés dans le code CFD PHOENICS. L'expérience 2D de Fessler et Eaton (écoulement autour d'une marche verticale orientée vers l'arrière) et l'expérience 3D réalisée au C.S.T.B. (flux autour d'un cube) sont utilisés comme références pour la validation. (1998 Publié par Elsevier Science Ltd. Tous droits réservés.

7-Kessler,al(1998) [7] : ont travaillé sur Une simulation numérique directe (DNS) d'écoulement turbulent dans un canal avec des obstacles carrés montés sur un mur a été réalisée. Le nombre de Reynolds était de 6820 basé sur la vitesse globale dans le canal et la hauteur du canal. L'objectif principal du travail était d'évaluer les données statistiques à partir de la solution numérique dépendant du temps. L'influence des erreurs numériques et statistiques sur ces données a été examinée. Une base de données complète comprenant 290 corrélations a été mise en place pour tester et améliorer les modèles de turbulence pour cet écoulement complexe et séparé.

8-J. Sousa(2002) [8] : ont effectué une étude dans La structure moyenne de l'écoulement turbulent autour d'un cube monté à la surface d'un canal d'eau à ciel ouvert a été étudiée en utilisant une implémentation bidimensionnelle de la vélocimétrie d'image de particules numériques (DPIV). La composante de vitesse hors plan a été obtenue en utilisant le concept de continuité appliqué à des champs de vitesse bidimensionnels enregistrés dans des plans parallèles. Diverses méthodes ont été utilisées pour l'identification et la localisation de structures tourbillonnaires à grande échelle dans l'écoulement tridimensionnel autour de l'obstacle monté en surface. Les résultats montrent la faisabilité de son application aux données PIV tridimensionnelles et les performances supérieures des techniques d'identification récentes (à savoir la force de tourbillonnement et le moment angulaire normalisé), par rapport au critère classique basé sur le tourbillon.

9-Yue,al(1994) [9] : ont travaillé sur cet article qui présente les prédictions numériques des caractéristiques de transfert de fluide et de chaleur pour l'écoulement turbulent du canal avec un et deux obstacles. Les équations dominantes turbulentes sont résolues par une méthode de différence finie basée sur le volume de contrôle avec des grilles décalées non uniformes et le modèle $k-\epsilon$ bien connu et sa fonction de paroi associée pour décrire la structure de turbulence. Les termes de vitesse et de pression des équations d'impulsion sont résolus par la méthode SIMPLE. Les paramètres intéressés comprennent le nombre de Reynolds d'entrée (entre 10^4 et 10^6), le rapport hauteur du chenal / hauteur d'obstacle (B / H) et la distance sans dimension entre deux obstacles (PR). Les calculs sont effectués pour trois milieux de travail, l'air, l'eau et le fréon R-12. Les points d'attache prévus situés à $x / H = 12,24$ sont comparés aux résultats expérimentaux de $x / H = 12,3$ pour le cas d'obstacle unique non chauffé avec $B / H = 15$. Le transfert de chaleur prédit autour du point d'attache est bien meilleur que celui de la zone de recirculation en raison du fort impact au point d'attache.

10- Grigoriadis,al(2009) [10] : ont simulé Des simulations à grands tourbillons (LES) d'écoulements turbulents chargés de particules sont présentées afin d'étudier les effets du temps de réponse des particules sur les modèles de dispersion d'un espace en développement d'écoulement avec une obstruction, où des particules solides sont injectées à l'intérieur du sillage d'un obstacle [Vincont, JY, Simoens, S., Ayrault M., Wallace, JM, 2000.

Dispersion scalaire passive dans une couche limite turbulente à partir d'une ligne source au niveau de la paroi et en aval d'un obstacle. J. Fluid Mech. 424, 127-167]. La méthode numérique est basée sur une approche par étapes fractionnaires entièrement explicite et des différences finies sur des grilles cartésiennes, utilisant la méthode des limites immergées (IBM) pour représenter l'existence d'obstacles solides. Deux modèles de turbulence différents ont été testés, le modèle de turbulence classique de Smagorinsky et le modèle de fonction de structure filtrée. La phase dispersée a été modélisée soit par une approche eulérienne, soit par un schéma de suivi de particules lagrangiennes de particules solides avec des nombres de Stokes dans la plage $St = 0-25$, en supposant un couplage unidirectionnel entre les deux phases. Un très bon accord a été observé entre les approches lagrangienne et eulérienne. On a trouvé que l'effet de la taille des particules différencieait significativement le modèle de dispersion pour l'écoulement non homogène au-dessus de l'obstacle. Bien que dans des écoulements homogènes comme des canaux turbulents chargés de particules, le groupement de particules près de la paroi augmente de manière monotone avec la taille des particules, pour l'écoulement examiné au-dessus d'un obstacle, les effets de concentration préférentielle n'étaient plus forts que pour une plage intermédiaire de nombres de Stokes.

11- MAZUMDER,al(2011) [11] : ont travaillé sur L'étude vise à étudier les caractéristiques moyennes d'écoulement et de turbulence dans la géométrie d'affouillement développée près d'un cylindre circulaire de 10 cm de longueur placé sur le lit de sable transversalement à l'écoulement. L'obstacle posé sur un lit de sable, sur le chemin d'un écoulement unidirectionnel, développe une marque d'affouillement en forme de croissant sur le lit. L'affouillement est causé par la génération de vortex développé du côté amont de l'obstacle. Des grains de sable érodés par ce vortex, se déposent du côté aval de l'obstacle au fur et à mesure des sillages. Le champ d'écoulement turbulent à l'intérieur de la marque d'affouillement a été mesuré dans un canal de laboratoire à l'aide d'un vélocimètre Doppler acoustique (ADV). Les marques d'affouillement appelées croissants de courant conservé dans les archives géologiques sont traditionnellement utilisées comme indicateurs de la direction des paléocourants. La distribution des composantes de vitesse moyenne, des intensités turbulentes et des contraintes de Reynolds à différentes positions de la marque est présentée. Les preuves expérimentales montrent également que les caractéristiques géométriques de la marque d'affouillement (largeur) dépendent principalement du rapport hauteur / largeur du cylindre, du nombre de Reynolds du cylindre et du nombre de Froude des sédiments.

12-Yang,al(1993) [12] : ont simulé et Nous appliquons le modèle dynamique à l'échelle de la sous-grille à une simulation à grand tourbillon de l'écoulement du canal turbulent avec une nervure carrée montée sur un mur. Le nombre de Reynolds Re est de $3,21 \times 10^3$ basé sur la vitesse moyenne au-dessus de l'obstacle et la hauteur de l'obstacle. Les structures

Proches du mur sont résolues avec la condition aux limites anti-glissement. Les résultats montrent un meilleur accord avec la simulation numérique directe que la simulation à grands tourbillons avec une constante de modèle fixe, vérifiant la valeur du modèle dynamique à l'échelle de la sous-grille pour simuler des écoulements turbulents complexes.

13-Elfstrom(1982) [13] : ont travaillé sur Le bloc d'obstacles, développé comme une alternative au tube Preston pour mesurer indirectement le frottement cutané sur des surfaces lisses dans des écoulements incompressibles, est également examiné comme un dispositif pour les écoulements compressibles. Le bloc, qui est congruent avec un orifice de pression statique de surface, a une géométrie qui est facilement spécifiée et a donc un étalonnage universel. Les données de deux études indépendantes sont utilisées pour établir un tel étalonnage à l'aide de variables "murales", valables pour des nombres de Mach jusqu'à environ 3. Différents aspects concernant l'application pratique du dispositif sont examinés, tels que la sensibilité au lacet et l'espacement axial minimal admissible entre blocs. Plusieurs exemples illustrant l'utilité de l'appareil sont donnés.

14-HEIST,al(1994) [14] : ont étudié la pertinence des simulations numériques pour prédire les flux liés à l'incinérateur, une étude expérimentale et informatique d'un écoulement d'obstacle avec certaines des caractéristiques des flux d'incinérateur est réalisée. Les résultats des mesures LOV d'une expérience de canal d'eau sur l'écoulement au-dessus d'un obstacle triangulaire et d'une simulation FEM simultanée utilisant le modèle de turbulence k- ϵ standard sont comparés. La longueur de rattachement prédite par les calculs concorde à moins de 3% avec la valeur déterminée expérimentalement. Les profils de vitesse moyenne et les formes des profils d'énergie cinétique turbulente montrent une bonne concordance. Un modèle plus réaliste de l'écoulement dans un incinérateur est brièvement étudié et fournit des informations sur le choix approprié des conditions aux limites de l'écoulement pour le calcul des flux dans des domaines tronqués. Le modèle k- ϵ standard s'est avéré utile pour faire des prédictions de flux séparés avec des similitudes avec celles trouvées dans les incinérateurs. Des conditions aux limites de sortie spéciales qui permettent une variation de pression indépendante des contraintes normales visqueuses se sont avérées prédire des profils de vitesse de sortie réalistes.

15-Stathopoulos,al(1994) [15] : ont réalisé L'article fait référence à une prédiction numérique de l'écoulement de cisaillement turbulent autour d'obstacles prismatiques à deux ou trois dimensions en résolvant des équations d'écoulement faiblement compressibles avec le modèle de turbulence à l'échelle de sous-réseau de Smagorinsky (1963). L'approche est applicable à l'évaluation des pressions induites par le vent sur l'enveloppe du bâtiment et des conditions d'écoulement du vent autour des bâtiments tangulaires rec; il peut donc potentiellement contribuer au domaine de l'ingénierie éolienne computationnelle qui se développe rapidement ces dernières années.

16-He,al(1992) [16] : ont étudié Une prédiction numérique de l'écoulement de cisaillement turbulent sur un obstacle bidimensionnel et tridimensionnel est obtenue en résolvant des équations d'écoulement faiblement compressibles, ainsi que le modèle turbulent à l'échelle de sous-réseau de Smagorinsky. Le schéma numérique est basé sur la méthode des volumes Finis explicites prédicteur-correcteur de MacCormack. Premièrement, des calculs ont été effectués pour le cas d'un écoulement sur un obstacle bidimensionnel ayant une épaisseur de couche limite d'entrée différente, puis pour un corps de bluff cubique dans une quatrième couche limite de puissance. Les résultats calculés sont en bon accord avec les données expérimentales disponibles. L'effet de la couche limite d'entrée sur le champ d'écoulement dans le cas bidimensionnel a été analysé. La pression moyenne dans le temps autour du corps cubique du bluff, le modèle de sillage derrière le corps, le vortex en fer à cheval et une paire de tourbillons axiaux dans la région du sillage éloigné étaient bien prédits.

17-Harnane,al(2014) [17] : ont réalisé Dans la présente étude, des expériences ont été menées pour la convection turbulente naturelle induite par une barre carrée chauffée dans un canal vertical ouvert bidimensionnel (2D) pour différents nombres de Rayleigh et positions de barre. À cette fin, un système de vélocimétrie d'image de particules (PIV) a été utilisé pour étudier le champ de vitesse dans le plan du canal central vertical. Le présent travail s'intéresse également à la simulation de la dynamique des fluides par calcul (CFD) en utilisant un grand modèle de turbulence par simulation de tourbillon (LES), utilisé dans le code de simulation dynamique du feu (FDS). Des calculs ont été effectués pour différents rapports d'aspect de cheminée A (hauteur H sur largeur L) et des nombres de Rayleigh modifiés compris entre 4×10^7 et 10^8 . Les résultats expérimentaux et numériques comprenaient des profils de vitesse moyenne; la structure du flux et le nombre de Nusselt ont été présentés et discutés. Pour valider le code CFD, les profils de vitesse le long de l'élévation du canal ont été comparés à nos mesures expérimentales et un bon accord a été observé. Par conséquent, le code FDS est un outil utile pour simuler le champ dynamique de convection turbulente naturelle, et par conséquent le champ thermique dans une telle situation. Le code CFD a été utilisé pour étudier le meilleur emplacement de la barre chauffée (correspondant au meilleur effet de refroidissement) dans le canal ainsi que le meilleur débit d'air. Ce meilleur emplacement et son explication sont discutés dans cet article.

18-Ghaffari,al(2012) [18] : ont étudié Dans cet article, le dépôt de particules dans un écoulement turbulent chargé de particules sur un obstacle dans un tuyau droit est étudié expérimentalement et numériquement. Une caméra équipée d'un microscope permet d'observer les surfaces sur lesquelles des dépôts de particules peuvent avoir lieu. L'étude numérique est réalisée à l'aide de simulations de Navier Stokes à moyenne eulérienne-

Lagrangienne Reynolds pour modéliser l'écoulement et le potentiel de dépôt de particules dans l'équipement. Parmi les différents facteurs influençant la disposition des particules, nous faisons varier le coefficient de restitution dans les simulations numériques comme une méthode simple pour étudier le mouvement des particules rigides en collision après un impact. Les résultats des simulations sont présentés sous forme d'instantanés de la Position des particules et des vecteurs de vitesse d'écoulement dans le temps. Les comparaisons entre simulations numériques et observations sont en bon accord et montrent que la diminution du coefficient de restitution entraîne une augmentation du potentiel de dépôt après des collisions de particules, bien que cela ne soit pas suffisant pour provoquer un dépôt réel.

19-He, Jianming,al(1994) [19] : ont réalisé L'objectif principal de l'article est d'introduire la méthode numérique et de montrer sa capacité à simuler un écoulement de cisaillement de turbulence tridimensionnel autour d'un obstacle monté en surface, qui peut contenir des composants stables ou instables. La raison pour laquelle seules les quantités moyennées dans le temps ont été présentées est que seules ces valeurs expérimentales sont disponibles pour comparaison. Comme indiqué dans l'article, nous aborderons la question de l'instabilité dans un autre article en raison de la contrainte d'espace. En fait, des résultats très intéressants sur l'instabilité ont été obtenus dans le calcul. Certains des résultats peuvent être consultés dans d'autres publications (He 1992; Song et He 1992a). De plus, les différentes études de cas telles que les différentes directions et géométries du vent, comme les intervenants l'ont mentionné, ne peuvent pas être incluses dans un seul article. Nous pensons que si une méthode numérique est capable de simuler un modèle de base qui a des données expérimentales bien documentées, il n'est pas difficile de mettre en œuvre la méthode dans différents cas d'ingénierie. Les lecteurs intéressés peuvent trouver ses applications techniques dans nos récents rapports de recherche (Song et He 1992b; Song et He 1993).

20-Gamel,al (2014) [20] : ont effectué La prédiction de la dynamique d'écoulement produite par l'interaction entre un écoulement turbulent cisailé et un corps de falaise a des implications importantes dans le domaine de l'ingénierie éolienne et pour ce qui concerne la simulation de la dispersion atmosphérique des polluants atmosphériques. Dans cette étude, nous présentons les résultats de l'enquête expérimentale sur le sillage d'un obstacle 2D, immergé dans un écoulement de couche limite à stratification neutre. Les mesures sont effectuées au moyen de deux techniques différentes, à savoir l'anémométrie laser Doppler et la vélocimétrie par image stéréoscopique. Celles-ci nous permettent de cartographier l'évolution spatiale des statistiques de vitesse jusqu'à leurs moments de troisième ordre. L'étude porte en particulier sur le bilan de l'énergie cinétique turbulente (t.k.e.) et

L'estimation de son taux de dissipation moyen. L'ensemble de données expérimentales est la base d'une analyse détaillée de la fiabilité et des principales limites d'un modèle de fermeture $k-\epsilon$ classique. Cela a des implications majeures pour la simulation numérique de la dispersion des polluants dans l'environnement bâti.

21-Yin,al(2017) [21] : ont travaillé sur L'étude du battement d'aile très instable comprend les tourbillons à grande échelle, la locomotion / dynamique compliquée et les structures d'ailes déformables. Lorsque des insectes / oiseaux battants s'approchent ou se perchent sur certains objets, tels que le sol, un mur ou un obstacle, la frontière solide se dissipe, absorbe et rebondit le bord d'attaque, le bord de fuite et les tourbillons d'extrémité d'aile, qui sont générés et perdus pendant le vol battant. Un tel phénomène crée une zone de haute pression, conduit à un effet d'amortissement et influence considérablement le nom, la stabilité et la maniabilité de l'aérody.

Cet article utilise la méthode des limites immergées (IBM) pour étudier numériquement les performances aérodynamiques de l'aile battante à proximité d'obstacles, étudier la distance, les effets de mouvement de battement et de flexibilité de l'aile et les modèles d'écoulement symétriques / asymétriques pertinents, rechercher l'influence du vortex générer et éliminer le changement de portance / traînée, explorez la distance clé et révélez le mécanisme comment les insectes / oiseaux ajustent le mouvement de battement pour obtenir un vol idéal. Une telle recherche pourrait théoriquement soutenir le développement d'un véhicule micro-bionique à voilure battante.

22-Singh,al(2018) [22] : ont travaillé sur L'article présente une étude expérimentale dans un canal de laboratoire pour étudier le flux combiné vague-courant au-dessus d'un obstacle cubique fixé au mur. Des données de vitesse détaillées ont été recueillies à l'aide d'un vélocimètre Doppler micro-acoustique tridimensionnel (3D) de l'amont à l'aval du cube le long de la ligne médiane du canal. Cette étude examine les spectres, les co-spectres et l'analyse du flux d'énergie cinétique de turbulence sous l'influence du cube dans la couche limite turbulente. On observe que les distributions d'énergie spectrale et co-spectrale dans le sens des flux varient avec l'ajout d'onde de surface. Une attention particulière est également accordée à la compréhension du comportement des moments d'ordre supérieur afin de prendre en compte explicitement les caractéristiques de transport d'impulsion turbulente sur un cube mural sous les interactions vague-courant.

