



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ibn Khaldoun de Tiaret
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Spécialité : Énergétique

Thème

Simulation numérique d'un écoulement de fluide autour d'un obstacle carré : Influence de l'angle d'inclinaison.

Préparé par :

- **Amara Oussama**
- **Zerouki Charaf Eddine**

Soutenu publiquement le : 15 / 11 / 2020, devant le jury composé de :

M. MOULGADA Abdel Madjid	MCA (Université Ibn Khaldoun-Tiaret)	Président
M. CHAÏB Khaled	MCA (Université Ibn Khaldoun-Tiaret)	Examineur
M. BENFERHAT Slimane	Docteur en science (Université Ibn Khaldoun-Tiaret)	Examineur
M. MEKROUSSI Saïd	MCA (Université Ibn Khaldoun-Tiaret)	Encadrant

Année universitaire : 2019 - 2020

REMERCIEMENTS

En premier lieu, nous remercions ALLAH, notre créateur, qui nous a donné la force, le courage et la volonté pour achever ce travail.

Nous remercions tout les personnes ayant soutenu et encadré notre travail, En premier lieu nous remercions sincèrement notre encadreur Monsieur MEKROUSSI Said, Maître de conférences à l'Université Ibn Khaldoun-Tiaret, pour sa disponibilité sa contribution majeure à l'orientation des travaux de recherche et ses idées originales qui ont servi à enrichir le contenu de ce mémoire, ainsi que Monsieur BENFERHAT Slimane, Docteur en science à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, pour ses conseils et aide qui ont bien contribué à l'avancement de ce travail.

Nous remercions aussi Monsieur MOULGADA Abdelmadjid, Maître de conférences à l'Université Ibn Khaldoun-Tiaret, d'avoir accepté de présider ce jury, Monsieur CHAÏB Khaled, Maître de conférences à l'Université Ibn Khaldoun-Tiaret, qui ont bien voulu rapporter mon travail et participer au jury.

DÉDICACE

*À mes chers parents pour l'éducation et le grand amour dont ils m'ont entouré
depuis ma naissance.*

À mes chères sœurs Malak et Nour El Iman et Salssabil.

À toute ma famille.

À tous mes profs qui nous a appris.

À mes chers amis.

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Oussama Amara

DÉDICACE

*À mes chers parents pour l'éducation et le grand amour dont ils m'ont entouré
depuis ma naissance.*

À mes chers frères

À toute ma famille.

À tous mes profs qui nous a appris.

À mes chers amis.

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Charaf Eddine Zerouki

Sommaire

Remerciement	<i>i</i>
Dédicace	<i>ii</i>
Sommaire	<i>v</i>
Liste des figures	<i>x</i>
Liste de tableaux	<i>xii</i>
Nomenclature	<i>xiii</i>
Introduction générale	<i>1</i>

Chapitre I : Étude bibliographique

I.1 Introduction	<i>2</i>
I.2 Généralités sur la mécanique de fluide	<i>2</i>
I.2.1 Notion de fluide	<i>2</i>
I.2.2 Propriétés des fluides	<i>3</i>
I.2.2.1 Masse volumique	<i>3</i>
I.2.2.2 Densité.....	<i>3</i>
I.2.2.3 Viscosité.....	<i>3</i>
I.2.2.3.1 Viscosité dynamique.....	<i>3</i>
I.2.2.3.2 Viscosité cinématique.....	<i>4</i>
I.3 Ecoulement de fluides.....	<i>4</i>
I.3.1 Différents types des écoulements	<i>4</i>
I.3.1.1 Ecoulement incompressible	<i>4</i>
I.3.1.2 Ecoulement compressibles	<i>5</i>
I.3.1.3 Ecoulement stable	<i>5</i>
I.3.1.4 Ecoulement instable	<i>5</i>
I.3.1.5 Ecoulement stationnaire	<i>5</i>
I.3.1.6 Ecoulement non stationnaire.....	<i>5</i>
I.3.1.7 Ecoulement visqueux	<i>5</i>

I.3.1.8 Ecoulement non visqueux	6
I.3.2 Les régimes de l'écoulement	6
I.3.2.1 Régime laminaire	6
I.3.2.2 Régime transitoire	7
I.3.2.3 Régime turbulent	7
I.4 Ecoulement autour des obstacles	8
I.4.1 Ecoulement autour des obstacles carrés	8
I.4.2 Ecoulement de von karman	9
I.4.3 Caractéristiques de l'écoulement autour d'un obstacle carré	9
I.4.3.1 Nombre de Reynolds	9
I.4.3.2 Nombre de Strouhal	10
I.4.3.3 Coefficient de trainée (drag coefficient)	10
I.4.3.4 Coefficient de portance (lift coefficient).....	10
I.4.4 La couche limite	11
I.4.4.1 Point de séparation	12
I.4.4.2 Couche de cisaillement	12
I.4.4.3 Zone de recirculation	12
I.4.5 Profil de vitesse	13
I.5 Revue des travaux sur les écoulements autour d'un obstacle carre	14
I.6 Conclusion	18

Chapitre II : Formulation mathématique et modélisation numérique

II.1 Introduction	19
II.2 Formulation mathématique	19
II.2.1 Hypothèses Simplificatrices	20
II.2.2 Equations de transport	20
II.2.2.1 Equation de continuité	20
II.2.2.2 Equations de quantité de mouvement	20
II.2.2.3 Équation de continuité moyennée	21
II.2.2.4 Équation de quantité de mouvement moyennée	21
II.3 Résolution numérique	21
II.3.1 Méthode des différences finie	22
II.3.2 Méthode des éléments finie	21
II.3.3 Méthode des volumes finie	22

II.3.3.1 Principe de la méthode des volumes finis	22
II.3.3.1.1 Le maillage	22
II.3.3.1.2 Nœuds et éléments	23
II.3.3.1.3 Géométrie et topologie	24
II.3.3.1.4 Connectivité	24
II.4 Algorithme Simple	25
II.4.1 Logiciel Gambit	25
II.4.1.1 Comment utiliser Gambit	26
II.4.1.1.1 Vue globale	26
II.4.1.1.2 Construction de la géométrie	26
II.4.1.2 Choix du type de maillage	27
II.4.1.2.1 Maillage structuré (quadra/hexa)	27
II.4.1.2.2 Maillage non structuré (tri /tétra)	27
II.4.1.2.3 Maillage hybride	28
II.4.1.3 Conditions aux limites et définition de domaine	28
II.4.1.4 Exportation du maillage de gambit	29
II.4.2 Code Fluent	29
II.4.2.1 Choix du schéma de discrétisation	30
II.4.2.2 Initialisation	30
II.4.2.3 Méthode de la solution	30
II.4.2.3.1 La consistance	30
II.4.2.3.2 La stabilité	31
II.4.2.3.3 la convergence	31
II.4.2.3.4 La conservation	31
II.4.2.3.7 Exactitude	31
II.4.3 Procédures de simulation	32
II.4.3.1 Interface du code Fluent et lecture du fichier mesh	32
II.4.3.2 Vérification du maillage	33
II.4.3.3 Lissage du maillage	33
II.4.3.4 Vérification des dimensions et des unités	34
II.4.3.5 Affichage de la grille	34
II.4.3.6 Choix du solveur et l'état de l'écoulement	35
II.4.3.7 Choix du modèle de l'écoulement	36
II.4.3.8 Définition des caractéristiques du fluide	37

II.4.3.9 Pression de référence	38
II.4.3.10 Conditions aux limites	38
II.4.3.11 Choix d'ordre des équations et couplage vitesse pression	39
II.4.3.12 Initialisation du calcul	40
II.4.3.13 Choix des critères de convergences	41
II.4.3.14 Lancement du calcul	41
II.4.3.15 Allures de convergence des résidus	42
II.5 Conclusion	42

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1 Introduction	44
III.2 Domaine d'étude et condition aux limites	44
III.3 Validation	45
III.4 Maillage du domaine	46
III.5 Critère de convergence	46
III.6 Les lignes de courants	47
III.7 Les zones de recirculation	49
III.8 Coefficient de trainé (Drag coefficient)	49
III.9 Coefficients de pression	50
III.10 Champs de vitesse autour d'obstacle	51
III.11 Conclusion	52
Conclusion générale et perspectives	53
Bibliographie	54
Résumé	

Liste des figures

Figure I.1	Deux différents types de fluide a) fluide liquide b) fluide gazeux.....	2
Figure I.2	Un régime laminaire.....	6
Figure I.3	Régime turbulent.....	7
Figure I.4	Ecoulement autour dun obstacle carre.....	8
Figure I.5	Sillage derrière un obstacle carré (lâchée de Von Karman).....	9
Figure I.6	La couche limite.....	12
Figure I.7	Profil de vitesse.....	12
Figure I.8	Ecoulement autour d'un obstacle carre pour des petits nombres de Reynolds.....	13
Figure II.1	Schéma du maillage.....	24
Figure II.2	Schéma du maillage.....	24
Figure II.3	Illustration de la notion de maillage.....	24
Figure II.4	Géométrie du domaine pour l'angle 0°	25
Figure II.5	Les différences structurent de maillage par code FLEUNT.....	26
Figure II.6	L'interface de Gambit.....	27
Figure II.7	Création de la géométrie et génération de maillage.....	27
Figure II.8	Vérification de maillage et options d'affichage.....	28
Figure II.9	Définition des conditions aux limites.....	29
Figure II.10	Exportation de maillage.....	30
Figure II.11	Importation de la géométrie.....	33
Figure II.12	Vérification du maillage.....	34
Figure II.13	Lissage de maillage.....	34
Figure II.14	Vérification des dimensions et des unités.....	35
Figure II.15	Affichage de la grille.....	35
Figure II.16	Affichage des conditions aux limites.....	36
Figure II.17	Choix du solveur.....	36
Figure II.18	Interface du Choix du solveur.....	37
Figure II.19	Interface du modèle de turbulence.....	37

Figure II.20	Définition des caractéristiques du fluide.....	38
Figure II.21	Interface de la liste des fluides.....	21
Figure II.22	Pression de référence.....	39
Figure II.23	La vitesse d'entrée (condition aux limites)	39
Figure II.24	Interface de la vitesse d'entrée.....	40
Figure II.25	Choix d'ordre d'équations.....	40
Figure II.26	Interface du choix d'ordre d'équations.....	41
Figure II.27	Initialisation de calcul.....	41
Figure II.28	Interface des critères de convergence.....	42
Figure II.29	Lancement du calcul.....	42
Figure II.30	Convergences des résidus.....	43
Figure III.1	Domaine d'étude et conditions aux limites.....	44
Figure III.2	Lignes de courant a $Re = 20$	45
Figure III.3	Lignes d'iso-vorticité a $Re = 40$	45
Figure III.4	Maillage utilisé.....	46
Figure III.5	Courbe de convergence.....	46
Figure III.6	Représentation des lignes des courants.....	48
Figure III.7	La longueur de la zone de recirculation pour chaque angle en fonction de Re ...	49
Figure III.8	Coefficient de trainée pour chaque angle d'inclinaison en fonction de Re	50
Figure III.9	Coefficient de pression pour chaque angle d'inclinaison.....	50
Figure. III.10	Coefficient de pression pour chaque angle d'inclinaison.....	51
Figure. III.11	Champs de vitesse autour d'obstacle.....	52

Liste des tableaux

Tableau I.1	Les caractéristiques des régimes de l'écoulement	8
Tableau III.1	Représentation des lignes des courants	47

Nomenclature

m	masse de fluide	[kg]
ρ	masse volumique	[kg/m ³]
F_t	La force de frottement	[N/kg]
ν	Viscosité cinématique	[m ² /s]
μ	Viscosité dynamique	[Pa.s]
P	pression	[Pa]
U	la vitesse de l'écoulement	[m/s]
D	le diamètre de section	[m]
U_∞	vitesse à l'infini amont	[m/s]
F	la fréquence	[s ⁻¹]
$(u_i, u_j) = (u, v)$	champ de vitesse	[m/s]
u_t	vitesse de frottement de paroi	[m/s]
d	la densité	[-]
Re	nombre de Reynolds	[-]
S_t	nombre de Strouhal	[-]
C_D	coefficient de traînée	[-]
C_L	coefficient de portance	[-]
F_D	Force de trainé	[N]
F_L	Force de portance	[N]
C_F	le coefficient de frottement	[-]
C_P	le coefficient de pression	[-]
$\frac{\rho}{2} u_\infty^2$	Pression dynamique d'écoulement libre	[kg/m ² s]
A	Section de référence	[m ²]
dV	la différence de vitesse des couches	[-]

Nombres adimensionnels

Nombre de Reynolds $Re = \frac{UD}{\nu}$

Nombre de Strouhal $S_t = \frac{f_v D}{U}$

Coefficient de trainée $C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 A}$

Coefficient de portance $C_L = \frac{F_L}{\frac{\rho}{2} u_\infty^2 A}$

Abréviation

CFD	Computational Fluid Dynamics
2D	Bidimensionnel
3D	Tridimensionnel

Introduction générale

L'étude du comportement dynamique autour des obstacles fait une importance vitale dans le domaine de base des applications industrielles telles que la circulation de fluides dans les échangeurs de chaleur, le refroidissement dans les systèmes mécaniques ou électroniques, la construction des piliers des ponts qui traversent les rivières, les écoulements internes tels les échangeurs et les turbomachines, l'aéronautique autour des profils et les avions... etc.

A cet effet, nous avons réalisé cette étude dans le but de faire une étude numérique d'un écoulement de l'air autour d'un obstacle carré. La simulation est effectuée à l'aide du code de calcul commercial "Fluent" qui est basé sur la méthode des volumes finis, ce code peut maintenant être considéré comme de véritable "expérience numérique" lorsque les simulations sont faites avec soin.

Le manuscrit de ce mémoire est constitué de trois chapitres. Le premier présente une étude bibliographique sur les travaux antérieurs expérimentaux et numériques en relation avec le thème abordé.

La description du problème physique bidimensionnel et sa modélisation mathématique et numérique font l'objet du deuxième chapitre. Le code numérique "Fluent" dans sa version 6.3 utilisé est basé sur la méthode classique des volumes finis en utilisant l'algorithme SIMPLE pour accélérer les calculs numériques.

L'analyse des effets de l'angle d'inclinaison sur le comportement dynamique compte parmi les principaux objectifs de troisième chapitre qui sera consacré à des simulations numériques des écoulements bidimensionnels autour d'un obstacle carré.

Enfin, cette étude se termine par une conclusion générale qui contient un résumé des résultats obtenus.

Chapitre I

Étude bibliographique

I.1 Introduction

Le comportement aérodynamique d'un écoulement autour d'un obstacle de type carré ou cylindrique est un problème majeur en mécanique des fluides et fait une grande importance. Ceci est très important dans de nombreuses applications scientifiques et pratiques tel que les barrages, les bâtiments ainsi que le refroidissement des composants électriques. Pour cette raison, nous avons essayé dans ce chapitre de fournir un ensemble de définitions et d'expériences de certains chercheurs d'ouvrages bibliographiques dans ce domaine.

I.2 Généralités sur la mécanique des fluides

I.2.1 Notion de fluide

Un fluide est un milieu matériel parfaitement déformable. Du point de vue mécanique, la définition d'un matériau est liée à sa déformation en fonction des contraintes : « c'est quelque chose qui coule » sous l'action d'une contrainte donnée et même si la déformation est grande, ceci ne provoque pas la perte de cohésion entre ses molécules. Par contre, un solide (indéformable, élastique ou plastique) ne coule pas sous contrainte et la déformation qui croît avec la contrainte appliquée provoque (si elle est grande) une rupture de solide. Le fluide est défini comme un corps qui peut prendre n'importe quelle forme qui lui est présentée. [1]



(a)



(b)

Figure I.1 : Deux différents types de fluide a) fluide liquide b) fluide gazeux [2]

I.2.2 Propriétés des fluides

Tous les fluides possèdent des caractéristiques permettant de décrire leurs conditions physiques dans un état donné. Parmi ces caractéristiques on a :

I.2.2.1 Masse volumique

La masse volumique ρ d'un fluide. Elle est exprimée en (kg/m^3).

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (\text{I.1})$$

I.2.2.2 Densité

La densité elle mesure le rapport de la masse volumique du fluide rapportée à un corps de référence. C'est une grandeur sans unité par :

$$d = \frac{\rho}{\rho_{ref}} \quad (\text{I.2})$$

Pour les gaz, la masse dépend de la température et de pression.

I.2.2.3 Viscosité

La viscosité est la propriété du fluide qui décrit l'interaction entre ses particules en mouvement. Il est la mesure de la résistance à l'écoulement des fluides.

I.2.2.3.1 Viscosité dynamique

Considérons deux couches de fluide voisin distantes de dz . La force de frottement F_t qui s'exerce à la surface de séparation de ces deux couches s'oppose au glissement d'une couche sur l'autre. Elle est proportionnelle à la différence de vitesse des couches soit dv à leur surface S et inversement proportionnelle à dz , elle exprime en kg/ms .

$$F_t = \mu S \cdot \frac{dv}{dz} \quad (\text{I.3})$$

μ Le facteur de proportionnalité est le coefficient de viscosité dynamique du fluide.

I.2.2.3.2 Viscosité cinématique

Dans de nombreuses formules apparait le rapport de la viscosité dynamique μ et de la masse volumique ρ . ce rapport est appelé viscosité cinématique son unité est (m^2/s).

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (I.4)$$

Les fluides affichent des propriétés telles que :

Ne pas résister la déformation, ou lui résister légèrement (la viscosité)

L'aptitude à l'écoulement (également décrit comme la capacité de prendre la forme du récipient). [3]

I.3 Ecoulement de fluides

L'écoulement d'un fluide se produit lorsque chaque particule du fluide suit une trajectoire lisse, les chemins qui ne gênent ni ne touchent pas les uns les autres.

I.3.1 Différents types des écoulements

En physique, l'écoulement du fluide à toutes sortes d'aspects a des caractéristiques, soit stables ou instables, compressibles ou incompressibles, visqueux ou non visqueux, et stationnaires et non stationnaires.

Écoulement de fluide en fonction de la masse volumique peut être

I.3.1.1 Ecoulement incompressibles

On considère ici que la masse volumique du fluide est constante. Les écoulements incompressibles suivent le principe de Bernoulli, du nom du mathématicien et scientifique suisse Daniel Bernoulli. D'après ce principe, l'énergie mécanique totale d'un écoulement de fluide incompressible et sans frottement est constante le long d'une ligne de courant de cet écoulement. L'écoulement gazeux est considéré comme incompressible si la vitesse de l'écoulement est très petite par rapport à celle du son. Autrement dit, si son nombre de Mach (rapport entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse du son) est très inférieur à 1. Pratiquement, l'hypothèse d'écoulement incompressible est faite lorsque le nombre de Mach est inférieur à 0.3 en tout point de l'écoulement. Elle est donc très utilisée en aérodynamique pour des véhicules dont la vitesse ne dépasse pas 400 km/h.

I.3.1.2 Écoulement compressibles

Vers la fin du XIXe siècle, Prandtl apporta des contributions considérables à la théorie des fluides compressibles. Celle-ci devint d'une importance considérable pendant la seconde guerre mondiale, avec l'apparition des avions à grande vitesse et des fusées. Lors de l'écoulement compressible d'un gaz, sa densité change lorsqu'il est soumis à des variations importantes de vitesse et de pression. Sa température se modifie également, ce qui complique les phénomènes à étudier. L'écoulement d'un gaz compressible dépend du rapport de la vitesse du gaz sur la vitesse de propagation du son dans le milieu. Écoulement de fluide en fonction de la vitesse peut être.

I.3.1.3 Écoulement stable

Dans l'écoulement du fluide stable, la vitesse de l'écoulement du fluide est constante à n'importe point de sa route. Un fluide est déterminé avec l'écoulement stable si son écoulement reste inchangé et constante durant une période de temps spécifique.

I.3.1.4 Écoulement instable

Lorsque l'écoulement est instable, la vitesse du fluide peut différer entre n'importe deux points sur sa route.

Écoulement du fluide en fonction temps peut être :

I.3.1.5 Écoulement stationnaire

On dit un écoulement stationnaire si toutes les variables décrivant un mouvement sont indépendantes du temps. Ainsi la pression P , la vitesse V , la densité d , l'énergie E d'un écoulement.

I.3.1.6 Écoulement non stationnaire

On dit un écoulement non stationnaire si les variables décrivant le mouvement dépendent du temps. Écoulement de fluide en fonction de la viscosité peut être.

I.3.1.7 Écoulement visqueux

L'écoulement visqueux est un écoulement plan connu sous le nom d'écoulement de poiseuille plan et un écoulement dans une conduite rectiligne connu sous le nom d'écoulement de poiseuille (poiseuille cylindrique).

I.3.1.8 Écoulement non visqueux

L'écoulement non visqueux est un flux non visqueux d'un fluide dans lequel la viscosité du fluide est égale à zéro. [4]

I.3.2 Les régimes de l'écoulement

En fonction des nombres de **Reynolds** croissants, on distingue quatre régimes principaux : régime de Stokes, régime laminaire, régime transitoire, régime turbulent

L'écoulement de Stokes correspond aux très faibles valeurs du Reynolds (inférieures à 1)

Si $Re < 2000$, le régime est Laminaire

Si $Re > 3000$, le régime est turbulent.

Si $2000 < Re < 3000$, le régime est transitoire. [5]

I.3.2.1 Régime laminaire

Le flot d'une rivière profonde, vide de tout obstacle, sera rapide et facile. L'eau coule en ligne droite ou presque. Ce phénomène est connu sous nom d'écoulement laminaire. Dans la dynamique des fluides, écoulement laminaire (ou les flux) se produit lorsqu'un fluide s'écoule dans des couches parallèles, sans interruption. Une des conséquences de l'écoulement laminaire est que la vitesse du fluide est constante à n'importe point dans le fluide. Les fluides ayant l'écoulement laminaire ont également souvent l'écoulement constant.

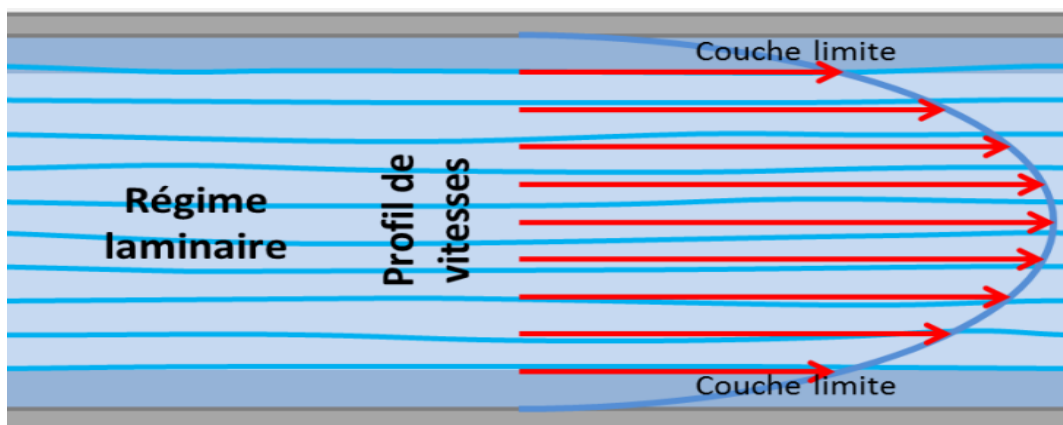


Figure I.2 : Régime laminaire [6]

I.3.2.2 Régime transitoire

C'est une transition entre le régime laminaire et le régime turbulent.

I.3.2.3 Régime turbulent

Le flot d'une rivière peu profond et hérissée de rochers serait difficile. L'eau ne coulera pas en ligne droite. Le flot serait irrégulier et agité. C'est un écoulement turbulent. L'écoulement irrégulier qui se caractérise par de minuscules régions spirales et tourbillons. La vitesse de ce fluide n'est certainement pas constante à chaque point. Pour un écoulement turbulent nous devons considérer aussi une contrainte de cisaillement associée aux effets tourbillonnaires. [6]

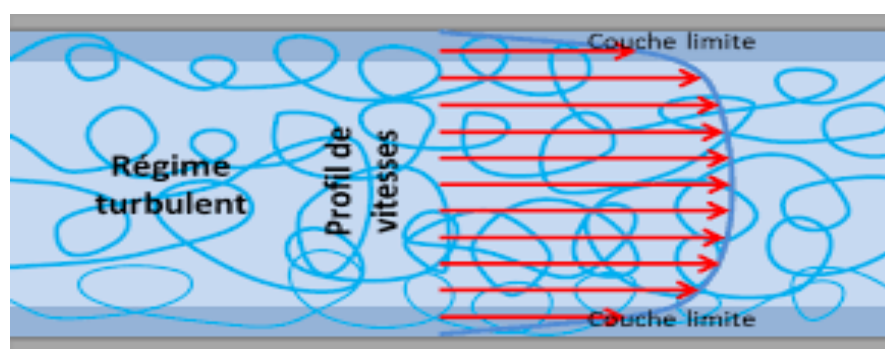


Figure I.3 : Régime turbulent [6]

La différence entre les deux régimes de l'écoulement est abordée dans le tableau suivant

Régime laminaire	Régime turbulent
Écoulement dont les filets fluides ne s'entrecroisent pas	L'écoulement devient instable
Pas de mélange mais interaction visqueuse entre les filets fluides	Il existe un mélange des filets fluides même en écoulement globalement stationnaire
En stationnaire, les lignes de courant sont confondues avec les trajectoires.	La notion de ligne de courant n'a plus de sens sauf « en moyenne temporelle »

Tableau I.1 : Caractéristiques des régimes de l'écoulement [7]

I.4 Ecoulement autour des obstacles

L'écoulement autour des obstacles est un phénomène qui se produit fréquemment dans la pratique et sa compréhension est nécessaire pour la conception mécanique et thermique de nombreux systèmes en engineering comme : avions, automobiles, bâtiments, composantes électroniques, les profils NACA d'une aile d'avion. Les types de refroidissement dans les échangeurs et radiateurs, les aubes d'une turbine industrielle qui entraînent les bateaux et les obstacles carré et cylindrique. L'identification et l'étude des phénomènes hydro et aérodynamiques qui surgissent dans le sillage d'un obstacle restent un sujet d'intérêt dans divers domaines [8]

On peut classer les obstacles aérodynamiques de forme géométrie simple en trois types :

- ❖ Les obstacles à courbure progressive, pour lesquels le point de décollement de la couche limite est susceptible de se déplacer : le modèle géométrique est la sphère ou la cylindre.
- ❖ Les obstacles à arrête vive, pour lesquels le point de décollement de la couche limite est fixe : le modèle géométrique est la plaque plane inclinée sur la direction de la vitesse v .
- ❖ Les obstacles profilés, pour lesquels il n'y a pas de décollement de la couche limite : le modèle géométrique est la plaque plane parallèle à v [9]

I.4.1 Ecoulement autour des obstacles carrés

Le cas d'un obstacle carré joue un rôle dominant dans de nombreuses Applications industrielles et techniques telle que l'aérodynamique des constructions. Ces écoulements sont en général observés dans la branche de l'ingénierie du vent : autour des immeubles de grandes hauteurs, des ponts, des Monuments et des tours qui sont en permanence exposés au vent. De même, Ils sont rencontrés autour des piliers de ponts et des jambes des plates-formes Shore qui est en permanence soumis à la charge produite par les courants Maritimes fluviaux. Ce type d'écoulement a donc fait l'objet de nombreuses études expérimentales et numériques [10]

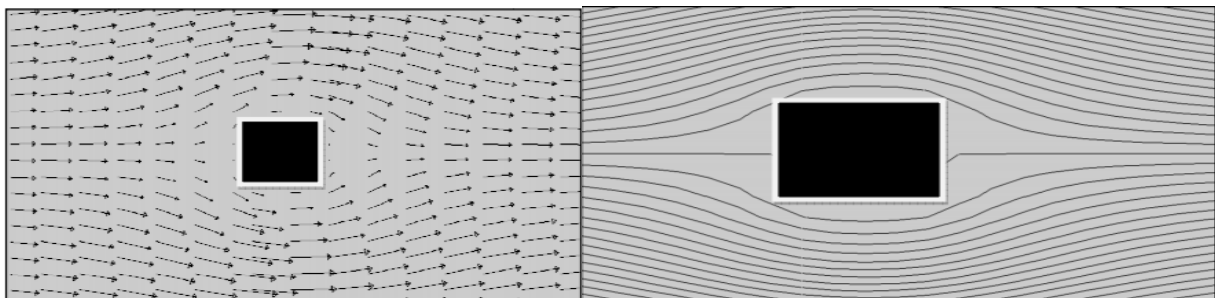


Figure I.4 : Ecoulement autour d'un obstacle carré [11]

I.4.2 Écoulement de von karman

Lorsqu'un tourbillon se détache, un écoulement dissymétrique se forme autour du corps, ce qui modifie la distribution des pressions. Cela signifie que la séparation alternée des tourbillons peut créer sur ce corps une portance périodique, cause de vibrations.

Si la fréquence de séparation est voisine de la fréquence propre d'une structure, cela crée une résonance. C'est cette vibration forcée qui, à la fréquence correcte, fait « chanter » les lignes électriques ou celles de téléphone, augmente à certaines vitesses les vibrations des antennes des voitures et est également responsable des battements des stores vénitiens quand le vent passe à travers.

Dans divers problèmes techniques, ce phénomène peut avoir des conséquences beaucoup plus dommageables (vibrations des haubans de ponts suspendus N 1, rupture éventuelle de ces ponts N 2, écoulement de cheminées, etc.

Les allées de tourbillons de Bénard-Karman disparaissent au régime critique, mais réapparaissent à plus haut nombre de Reynolds. [12]

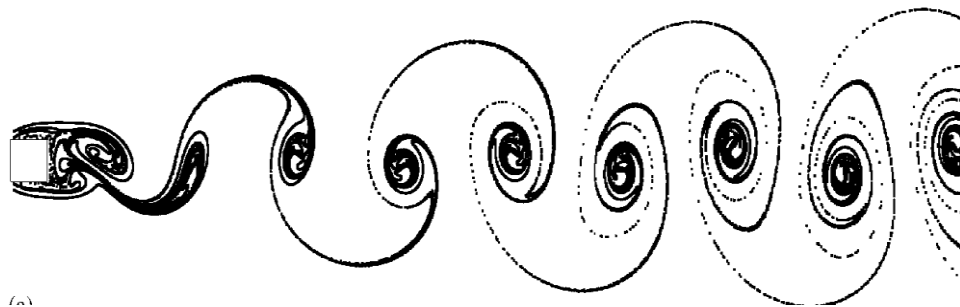


Figure (I.5) Sillage derrière un obstacle carré (lâchée de Von Karman) [12]

I.4.3 Caractéristiques de l'écoulement autour d'un obstacle carre

I.4.3.1 Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimension utilisé en mécanique des fluides. Il a été mis en évidence en 1883 par Osborne Reynolds. Il caractérise un écoulement, en particulier la nature de son régime (laminaire, transitoire, turbulent). Le nombre de Reynolds représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. Ce nombre sans dimension apparaît naturellement en dimensionnant les équations de Navier-Stokes. On le définit de la manière suivante :

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (I.5)$$

Avec :

U : la vitesse de l'écoulement (m/s).

D : le diamètre de section (m).

ν : La viscosité cinématique (m²/s). [13]

I.4.3.2 Nombre de Strouhal

Est un nombre sans dimension décrivant les mécanismes de circulation oscillante. ce nombre porte le nom de Vincent Strouhal, physicien tchèque. Physiquement, il représente le rapport du temps d'advection et du temps caractéristique de l'instationnaire. Si l'écoulement est dit quasi stationnaire.

En 1878, en étudiant les notes émises par un fil tendu soumis au vent, le physicien tchèque Vincent Strouhal fut le premier à remarquer la relation entre la fréquence du son et le quotient de la vitesse du vent par le diamètre du fil. Cette relation s'exprime par la formule :

$$S_t = \frac{F.L}{V} \quad (I.6)$$

F : fréquence d'émission des tourbillons (cette fréquence étant définie classiquement comme l'inverse de la période mesurée de situation homologue à situation homologue) ;

L : longueur caractéristique (diamètre du fil dans les expériences de Strouhal) ;

V : vitesse de l'écoulement non perturbé.

I.4.3.3 Coefficient de traînée (drag coefficient)

Considérons par exemple, une sphère en mouvement uniforme dans un fluide. Il faut tout d'abord préciser que la viscosité est essentielle pour justifier l'existence d'une force de frottement. Si le fluide est parfait il n'y a pas de traînée car les couches de fluide glissent sur l'obstacle.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 A} \quad (I.7)$$

F_D : Force de traînée.

$\frac{\rho}{2} U_\infty^2$: Pression dynamique d'écoulement libre.

A : Section de référence.

I.4.3.4 Coefficient de portance (lift coefficient)

C'est un nombre adimensionnel, une composante des forces aérodynamiques qui s'exercent sur l'objet lorsqu'il se déplace dans l'air (ou dans un autre milieu). La valeur de ce nombre dépend de la forme et de la position d'un objet par rapport au fluide elle est illustrée par l'équation suivante

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 A} \quad (\text{I.8})$$

F_L : Force de trainée.

$\frac{\rho}{2} U_\infty^2$: Pression dynamique d'écoulement libre.

A : Section de référence.

I.4.4 La couche limite

On sait qu'au voisinage d'une paroi il existe une zone de gradients de vitesse et de température ou la viscosité d'un fluide joue un rôle très important et ce d'autant plus que le nombre de Reynolds est grand. Cette zone est appelée couche limite c'est la zone d'interface entre un corps et le fluide environnant lors d'un mouvement relatif entre les deux, conséquence de la viscosité du fluide. Elle est un élément important en mécanique des fluides, (aérodynamique, hydrodynamique), en météorologie, en océanographie, etc. Elle résulte d'échanges de quantité de mouvement et de chaleur entre le fluide et la paroi. En dehors de cette zone. Le fluide peut être considéré comme parfait (sans viscosité) obéissant ainsi aux équations d'Euler.

Dans le cas d'un écoulement interne les couches limites visqueuses s'accroissent de part et d'autre des parois, pour se rejoindront après une certaine distance parcourue dite la longueur d'établissement à partir de ce point, l'écoulement sera totalement visqueux et entièrement développé. Donc, il est important que le maillage près de la paroi soit bien traité. En effet, un maillage grossier près de la paroi ne pourra pas capturer le développement de la couche limite et peut conduire à une sous-estimation de la longueur d'établissement de l'écoulement

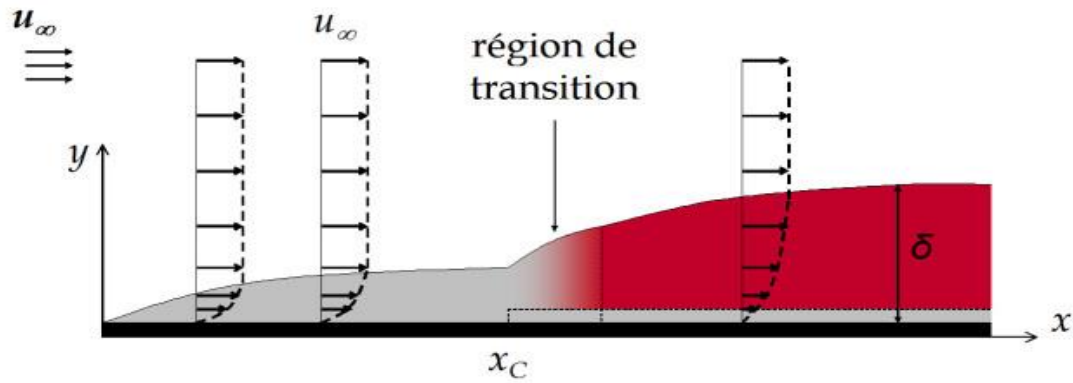


Figure (I.6) : La couche limite [15]

I.4.4.1 Point de séparation

Point de séparation à partir duquel la couche limite décolle de la paroi et définit comme le point où le frottement s'annule. Contrairement à certaine géométrie comme celle de cylindre carré, le décollement dans le cas de cylindre circulaire n'est pas due à une singularité dans la géométrie mais au fait que la couche limite se développe en présence d'un gradient de pression adverse (gradient de pression tel que la pression augmente dans les sens d'écoulement). Lorsque ce gradient de pression adverse et suffisamment important, la vitesse de particules fluides va diminuer jusqu'à devenir nulle puis négative, c'est le processus de décollement de la couche limite.