23-Kashinsky,al (2014) [23] : ont mené Une étude expérimentale de l'écoulement de liquide et du transfert de chaleur dans un canal annulaire est réalisée. Le canal se composait de deux tubes coaxiaux avec les diamètres de 42,2 et 20 mm. Un obstacle couvrant un quart de la section du canal a été placé dans le canal pour produire une forte perturbation tridimensionnelle de l'écoulement. Les mesures de la contrainte de cisaillement de paroi

Locale sont effectuées à l'aide d'une technique électrochimique. Des mesures de transfert thermique, de contrainte de cisaillement de paroi moyennée dans le temps et fluctuante sont effectuées en différents points par rapport à l'obstacle, ce qui a permis d'étudier le champ des paramètres hydrodynamiques de l'écoulement. Les données expérimentales obtenues peuvent être utilisées pour la validation de codes informatiques existants et en développement représentant une structure 3D d'écoulements turbulents.

24-Chatterjee,al (2020) [24] : ont étudié Le champ d'écoulement local et la région de sillage au-dessus d'un obstacle orienté vers l'avant ont été étudiés expérimentalement, lorsque la surface de l'eau au-dessus de l'obstacle a été plongée par rapport à un écoulement plus en amont et plus en aval. L'obstacle a été modélisé ressemblant à la forme d'un profil aérodynamique avec un sommet plat ayant une pente du côté stoss de 35° et une pente du côté sous le vent en aval de 6° conçue pour une séparation minimale de l'écoulement. L'obstacle submergé a montré un changement évolutif dans le champ d'écoulement avec une forme de surface d'eau plongée au-dessus de la crête; et par conséquent, trois régions d'écoulement distinctes ont été observées: la région en amont, la région de crête et l'aval. Les données de vitesse ont été enregistrées à l'aide d'un vélocimètre Doppler micro-acoustique tridimensionnel le long de la ligne médiane du canal pour trois nombres de Reynolds d'écoulement et différents nombres de Froude localisés. L'article met en évidence les paramètres premiers de l'écoulement et de la turbulence: statistiques de second ordre, énergie cinétique de turbulence, viscosité des tourbillons, production de turbulence, fonctions de densité de probabilité et contributions de la fraction de contrainte en quatre quadrants à la contrainte de cisaillement totale le long de l'écoulement. L'analyse spectrale a été réalisée pour examiner les distributions d'énergie, les fréquences de délestage de vortex avec les nombres de Strouhal correspondants. Les variations de l'échelle de longueur intégrale de turbulence le long de l'écoulement passant au-dessus de l'obstacle ont été étudiées pour examiner les échelles de rotation des tourbillons. Les caractéristiques turbulentes étaient assez inspirantes car elles conduisaient à une accélération prononcée sur l'emplacement de la crête comme un jet avec une région centrale potentielle, et à une déviation allongée dans la pente descendante. Les résultats fournissent une turbulence de base dans un environnement naturel pour diverses phases de reflux et de marée sur un obstacle lisse submergé ou des collines de montagne dans une rivière / océan.

25- J.Hines,al(2009) [25] : ont effectué La présente étude se concentre sur le développement de la méthodologie nécessaire à l'étude des interactions fluide-structure entre un cylindre de section carrée et un écoulement transversal turbulent. Le cylindre carré est simulé dans trois configurations: 1) stationnaire, 2) subissant un mouvement vertical prescrit et 3) subissant un mouvement vertical autonome. Le mouvement du cylindre carré à travers le domaine de calcul est facilité par une méthode de déformation localisée du maillage, qui déforme les volumes de contrôle immédiatement au-dessus et au-dessous du cylindre carré à mesure qu'il se déplace. Les résultats pour le mouvement vertical prescrit du cylindre, régi par des équations sinusoïdales de mouvement, sont comparés à ceux de la littérature publiée et un accord substantiel est obtenu. Afin de simuler un mouvement autonome, un modèle de vibration est implémenté fournissant une application directe de l'équilibre de cisaillement et de pression autour du cylindre carré au mouvement du cylindre.

26-ALIANE Khaled,al(2014) [26] : ont étudié des écoulements autour d'obstacles trouve son intérêt dans de nombreuses applications. Pour cela, une telle étude est élargie investiguée par les chercheurs. Chacun d'entre eux vise un objectif différent de l'autre et trouve de nouveaux résultats pour de nouvelles applications. L'étude des écoulements autour d'obstacles se décompose en trois positions différentes par rapport à l'obstacle: en amont de l'obstacle, sur l'obstacle et en aval de ce dernier. Les travaux des différents chercheurs confirment tous que l'étude des deux premières positions est plus ou moins maîtrisée et que le comportement du fluide dans ces endroits est bien connu. Par contre, le comportement du fluide en aval de l'obstacle est moins connu et des modélisations physiques et numériques sont en cours vu l'existence des zones de recirculation caractérisées par leurs comportements complexes. L'étude de la variation de ces zones de recirculation et de leurs longueurs de réattachement présente son intérêt dans plusieurs applications, notamment dans le refroidissement des composants électroniques et les échangeurs de chaleur. Elle est fortement intéressante lors de l'étude de la basse couche de l'atmosphère urbaine qui est la canopée urbaine, existante entre le sol et le niveau moyen des toits. Dans cet endroit, la longueur de ré attachement qui détermine l'envergure de la zone de recirculation des courants de retour emprisonne des aérosols et des polluants gazeux particuliers dont les tailles sont liées directement à la taille de ces zones. L'apport de cette étude consiste à montrer l'effet de l'arrondissement se trouve sur l'arête amont et aval de l'obstacle rectangulaire sur les dimensions de la longueur de ré attachement XR / h et sur la deuxième zone de recirculation créée en aval de cet obstacle. Pour ce faire, on compare les résultats de l'obstacle rectangulaire avec ceux de l'obstacle rectangulaire arrondi sur l'arête amont et arrondi sur l'arête aval.

27-ALIANE Khaled,al(2006) [27] : ont étudié l'écoulement bidimensionnel autour d'obstacles en fonction du nombre de Reynolds Re et du rapport sans dimension h/H (hauteur de l'obstacle/Hauteur du canal), est envisagée afin d'examiner l'écoulement autour de deux modèles d' obstacles, un obstacle rectangulaire et un obstacle rectangulaire à bout arrondi. Deux régions importantes en aval de l'obstacle sont à étudier : la première c'est la zone de recirculation générée en aval de l'obstacle où on étudie les dimensions des longueurs de ré attachement X_R/h . La deuxième région est la deuxième zone de recirculation. L'influence de la forme arrondie sur les dimensions des longueurs de ré attachement et sur la génération de la deuxième zone de recirculation est illustrée et cela, en comparant les résultats obtenus pour les deux modèles d'obstacles. Les mesures sont effectuées en utilisant l'anémomètre Laser à effet Doppler.

3 But de travail

Dans ce travail, les questions de la turbulence bidimensionnelle et de la simulation numérique directe des écoulements turbulents sont abordées dans l'étude d'un écoulement turbulent isotherme bidimensionnel autour d'un obstacle. Dans ce qui suit, les équations gouvernantes sont présentées ainsi que le domaine de calcul et les paramètres de l'écoulement. Les questions relatives aux conditions initiales et aux conditions limites d'entrée et de sortie, et les forces sont ensuite examinées, suivies de la formulation par éléments finis et des détails de calcul. Les résultats de ce travail sont ensuite discutés et des conclusions sont finalement tirées.

Le but de ce travail est d'étudier numériquement les phénomènes de l'écoulement turbulent stationnaire du fluide incompressible et sans transfert de chaleur autour d'un obstacle.

Dans le cas bidimensionnel, une simulation numérique a été faite à l'aide du code de calcul COMSOL. Étudier l'influence de différents nombres de Reynolds et aussi le différent géométrique des obstacles, pour comparer les différents champs de vitesse, et de pression ainsi le phénomène de van-Karman entre l'écoulement autour d'obstacles cercle, carré, ellipse. L'effet de la turbulence sur l'écoulement a été pris en compte en utilisant le modèle $k-\epsilon$. Dans tous les cas considérés, les champs de pression et de vitesse satisfaisant, les phénomènes physiques tels que le développement des couches limites, la variation du coefficient de frottement et la zone de production de l'énergie cinétique turbulente ont tous été captés par la présente simulation.

4 Plan de l'étude

Ce travail comprend une introduction générale et une étude bibliographique avec quatre chapitres répartis comme suit :

- le premier chapitre : comporte une description générale d'un écoulement turbulent.
- le deuxième chapitre : présente la modélisation physique et mathématique du problème qu'on a. On cite les géométries étudiées ainsi que les hypothèses simplificatrices accompagnées par une étude détaillée des équations qui régissent un écoulement turbulent dérangé par un obstacle placé sur le fond d'un canal soumis par des conditions aux limites pour résoudre le problème.
- le troisième chapitre : consacré à une résolution numérique et une description des étapes de notre simulation par Comsol.
- le quatrième chapitre : qui donne les résultats obtenus et les interprétations.
- une conclusion générale est donnée à la fin de ce mémoire.



CHAPITRE 1

DESCRIPTION GENERALE

CHAPITRE 1

DESCITION GENERALE

1.1 GENERALITES

Les écoulements autour des objets est un phénomène qui se produit constamment dans la pratique et essentiel 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 a section carrée et circulaire. L'indentification et l'étude des phénomènes hydro et aérodynamiques qui présenter dans le sillage d'un obstacle restent un sujet d'intérêt dans divers domaines.

1.2 La Turbulence

Par définition, un mouvement turbulent est irrégulier. L'irrégularité associée à la turbulence est telle qu'elle peut être décrite par des lois de probabilités. L'écoulement turbulent peut être défini à travers les différentes quantités (par exemple les composantes de la vitesse et la pression) qui montrent une variation aléatoire avec le temps et l'espace de telle sorte que la moyenne statistique de ces quantités peut être exprimée quantitativement. Il est montré que les fluctuations provenant de ce mouvement aléatoire viennent des perturbations (dus à la rugosité de la surface par exemple) et peuvent être soit amorties par dissipation visqueuse soit amplifiées en pompant de l'énergie à partir de l'écoulement au loin. Pour un nombre de Reynolds inférieur à un nombre de Reynolds critique, l'énergie cinétique de l'écoulement n'est pas suffisante pour soutenir les fluctuations aléatoires contre les efforts visqueux et donc pour ces cas l'hypothèse d'un écoulement laminaire reste valable. Dans le cas contraire, la transition vers la turbulence.

1.3 Les caractéristiques de la turbulence

La caractéristique principale d'un mouvement turbulent vient du fait que les vitesses et pression en un point fluctuent avec le temps de façon aléatoire (voir Figure .1).

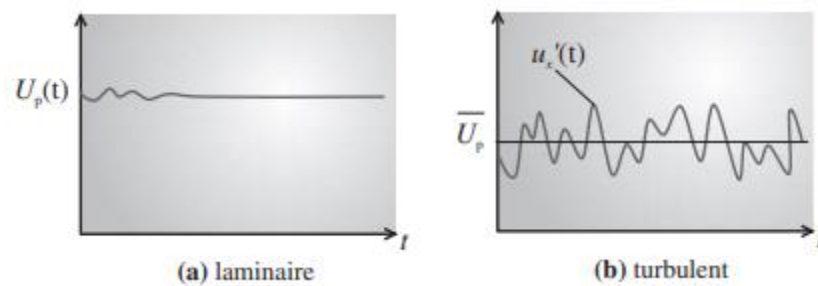


Figure 1.1 : Variation d'une des composantes de la vitesse pour des écoulements (a) laminaire et (b) turbulent en un point P. [35]

Le mélange dans un écoulement turbulent est dû à ces fluctuations qui donnent un profil de vitesses qui est plus uniforme en moyenne que dans le cas d'un écoulement laminaire dans un tube (voir Figure .2).

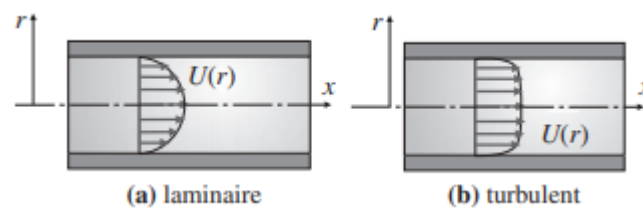


Figure 1.2 : Comparaison des profils de vitesse dans un tube à écoulement (a) laminaire et (b) turbulent. [35]

1.4 La transition laminaire-turbulent

La transition de l'écoulement d'un régime laminaire vers un régime turbulent dépend du nombre de Reynolds. La zone de transition entre l'écoulement laminaire et turbulent dépend aussi du nombre de Reynolds.

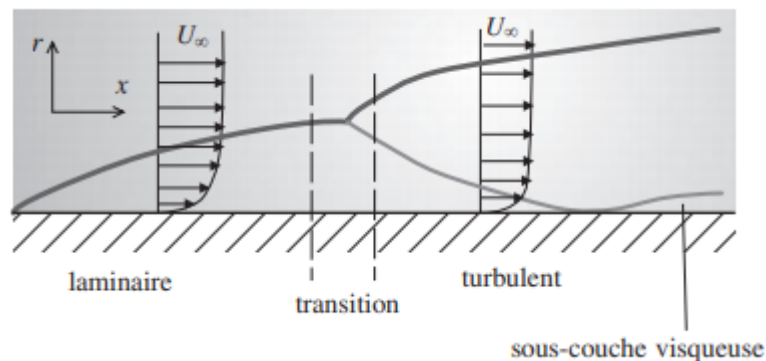


Figure 1.3 : Transition laminaire-turbulent. [35]

1.5 Nombre de Reynold (Re)

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

Régime d'écoulement :

- Laminaire : $Re \leq 2000$.
- Transitoire : $2000 < Re < 3000$.
- Turbulent : $Re > 3000$.

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu} = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (1-1)$$

Re : nombre de Reynolds s.u.

ν : viscosité cinématique en m^2 / s

V : vitesse débitante en m/s.

μ : viscosité dynamique en $kg / (m \cdot s)$

D : diamètre en m.

ρ : masse volumique en kg / m^3 .

1.6 La couche limite

La couche limite est la zone d'interface entre un corps et le fluide environnant lors d'un mouvement relatif entre les deux. Elle est la conséquence de la viscosité du fluide et est un élément important en mécanique des fluides (aérodynamique, hydrodynamique), en météorologie, en océanographie, etc... Quand un écoulement de fluide rencontre un obstacle, la vitesse de l'écoulement est, dû au frottement sur la surface de l'obstacle et à la viscosité de l'écoulement, égale à zéro sur la surface de l'obstacle. Au dessus de la surface, la vitesse de l'écoulement augmente progressivement jusqu'à une certaine hauteur où la vitesse de l'écoulement non perturbé peut être retrouvée. Cette zone, dans laquelle la vitesse de l'écoulement passe de zéro jusqu'à sa vitesse non perturbée, s'appelle la couche limite, notée δ . Le domaine de transition où la vitesse devient progressivement nulle est appelée « couche limite ».

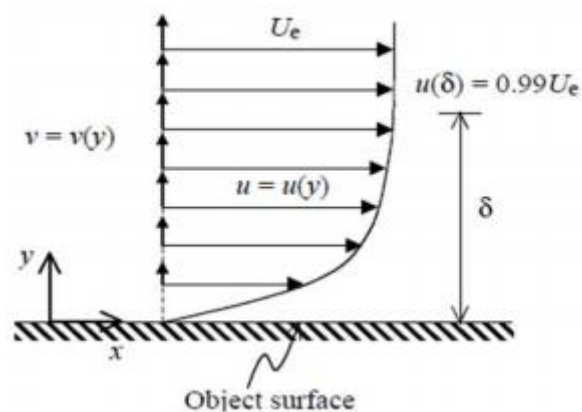


Figure1.4 : Couche limite sur un obstacle.

1.7 Caractéristique de la couche limite

« La couche limite dépend du nombre de Reynolds Re , soit laminaire soit turbulent » .Lorsque le nombre de Reynolds est assez bas, et que la turbulence amont est faible, la couche limite reste **laminaire**. Si on augmente le nombre de Reynolds, ou bien si la turbulence amont est forte, cette couche limite devient **turbulente**.

<p>Couche limite laminaire :</p> <p>$Re < 5.10^5$</p>	$C_d = \frac{1.328}{\sqrt{Re}}$ $\frac{\delta}{x} = \frac{5}{\sqrt{Re_x}}$ $\tau = 0.33\rho v^2 \sqrt{\frac{\nu}{x}} = \frac{0.33\rho v^2}{\sqrt{Re_x}}$
<p>Couche limite Turbulente :</p> <p>$Re > 5.10^5$</p>	<div style="text-align: right; border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">$Re < 10^7$</div> $C_d = \frac{0.074}{Re^{0.2}}$ $\frac{\delta}{x} = \frac{0.38}{Re_x^{0.2}}$
	<div style="text-align: right; border: 1px solid black; padding: 2px; width: fit-content; margin: 0 auto;">$Re > 10^7$</div> $C_d = \frac{0.455}{(\log Re)^{2.58}}$ $\frac{\delta}{x} = \frac{0.22}{Re_x^{0.167}}$ $\tau = \frac{0.023\rho v^2}{\left(\frac{\delta \cdot v}{\nu}\right)^{\frac{1}{4}}}$

T : force de Trainée global (frottement), ou force drag (F_d) :

$$T = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot s \cdot C_d$$

(1-2)

C_d : Coefficient Trainée moyenne (global).

T : force de Trainée local :

$$T = \frac{1}{2} \rho \cdot u^2 \cdot s \cdot C_f$$

(1-3)

C_f : Coefficient Trainée locale.

δ : Epaisseur de la couche limite.

τ : Contrainte tangentielle.

1.8 Notion de portance et traînée

D'une manière générale, l'écoulement bidimensionnel autour d'un obstacle placé dans un champ de vitesse uniforme développe une fine couche tout le long de cet objet avec une grande variation de la vitesse autour de cet obstacle. Cette couche est appelée couche limite et est due à la viscosité du fluide. En outre, l'écoulement se sépare derrière l'objet générant des tourbillons dans son sillage. Prenons l'exemple de l'écoulement autour d'un cylindre comme illustré sur la Figure .5. L'écoulement du point amont « a » s'arrête à un point « b » sur la surface de l'objet avec la vitesse qui décroît jusqu'à zéro ; le point « b » est appelé point d'arrêt. L'écoulement se divise alors en deux parties au point « b ». Pour le cylindre, l'écoulement se sépare ensuite au point « c » en produisant un sillage avec des tourbillons (zone de décollement). En appliquant l'équation de Bernoulli entre le point amont « a » et le point d'arrêt « b », on peut déterminer la pression P_0 au point d'arrêt :

$$P_0 = P_\infty + \frac{\rho U^2}{2}$$

(1-4)

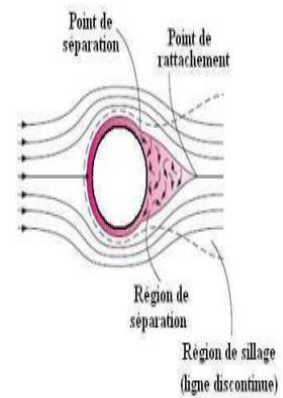
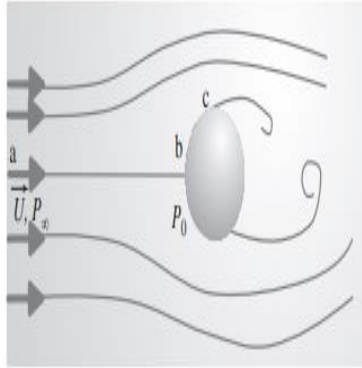


Figure 1.5 : Écoulement autour d'un cylindre **Figure1.6 :** Écoulement autour d'un cylindre.

1.9 Forces agissant sur l'obstacle

Lorsqu'un objet est placé dans un écoulement, il est soumis à une force provenant du fluide environnant. Une plaque plane placée dans la direction de l'écoulement n'est soumise qu'à une force dans la direction de l'écoulement. En revanche, dans le cas de l'écoulement autour d'un profil d'aile (voir Figure 1.7), la force \vec{F} agissant sur l'obstacle peut être décomposée en une force \vec{T} (Traînée ou « Drag ») dans la direction de l'écoulement et une force \vec{L} (Portance ou « Lift ») normale à la vitesse \vec{U} .

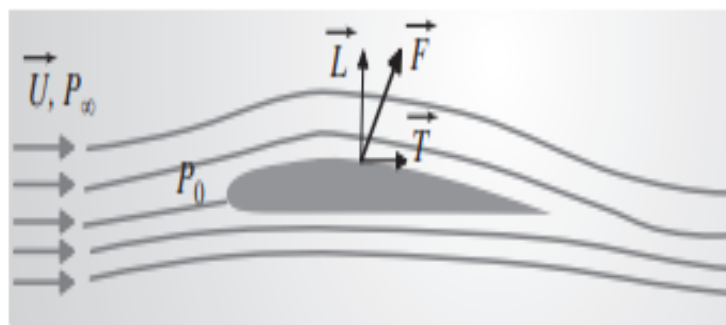


Figure 1.7 : Écoulement autour d'un profil d'aile.

Soit l'effort de pression P sur un élément de surface dS ainsi que l'effort tangentiel τ (ou de frottement) sur ce même élément dS . La force $P dS$ due à la pression P agit normalement à la surface dS alors que la force de frottement τ agit de façon tangentielle (voir la Figure .8).

- La traînée T_p qui est l'intégrale sur la surface de l'ensemble de l'objet de la Composante de la force $P dS$ dans la direction de l'écoulement est appelée **traînée de pression**.
- La traînée T_f est une intégration similaire de la force τdS et est appelée **traînée de frottement**.

Ces deux forces peuvent s'écrire sous la forme suivante (voir Tableau. 1) pour les valeurs de ces forces dans le cas d'objets usuels) :

$$T_p = \iint_s p ds \cos \theta \quad (1-5)$$

$$T_f = \iint_s \tau ds \sin \theta \quad (1-6)$$

Par conséquent la traînée totale peut s'écrire :

$$T = T_p + T_s \quad (1-7)$$

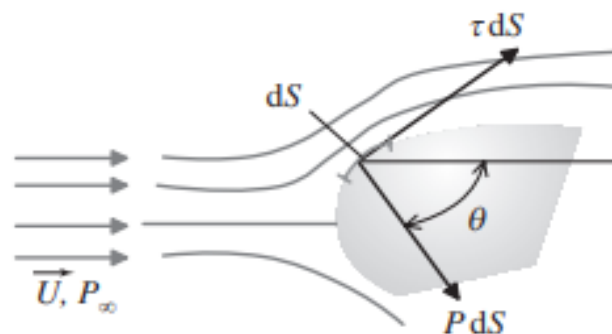


Figure 1.8 : Efforts de pression et de frottement sur un élément dS .



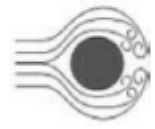
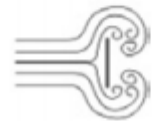
Forme	Traînée de pression T_p (%)	Traînée de frottement T_f (%)
	0	100
	≈ 10	≈ 90
	≈ 90	≈ 10
	100	0

Tableau 1.1 : Quelques exemples de traînée de pression et de frottement.

Avec le même raisonnement que pour la traînée, on peut déduire les expressions de la portance due à la pression et celle due au frottement :

$$L_p = \iint_s -pdA \sin \theta \quad (1-8)$$

$$L_f = \iint_s \tau dA \cos \theta \quad (1-9)$$

La portance totale peut donc s'écrire :

$$L = L_p + L_f \quad (1-10)$$

1.9.1 La traînée

La composante de la force dans le sens de l'écoulement (le courant libre) qui affecte le corps immergé, appelée force de traînée, symbolisée par FD (Drag force) ou T.

La traînée est obtenue par le système (Figure 1.7) mais est en général difficile à obtenir théoriquement pour tous types d'obstacles et de vitesses excepté pour des objets de forme simple et pour des valeurs définies de la vitesse. Par conséquent, on se tourne souvent vers les expériences et on calcule la traînée par la formule suivante :

$$T = \frac{1}{2} \rho u^2 . S . C_D \quad (1-11)$$

CD : Le coefficient de traînée (adimensionnel).

ρ : La densité du fluide.

U : la vitesse relative entre le corps et le fluide.

S : La surface.

Où S est la surface projetée de l'objet sur un plan vertical à la direction de l'écoulement uniforme (surface frontale) et C_D est le coefficient de traînée sans dimension. Quelques exemples du coefficient C_D sont fournis dans le (Tableau 1.2) en fonction de la géométrie et du type d'écoulement (nombre de Reynolds Re).

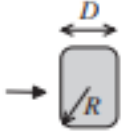


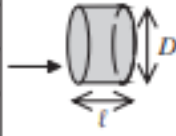
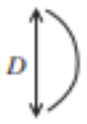



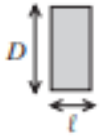

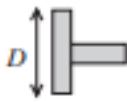


géométrie	S	Re	C _D		géométrie	S	Re	C _D	
			R/D	C _D					
	b × D	10 ⁵	R/D	C _D		b × D	>10 ⁴	1,98	
			0	2,2					
			0,02	2,0					
			0,17	1,2					
			0,33	1,0					
	b × D	10 ⁵	R/D	C _D		π D ² /4	>10 ⁵	l/D	C _D
			0	1,4				0,5	1,1
			0,02	1,2				1	0,93
			0,08	1,3				2	0,83
			0,25	1,1				4	0,85
	b × D	2 × 10 ⁴	2,3		π D ² /4	>10 ⁴	θ	C _D	
							10	0,30	
							30	0,55	
							60	0,80	
							90	1,15	
	b × D	>10 ⁴	2,15		π D ² /4		1,4		
	b × D	>10 ⁴	l/D	C _D		A	1,1		
			0,5	2,5					
			1	2,2					
			2	1,6					
	b × D	>10 ⁴	1,80		A	0,96			
								A	U (m · s ⁻¹)
10	0,43								
20	0,26								
		30	0,20						

Tableau 1.2: Quelques valeurs du coefficient de traînée en fonction de la forme de l'obstacle et du nombre de Reynolds (b est la largeur des profils, A est la surface apparente au vent, l'écoulement est toujours dirigé de la gauche vers la droite).

1.9.2 La portance

La composante de la force qui est verticale à la direction de l'écoulement, s'appelle la force de Portance et est symbolisée par F_L (lift force).

$$F_L = \frac{1}{2} \rho u^2 s C_L \quad (1-12)$$

CL: Le coefficient de portance (adimensionnel).

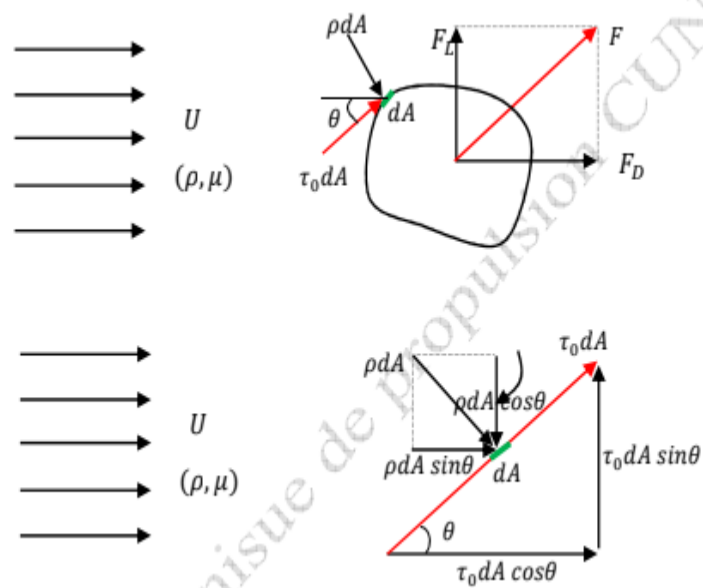


Figure1.9 : La force de pression et la force de frottement dans un élément de surface dans un Objet immergée.

Quand un courant libre s'approche d'un corps dans la direction de son axe de symétrie, la force Agissant sur ce corps est la force de traînée uniquement dans le sens de l'écoulement et il n'y a Pas de force de portance. La force de traînée est toujours présente et il est possible de faire un glissement sans soulèvement, mais il est impossible de lever sans tirer.

Pour générer une force efficace sur un corps, la viscosité du fluide affecte l'écoulement autour de Ce corps de trois manières:

- 1-**Lorsque les valeurs de Reynolds (Re) sont très basses, le fluide se déforme dans une zone très large autour du corps, provoquant la force de pression et la force de frottement.
- 2-** Plus le nombre de Reynolds est élevé, plus les effets de viscosité sur les couches limites sont limités, ce qui fait que la force de friction contrôle seule la limite.
- 3-**Pour certains corps avec des formes spéciales, la couche limite peut être séparée provoquant Plus de pression.



CHAPITRE 2

**FORMULATIONS
MATHEMATIQUES**

CHAPITRE 2

FORMULATION MATHÉMATIQUE

2 Introduction

Dans le présent travail, les écoulements considérés sont bidimensionnel turbulent, stationnaire d'un fluide incompressible, le fluide est visqueux et newtonien, sans transfert de chaleur. Dans ce qui suit, seront décrites les équations traduisant

le transport de masse (équation de continuité $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \nabla \cdot \vec{u} = 0$).

et de quantité de mouvement (équation de Navier Stokes $\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \mu \Delta \vec{u} + \rho \vec{g}$).

régissant de tels écoulements avec les simplifications nécessaires qui sont faites dans le code COMSOL selon les cas étudiés.

2.1 Equations de transport

Un écoulement établi, stationnaire, bidimensionnel, d'un fluide incompressible, newtonien autour d'un obstacle est caractérisé par les équations suivantes :

2.1.1-Equation de continuité

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (2-1)$$

2.1.2-Equations de quantité de mouvement (de Navier Stokes)

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

$$\underbrace{\frac{\partial U_i}{\partial t}}_{\text{instationnaire}} + \underbrace{U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j}}_{\text{convectif}} = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i}}_{\text{pression}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)}_{\text{terme visqueux}}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (2-2)$$

Comme nous sommes dans un cas stationnaire alors : le terme $\frac{\partial U_i}{\partial t} = 0$

L'équation (2-2) devient :

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (2-3)$$

Nous projetons l'équation (2-3) sur les directions X,Y , et étant donné que U,V sont les composantes de vitesse selon X,Y respectivement . Donc, nous obtenons :

$$\text{--Suivant X} \quad : \frac{\partial(UU)}{\partial x} + \frac{\partial(UV)}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} \quad (2-4)$$

$$\text{--Suivant Y} \quad : \frac{\partial(UV)}{\partial x} + \frac{\partial(VV)}{\partial y} = \nu \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} \quad (2-5)$$

L'équation de continuité s'écrit :

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (2-6)$$

Pour résoudre ce system nous utilisons les règle de Reynolds qui disent que chaque composante instantanée de l'écoulement (vitesse, pression,.....ext) est une somme de deux composantes : la première est une moyenne et la deuxième est une fluctuante.

$$U_i = \bar{U} + u_i', \bar{u}' = 0 \dots \dots \dots (2-7)$$

$$P = \bar{P} + p', \bar{p}' = 0 \dots \dots \dots (2-8)$$

Prenons l'équation (2-3) sur laquelle nous entrainons les formules précédentes, d'où nous pouvons obtenir la nouvelle équation suivante :

$$(\bar{U}_j + u_j') \frac{\partial (\bar{U}_i + u_i')}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_i} (\bar{P} + p') + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i + u_i') \right) \quad (2-9)$$

Après simplifications et l'application des règles de Reynolds, nous pouvons atteindre les équations moyennées de continuité et de quantité de mouvement suivants :

2.1.3 Équations de continuité moyennée

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2-10)$$

2.1.4 Équation de quantité de mouvement moyennée

$$\underbrace{\overline{U_j} \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{U_i})}_{\substack{\text{terme} \\ \text{convectif} \\ (1)}} = - \underbrace{\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i}}_{\substack{\text{effet} \\ \text{de la} \\ \text{pression} \\ (2)}} + \underbrace{\nu \frac{\partial^2 \overline{U_i}}{\partial x_j^2}}_{\substack{\text{contraite} \\ \text{visqueuse} \\ (3)}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \underbrace{\left(\overline{-\nu u_i u_j} \right)}_{\substack{\text{contraite} \\ \text{de Reynolds} \\ (4)}} \quad (2-11)$$

Le résolution de l'équation sera plus complexe à cause de la naissance d'inconnue supplémentaire $\left(\overline{u_i u_j} \right)$, pour cela on a besoin d'un modèle de turbulence afin de fermer le système d'équation.

2.2 Modèle de turbulence k-ε

Dans le code comsol, il existe différents modèles de turbulence, qui se distingue par un nombre d'équation de transport supplémentaires nécessaires pour fermer le système d'équations du problème à résoudre. Dans notre cas, on a utilisé le modèle k-ε standard qui est un modèle semi empirique basé sur le concept de Boussinesq reliant les contraintes de Reynolds, au taux de déformation moyen, (RANS) Reynolds Averaged Navier-Stokes :

$$\overline{-\rho u_i u_j} = \mu_t \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho K \quad (2-12)$$

$\frac{1}{2} \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right]$: est le tenseur de déformation.

$$K = \frac{\overline{u_i^2}}{2} \text{ est l'énergie cinétique turbulente.} \quad (2-13)$$

La viscosité turbulente caractérisée par une vitesse \sqrt{K} et une distance $L = \frac{K^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon}$ est donnée par :

$$\nu_t = C_\mu \sqrt{K} \frac{K^{\frac{3}{2}}}{\varepsilon} = C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon} \quad (2-14)$$

Avec $C_\mu = 0.09$

ε : est le taux de dissipation

K et ε sont obtenus à partir de ces deux fonctions :

- **2.2.1 Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k :**

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho K U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (2-15)$$

- **2.2.2 Equation de transport du taux de dissipation ε de l'énergie cinétique turbulent :**

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \varepsilon U_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{K} G_K - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (2-16)$$

$\sigma_k, \sigma_\varepsilon$ sont respectivement les nombres de Prandtl turbulents

relatifs à l'énergie cinétique turbulente et au taux de dissipation .

$C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}$ sont des constantes déterminées empiriquement Le terme de production G_k est donnée par :

$$G_k = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} = \rho \nu_t \left[\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right] \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} \quad (2-17)$$

Toutes les constantes sont regroupées dans le tableau suivant :

$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	C_μ	σ_k	σ_ε
1.44	1.92	0.09	1	1.3

Tableau 2.1 : Coefficients du modèle de turbulence K-ε.

2.3 Equation général de transport

Pour un écoulement turbulent d'un fluide incompressible, l'équation générale de transport peut s'écrire comme suit :

$$\underbrace{\text{div}(\varepsilon \rho U \Phi)}_{\text{terme convective}} = \underbrace{\text{div} \left(\overbrace{\Gamma_\Phi}^{\text{coef diffusion}} \text{grad} \Phi \right)}_{\text{terme diffusif}} + \underbrace{S_\Phi}_{\text{terme source}} \quad (2-18)$$

Le tableau (2-2) donne chaque terme de l'équation(2,18) pour les différentes grandeurs calculées dans le cas d'un écoulement incompressible, turbulent autour d'un obstacle.

Grandeur transportée	Φ	Γ_Φ	S_Φ
La continuité	1	0	0
Quantité de mouvement	u_i	ν	$-\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u_i u_j} \right]$
Energie cinétique turbulente	K	$\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k}$	$\nu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \varepsilon$
Taux de dissipation	ε	$\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon}$	$C_1 \nu_t \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$

Tableau 2.2 : Termes des grandeurs transportés.



CHAPITRE 3

RESOLUTION PAR COMSOL

CHAPITRE 3

RESOLUTION PAR COMSOL

3.1 Introduction

Dans ce travail, on s'intéresse à l'écoulement turbulent rencontrant un obstacle fixe placé sur le fond d'un canal. En mécanique des fluides, en supposant que le fluide est un milieu continu, on peut utiliser les lois classiques de conservation : la conservation de masse (équation de continuité), et la conservation de la quantité de mouvement (équation de NavierStokes). Pour résoudre un problème de turbulence, il faut de déterminer en tout point du domaine étudié les grandeurs physique qui caractérisent le fluide (l'eau) :

- le champ de vitesse.
- le champ de pression.
- le champ de l'énergie cinétique turbulente.
- le champ de dissipation de l'énergie cinétique turbulente.