I.4.4.2 Couche de cisaillement

Les couches de cisaillements sont les régions de fluides où il existe un gradient de vitesse élevé de cette différence au sein du fluide entraîne des contraintes de cisaillement importantes. Les particules fluides se déplaçant rapidement sont freinées par les particules fluides moins rapides.

Dans le cas de l'écoulement autour du cylindre, deux couches de cisaillement libres se développent, de part et d'autre du cylindre, entre la zone d'écoulement libre et la zone de vitesse quasi nulle existant le sillage.

I.4.4.3 Zone de recirculation

Le domaine se distingue par les conséquences de la zone de recyclage qui a une forte influence sur la prédiction de la main-d'œuvre sur le cylindre carré et sur la fréquence de libération du vortex. Cette zone est sensible aux conditions externes initiales telles que le nombre de Reynolds, le taux de turbulence, la taille du cylindre et les conditions finales [15]

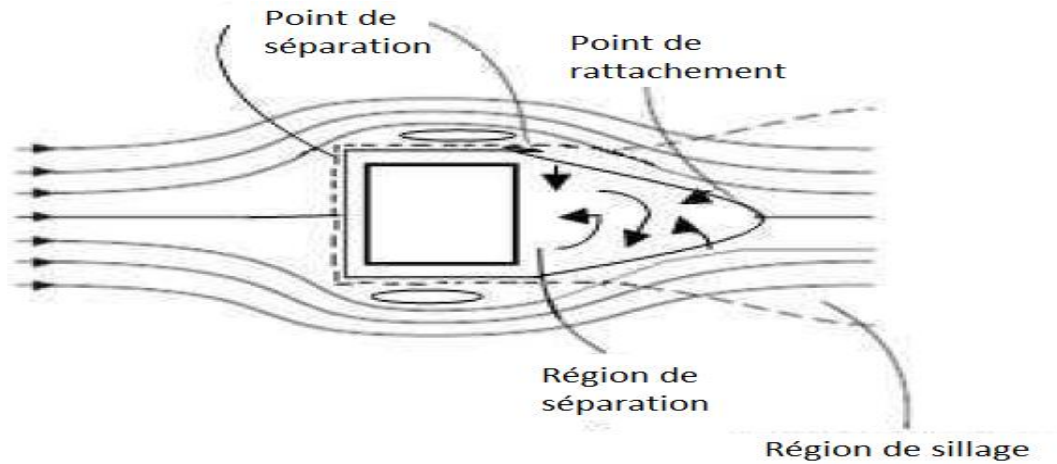


Figure (I.8) : Écoulement autour d'un obstacle carré pour des petits nombres de Reynolds [15]

I.4.5 Profil de vitesse

Sous l'effet des forces d'interaction entre les molécules de fluide et des forces d'interaction entre les molécules de fluide et celles de la paroi, chaque molécule de fluide ne s'écoule pas à la même vitesse. On dit qu'il existe un profil de vitesse. Des profils de vitesse à la notion de couche limite. La viscosité engendre un gradient de vitesse dans une section droite de conduite : à la paroi, la vitesse du fluide est nulle (c'est la condition d'adhérence) ; la vitesse est maximale au centre de la conduite

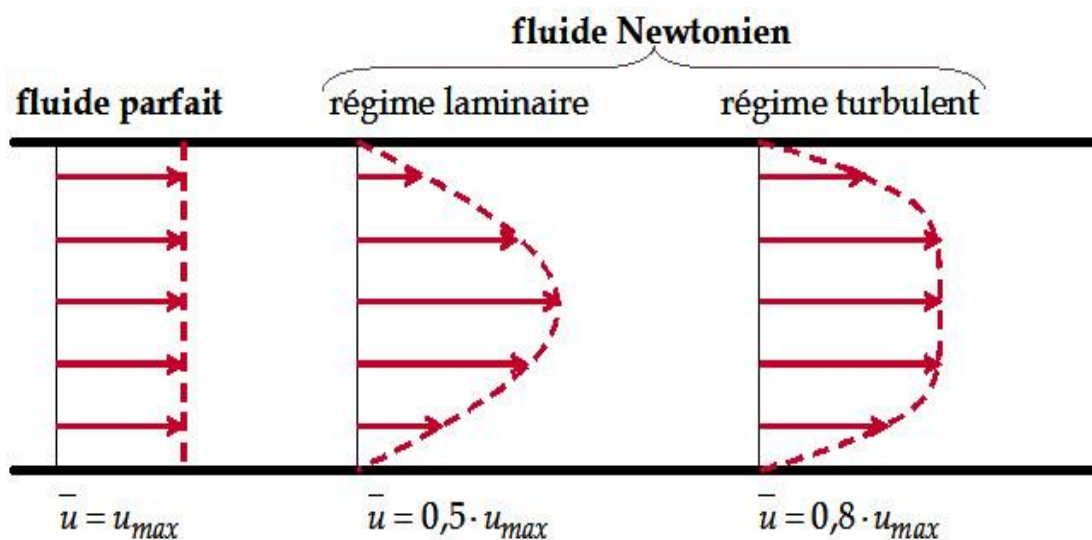


Figure (I.7) : Profil de vitesse [15]

I.6 Revue des travaux sur les écoulements autour d'un obstacle carré

La recherche est liée directement à l'évolution de la technologie ; et c'est ce qui pousse les chercheurs à avancer dans des cas très compliqués et d'actualité susceptibles d'être traités à l'aide d'un outil informatique très puissant et avec des moyens expérimentaux les plus sophistiqués et les plus performants. Afin d'élargir nos connaissances dans ce domaine, nous avons fait une lecture des auteurs qui se résument comme suit :

Okajima a effectué une série des expériences découvrant le nombre de Strouhal associé à chaque nombre de Reynolds et en fonction de rapport largeur / hauteur des cylindres rectangulaires. Le nombre de Reynolds a varié de 70 à 2 104, Le rapport largeur / hauteur variait de 1 à 4. Les résultats ont été confirmés par des calculs numériques. [16]

Kelkar et Patankar ont étudié le flux 2D autour d'un cylindre carré à différents nombres de Reynolds via l'utilisation d'une analyse de stabilité linéaire. Le début de l'instabilité a été étudié et analysée à travers diverses techniques de progression temporelle, le but principal était de déterminer la technique la plus appropriée pour étudier la croissance des perturbations. Une simulation chez Reynolds un nombre au-delà de la valeur critique a également été effectué pour connaître les caractéristiques périodiques de l'écoulement. Ils ont trouvé le nombre critique de Reynolds entre débit constant et instable était de 53 [16]

Sohankar et al. En 1995 ont étudié le flux laminaire autour d'un carré cylindre aux nombres de Reynolds allant de 45 à 250. Pour chaque nombre de Reynolds testé, ils ont prédit la portance, traînée, coefficient de pression et nombre de Strouhal. Il s'est avéré qu'au numéro 55 de Reynolds, le flux présentait une fréquence de perte de tourbillon bien définie mais au numéro 50 de Reynolds, le débit était toujours stable. [16]

Quatre ans plus tard, **Sohankar et al.** a entrepris une autre étude sur l'écoulement autour d'un cylindre carré 3D à modéré. Les nombres de Reynolds, basés sur leurs expériences ils ont rapporté que les Reynolds stables / instables la valeur critique était de 47 2, à partir des simulations effectuées, ils ont observé le nombre de Reynolds a dont le flux est devenu 3D se situait entre 150 et 200. [16]

Luo et al. Ont étudié expérimentalement le débit transition dans le sillage d'un cylindre carré. Dans leurs études, ils ont déterminé deux modes instables différents, modes A et B, leurs nombres de Reynolds respectifs 188-190 et 230-260 étaient associés. Conclu que le mécanisme de formation de vortex cylindres circulaires et carrés était le même, en raison de les structures verticales similaires qu'ils ont observées entre modes correspondants pour ces deux corps de bluff [16]

Ul-Islam et Zhou en 2009 ont enquêté sur le flux autour d'un cylindre carré au numéro 100 de Reynolds via en utilisant la méthode de Boltzmann sur réseau, le but était de déterminer l'influence des différentes limites conditions sur les caractéristiques d'écoulement en aval.

Dans la même année, **Ali et al.** A réalisé une grille étude de convergence pour un flux 2D autour d'un carré cylindre à Reynolds numéro 150. Ils ont remarqué que l'indépendance du réseau a été atteinte lorsque la première cellule a été placée à une distance non dimensionnelle de 0,005 de la surface solide.

Récemment, la technologie de contrôle du débit a été appliqué à l'écoulement sur les corps de bluff, la plupart du travail fait référence au contrôle de débit passif [12–18], où le flux est modifié via l'utilisation de dispositifs statiques, étant c'est l'idée du noyau du contrôle de flux passif [16]

Zhou et al. a étudié l'écoulement autour d'un cylindre carré avec une plaque de contrôle en amont. Ils ont placé une verticale plaque devant le cylindre carré et introduit la hauteur de la plaque comme paramètre modifiable, ils ont étudié son influence sur le vortex en aval perte de sillage. [16]

Cheng et al. A effectué une série de calculs via la méthode de Boltzmann sur réseau, étudier les caractéristiques d'écoulement d'un flux de cisaillement linéaire devant un cylindre carré aux nombres de Reynolds de 50 à 200. Les auteurs ont présenté un paramètre contrôlable connu sous le nom de taux de cisaillement, en modifiant ce paramètre, à $Re = 50$, ils ont remarqué que le flux régulier pourrait être perturbé et devenu instable [16]

Doolan a étudié l'interaction entre un cylindre carré et une plaque horizontale détachée en aval à $Re=150$. Dans son étude, les équations 2D N-S ont été résolues en utilisant la méthodologie des volumes finis mise en œuvre dans OpenFOAM. Il a signalé la perturbation causée par la plaque pourrait avoir une influence non négligeable sur la Nombre de Strouhal et coefficients de force [16]

Ali et al., ils ont étudié un cylindre carré avec un séparateur plaque fixée à l'arrière, ils ont introduit la plaque longueur comme paramètre modifiable. Numériquement, ils ont découvert que la plaque de séparation peut fondamentalement changer la structure d'écoulement du sillage. [16]

Ul-Islam et al. Ont réalisé une étude similaire mais avec une épaisseur plaque de séparation détachée. Dans leur étude, ils ont pris distance entre le cylindre carré et la plaque en tant que paramètre modifiable.

En 2016, **Wang et al. [18]** a présenté une étude sur l'écoulement autour d'un cylindre carré, avec une plaque verticale poreuse près du sillage. Ils ont conclu que le coefficient de traînée a diminué à une certaine mesure par rapport à celle associée au cylindre sans plaque. Le numéro Strouhal était également réduit et dans certaines conditions le vortex l'excrétion pourrait même être supprimée. [16]

D. Callaud et al (2001) ont mené une étude expérimentale et numérique de l'écoulement laminaire d'un fluide autour d'un obstacle de section carrée disposé sur une plaque plane. La mesure de l'écoulement est faite par PIV (Particle Image Velocimetry). La confrontation des deux méthodes a donné les mêmes résultats qui se manifestent par la topologie de l'écoulement, les lignes de séparation, le lâchage tourbillonnaire. A part, une légère formation de tourbillons verticaux lâchés au-dessus du cube s'avère un peu plus grand que celle faite par l'expérience [17]

S.C Luo et al. (2003), Les travaux expérimentaux sur les obstacles carrés, employant comme méthode de mesure un colorant fluorescent et la visualisation laser, ont permis de déterminer le nombre Reynolds critique de transition à 160 pour le mode A et à 200 pour le mode B. Il a été observé qu'au fur et à mesure que le nombre de Reynolds augmente jusqu'à 160, le caractère onduleux de sillage augmente. Ce qu'implique le mode A. A partir d'un nombre de Reynolds égal à 200, le sillage derrière l'obstacle devient complètement déformé, et les longueurs d'ondes sont de plus en plus faibles ; ce qui caractérise le mode B. [17]

K. Lam -L. Zou (2009) ont étudié numériquement et expérimentalement les écoulements turbulents autour de quatre cylindres dans une configuration carrée intégrée avec différents rapports d'espacement choisis. Les résultats obtenus de la fluctuation de vitesse sont avérés similaires aux résultats numériques. [17]

N. Mahir (2009) Ont étudié l'écoulement bidimensionnel et tridimensionnel autour d'un cylindre carré placé près d'un mur plat avec un rapport d'espace G/D varié et pour de nombres de Reynolds aussi variables, en utilisant une méthode entièrement implicite, de différence finie des équations Navier –Stokes. Ils ont constaté que la simulation numérique de l'écoulement tridimensionnel prévoit les coefficients de traînée et la racine carrée des coefficients de portance inférieurs que ceux de l'écoulement bidimensionnel. Ils ont conclu que le coefficient de traînée et la racine carrée des coefficients de portance diminue légèrement aux grands rapports d'espace G/D . [17]

M.M. Ouestati et al (2010) se sont intéressés à la simulation par les différentes formulations de la fonction-vorticité pour résoudre l'équation de Navier-stokes étudié l'écoulement de fluide régulier et transitoire autour d'un obstacle carré. Ils ont conclu que cette formulation a plusieurs avantages, puisque la limite de pression est éliminée des équations de gouvernement et satisfait automatiquement l'équation de continuité. [17]

Marcin Huptas, Witold Elsner 2008 Ont travaillé sur un écoulement stationnaire et instationnaire autour deux obstacles carrés. Ils ont présenté avec l'utilisation du FLUENT des résultats numériques concernant l'écoulement autour d'un obstacle carré en premier cas, et autour deux obstacles carrés sur même ligne en deuxième cas. Pour la première résolution, ils ont montré que l'épaisseur de la couche limite peut influencer sur la couche de cisaillement près de la paroi. Et pour la deuxième résolution, ils ont constaté que l'union des deux zones tourbillonnaires en aval du premier cube et en amont du deuxième rend l'écoulement plus turbulent [18]

M. Breuer et al. 2000 ont réalisé des calculs précis sur un écoulement laminaire autour d'un cylindre carré. Ces calculs sont basés sur deux méthodes : Lettice-Boltzmann (LBA) et la méthode des volumes finis (FVM). Le nombre de Reynolds est environ de 0.5 à 300. Le rapport de blocage est de 1/8. Les résultats des deux méthodes ont été évalués et comparés en détail. Les profils de vitesse, les longueurs de la recirculation et le nombre de Strouhal ont été étudiés. Ils ont constaté que malgré le manque des données précises et détaillées dans la littérature sur l'écoulement laminaire autour d'un cylindre carré, mais L'excellent accord entre les calculs de LBA et FVM a été trouvé pour la longueur de recirculation pour Re inférieure à 60 [19]

Jirapom Yojina et al 2010 : ont présenté une investigation aux configurations de l'écoulement dans un canal avec l'existence des obstacles carré.la modélisation est réalisé Par la méthode de Boltzmann (LBM) avec un rapport de blocage de 1/4. Le nombre de Reynolds est compris entre 1 et 300. Les lignes de courant et les profils de vitesse sont présentés pour indiquer le décollement de tourbillon. Le nombre de Strouhal est calculé pour caractériser le dynamique fréquentiel de l'écoulement. Les résultats obtenus prouvent que l'écoulement est laminaire à l'entrée, ensuite, ils ont constaté une transition périodique et instable sur l'écoulement. Cette transition est obtenue au fur et à mesure avec l'augmentation du nombre de Reynolds. On outre, avec un nombre suffisant d'itérations, ils ont montré que la périodicité de l'écoulement dans le sillage produit le décollement du tourbillon de Von Karman. [20]

Gera. B et al 2010 : Ont étudié avec CFD (Computational Fluid Dynamics) l'écoulement instationnaire 2D autour d'un obstacle carré. La simulation a été réalisée pour un écoulement autour d'un cylindre carré afin d'analyser le comportement de sillage. Le nombre de Reynolds a été pris de l'ordre de 50 à 250. La méthode des volumes finis a été utilisée avec une grille décalée. L'algorithme SIMPLE a été utilisé pour le couplage vitesse-pression.