Dans ce chapitre, nous présentons les géométries du problème pour tous les cas qu'on a, ensuite on présente le system des équations gouvernantes qui caractérisent le phénomène d'un écoulement turbulent dans un canal dérangé par un obstacle (cercle, carré, ellipse) sur le fond en utilisant le modèle de turbulence K- ϵ standard. Et pour résoudre ce system, il faut nécessairement cerner le domaine d'étude par des conditions aux limites.

3.2 COMSOL

C'est un pré processeur intégré pour l'analyse en CFD (computation fluide Dynamics). Il est utilisé pour construire une géométrie et générer son maillage.COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis. Ce logiciel permet de simuler de nombreuses physiques et applications en ingénierie, et tout particulièrement les phénomènes couplés ou simulation multi-physiques.

Dans le présent travail, COMSOL offre cette possibilité de définir des obstacles cercle et carrée et ellipse, créer un volume représentant le domaine d'étude et générer son maillage.

3.2.1 Géométrie

La géométrie du problème considéré est schématisée par la figure (3.1). Elle décrit un canal rectangulaire de longueur L et de hauteur H , et d'un obstacle de section cercle et carré, ellipse placé Sur le fond du canal. Les dimensions géométriques sont utilisées :

- Le canal est de longueur $L=250\text{cm}$.
- La hauteur du canal est de $H=30\text{cm}$.
- La distance entre l'entrée du canal et l'obstacle est $X_1=40\text{cm}$.
- La dimension de le cercle, carrée, ellipse c'est $d=10\text{cm}$.

Remarque : ces dimensions sont fixes pour tous les obstacles.

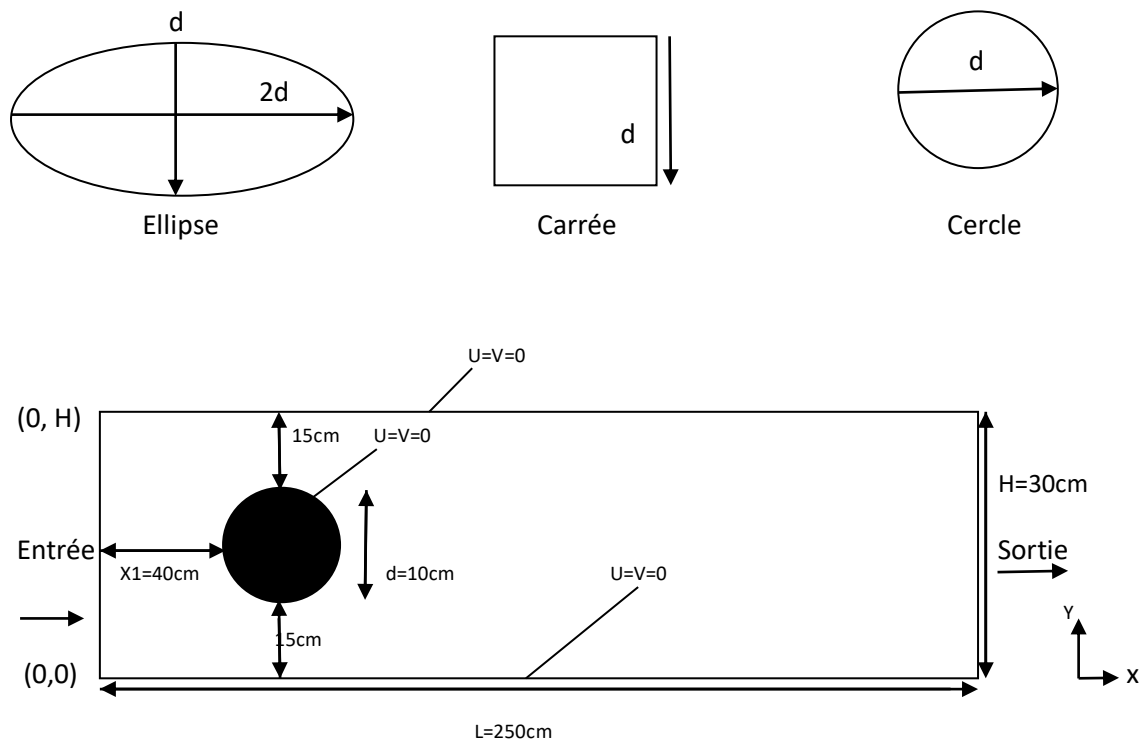


Figure 3.1 : Géométrie de localisation des obstacles.

3.2.2 Conditions aux limites

A l'entrée du canal : ($x=0$) $0 \leq Y \leq 30$

$$U(0, Y) = U_0 = U_p$$

$$V(0, Y) = 0$$

A la sortie du canal : ($x=L$) $0 \leq Y \leq 30$

$$P = P_{atm}$$

A la paroi inférieure et supérieure : $U = V = 0$

Remarque : ces conditions aux limites sont fixes pour tous les obstacles. Est schématisée par la figure (3.2).

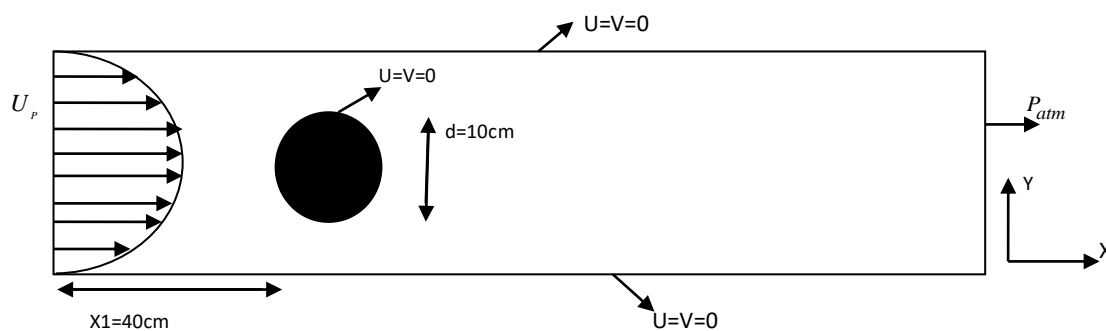


Figure 3.2 : conditions aux limites.

3.2.3 Les paramètres

Remarque : Ces Les paramètres sont fixes pour tous les obstacles (cercle, carrée, ellipse).

Tableau (3.1) d'prêt programme CFD (COMSOL).

Nom	Expression	Valeur	Description
H	30[cm]	0.30000m	Hauteur
L	250[cm]	2.5000m	Largeur
D	10[cm]	0.10000m	diamètre
X1	40[cm]	0.40000m	Distance entre l'entrée et l'obstacle
Re	4000	4000.0	Reynolds
rho	1000[kg/m ³]	1000.0 kg/m ³	densité
mu	0.001[Pa*s]	0.0010000 Pa.s	Viscosité dynamique
U0	$Re \cdot \mu / (\rho \cdot H)$	0.013333m/s	Vitesse initial

Tableau 3.1 : Les paramètres d'un écoulement turbulent autour d'un obstacle.

3.2.4 Maillage

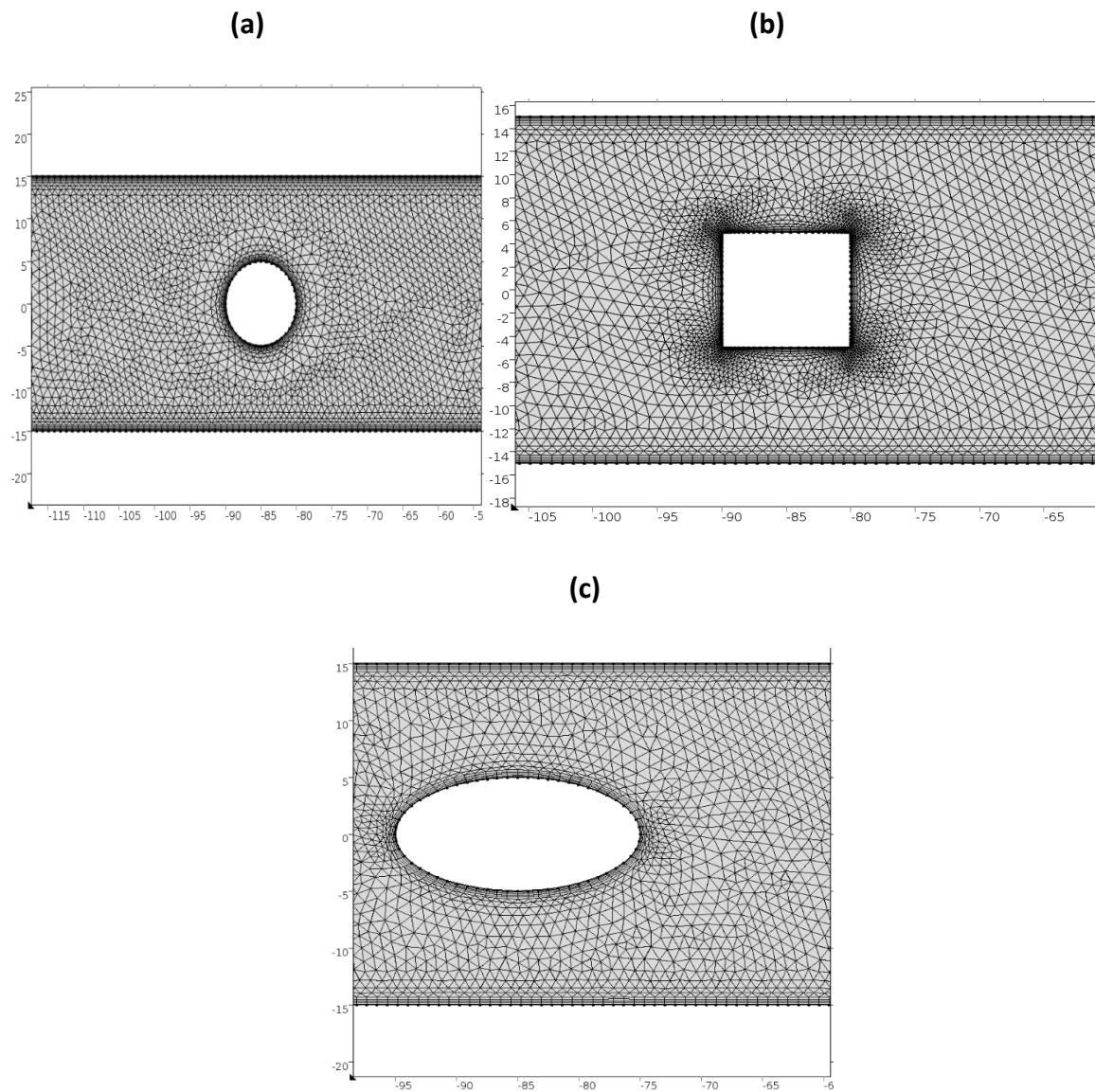


Figure 3.3 : (a) Maillage pour un obstacle cercle, (b) carrée, (c) ellipse à 2D et nombre Reynolds4000.



CHAPITRE 4

RESULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE 4

RESULTATS ET DISCUSSION

4 Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les résultats de la simulation numérique obtenus par le code de calcul utilisé. Notre problème port sur l'étude du comportement dynamique d'un écoulement turbulent dérangé par un obstacle(cercle, carré ,ellipse)placé sur le fond d'un canal. On s'intéresse principalement sur l'influence de nombre Reynolds c'est le premier cas, et la géométrie c'est le deuxième cas.

4.1 Premier Cas (L'écoulement autour d'un obstacle cercle)

A été simulé 2D à l'aide du code comsol. D'après trois cas de nombre du Reynolds différent :
Reynolds (100, 2000,4000).

4.1.1 Différents régimes de l'écoulement autour d'un cylindre ou cercle :

Ces différentes investigations ont mis en évidence les "régimes" successifs de l'écoulement en fonction du nombre de Reynolds :

- a) Ecoulement rampant : $Re \leq 5$.
- b) Régime stationnaire décollé : Pour $5 \leq Re \leq 48$.
- c) Régime laminaire instationnaire bidimensionnel : $48 < Re < 180$.

L'écoulement autour du cylindre est instationnaire pour $48 < Re < 180$. Au-delà d'une valeur critique du nombre de Reynolds ($Re = 48$), les deux zones de recirculation en aval du cylindre deviennent instables et sensibles à de petites perturbations qui conduisent au déclenchement de l'instabilité de von Kármán. Les deux tourbillons perdent leur symétrie par rapport à l'axe longitudinal, se détachent du cylindre alternativement et sont convectés

Dans le sillage. Cette instabilité absolue correspond à une bifurcation de Hopf supercritique [28]. Elle est de nature bidimensionnelle et se caractérise par une périodicité marquée : le spectre temporel de la vitesse ou de la pression en un point de l'écoulement présente un pic important à la fréquence de l'échappement tourbillonnaire [29]. Cette fréquence f , adimensionnée par la vitesse de l'écoulement incident à l'infini U et le diamètre du cylindre D définit le nombre de Strouhal : $St = fD/U$. Sur l'intervalle de valeurs du nombre de Reynolds considéré, le nombre de Strouhal augmente avec le nombre de Reynolds. La loi de similitude proposée et vérifiée expérimentalement par Goujon-Durand et al. [30] pour l'évolution de l'amplitude de l'oscillation liée à l'échappement tourbillonnaire dans le sillage d'un obstacle trapézoïdal épais a également été confirmée numériquement dans le cas d'un cylindre circulaire [31]. Par ailleurs, la moyenne temporelle de l'écoulement conduit à une topologie symétrique par rapport à l'axe longitudinal avec deux tourbillons contra-rotatifs attachés au cylindre. La longueur de ces "bulbes" de recirculation croît également avec le nombre de Reynolds.

Pour caractériser les forces exercées par le fluide sur le cylindre, les coefficients de traînée et de portance sont définis. Ils correspondent respectivement aux forces appliquées sur le corps dans la direction de l'écoulement et perpendiculairement à l'écoulement incident, adimensionnées par la masse volumique du fluide, sa vitesse à l'infini amont et une surface caractéristique calculée à partir du diamètre du cylindre et de son envergure. Ces forces sont les résultantes des actions de la pression pariétale et du frottement visqueux sur le cylindre obtenues par intégration sur sa surface. La symétrie de l'écoulement en moyenne temporelle conduit à un coefficient de portance nul en moyenne. Le coefficient de traînée moyen a tendance à diminuer lorsque le nombre de Reynolds augmente sur l'intervalle considéré [32].

d) Régime laminaire instationnaire tridimensionnel : $180 < Re < 300$.

e) Régime sous critique : $300 < Re < 2 \cdot 10^5$.

L'écoulement dévient turbulent dans le sillage mais la couche limite en amont du point de décollement reste laminaire pour $300 < Re < 2 \cdot 10^5$. A partir de $Re = 1000$, de petits tourbillons secondaires se développent de part et d'autre de l'allée tourbillonnaire suite à l'amplification de l'instabilité locale de Kelvin-Helmholtz dans les zones de cisaillement autour du cylindre [33]. Lorsque le nombre de Reynolds augmente ($Re \approx 2600$), cette instabilité est plus prononcée et couvre une région importante de la zone de mélange.

f) Régime super critique : $Re > 2 \times 10^6$.

Pour des nombres de Reynolds supérieurs à 2×10^6 , le régime est appelé régime super critique et l'écoulement est entièrement turbulent. Une étude détaillée de ce régime a été fournie par Roshko [34]. Dans ce cas, il a été montré que l'allée tourbillonnaire réapparaît dans le sillage à une fréquence de Strouhal constante plus élevée que celle des régimes précédents.

4.1.2 Simulation numérique

4.1.2.1 Champ de vitesse :

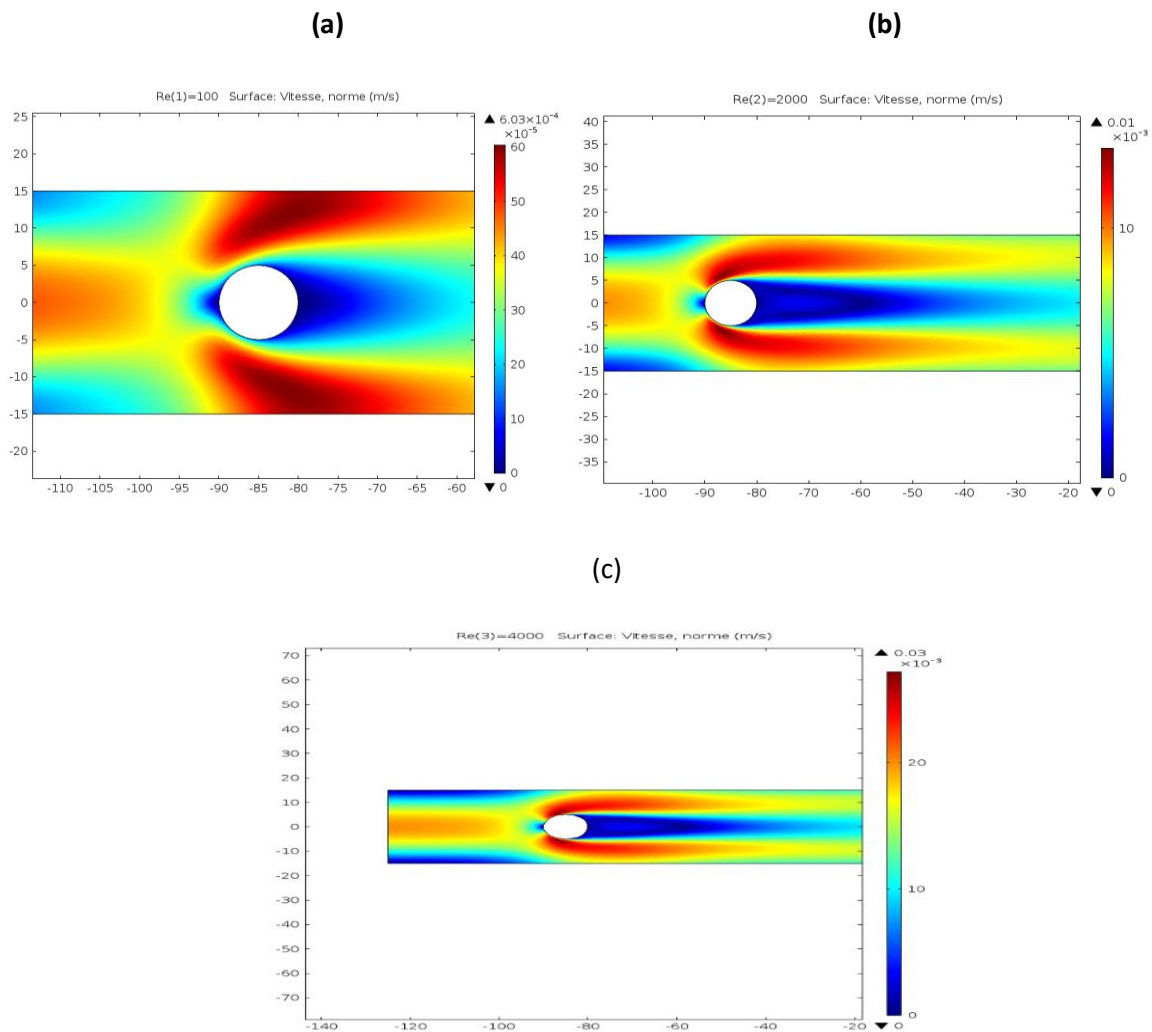


Figure 4.1 : contours du champ de vitesse d'après nombre Reynolds (a)100, (b) 2000,(c)4000.

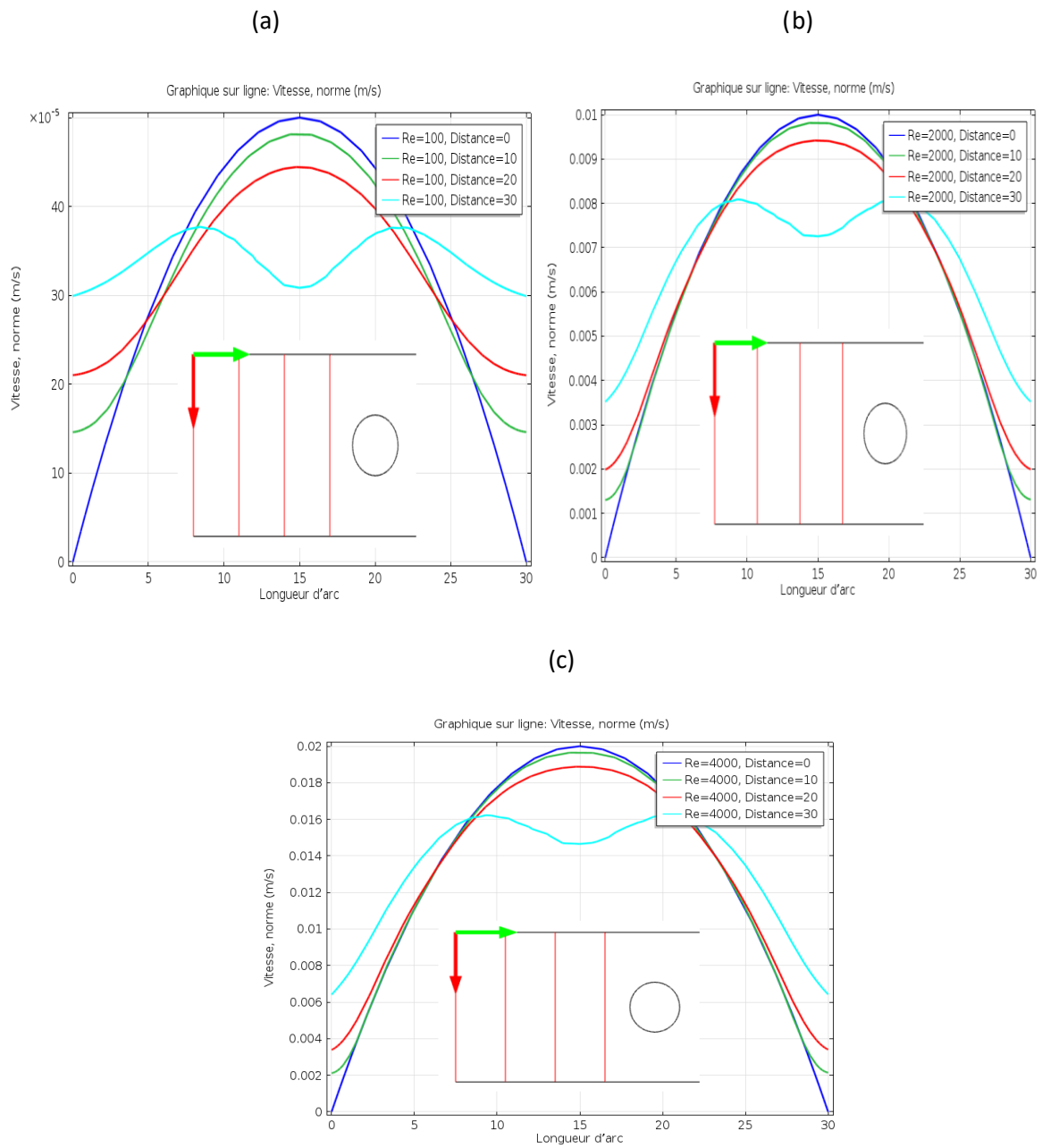


Figure 4.2 : profil de vitesse d'un écoulement autour d'un obstacle cercle, avec trois cas de nombre Reynolds (a)100, (b) 2000, (c)4000.

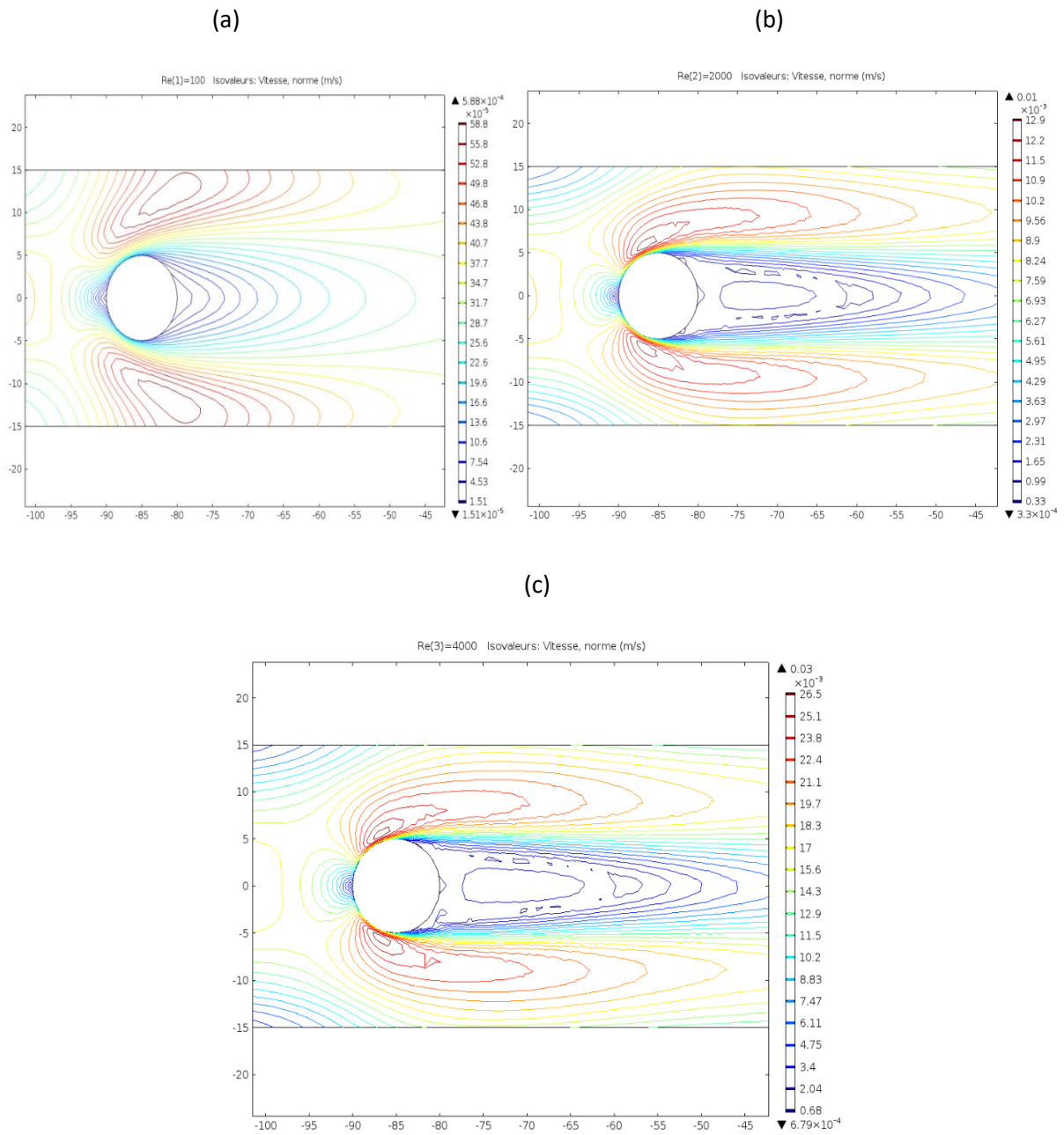


Figure 4.3 : Ligne du champ de vitesse d'après nombre Reynolds (a)100, (b) 2000, (c)4000.

4.1.2.2 Ligne de courant

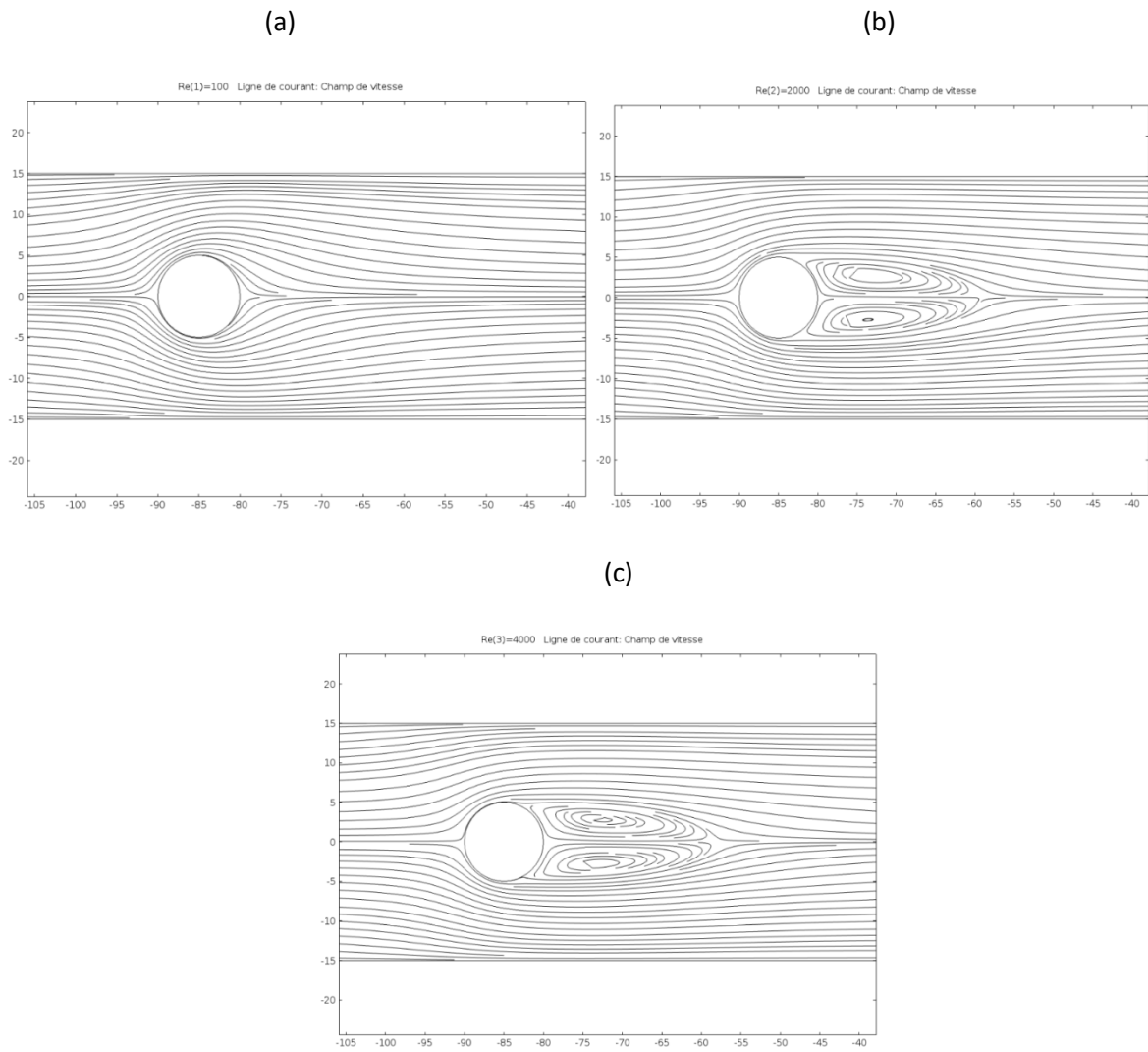


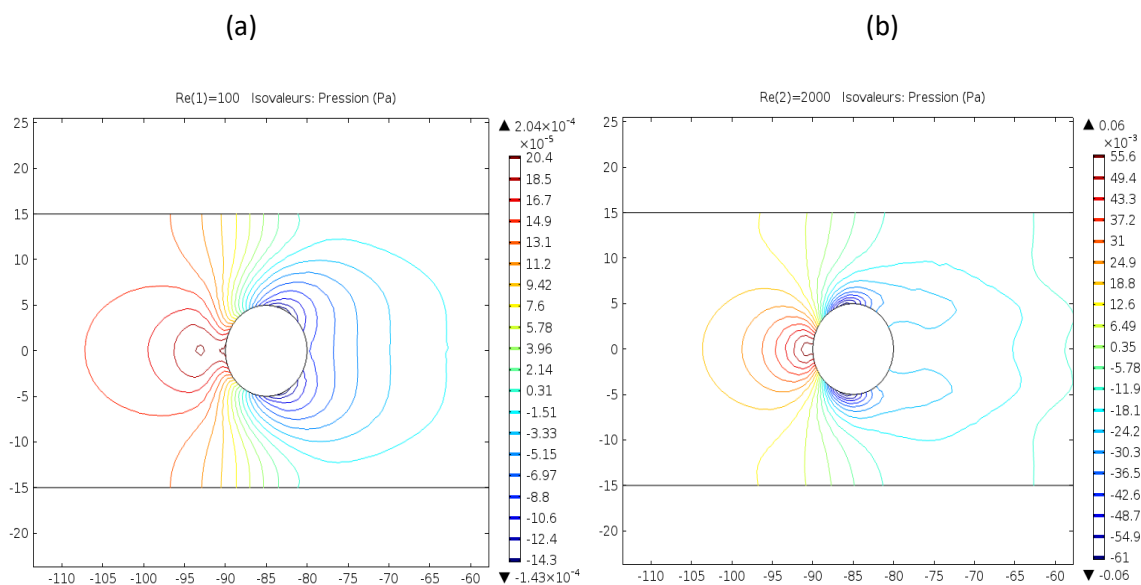
Figure 4.4 : Ligne courant du champ de vitesse d'après nombre Reynolds (a)100, (b) 2000, (c)4000.

4.1.2.3 Commentaires (Champ de vitesse)

Les figures (4.1....4.4) montrent les contours ainsi que le champ de la grandeur de la vitesse et les lignes de courant autour de l'obstacle cercle. A l'entrée, la vitesse est uniforme et égale à 0.01 m/s, comme condition aux limites. Nous pouvons remarquer une accélération de la vitesse entre l'espace paroi-obstacle, ceci est dû à la diminution de la section du passage du fluide. Là, il ya une conversion d'énergie du fluide provoquant un coefficient de frottement important. Puis en aval de l'obstacle et selon le régime et le nombre de Reynolds apparaisse un écoulement particulier et entraînant à chaque fois un nouveau point de décollement du fluide avec évidence de changement de la zone de sillage. L'écoulement autour des parois et dans le sillage reste peu perturbé par la présence de la structure comme schématisé Figure (4.4.a). On dit dans ce cas que l'écoulement est non décollé, c'est à dire que la vitesse du fluide au voisinage des parois tend à leur rester globalement parallèle.

Si la vitesse peut subir de très fortes perturbations jusqu'à présenter une inversion de sens sous la forme de tourbillons .On dit, dans ce cas que la couche limite est décollée parce que l'écoulement principal ne semble plus adhérer à la paroi. le bord de fuite comporte un culot produisant un sillage important comme schématisé dans la Figure (4.4.c).

4.1.2.4 Champ de pression



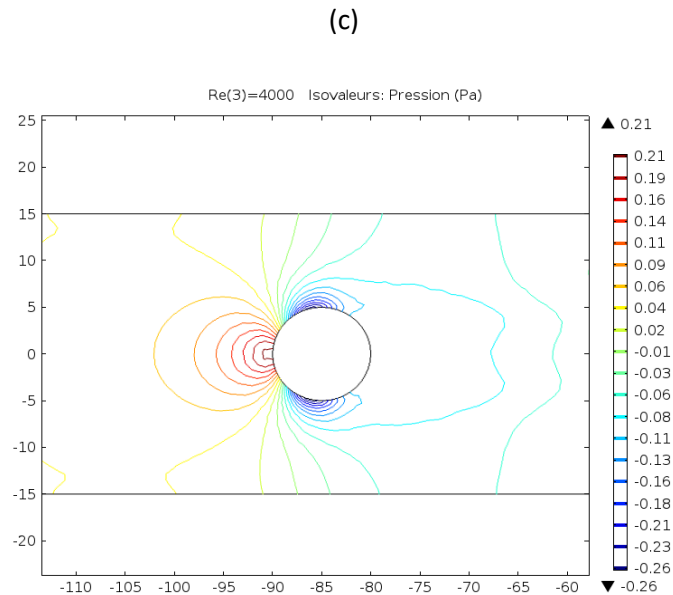


Figure 4.5 : Ligne du champ de pression d'après nombre Reynolds (a)100, (b) 2000, (c)4000.