Le coefficient de portance et la vitesse dans la région de sillage ont été surveillés pour le calcul du nombre de Strouhal. Et enfin la variation du nombre de Strouhal avec le nombre de Reynolds a été trouvée à partir de cette analyse [21]

Hafida .N, Mohamed. S 2010 ont mené une étude numérique des effets des obstacles carrés sur le profil du vent. Cette étude leur permis d'évaluer les perturbations aérodynamiques engendrées par la présence d'un obstacle carré dans un champ de vitesse caractérisé par un profil incident parallèle et logarithmique. Les équations régissant l'écoulement du fluide supposé incompressible ont été résolues via des modèles numériques CFD (Computational Fluid Dynamics). Toutefois, les zones de recirculations, les longueurs de rattachement et les points de séparations ont été évalués en utilisant les modèles K- ϵ standard et K- ϵ réalisable pour des nombres de Reynolds de l'ordre de 10^4 et 10^5 . Dans ce travail, ils ont constaté que l'influence de l'obstacle sur l'écoulement du vent est clairement apparue. Ils ont montré l'évolution des forts gradients de vitesse qui se forment autour du bâtiment et près du sol. [22]

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques concepts théoriques de base des écoulements de fluides autour des obstacles de type carrés et cylindrique en général, ainsi que quelques expériences de certains chercheurs sur ce phénomène. Dans le chapitre suivant, nous tenterons d'aborder la formule mathématique et numérique, et nous ferons une présentation du code informatique utilisé pour résoudre notre problème.

Chapitre II

Formulation mathématique et modélisation numérique

II.1 Introduction

Ce chapitre est constitué une formulation mathématique et une modélisation numérique des écoulements des fluides autour d'un obstacle carré. Il s'attache surtout à présenter le code FLUENT qui est basé sur la description de problème et les hypothèses simplificatrices.

II.2 Formulation mathématique

La modélisation mathématique de l'écoulement est basée sur les lois de Navier Stokes ; La loi de conservation de la masse (également appelée équation de continuité), de l'impulsion et de l'énergie (connue sous le nom de deuxième loi de Newton) ainsi que la loi de conservation de l'énergie. Dans le cas de liquides sans pression et à densité fixe.

En mécanique des fluides, les équations de Navier-stock sont des équations différentielles non linéaires partielles qui décrivent le mouvement des fluides. Ils régissent, par exemple, le mouvement de l'air de l'atmosphère, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau de l'eau à travers des tubes et de nombreux autres phénomènes d'écoulement des fluides. Ces équations, lorsqu'elles ne sont pas simplifiées, n'ont pas de solutions analytiques et ne sont donc utiles que pour les simulations numériques. Ces équations peuvent être simplifiées de différentes manières, ce qui facilite la résolution de ces équations. Certaines simplifications permettent de trouver des solutions analytiques aux problèmes de dynamique des fluides. Dans le présent travail, les écoulements considérés sont tridimensionnel turbulent ou laminaire, stationnaire et instationnaire d'un fluide incompressible, sans transfert de chaleur. Dans ce qui suit, seront décrites les équations traduisant le transport de masse et de quantité de mouvement régissant de tels écoulements avec les simplifications nécessaires qui sont faites dans le code FLUENT selon les cas étudiés. [24]

II.2.1 Hypothèses Simplificatrices

Afin de rendre le modèle de calcul plus détaillé et plus précis, il faut introduire certaines hypothèses simplificatrices, qui se sont réparties comme suit :

- ❖ L'écoulement est stationnaire et le fluide est incompressible.
- ❖ L'écoulement est bidimensionnel.
- ❖ Le fluide est visqueux et newtonien.
- ❖ Le profil de vitesse à l'entrée du canal est constant.
- ❖ Le transfert thermique par tous les modes est négligeable.

II.2.2 Equations de transport

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

II.2.2.1 Equation de continuité

Équation de continuité c'est l'équation qui exprime la loi de conservation de masse aux cours de l'écoulement. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

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

Où ρ la masse volumique et \vec{v} le vecteur de vitesse.

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{II.1})$$

II.2.2.2 Equations de quantité de mouvement

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 :

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

Comme nous sommes dans un cas stationnaire alors :

$$\text{Le terme : } \frac{\partial U_i}{\partial t} = 0$$

$$\text{L'équation (2-2) devient : } U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (\text{II.3})$$

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

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

$$\text{L'équation de continuité s'écrit : } \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.6})$$

II.3 Résolution numérique

La discrétisation des équations aux dérivées partielles a pour le but de transformer le Problème continu en un problème discret, de façon à pouvoir assurer sa résolution par des méthodes numériques telle que la méthode des éléments finis, la méthode de différences finis et la méthode des volumes finis. Cette dernière est la plus utilisée actuellement dans le code de simulation numérique CFX.

II.3.1 Méthode des différences finie

La méthode des différences finis est à l'origine des premières simulations dans la mécanique des fluides et transfert de chaleur (1960 à 1965). Son principe consiste à discrétiser. Les équations aux nœuds de la grille en calculant chaque dérivée partielle à l'aide du développement de Taylor, pour obtenir les équations linéaires qui lient les variables inconnues en un nœud aux valeurs de ces mêmes variables aux nœuds voisins. La précision du schéma dépend du nombre de nœud de l'ensemble retenu pour approximer une dérivée donnée et du maillage effectué (en général utilisation de maillage régulier et structuré).

II.3.2 Méthode des éléments finie

La technique des éléments finis discrétise l'espace à l'aide d'éléments géométriques Simples (triangles ou quadrangles en général). Comme elle permet de modéliser des geometries très complexes, elle est parfois préférée à la méthode des volumes finis. Ensuite, la forme forte des équations est remplacée par la forme faible dans laquelle les inconnues sont approximées par une combinaison linéaire de fonctions de base dont le support est un élément. La méthode des éléments finis a vu les premières utilisations pour résoudre les équations de Navier-Stokes dans les années soixante-dix. Dans la méthode des éléments finis. Les variables inconnues sont calculées par une combinaison linéaire de fonction. L'approche éléments finis se décompose en deux étapes:

- ❖ Approximation nodale des fonctions inconnues par sous-domaines (fonctions D'interpolation)

- ❖ Utilisation de la méthode des résidus pondérés qui permet de construire une Formulation Intégrale à partir des équations aux dérivées partielles (la méthode Galerkin est la plus fréquemment utilisée). C'est une méthode conservative sur un domaine.

II.3.3 Méthode des volumes finis

Cette méthode consiste à subdiviser le domaine physique de l'écoulement en éléments de volumes plus ou moins réguliers dans lesquels les équations, décrivant l'écoulement, écrites sous une forme conservative, sont intégrées. Le but de cette méthode est de convertir l'équation différentielle générale en un système d'équations algébriques en mettant en relation les valeurs de la variable considérée f aux points nodaux adjacents d'un volume de contrôle typique. Cela est obtenu par l'intégration de l'équation différentielle gouvernante dans ce volume de contrôle avec l'approximation des différents termes (convection, diffusion et source). la méthode des volumes finis, elle consiste en :

- ❖ La division du domaine de calcul en des volumes de contrôle discret par un maillage de calcul.
- ❖ L'intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels, afin de construire les équations algébriques pour les variables dépendantes discrètes (les inconnus), tels que les vitesses, pressions, températures et les autres scalaires conservés.
- ❖ La linéarisation des équations discrétisées et la solution du système d'équations linéaires résultants pour pouvoir adapter les valeurs des variables dépendantes.

II.3.3.1 Principe de la méthode des volumes finis

Les étapes de résolution de la méthode des volumes finis sont les suivantes :

II.3.3.1.1 Le maillage

C'est la subdivision du domaine d'étude en grilles longitudinales et transversales dont l'intersection représente un nœud, ou on trouve les composantes u et v de la vectrice vitesse qui se trouve au milieu des segments reliant deux nœuds adjacents. La discrétisation du domaine est obtenue par un maillage constitué d'un réseau de points. Les grandeurs scalaires pression, température, sont stockées dans le nœud P du maillage, tandis que les grandeurs vectorielles u et v sont stockés aux milieux des segments reliant les nœuds. L'équation générale du transport est intégrée sur le volume de contrôle associé aux variables scalaires est les équations de quantités de mouvement sont in le volume de contrôle associé aux composants de vitesses. Le volume de contrôle de la composante longitudinale u est décalé suivant la direction x par rapport au volume de contrôle principale, celui de la composante transversale v est décalé suivant la direction de y . Ce

type de maillage est dit maillage décalé permet une bonne approximation des flux convectifs est une meilleure évaluation de des gradients de pression ainsi une stabilisation numérique de la solution. La construction des volumes des contrôle et le maillage décale sont montres dans le schéma suivant : [25]

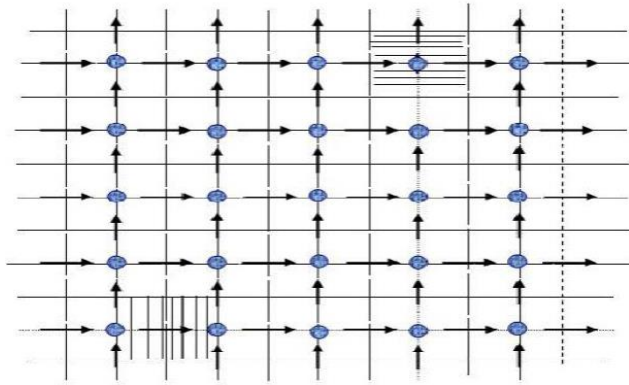


Figure II.1 : Schéma du maillage [26]

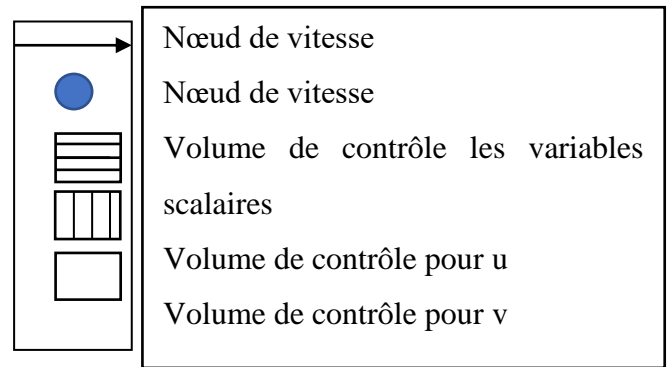


Figure II.2 : Schéma du maillage [26]

II.3.3.1.2 Nœuds et éléments

La modélisation numérique repose sur la reformulation des équations de conservation sur des volumes élémentaires ou discrets, appelés éléments ou mailles. A ces éléments, sont associés les nœuds de discrétisation, c'est-à-dire les points de résolution des équations discrètes. Ceux-ci peuvent être aussi bien placés aux sommets des éléments qu'en leur centre ou encore sur les faces, selon la méthode de discrétisation utilisée. Les éléments et les nœuds associés composent le maillage, qui se fait par un découpage géométrique du domaine de calcul.

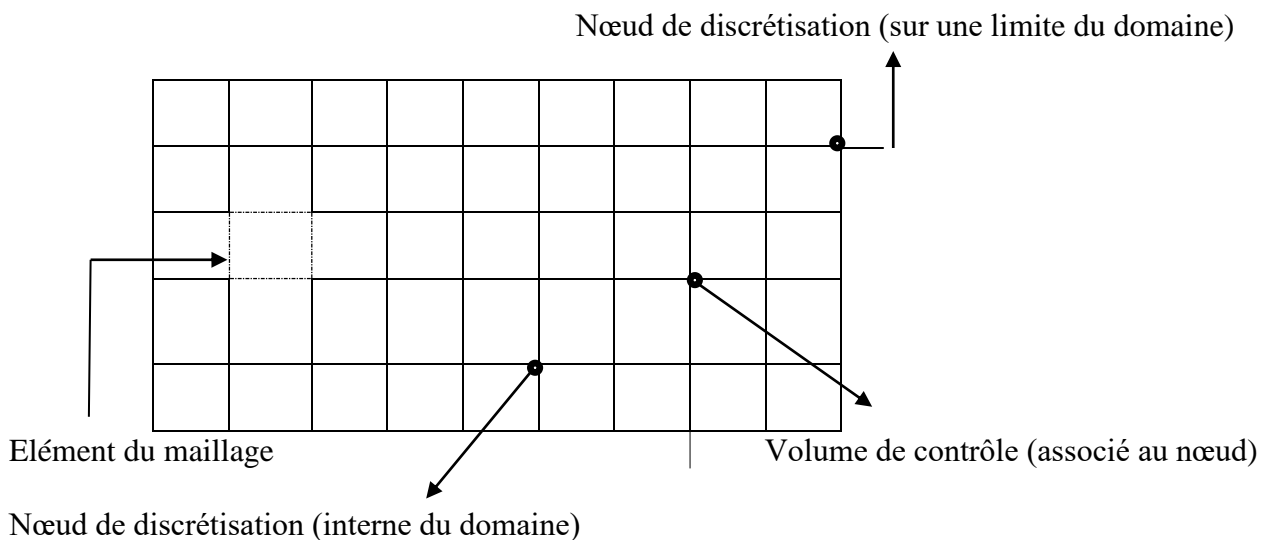


Figure II.3 : Illustration de la notion de maillage

II.3.3.1.3 Géométrie et topologie

La géométrie du problème considéré est schématisée par la figure II-4. Elle décrit un canal rectangulaire de longueur L et de hauteur h , et d'un obstacle de section carré placé Sur le fond du canal. Sur le fond du canal. Les dimensions géométriques sont celles utilisées par Pellerin et Nore

Le canal est de longueur $L=24\text{m}$

La hauteur du canal est de $H=13\text{m}$

La distance entre l'entrée du canal et la première arête de cube est de $5D$

La distance entre la deuxième arête de l'obstacle et la sortie du canal est de $18D$

$D=1\text{m}$ c'est le coté d'obstacle.

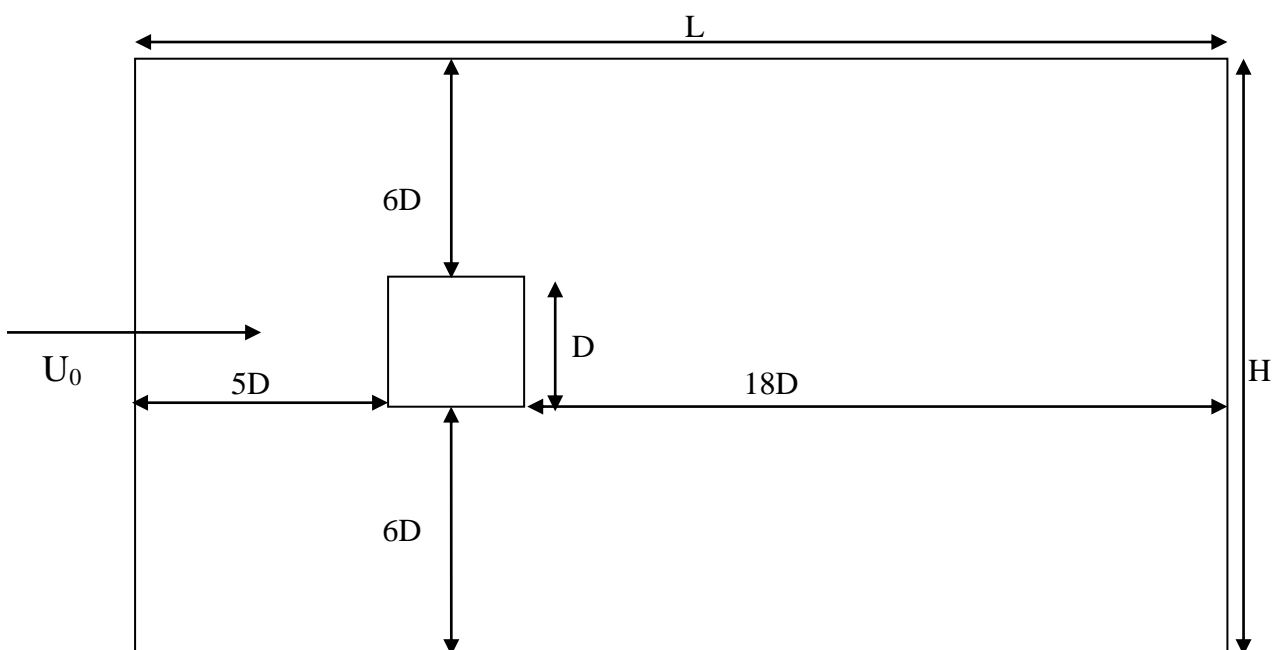


Figure II.4 : Géométrie du domaine pour l'angle 0° [28]

II.3.3.1.4 Connectivité

La connectivité décrit les liaisons entre les sommets des éléments. On parle de maillage structuré si les nœuds de même type (dans le domaine, sur une limite ou sur un coin) ont toujours le même nombre de nœuds voisins, ou sont associés au même nombre d'éléments. La connectivité associée à ces nœuds est alors toujours de même type. Dans le cas d'un maillage non-structuré, la connectivité est de type quelconque, et le nombre de nœuds voisins de chaque nœud diffère localement.