4.1.2.5 Commentaires (Champ de pression)

Figures (4.5) montre le contour de la pression statique dans le domaine d'étude. La légère chute de pression de l'entrée à la sortie due au frottement du fluide avec les parois de l'obstacle et de canal est mise en évidence.

Plus le nombre de Reynolds augmente, plus les points de décollements remontent vers le point d'arrêt amont. Le coefficient de pression est négatif, sans borne inférieure en théorie. La traînée de ce type de structure est principalement occasionnée par cette forte dépression que l'on appelle l'effet de culot. Le coefficient de pression est un paramètre relativement indépendant de la vitesse de l'écoulement

4.1.2.6 Energie cinétique turbulente

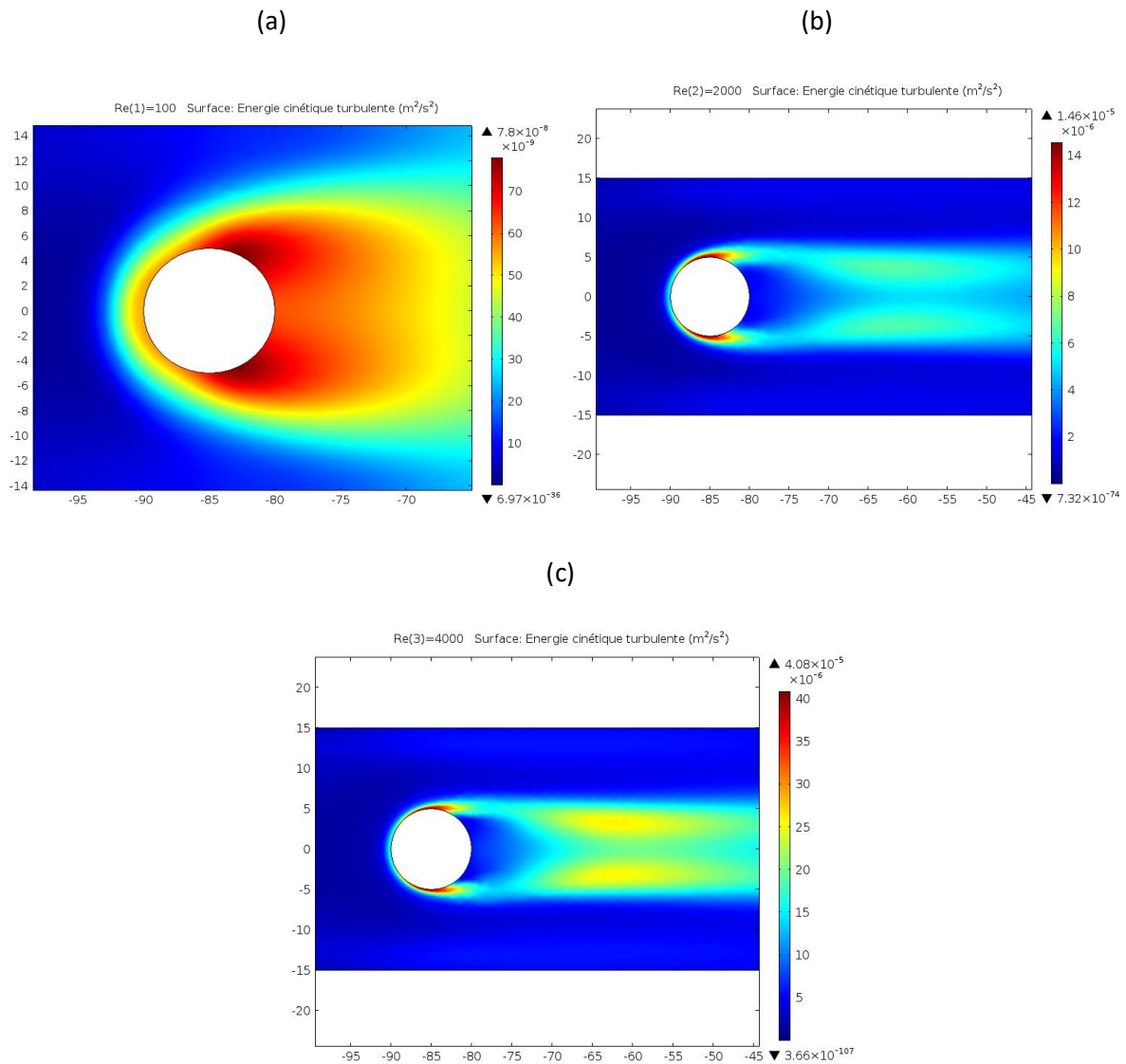


Figure 4.6 : contours d'énergie cinétique turbulente d'après nombre Reynolds (a)100, (b) 2000, (c)4000.

4.1.2.7 Viscosité dynamique turbulente

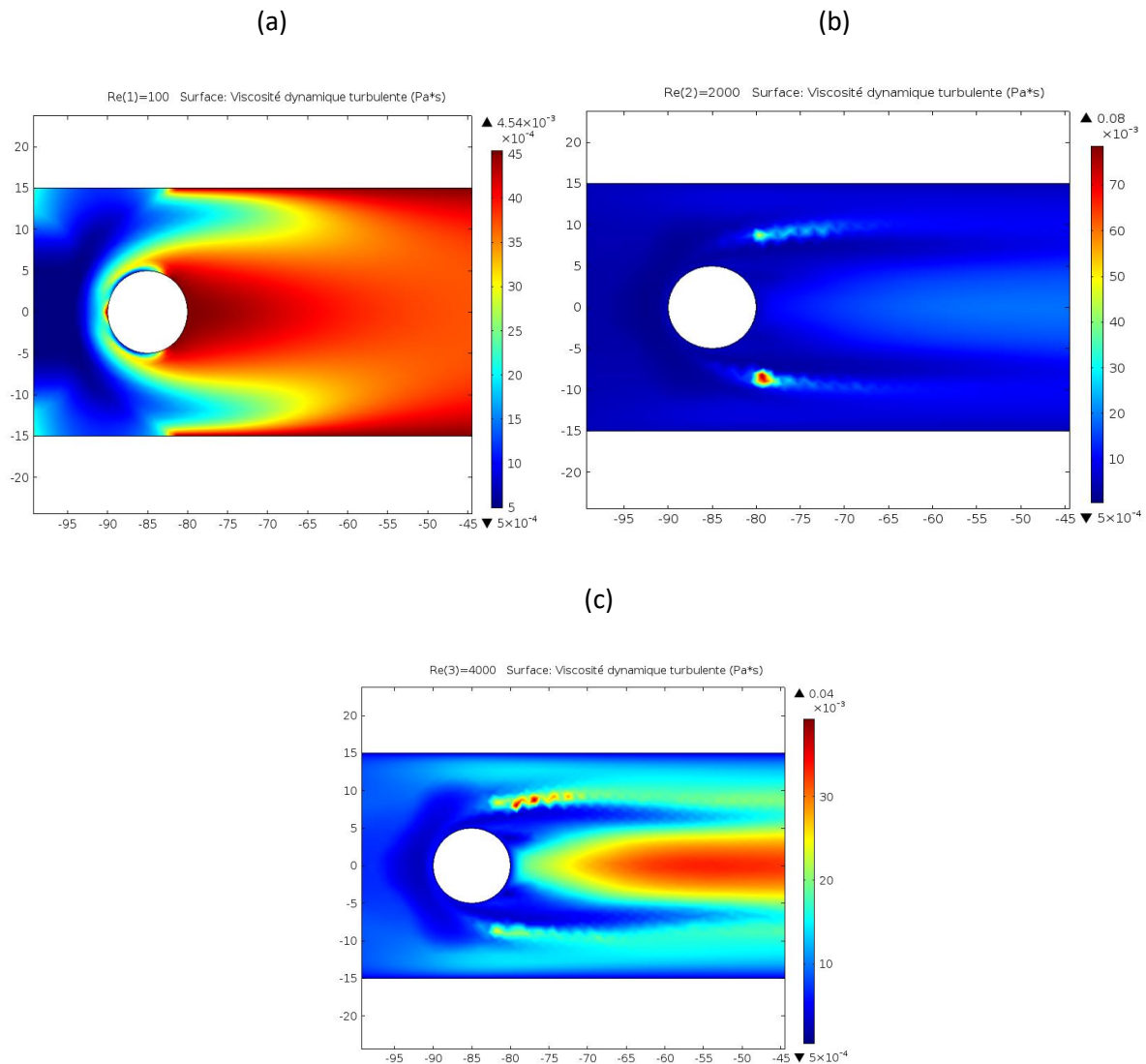


Figure 4.7 : contours Viscosité dynamique turbulente d'après nombre Reynolds (a)100, (b) 2000, (c)4000.

4.1.2.8 Commentaire (Energie cinétique turbulente)

Les figures (4.6) qui représentent contours d'énergie cinétique turbulente, (4.7) contours Viscosité dynamique turbulente. L'énergie cinétique turbulente est simplement dissipée par l'effet de viscosité, donc il y a un équilibre entre le flux convectif et le taux de dissipation visqueuse.

4.1.2.9 la force de traînée et portance

La force de traînée :

Le coefficient de traînée de tout objet comprend au minimum la somme de deux effets : la traînée liée au frottement visqueux et la traînée liée à la pression.

Le coefficient de traînée dépend du nombre de Reynolds. Pour les vitesses très faibles, correspondant à un très petit nombre de Reynolds, la viscosité est prépondérante. Le coefficient de traînée apparaît alors comme inversement proportionnel au nombre de Reynolds.

La traînée induite varie de manière inversement proportionnelle avec le carré de la vitesse. En fait plus la vitesse est faite, plus l'incidence est grande et les vortex forts.

La force de portance :

Le nombre de Reynolds qui exprime les effets de la viscosité joue pour la portance un rôle moins important que pour la traînée.

La vitesse plus élevée de l'air sur l'extrados crée une dépression qui attire le corps vers le haut. La vitesse plus faible de l'air sur l'intrados crée une surpression qui pousse aussi le corps vers le haut. La dépression sur l'extrados crée typiquement deux fois plus de force de portance que la surpression sur l'intrados.

4.2 Deuxième cas (L'écoulement autour d'un obstacle Cercle, Carrée, ellipse)

A été simulé 2D à l'aide du code comsol, et le nombre de Reynolds est 4000 est fixé. Dans ce cas Nous étudions la différence entre les trois obstacles.

4.2.1 Simulation numérique

4.2.1.1 Champ de vitesse

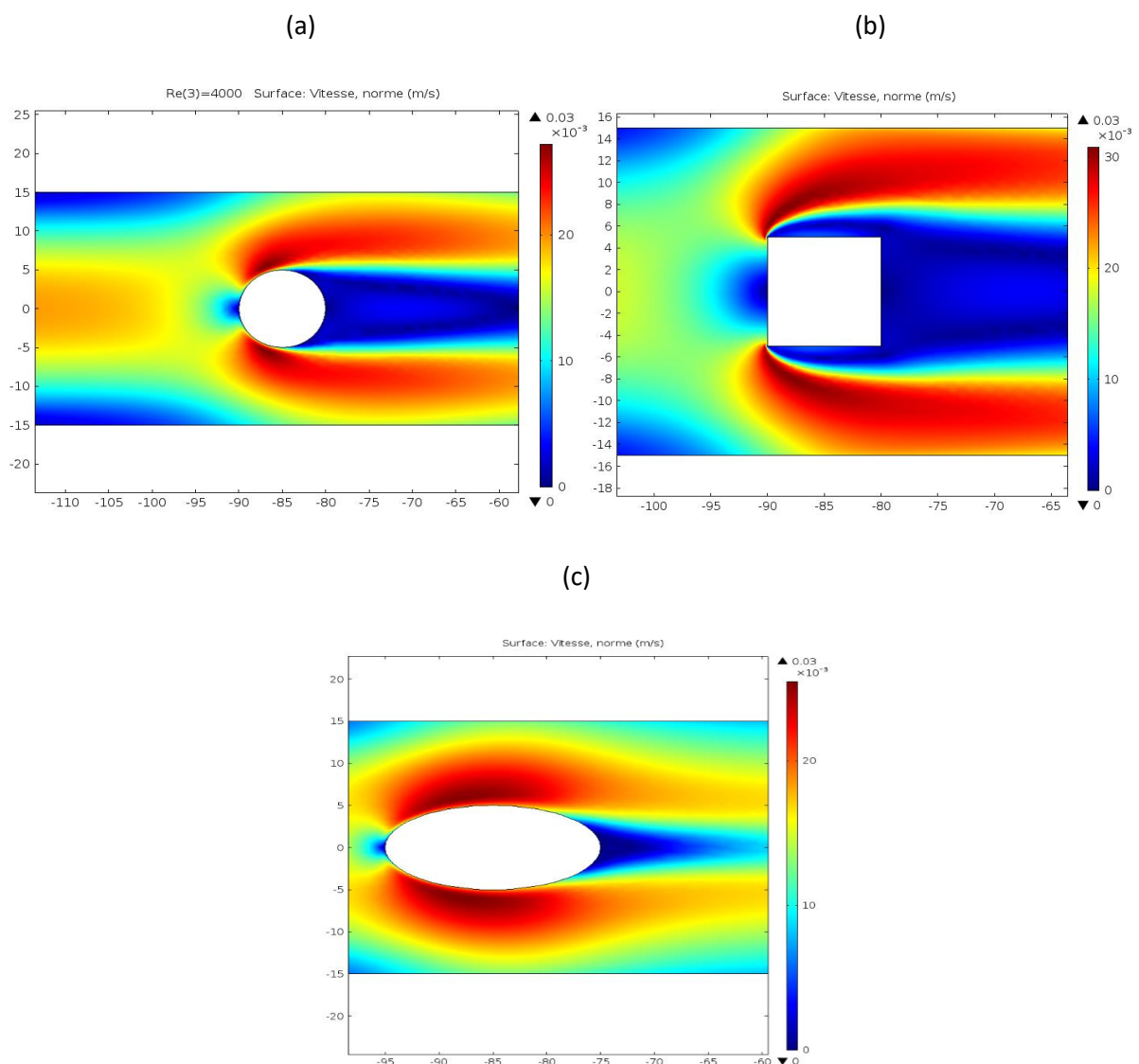


Figure 4.8 : contours du champ de vitesse d'un écoulement turbulent autour d'un obstacle
(a)cercle, (b) carrée, (c)ellipse.

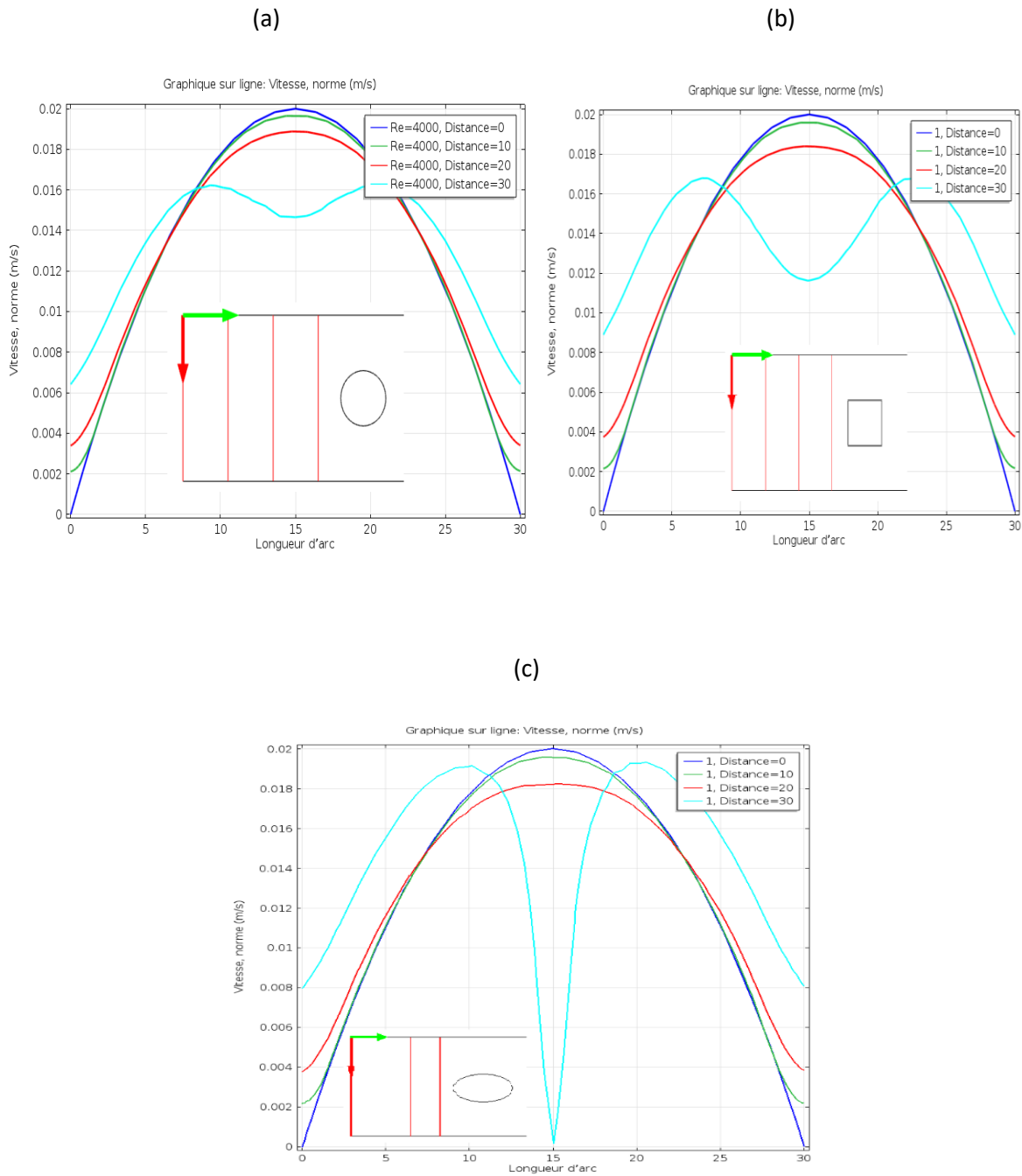


Figure 4.9 : Profil de vitesse d'un écoulement turbulent autour d'un obstacle (a) cercle, (b) carrée, (c) ellipse.

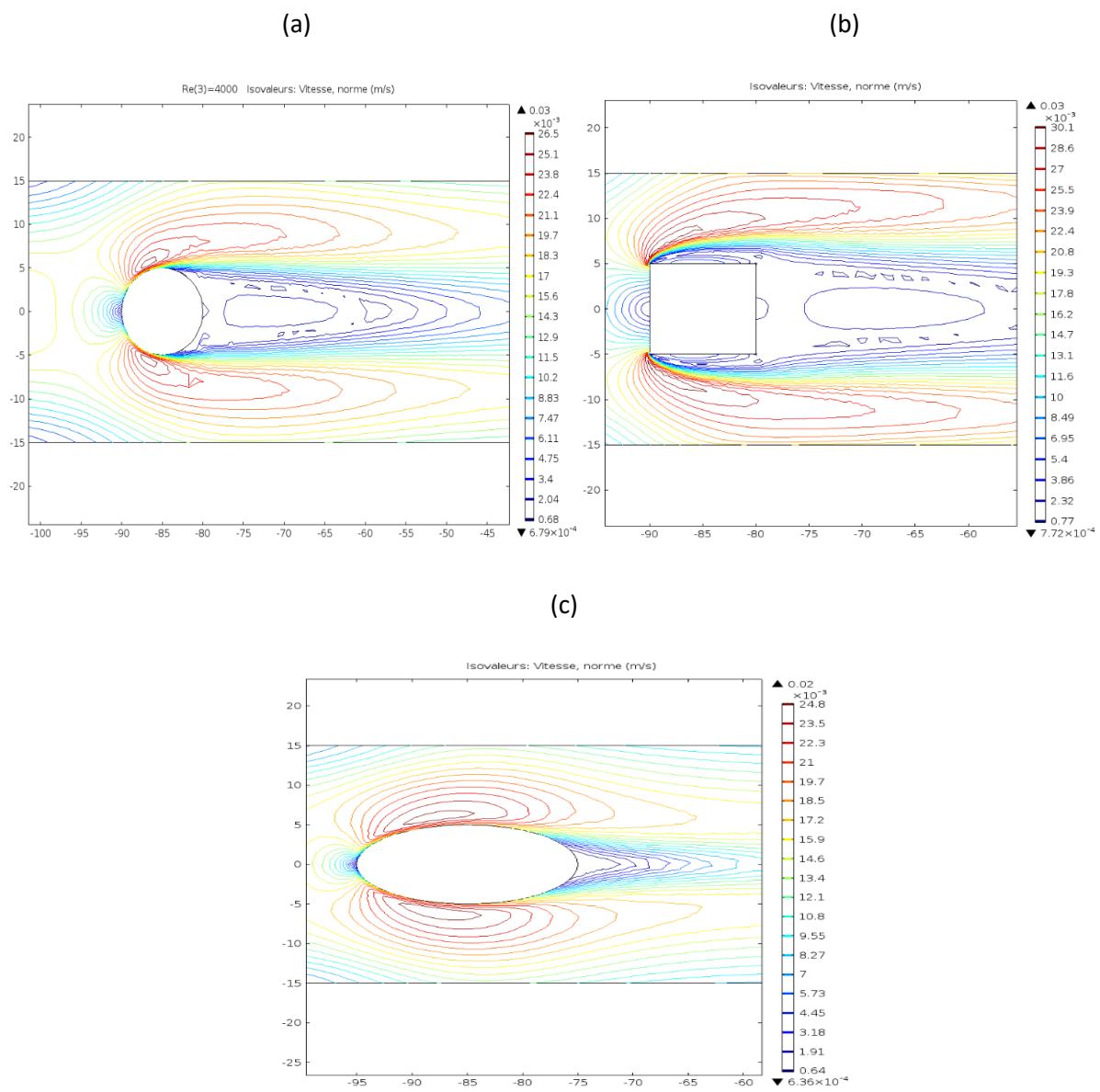


Figure 4.10 : Ligne du champ de vitesse d'un écoulement turbulent autour d'un obstacle
 (a)cercle, (b) carrée, (c)ellipse.

4.2.1.2 Ligne de courant

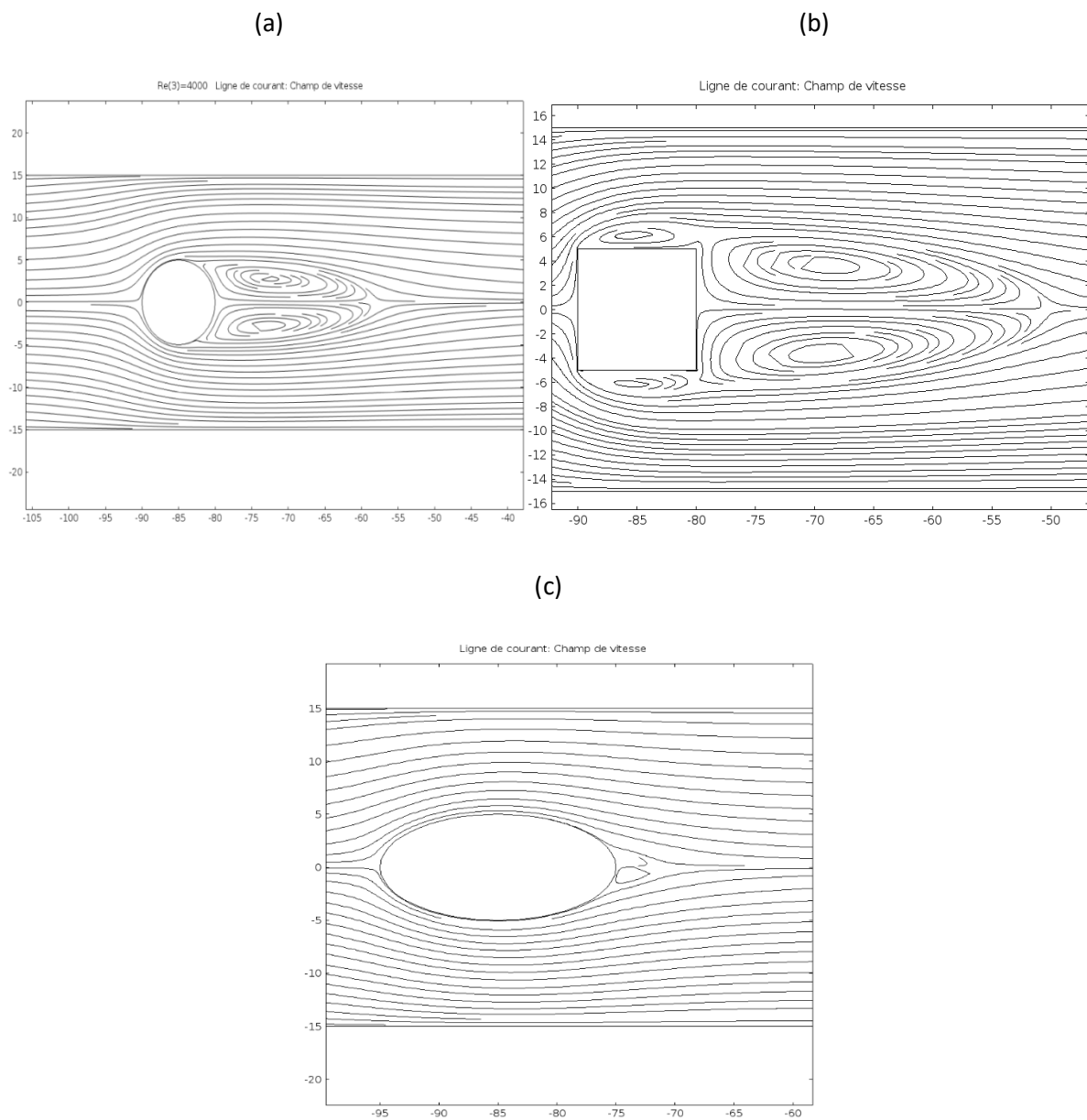


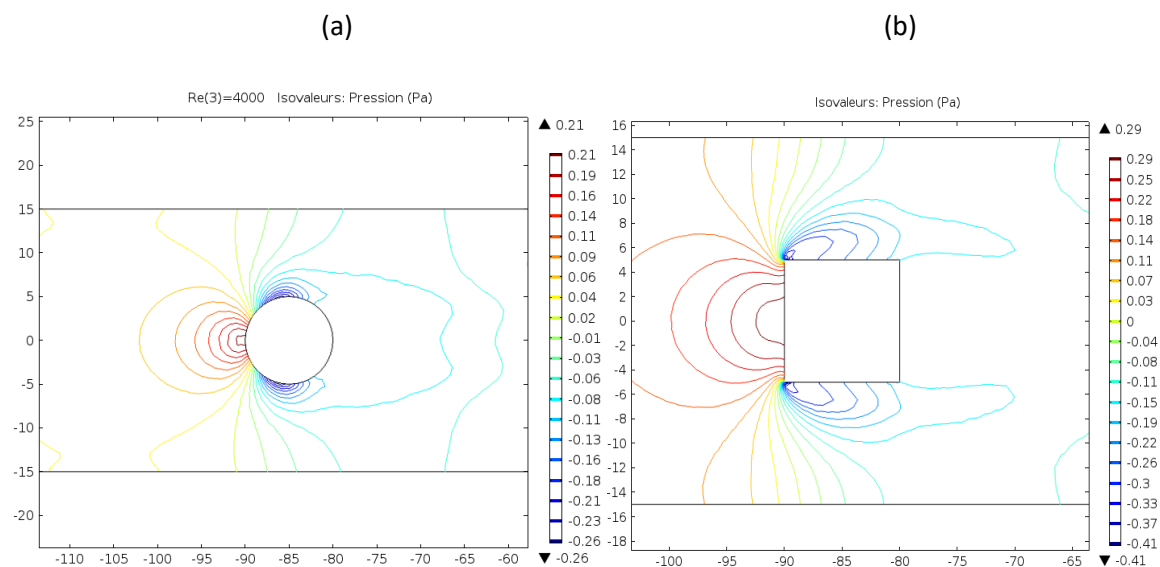
Figure 4.11 : Ligne courant du champ de vitesse d'un écoulement turbulent autour d'un obstacle (a) cercle, (b) carrée, (c) ellipse.

4.2.1.3 Commentaires (Champ de vitesse)

Les figures (4.8...4.11) montrent les contours ainsi que le champ de la grandeur de la vitesse et les lignes de courant autour de l'obstacle cercle et carrée l'obstacle ellipse. A l'entrée, la vitesse est uniforme et égale à 0.01 m/s, comme condition aux limites. On note un net changement de vortex qui se développe en visualisant l'allée tourbillonnaire de Von- karman avec un allongement de la zone de sillage. On assiste ainsi à l'apparition de paire de tourbillons alternés de signes opposés qui se détache derrière les obstacles. Les instabilités de l'écoulement croissent et l'écoulement prend une forme oscillatoire. Ainsi, la fluctuation dans le sillage est purement périodique montrant une augmentation de l'amplitude et une fréquence variable dans le régime laminaire et pour les deux applications considérées.

On remarque aussi, que la taille des structures tourbillonnaires de la section carrée est beaucoup plus grande que celle de la section cercle et la section cercle grande que celle de la section ellipse. On remarque aussi qu'il ya des gros tourbillons qui se développent et ils sont éjectés en alternance parfois vers la paroi supérieure et la paroi inférieure. On peut parler qu'il ya un roulement des tourbillons dans la zone de sillage et non un glissement.

4.2.1.4 Champ de pression



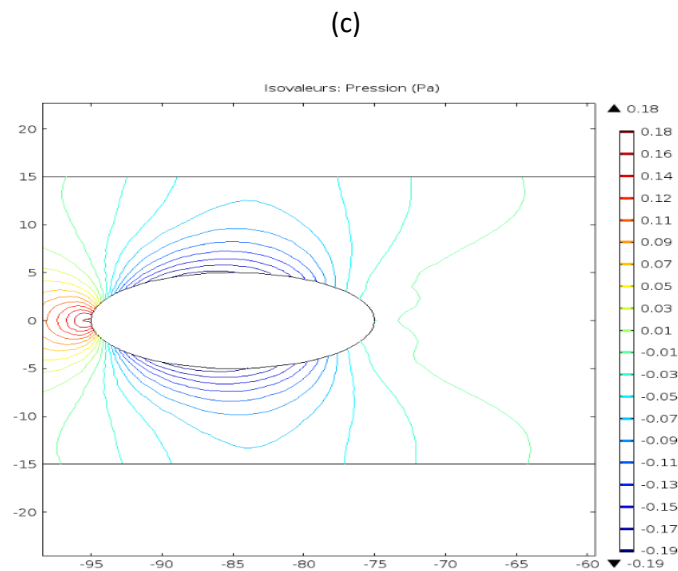


Figure 4.12 : Ligne du champ de pression d'un écoulement turbulent autour d'un obstacle (a) cercle, (b) carrée, (c) ellipse.

4.2.1.5 Commentaires (Champ de pression)

Figures (4.12) montre le contour de la pression statique dans le domaine d'étude. La légère chute de pression de l'entrée à la sortie due au frottement du fluide avec les parois de l'obstacle et de canal est mise en évidence.

Le nombre de Reynolds est plus grand (4000), alors est plus les points de décollements remontent vers le point d'arrêt amont. Les deux couches minces décollées de part et d'autre du cercle se rejoignent à une certaine distance du point d'arrêt en aval du cercle, sur l'axe de symétrie. C'est le même que l'obstacle ellipse.

Dans la région amont à l'obstacle carré, le fluide vient heurter le profil. Il tente ainsi de le contourner en passant par ses côtés ou par dessus. Il apparaît une inversion du gradient de pression.

4.2.1.6 Energie cinétique turbulente

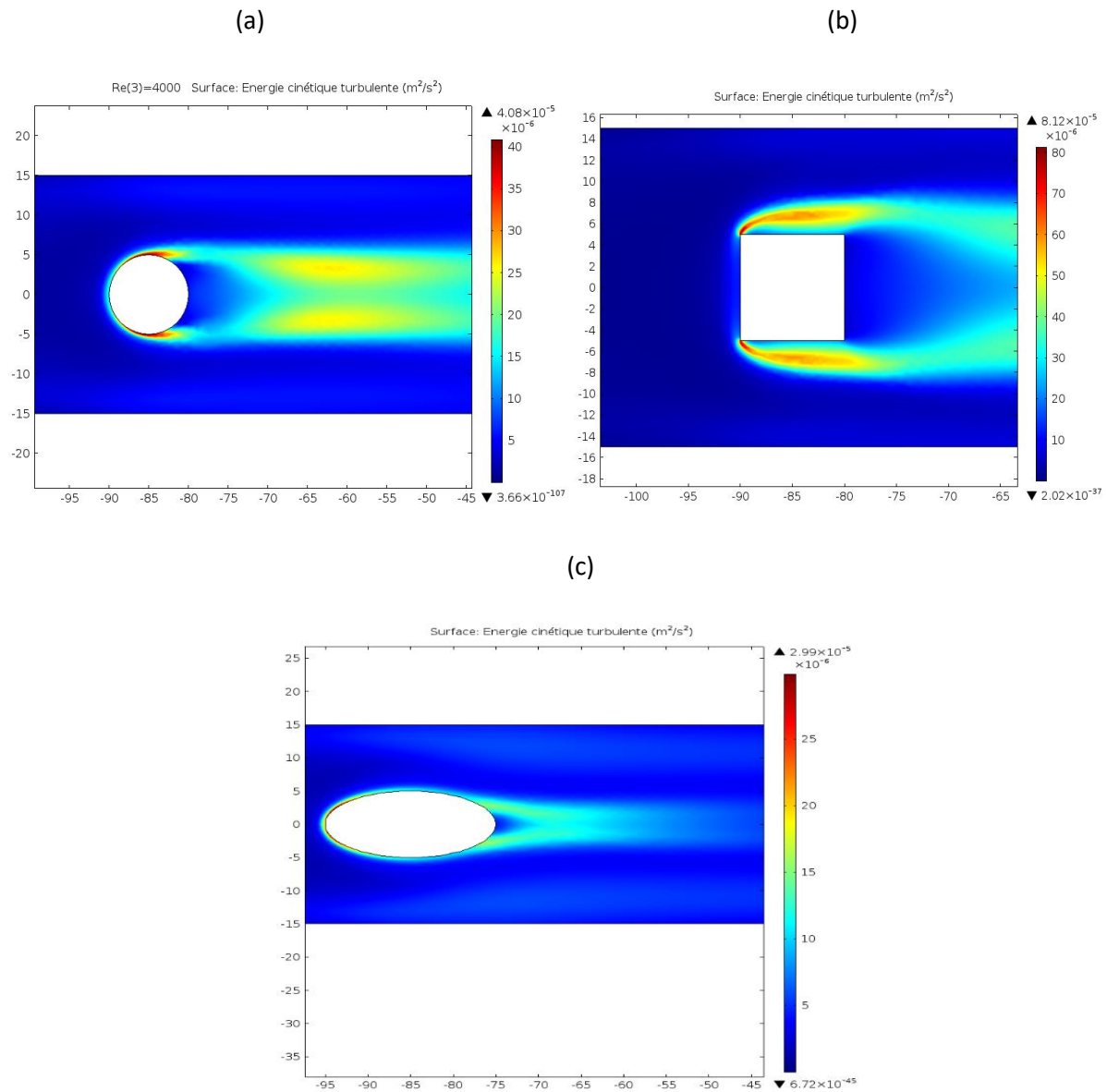


Figure 4.13 : contours d'énergie cinétique turbulente d'un écoulement turbulent autour d'un obstacle (a) cercle, (b) carrée, (c) ellipse.