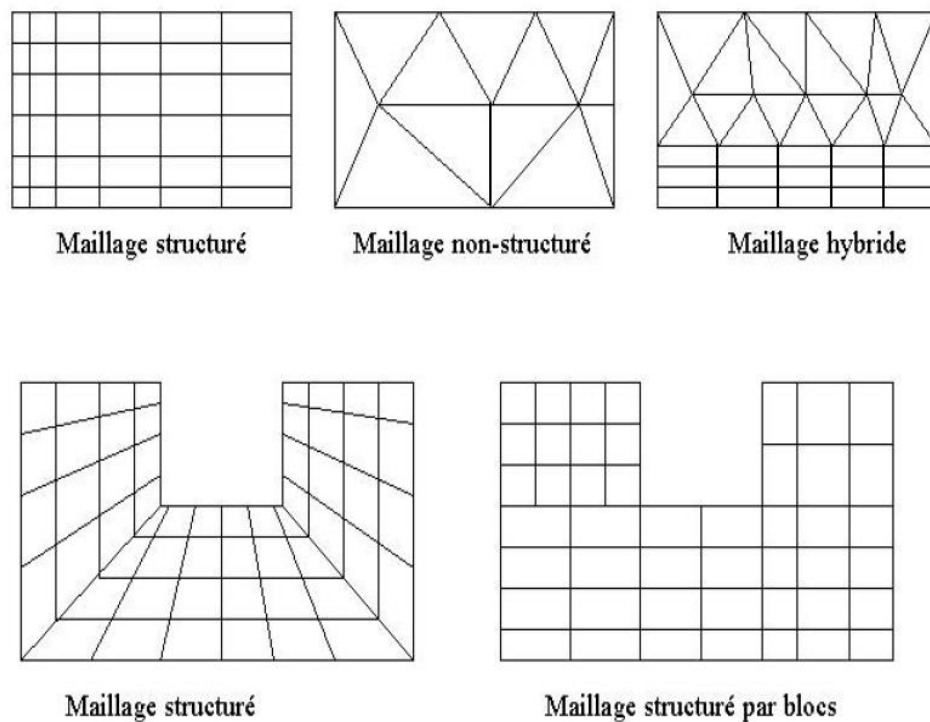


Figure II.5 : Les différences structurent de maillage par code FLEUNT I271

II.4 Algorithme Simple

Pour notre résolution nous utilisons l'algorithme Simple qui suit les étapes suivantes :

- ❖ Mettre à jour des propriétés du fluide.
- ❖ Mettre à jour le champ de vitesse, c'est-à-dire la résolution des équations de transport de quantité de mouvement de u , v , w , en utilisant les valeurs courantes de pression.
- ❖ Corriger la pression si les vitesses trouvées dans l'étape précédente ne satisfont pas l'équation de continuité.
- ❖ Tester la convergence, si celle-ci est atteinte, on arrête le processus de calcul.

II.4.1 Logiciel Gambit

Il permet à l'utilisateur de construire la géométrie du domaine de calcul et de subdiviser ce dernier en petits volumes de contrôle ou cellules de calcul. L'ensemble de ces volumes élémentaires constitue le maillage. La définition des conditions aux limites appropriées, au niveau des cellules qui coïncident ou touchent la frontière du domaine de calcul, se fait également à ce niveau.

II.4.1.1 Comment- utiliser Gambit ?

II.4.1.1.1 Vue globale

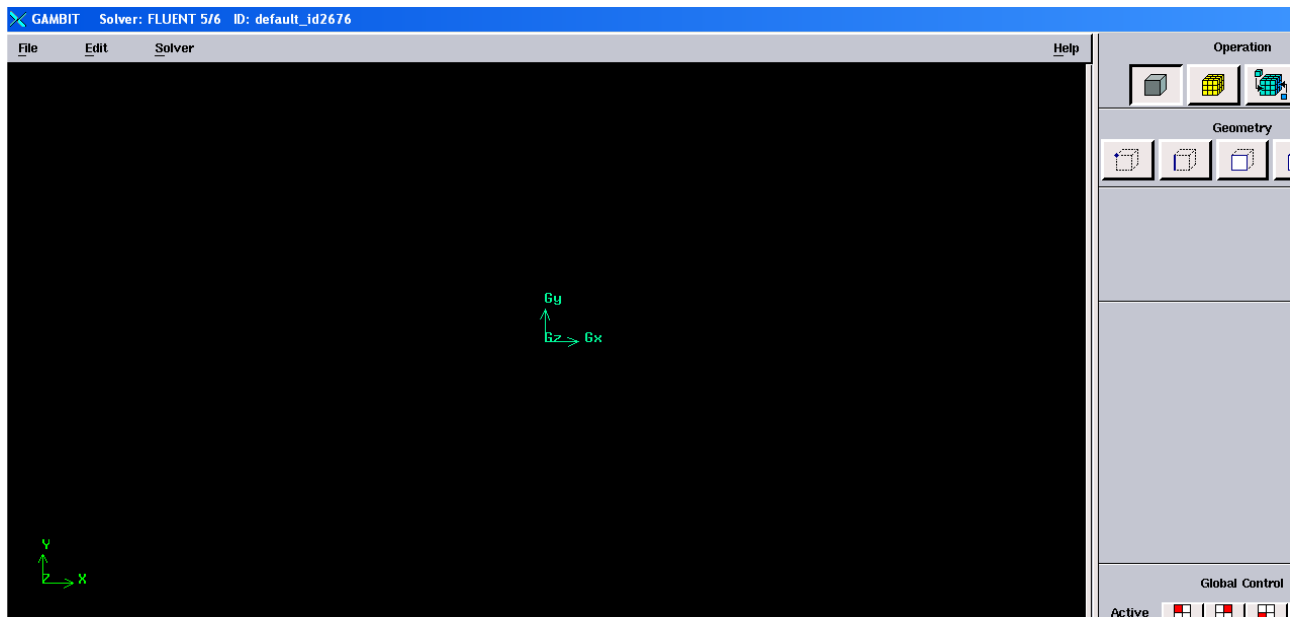


Figure II.6 : L'interface de Gambit

II.4.1.1.2 Construction de la géométrie

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

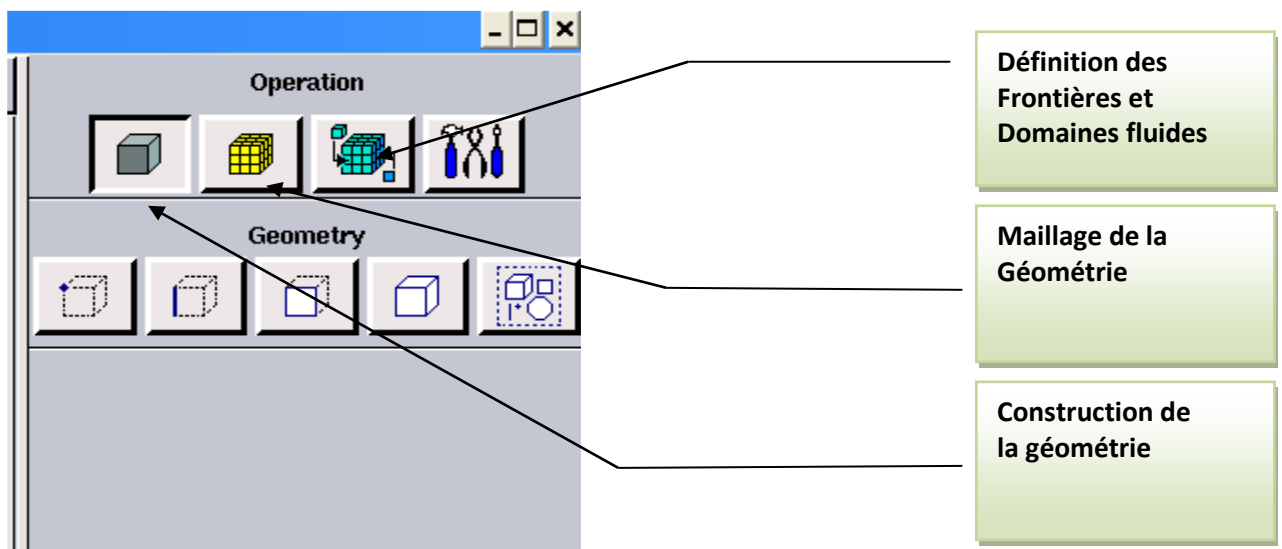


Figure II.7 : Création de la géométrie et génération de maillage

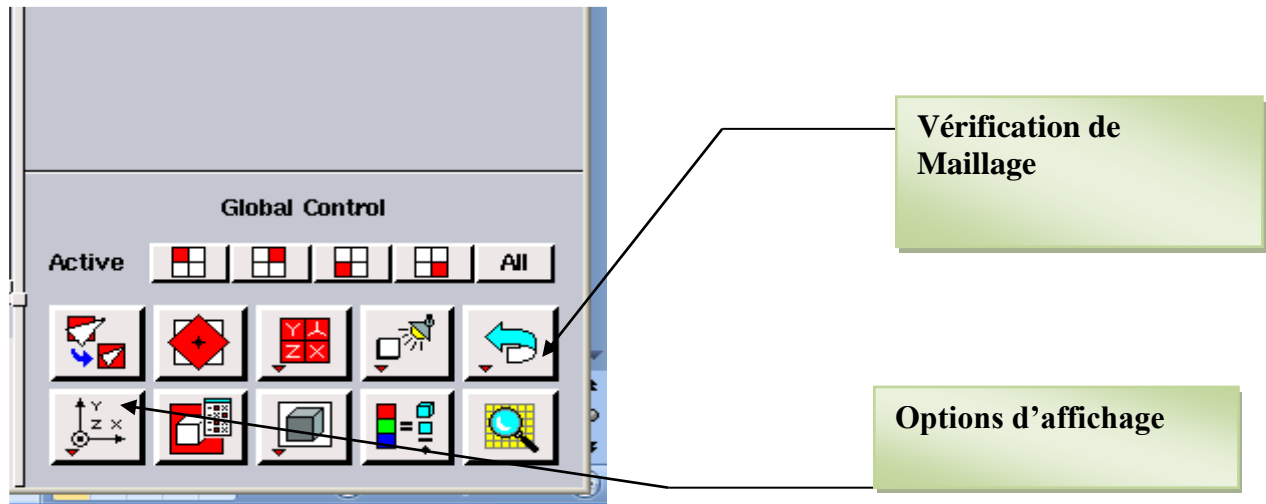


Figure II.8 : Vérification de maillage et options d'affichage

II.4.1.2 Choix du type de maillage

II.4.1.2.1 Maillage structuré (quadra/hexa)

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc, il présente les avantages suivants :

- ❖ Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- ❖ Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.
- ❖ Ses inconvénients sont :
- ❖ Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe
- ❖ Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.

II.4.1.2.2 Maillage non structuré (tri /tétra)

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

Ses avantages :

- ❖ Peut-être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments
- ❖ Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/titra) sont très automatisés Ses inconvénients :
- ❖ Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré.
- ❖ Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré.

II.4.1.2.3 Maillage hybride

C'est un maillage généré par un mélange d'éléments types, triangulaires ou quadratiques en 2D, tétraédrique, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

Ses avantages :

- ❖ Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré.
- Techniques générales de génération du maillage :
- Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable. Nous pouvons résumer ses règles ainsi :
- ❖ Maintenir une bonne qualité des éléments.
 - ❖ Assurer une bonne résolution dans les régions à fort gradient.
 - ❖ Assurer un bon lissage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier
 - ❖ Minimiser le nombre total des éléments (temps de calcul raisonnable).

II.4.1.3 Conditions aux limites et définition de domaine

Le mailleur Gambit peut générer des maillages que beaucoup de solveurs peuvent utiliser, ainsi nous devons spécifier le logiciel solveur avec lequel on veut traiter le fichier maillage. Comme conditions aux limites, on peut imposer une vitesse à l'entrée du canal et une condition de la pression à la sortie. La figure suivante résume les différentes conditions qu'on peut imposer pour un écoulement laminaire autour d'un obstacle carré au fond d'un canal. Ensuite, on procède à la définition des domaines de calcul.

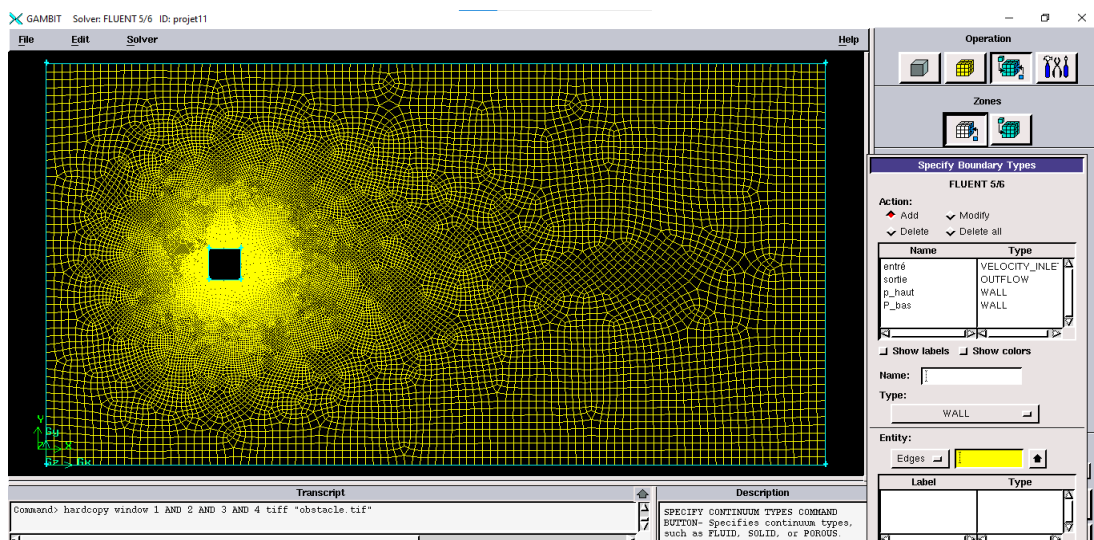


Figure II.9 : Définition des conditions aux limites

II.4.1.4 Exportation du maillage de gambit

Après que nous finissons de créer la géométrie et la définition des conditions aux limites, nous exportons le maillage en fichier (mesh : maillage) a raison de facilité la lecture par fluent.

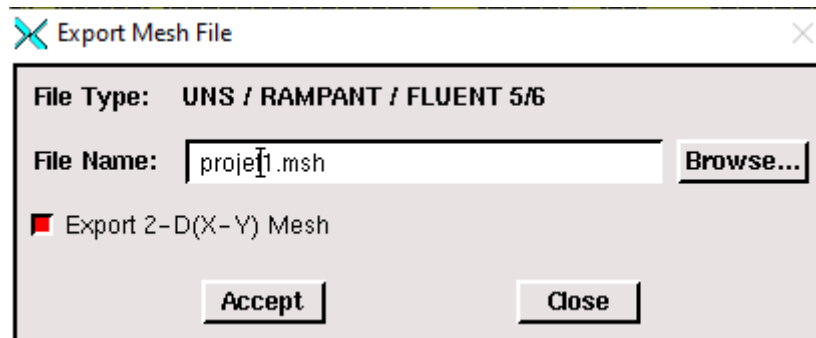


Figure II.10 : Exportation de maillage

II.4.2 Code Fluent

Fluent est un code de calcul qui permet de simuler les écoulements des fluides avec et sans les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles structurées et non structurées produites grâce à des géométries complexes avec une facilité relative. Les mailles supportées en 2D sont de types triangulaires ou quadrilatéraux. Elles sont tétraédriques/hexaédriques/pyramidales en 3D ou des mailles (hybrides) mélangées. Le code "Fluent" est écrit en langage C et utilise pleinement la flexibilité et la puissance offertes par ce langage (allocation de la mémoire dynamique). En plus, il utilise une architecture qui lui permet de s'exécuter en tant que plusieurs processus simultanés sur le même poste de travail ou sur des postes séparés, pour une exécution plus efficace.

"Fluent" s'utilise à travers une interface graphique très simple. L'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu afin d'automatiser certaines procédures. Ainsi, il a la capacité de modéliser :

- ❖ Les écoulements 2D ou 3D.
- ❖ Etats permanents ou transitoires.
- ❖ Ecoulements incompressibles ou compressibles incluant toute vitesse de régimes.
- ❖ Ecoulements non visqueux, visqueux, laminaires ou turbulents.
- ❖ Les écoulements dans les milieux poreux.

Ce code de calcul utilise la méthode des volumes finis. La discrétisation des équations intégrales qui gouvernent l'écoulement, tels que l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation d'énergie associées à d'autres scalaires dépendants de la nature de l'écoulement, est faite en se basant sur la technique du volume de contrôle. Elle consiste à :

- ❖ La division du domaine en des volumes de contrôle discrets en utilisant un maillage de cellules.
- ❖ L'intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels afin de d'établir les équations algébriques pour les variables dépendantes discrètes (les inconnues), telles que les vitesses, les pressions, les températures et les scalaires conservés.
- ❖ La linéarisation des équations discrétisées et solution du système d'équations linéaires résultant pour pouvoir adapter les valeurs des variables dépendantes.

II.4.2.1 Choix du schéma de discrétisation

Le code Fluent nous permet de choisir le schéma de discrétisation pour les termes convectifs de chaque équation gouvernante (le second ordre est automatiquement le plus utilisé pour les termes visqueux). Pour nos simulations, le schéma second ordre upwind a été choisi.

II.4.2.2 Initialisation

Avant de commencer les simulations, nous devons implémenter une estimation initiale de la solution du champ d'écoulement. Le choix adéquat des conditions initiales permet d'atteindre une solution stable et une convergence accélérée

II.4.2.3 Méthode de la solution

Les problèmes des écoulements permanents sont souvent résolus par un processus pseudo temporel ou un schéma itératif équivalent puisque les équations sont non linéaires. Un schéma itératif est utilisé pour les résoudre (Ferziger et Peric, (2002)).

Ces méthodes utilisent une linéarisation successive des équations et les systèmes linéaires résultants sont généralement résolus par des techniques itératives. La méthode suivie pour atteindre la solution doit avoir certaines propriétés qui sont brièvement résumées dans ce qui suit :

II.4.2.3.1 La consistance

La discrétisation doit être exacte quand Δx_i (incrémentaire dans l'espace) tend vers zéro, l'erreur de troncature est la différence entre l'équation discrétisée et la solution exacte. Pour qu'une méthode soit consistante, l'erreur de troncature doit tendre vers zéro quand le Δx_i tend vers

II.4.2.3.2 La stabilité

La méthode ou le schéma de discrétisation est stable quand il n'amplifie pas les erreurs au cours du processus de la solution numérique.

II.4.2.3.3 la convergence

Pour les problèmes non linéaires qui sont fortement influencés par les conditions aux limites, la convergence et la stabilité sont généralement atteints et contrôlés en utilisant de l'expérimentation numérique.

II.4.2.3.4 La conservation

Puisque les équations à résoudre obéissent aux lois de conservation, le schéma numérique doit être aussi. Ceci veut dire que les quantités conservées qui quittent un volume fermé doivent être égales aux quantités entrantes dans le cas stationnaire. Cette propriété est très importante puisqu'elle impose une contrainte sur l'erreur de la solution.

II.4.2.3.5 Exactitude

Les solutions numériques des problèmes d'écoulement de fluide et du transfert de chaleur sont des solutions approximatives. En plus aux erreurs qui peuvent être introduites au cours du développement de la solution de l'algorithme, en programmant ou en introduisant les conditions aux limites, il ya inclusion de trois types d'erreurs systématiques :

- ❖ Erreurs dues à la modélisation qui sont définies comme étant la différence entre l'écoulement actuel et la solution exacte du modèle mathématique.
- ❖ Erreurs dues à la discrétisation et définis comme étant la différence exacte entre la solution exacte des équations de conservation et la solution exacte du système d'équations algébriques obtenues par discrétisation de ces dernières.
- ❖ Erreurs dues à l'itération définies comme étant la différence entre les solutions itératives et exactes du système d'équations algébriques

Les fonctions disponibles pour la procédure numérique sont :

File : pour les opérations concernant les fichiers : lecture, sauvegarde et importation.

Grid : pour la vérification et la manipulation du maillage et de la géométrie.

Define : pour définir les phénomènes physiques, les matériaux et les conditions aux limites

Solve : pour choisir les équations à résoudre, les schémas de discrétisation, les facteurs de sous relaxation, les critères de convergence et pour initialiser et procéder au calcul

Adapt : pour l'adaptation du maillage selon plusieurs paramètres

Surface : pour créer des points des lignes et des plans nécessaires à l'affichage des résultats.

Display et plot : pour l'exploitation des résultats.

Report : pour afficher des rapports contenant les détails du problème traité.

Help : pour l'exploitation du contenu du code.

II.4.3 Procédures de simulation

II.4.3.1 Interface du code Fluent et lecture du fichier mesh

File > Read > Case

Il faut d'abord importer le fichier (*.msh) généré avec Gambit avant d'aborder la simulation.

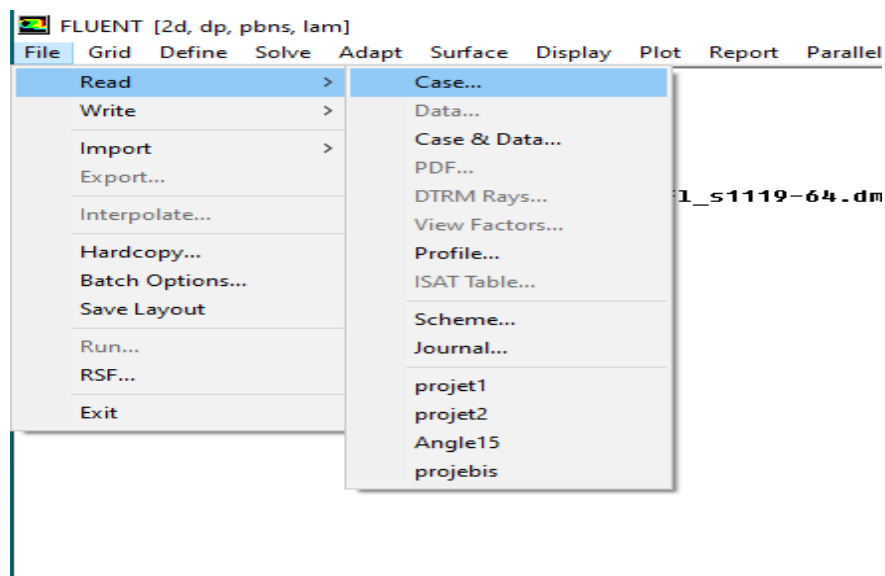


Figure II.11 : Importation de la géométrie

II.4.3.2 Vérification du maillage

Grid > Check

On doit dans cette étape vérifier le maillage s'il ne comporte pas des erreurs ou des volumes négatifs.

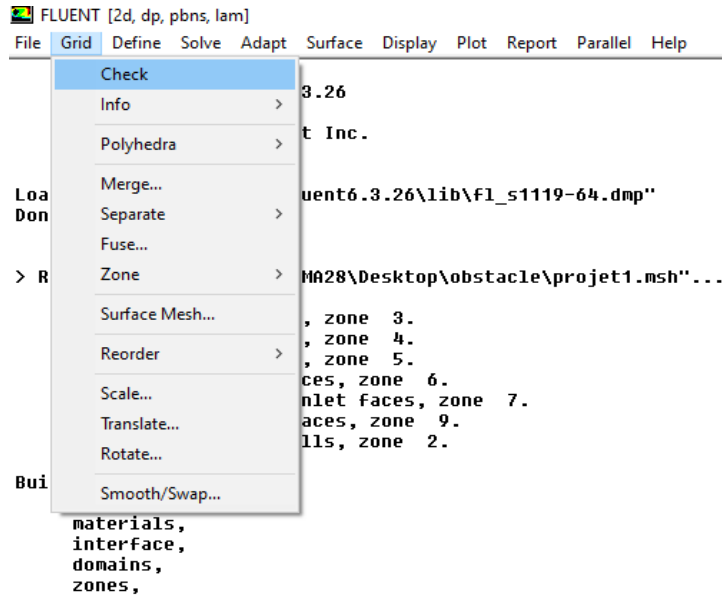


Figure II.12 : Vérification du maillage

II.4.3.3 Lissage du maillage

Grid > Smooth/Swap

Pour être assuré de la qualité du maillage. On doit le lisser, nous cliquons sur le bouton « Smooth » ensuite sur le bouton « Swap ». L'opération sera répétée jusqu'à ce que Fluent déclare nous que zéro face sont « swapped »

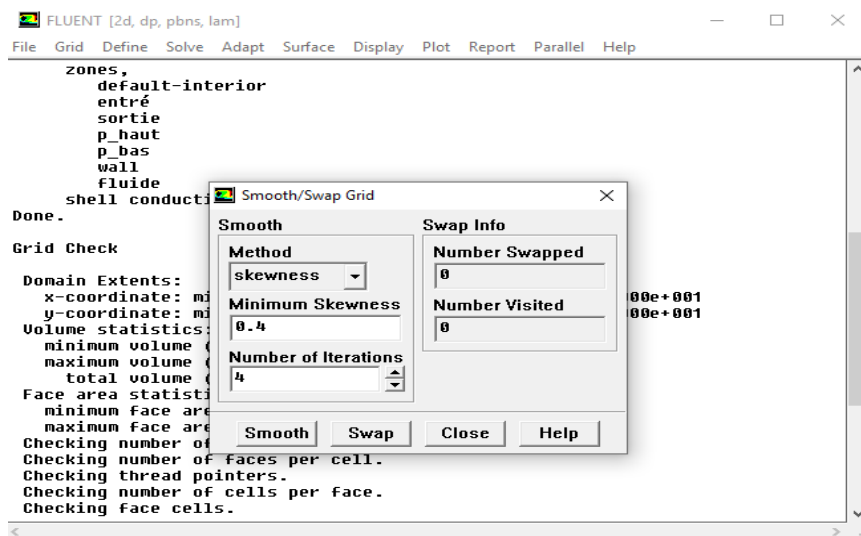


Figure II.13 : Lissage de maillage

II.4.3.4 Vérification des dimensions et des unités

Grid > Scale

Dans cette étape, il faut être sûr que les dimensions et les unités du domaine de calcul sont identiques aux celles appliqués dans le maillage.

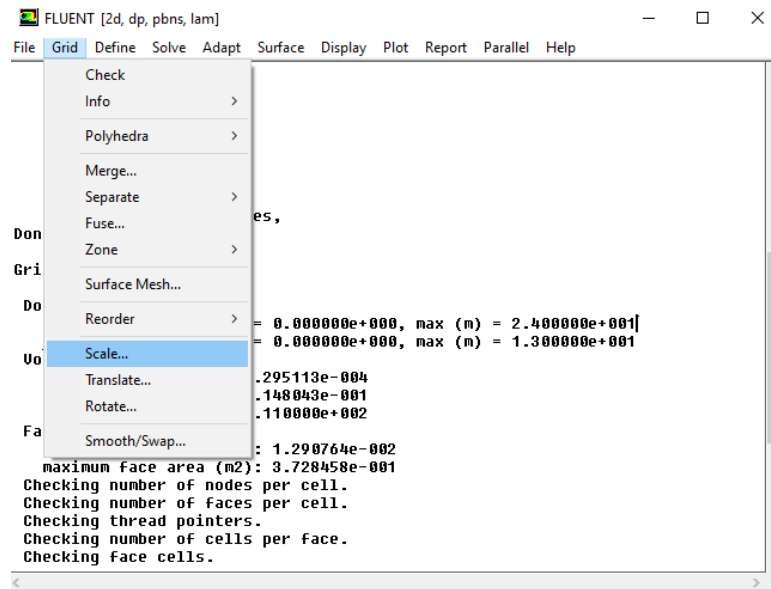


Figure II.14 : Vérification des dimensions et des unités

II.4.3.5 Affichage de la grille

Display > Grid

Cette option sert à afficher le maillage, et cela permis nous de vérifier les conditions aux limites prédéfinies sur Gambit.

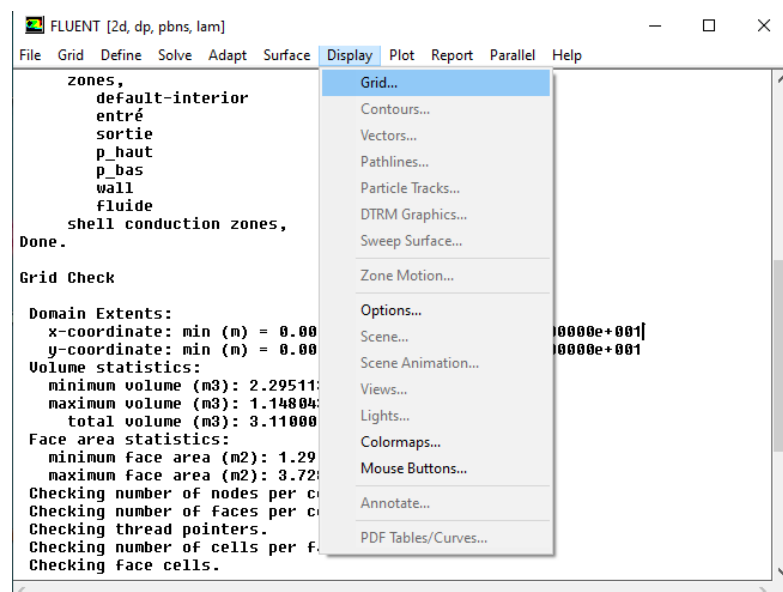


Figure II.15 : Affichage de la grille

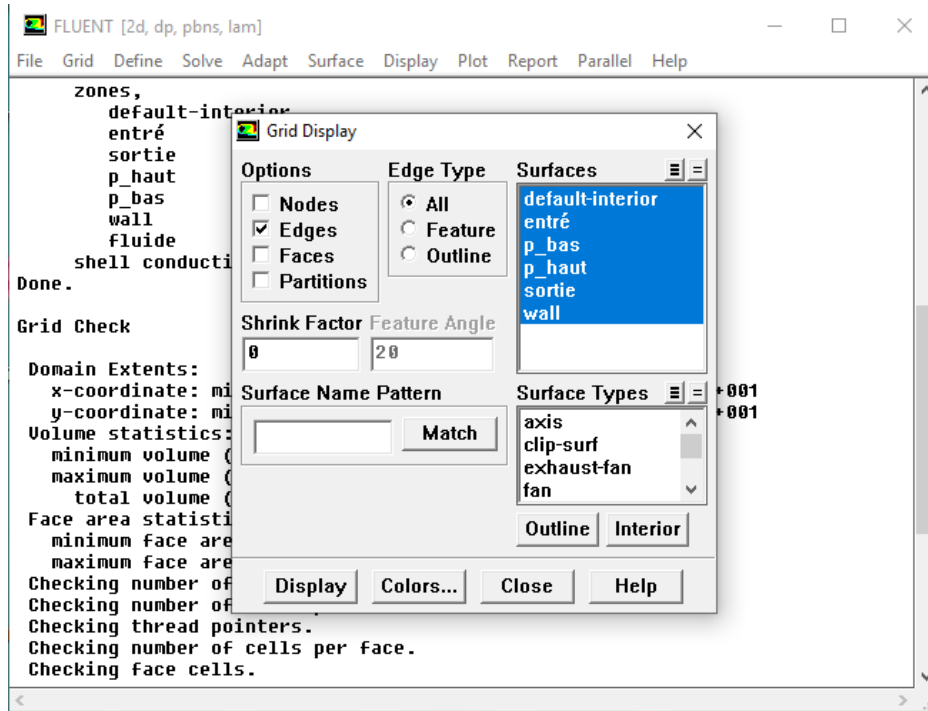


Figure II.16 : Affichage des conditions aux limites

II.4.3.6 Choix du solveur et l'état de l'écoulement

Define > Models > Solver

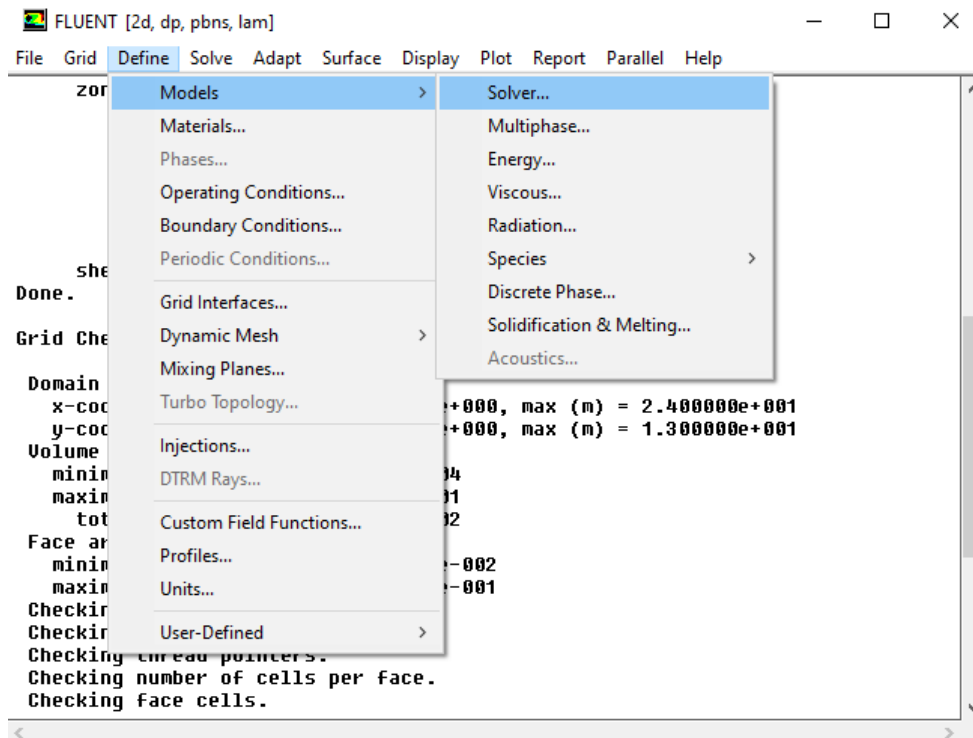


Figure II.17 : Choix du solveur

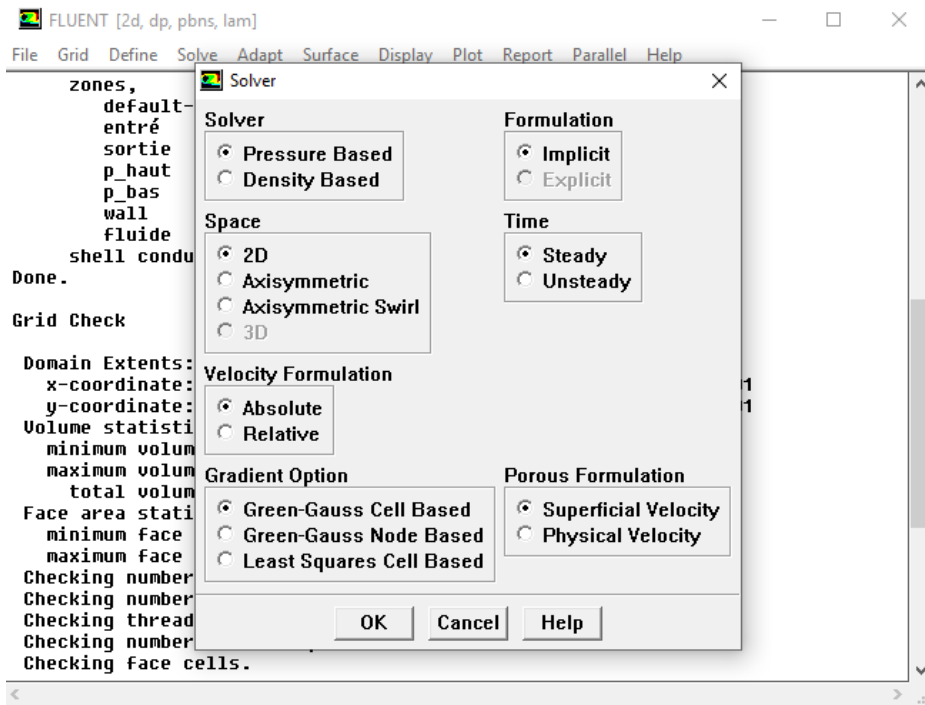


Figure II.18 : Interface du Choix du solveur

Steady : l'écoulement est stationnaire

II.4.3.7 Choix du modèle de l'écoulement

Define > Models > Viscous

Dans cette étape, on doit utiliser le modèle de laminaire qui intervient avec l'état de l'écoulement.