4.2.1.7 Commentaires (Energie cinétique turbulente)

Sur la figure (4.13) qui représente la variation du champ et le profil de l'énergie cinétique turbulente dans le domaine d'étude on note que :

A l'entrée, l'énergie cinétique turbulente est simplement dissipée par l'effet de viscosité, donc il y a un équilibre entre le flux convectif et le taux de dissipation visqueuse. Dans l'équation de transport de k , puisqu'il n'y a ni mécanisme de production (pas de gradient de vitesse), ni mécanisme de diffusion (pas de gradient de k).

En effet là où les gradients de vitesse sont importants, une production de turbulence élevée est observée surtout au niveau des couches limites sur les parois de la veine d'essai. La section ellipse est beaucoup plus grande que celle de la section cercle et la section cercle grande que celle de la section carrée. Elle est liée à la forme du profil.

Les différents profils engendrent des écoulements différents. Il se forme alors des tourbillons et les filets de l'écoulement ne sont plus lisses. La résistance, presque entièrement attribuable à la formation de tourbillons, est très grande.

Conclusion, la meilleure forme d'obstacle en termes de formation de courants turbulents est ellipse, puis le cercle, et enfin le carré.

4.2.1.8 Viscosité dynamique turbulente

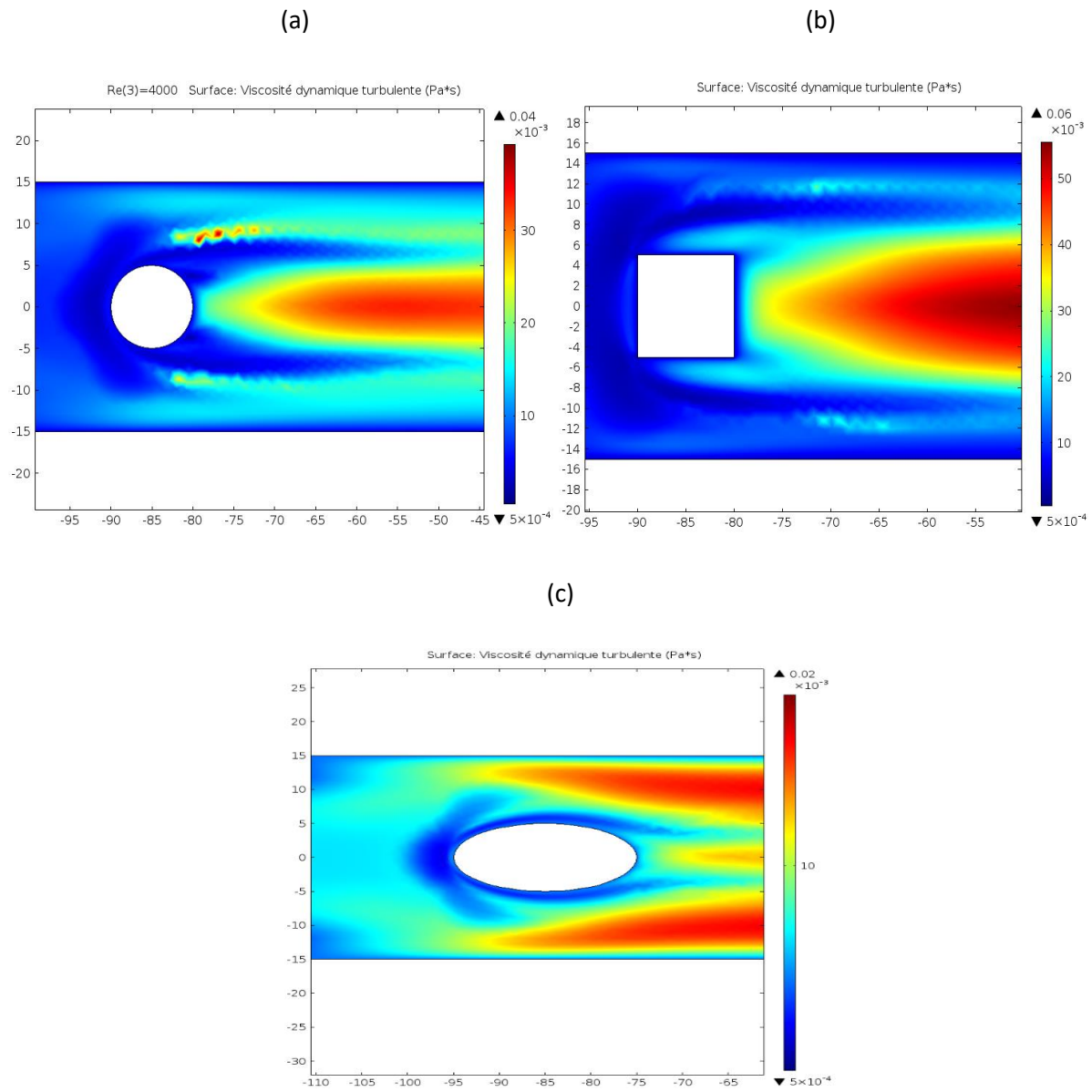


Figure 4.14 : contours Viscosité dynamique turbulente d'un écoulement turbulent autour d'un obstacle (a) cercle, (b) carrée, (c) ellipse.

4.2.1.9 la force de trainée et portance

La force de portance :

Celles-ci se traitent en général par la théorie des écoulements à potentiel de vitesse et, plus particulièrement, par la théorie des profils minces. La vitesse plus élevée de l'air sur l'extrados crée une dépression qui attire le corps vers le haut. En fait plus la vitesse est faite, plus l'incidence est grande et les vortex forts.

La vitesse plus faible de l'air sur l'intrados crée une surpression qui pousse aussi le corps vers le haut. La dépression sur l'extrados crée typiquement deux fois plus de force de portance que la surpression sur l'intrados.

La force de traînée :

Le coefficient de traînée induite varie de manière inversement proportionnelle avec l'allongement. On observe donc que lorsque l'allongement augmente la traînée induite diminue (voir la forme ellipse).

Traînée de forme Comme son nom l'indique elle est liée à la forme du profil. En effet, les écoulements sont différents en fonction des profils, et donc les différences de pressions entre le bord d'attaque et le bord de fuite ne sont pas identiques. La pression au bord d'attaque étant plus forte que la pression au bord de fuite dû au décollement des filets d'air, une force aérodynamique va alors se créer des hautes pressions vers les basses pressions. C'est la traînée de forme. Le décollement de la couche limite entraîne une augmentation de la traînée de forme. La traînée de forme est minimale quand l'écoulement n'est pas décollé. Les variations de section brutales du corps amènent des décollements, de la turbulence et donc de la traînée. Afin de réduire les décollements et la turbulence, il faut "profilier" le corps.

Les coefficients de portance et de traînée. Ils varient en fonction : De la forme du profil.

CONCLUSION

Dans ce travail, on a étudié avec une simulation numérique fournie par le logiciel Comsol, un écoulement stationnaire, bidimensionnel, turbulent d'un fluide incompressible et newtonien, autour d'un obstacle (cercle, carré, ellipse) placé sur le fond d'un canal rectangulaire. Comme conditions aux limites, une vitesse uniforme est imposée à l'entrée du canal et une pression à la sortie. Les parois supérieure et inférieure, ainsi que les frontières du cube, ont été considérées comme des murs.

Les différentes formes géométriques des obstacles retenues sont l'obstacle à section cercle et section carrée et à section ellipse. L'étude est faite en 2D dans le cas de la configuration. Le raffinement de maillage a été appliqué pour bien capturer efficacement la taille des tourbillons en aval des configurations étudiées deux cas. Appliqué le modèle $k-\epsilon$.

L'objectif de mon travail est d'étudier avec une simulation numérique les effets de la géométrie de l'obstacle sur la structure de l'écoulement. Des expériences numériques ont été effectuées à l'aide d'un code numérique (comsol) basé sur une formulation de type volumes finis. Ensuite, l'effet de la géométrie de l'obstacle sur le détachement tourbillonnaire est analysé en régime rampant, stationnaire et in-stationnaire ainsi nous avons illustré la variation du nombre de Strouhal en fonction du nombre de Reynolds. Par la suite, nous avons analysé l'effet de la géométrie de l'obstacle sur la variation des forces aérodynamiques en fonction du nombre de Reynolds (Régime laminaire instationnaire bidimensionnel, Régime sous critique...).

Les différents profils engendrent des écoulements différents. Il se forme alors des tourbillons et les filets de l'écoulement ne sont plus lisses. La résistance, presque entièrement attribuable à la formation de tourbillons, est très grande (exemple section carrée...).

Pour le régime turbulent, nous avons remarqué une production importante de l'énergie cinétique turbulente à partir de la moitié d'obstacle section ellipse en aval et dans la zone de sillage dû essentiellement aux forts gradients de vitesse.

On conclure que la forme d'obstacle ellipse c'est comme la forme générale du profil d'aile idéal. Tout les formes profilées, autour desquelles les écoulements restent attachés, mais qui sont exceptionnelles dans le domaine des structures soumises au vent et sont principalement utilisées en aéronautique. Car L'écoulement autour des parois et dans le sillage reste peu perturbé. On dit dans ce cas que l'écoulement est non décollé, c'est à dire que la vitesse du fluide au voisinage des parois tend à leur rester globalement parallèle. Alors la forme ellipse c'est la meilleure forme d'obstacle au l'écoulement.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

[1]- **V. P. Fragos, S. P. Psychoudaki, and N. A. Malamataris.** “Direct simulation of two-dimensional turbulent flow over a surface-mounted obstacle“. INTERNATIONAL JOURNAL FOR NUMERICAL METHODS IN FLUIDS 2007; 55:985–1018.

[2]- **VEYSEL ATLI.**“ SUBSONIC FLOW OVER A TWO-DIMENSIONAL OBSTACLE IMMERSSED IN A TURBULENT BOUNDARY LAYER ON A FLAT SURFACE“. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 31 (1988) 225-239.

[3]- **Kazuhiko Suga.** “Improvement of second moment closure for turbulent obstacle flow and heat transfer“.International Journal of Heat and Fluid Flow 25 (2004) 776–784.

[4]- **Cary Presser, George Papadopoulos, John F. Widmann.**” PIV measurements of water mist transport in a homogeneous turbulent flow past an obstacle“. Fire Safety Journal 41 (2006) 580–604.

[5]- **Giancarlo Alfonsia, Carlo Restanob , Leonardo Primavera.**” Coherent structures of the flow around a surface-mounted cubic obstacle in turbulent channel flow“.Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 91 (2003) 495–511.

[6]- **S. Laslandes, C. Sacre.**“ Transport of particles by a turbulent flow around an obstacle — a numerical and a wind tunnel approach“. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 74—76 (1998) 577—587.

[7]- **R. Kessler and K. S. Yang.**” Direct Numerical Simulation of Turbulent Periodic Obstacle Flow“. KSME International Journal, VoL 12, No. 2, pp. 291--300, 1998.

[8]- **J.M.M. Sousa.**“ Turbulent flow around a surface-mounted obstacle using 2D-3C DPIV“.Experiments in Fluids 33 (2002) 854–862.

- [9]- **YUE-TZU YANG and SHIARNG YANG.**“ Numerical study of turbulent flow in two-dimensional channel with surface mounted obstacle“. *Int.J.Heat Mass Transfer*. Vol. 37, No. 18, pp. 2985-2991, 1994.
- [10]- **D.G.E. Grigoriadis , S.C. Kassinos .**“Lagrangian particle dispersion in turbulent flow over a wall mounted obstacle“. *International Journal of Heat and Fluid Flow* 30 (2009) 462–470.
- [11]- **B. S. MAZUMDER , H. MAITY, and T. CHADDA.**“ Turbulent flow field over fluvial obstacle marks generated in a laboratory flume“. *International Journal of Sediment Research* 26 (2011) 62-77.
- [12]- **Kyung-Soo Yang, and Joel H. Ferziger.**“ Large-Eddy Simulation of Turbulent Obstacle Flow Using a Dynamic Subgrid-Scale Model“. *AIA A JOURNAL* Vol. 31, No. 8, August 1993.
- [13]- **G.M. Elfstrom, C. Kostopoulos, D.J. Peake, D.F. Fisher.**“ THE OBSTACLE BLOCK AS A DEVICE TO MEASURE TURBULENT SKIN FRICTION IN COMPRESSIBLE FLOW“. 182-24664.
- [14]- **D. K. HEIST , M. RAVICHANDRAN , F. C. GOULDIN.**“ Incinerator Related Flows: An Experimental and Numerical Study of Turbulent Flow over an Obstacle“. *University of Cambridge* 28 December 2014.
- [15]- **Theodore Stathopoulos, Fellow, ASCE, Yongsheng Zhou, and Ye Li.**“ COMPUTATION OF TURBULENT SHEAR FLOW OVER SURFACE-MOUNTED OBSTACLE“. *J. Eng. Mech.* 1994.120:1172-1174.
- [16]- **Jianming He, Charles C. S. Song.**“ COMPUTATION OF TURBULENT SHEAR FLOW OVER SURFACE-MOUNTED OBSTACLE“. *New York University* on 05/15/15.
- [17]- **Yamina Harnane , Didier Saury, Rachid Bessaih, Denis Lemonnier, Cherif Bougriou.**“ Experim ental and Num erical Investigation of Turbulent Natural Convection Flow in a Vertical Channel W ith a Heated Obstacle“. [DOI: 10.1115/1.4028022].

- [18]- **Maryam Ghaffari, Anders Vestvik, Boris Balakin, Alex C. Hoffmann.**“ Deposition Capabilities of Turbulent Particle-laden Flow Passing an Obstacle Using Experiment and CFD”. Department of Physics and Technology, University of Bergen, Allegaten 55, 5007 Bergen, Norway.
- [19]- **Jianming He, and Charles C. S. Song.**“ A computing method for incompressible flows bounded by moving walls”. J. Computational Physics, 8, 119-143.
- [20]- **H.Gamel, P.Salizzoni , L.Soulhac, P.Méjean , M.Marro , N.Grosjean.**“ TURBULENT KINETIC ENERGY BUDGET AND DISSIPATION IN THE WAKE OF 2D OBSTACLE: ANALYSIS OF THE K- ϵ CLOSURE MODEL”. Proceedings of the ASME 2014 4th Joint US-European Fluids Engineering Division Summer Meeting FEDSM2014. FEDSM2014-21489.
- [21]- **Bo Yin, Guowei Yang.**“ INVESTIGATION OF OBSTACLE EFFECTS ON THE AERODYNAMIC PERFORMANCE OF FLAPPING WINGS”. FEDSM2017-69264.
- [22]- **Santosh Kumar Singh, Pankaj Kumar Raushan, Koustuv Debnath & Bijoy S. Mazumder.**“ Higher order turbulent flow characteristics of oscillatory flow over a wall-mounted obstacle”. ISH Journal of Hydraulic Engineering, 2018.
- [23]- **O.N. Kashinsky, A.S. Kurdyumov, P.D. Lobanov, N.A. Pribaturin.**“ HEAT TRANSFER AND TURBULENT STRUCTURE IN AN ANNULAR CHANNEL WITH AN OBSTACLE”. FEDSM2014-21482.
- [24]- **Debasmita Chatterjee , B. S. Mazumder , Subir Ghosh , K. Debnath.**“ Turbulent flow characteristics over forward-facing obstacle”. Journal of Turbulence, DOI: 10.1080/14685248.2020.1854461.
- [25]- **J. Hines, G.P. Thompson & F.S. Lien.**“ A Turbulent Flow Over a Square Cylinder with Prescribed and Autonomous Motions”. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 3:4, 573-586, DOI: 10.1080/19942060.2009.11015292.

- [26]- **ALIANE Khaled, SARI-HASSOUN Zakaria.**“ Contrôle de l’écoulement turbulent autour d’un obstacle par l’effet de courbure“.International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET) Vol.3-pp.14-18, Copyright - IPCO 2015.
- [27]- **K Aliane, Sebbane,A Houmat.**” Etude expérimentale de l’écoulement bidimensionnel autour d’un obstacle rectangulaire et un obstacle rectangulaire arrondi “.Afrique Science: Revue Internationale des Sciences et Technologie DOI: 10.4314/afsci.v2i3.61184.
- [28] **Provansal, M. Mathi, C. and Boyer, L. Bénard-von kármán instability** : transient and forced regimes. Fluid Mech, 182, 1-22, (1987).
- [29] **Bloor, M.** Transition to turbulence in the wake of a circular cylinder. J. Fluid Mech, 19, 290-304, (1964).
- [30] **Goujon-Durand, S. Jenffer, P. and Wesfreid, J.E.** Downstream evolution of the Bénard-von Kármán instability. Phys. Rev. E 50(1), 308-313, 10, (1994).
- [31] **Persillon, H. and Braza, M.** Physical analysis of the transition to turbulence in the wake of a circular cylinder by three-dimensional Navier-Stokes simulation. Fluid Mech, 365, 23-88, (1998).
- [32] **Braza, M. Chassaing, P. and Ha Minh, H.** Prediction of large-scale transition features in the wake of a circular cylinder. Phys. Fluids A, 2(8), 1461-1471, (1990).
- [33] **Braza, M. Chassaing, P and Ha Minh, H.** Numerical study and analysis of the pressure and velocity fields in the near wake of a cylinder. J. Fluid Mech, 165, 79-165, (1986).
- [34] **Roshko, A.** Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. J. Fluid Mech., 10 (3), 345-356, (1961).
- [35] **Sakir Amiroudine, Jean-Luc Battaglia.** MÉCANIQUE DES FLUIDES. Dunod, Paris, ISBN 978-2-10-056922-9 (2011).