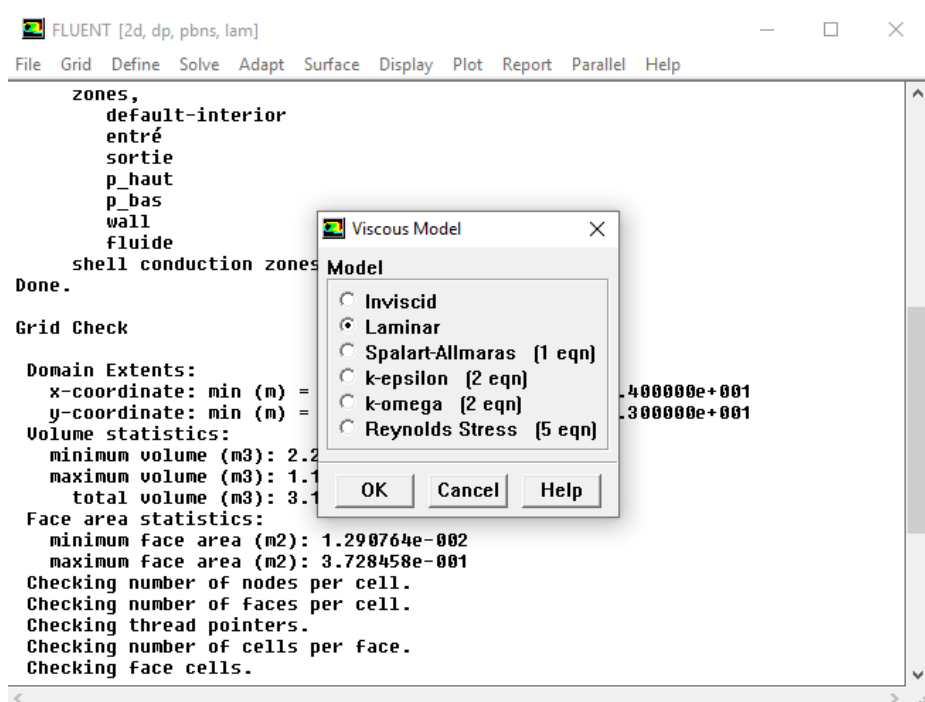


Figure II.19 : Interface du modèle de turbulence

II.4.3.8 Définition des caractéristiques du fluide

Define > Materials

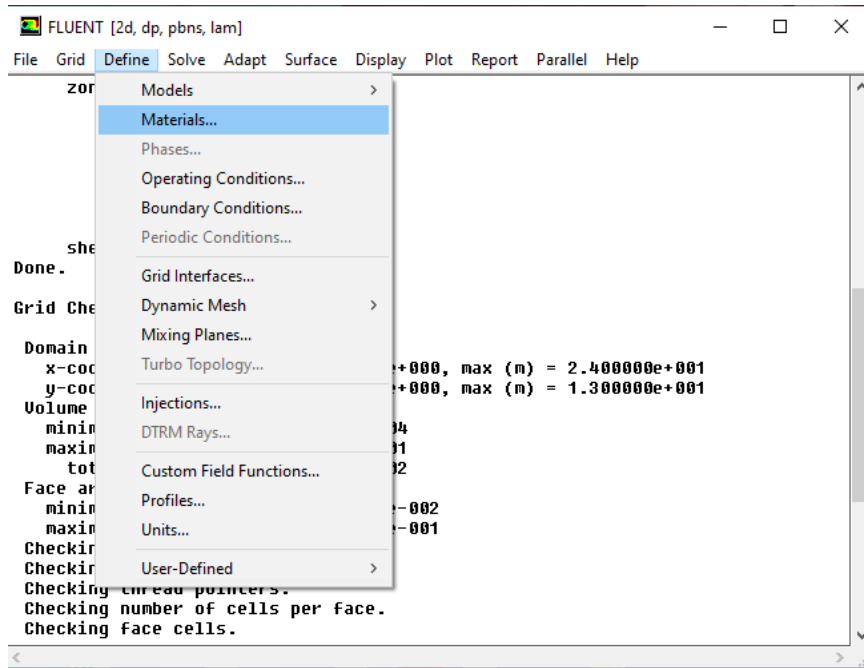


Figure II.20 : Définition des caractéristiques du fluide

On doit utiliser « Fluent Data base » qui nous aide à chercher et sélectionner les caractéristiques du fluide concernée.

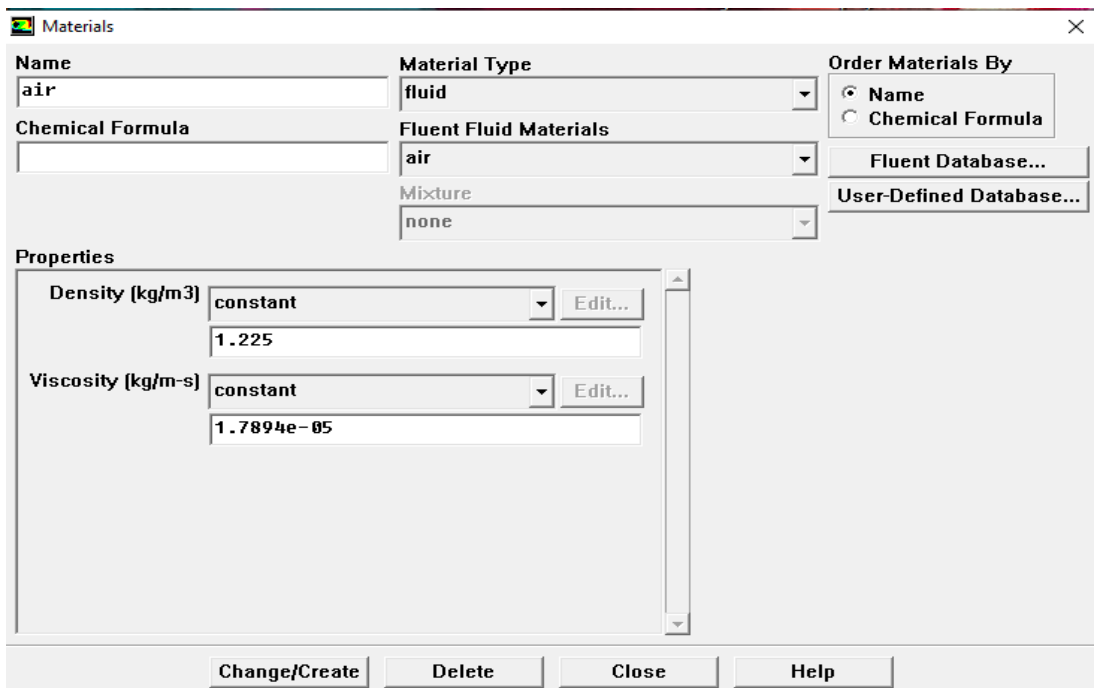


Figure II.21 : Interface de la liste des fluides

II.4.3.9 Pression de référence

Define > operating > conditions

Il faut choisir la valeur de la pression de référence. Fluent laisse par défaut la valeur de la pression atmosphérique (101325pa)

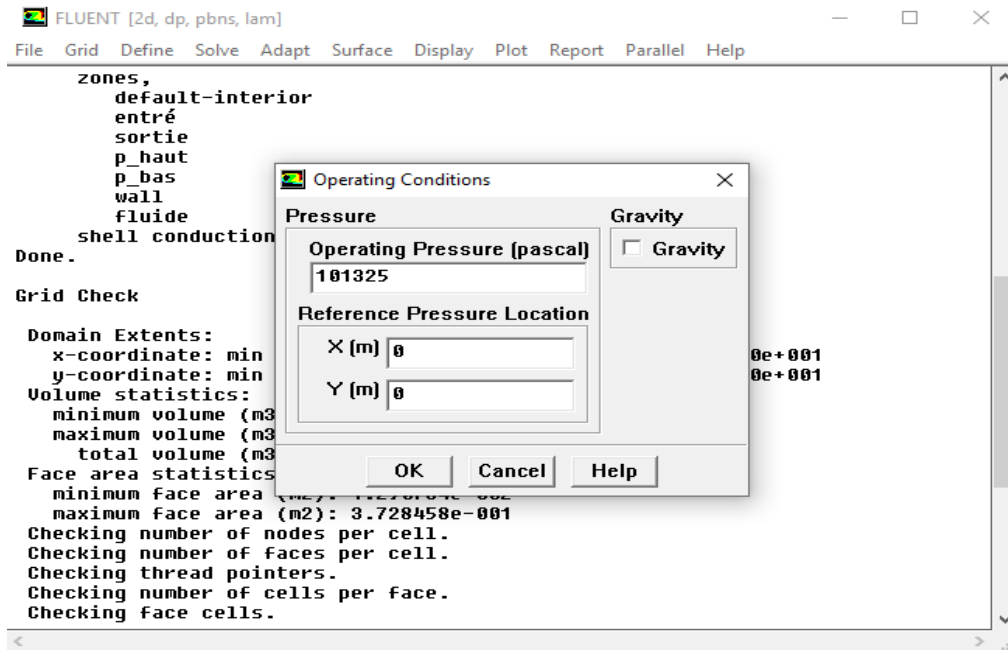


Figure II.22 : Pression de référence

II.4.3.10 Conditions aux limites

Define > Boundary Conditions

Dans cette étape, on doit introduire les valeurs des conditions aux limites.

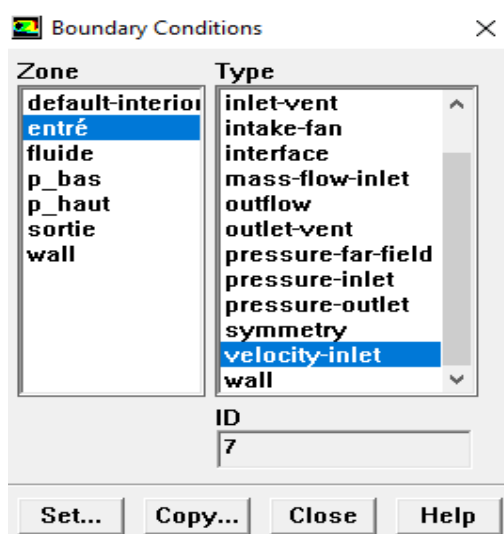


Figure II.23 : La vitesse d'entrée (condition aux limites)

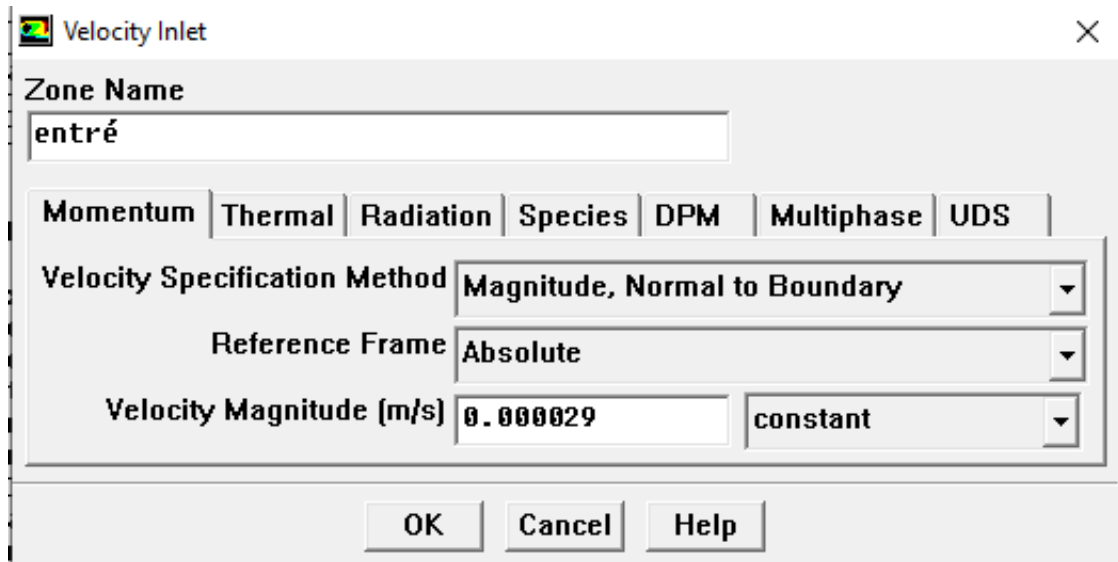


Figure II.24 : Interface de la vitesse d'entrée

II.4.3.11 Choix d'ordre des équations et couplage vitesse-pression

Solve > Controls > Solution

Cette étape nous permis d'identifier le degré d'ordre des équations à résoudre, ainsi que l'algorithme utilisé pour le couplage vitesse pression.

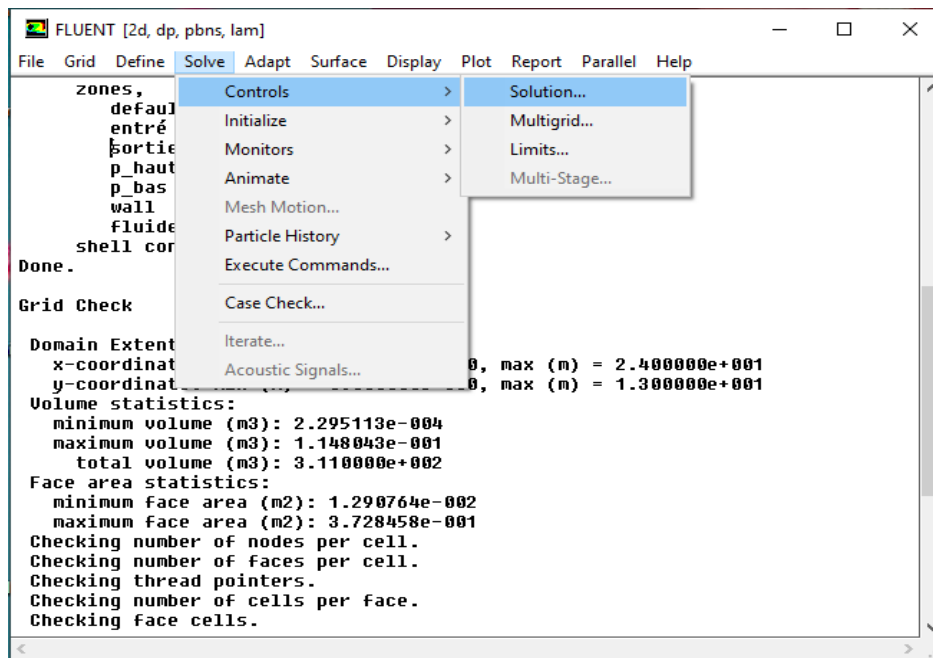


Figure II.25 : Choix d'ordre d'équations

Le schéma « Second Order Upwind » est utilisé pour la discrétisation des équations. Et pour le couplage vitesse-pression, l’algorithme « Simple » est employé.

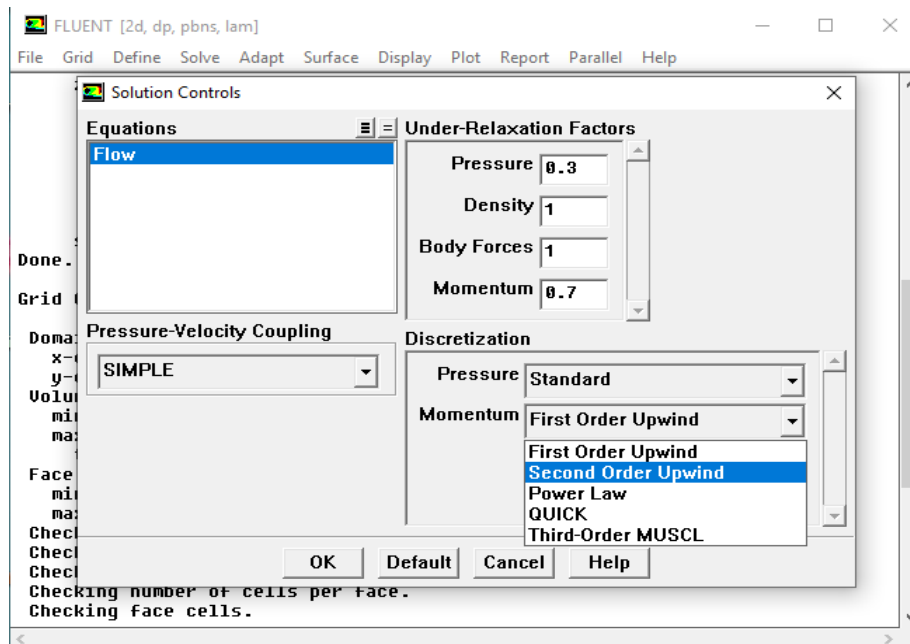


Figure II.26 : Interface du choix d’ordre d’équations

II.4.3.12 Initialisation du calcul

Pour commencer le calcul, il faut d’abord donner des valeurs initiales.

Solve > Initialise > Initialise

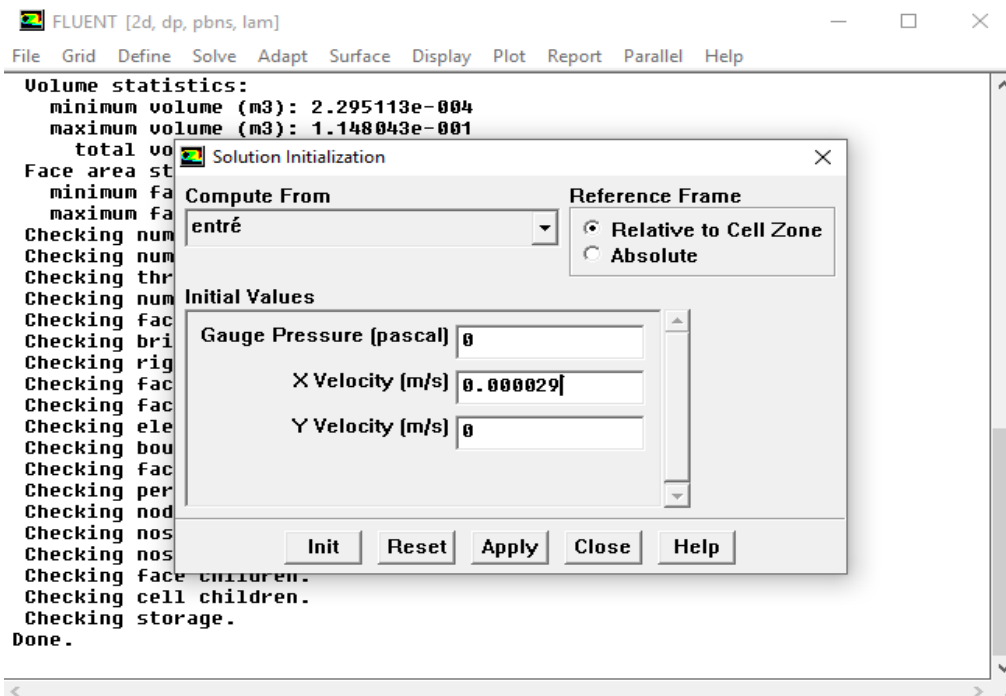


Figure II.27 : Initialisation de calcul

II.4.3.13 Choix des critères de convergences

Solve > Monitors > Résiduel

Il s'agit de choisir les critères de convergence qui doivent être vérifiés pour que les calculs seront stoppés.

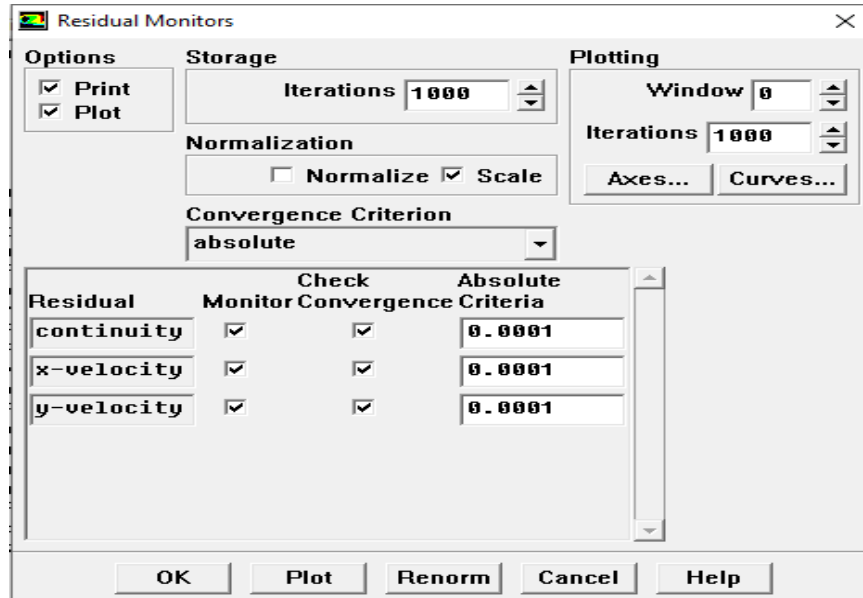


Figure II.28 : Interface des critères de convergence

II.4.3.14 Lancement du calcul

Solve > Iterate

Pour commencer le calcul, on doit limiter le nombre d'itérations.

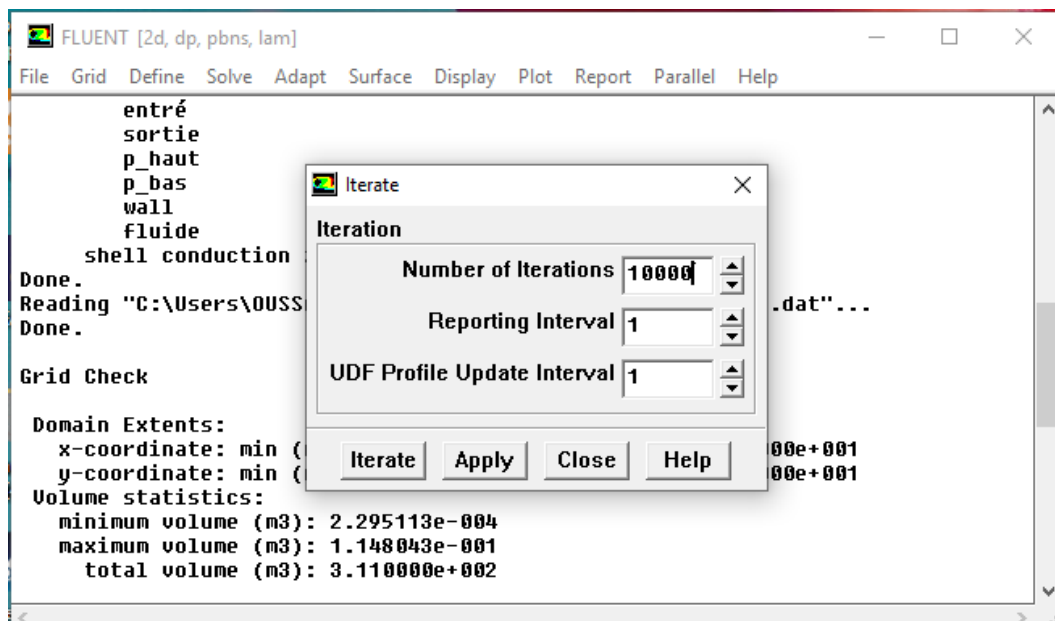


Figure II.29 : lancement du calcul

II.4.3.15 Allures de convergence des résidus

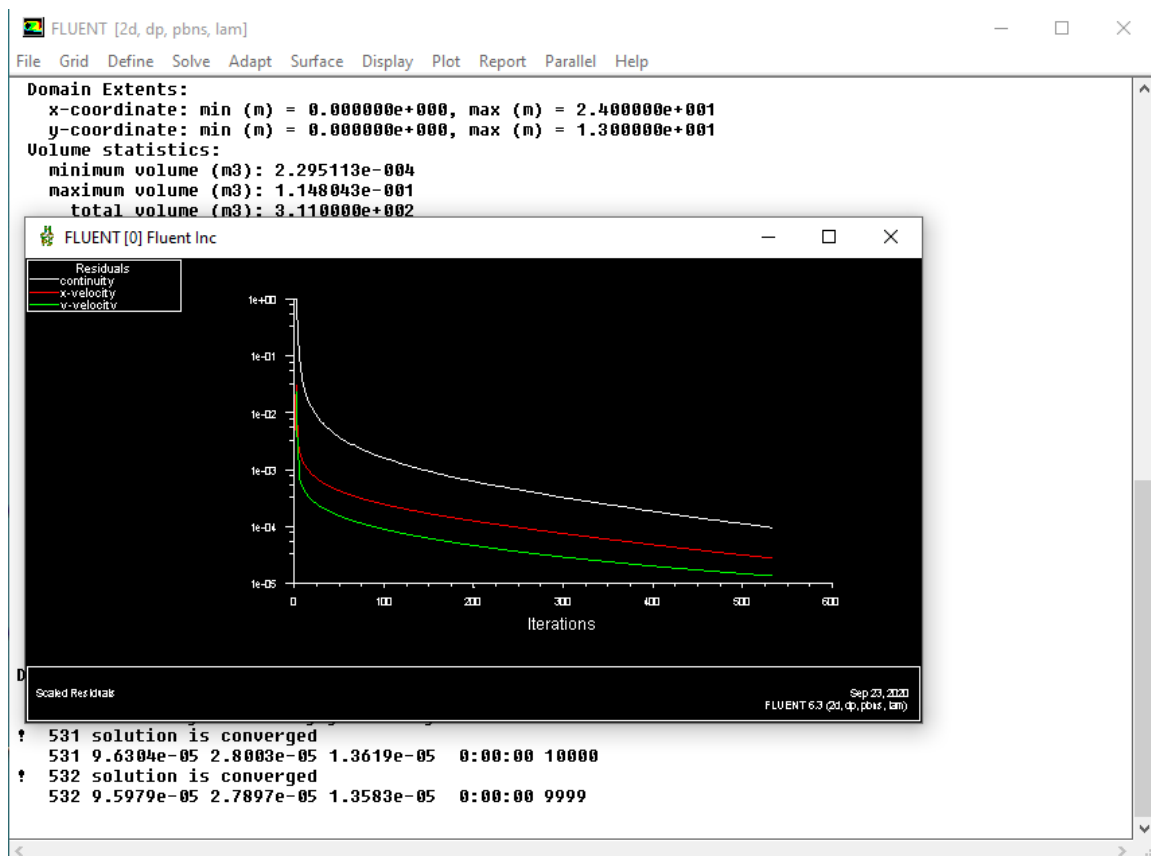


Figure II.30 : Convergences des résidus

II.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les équations régissant ce problème ainsi que les conditions aux limites appliquées aux différentes parois.

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier résultats de simulation numérique.

Chapitre III

Résultats et discussions

III.1 Introduction

Dans ce dernier chapitre, on va présenter les résultats de simulation cotés dynamique c'est-à-dire le comportement de l'écoulement en amont et on aval de l'obstacle. Le fluide utilisé dans notre étude c'est l'air en écoulement laminaire et stationnaire. On a choisi quatre types d'angle d'inclinaison $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ et 45° de l'obstacle pour avoir le meilleur angle d'inclinaison d'une part et d'autre part le changement remarquable de la structure de l'écoulement derrière l'obstacle. Notre étude est basée sur un nombre de Reynolds varie entre $2 \leq Re \leq 40$.

III.2 Domaine d'étude et conditions aux limites

Pour le domaine d'étude nous avons pris la même géométrie et les mêmes dimensions utilisées par Pellerin et Nore [32]. La figure III.1 résume les différentes conditions aux limites imposées aux domaines de calcul.

On considère l'écoulement d'air incompressible dans un domaine bidimensionnel en présence d'un obstacle carrée, la vitesse de l'air est $U = 1\text{m/s}$. Le nombre de Prandtl est fixe $Pr = 0.71$.

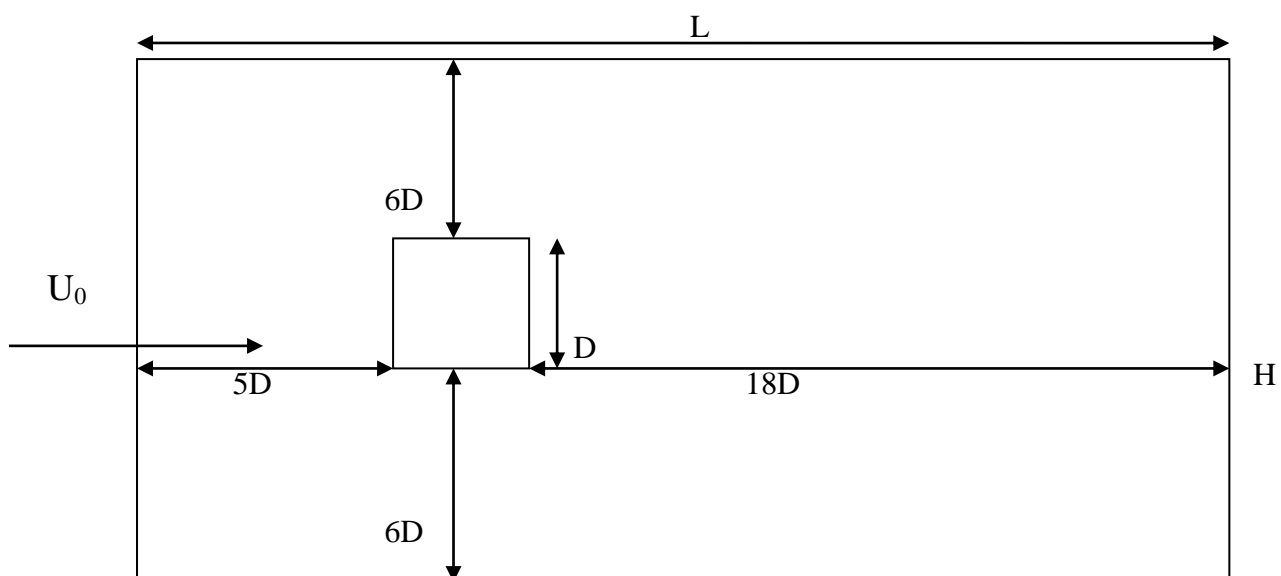


Figure III.1 : Domaine d'étude et conditions aux limites

III.3. Validation

La première étape consiste à valider notre simulation numérique (notre modèle sous FLUENT 6.3.26) en comparant nos résultats avec ceux de la littérature. A cet effet on a choisi le travail publié par Pellerin et Nore [32]. Pour la même configuration et les mêmes conditions soit une inclinaison de zéro degré et deux nombres de Reynolds $Re = 20$ et 40 , on compare les lignes de courant et l'iso-vorticité (respectivement figure III.2 et figure (III.3)) ou on distingue une zone de recirculation située en aval de l'obstacle carré.

Les figures montrent la progression et l'évolution de la zone de vorticité ou l'écoulement reste symétrique et la recirculation se forme dans le sillage et que la taille des structures tourbillonnaires grandies relativement avec la variation du nombre de Reynolds Re .

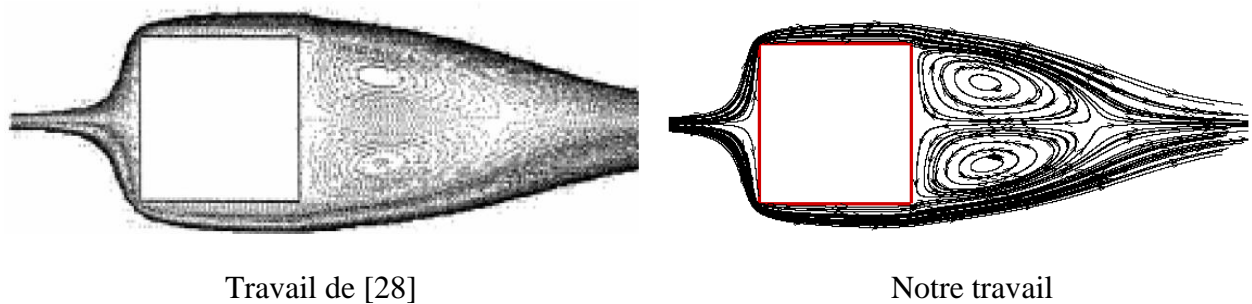


Figure III.2 : Lignes de courant à $Re = 20$

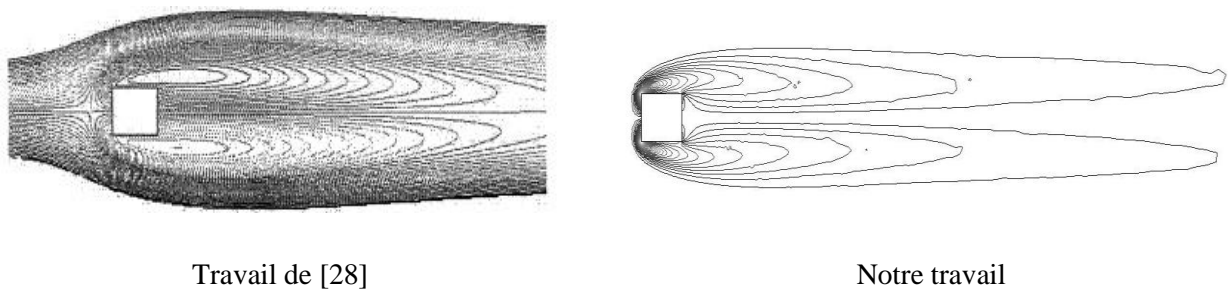


Figure III.3 : Lignes d'iso-vorticité à $Re = 40$

III.4 Maillage du domaine

Nous avons utilisé le maillage quadratique qui est un maillage structuré composés d'éléments hexagonaux qui forment des lignes continues à travers le domaine, qui suivent mieux le contour des surfaces définissant la géométrie.

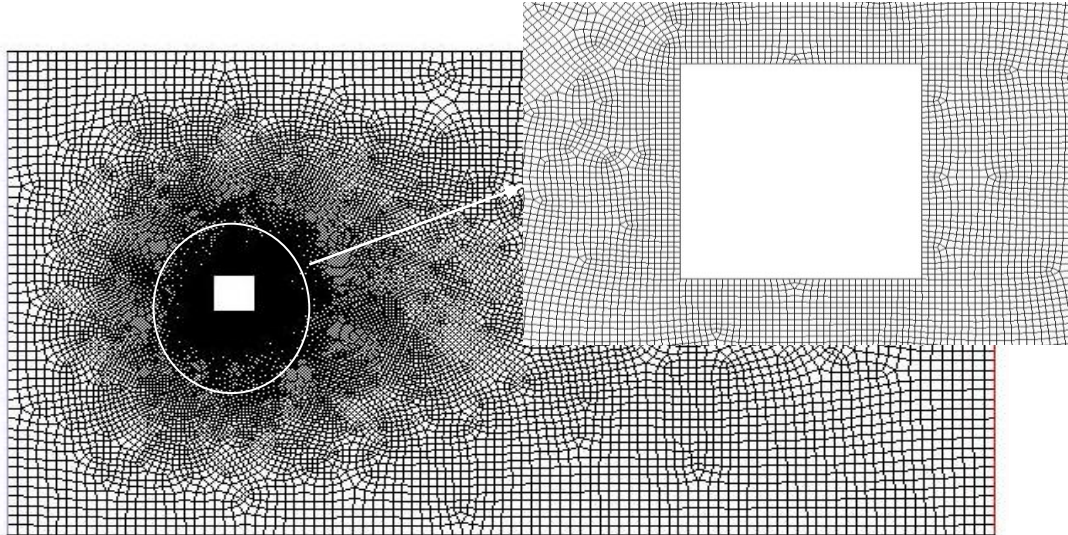


Figure III.4 : Maillage utilisé

III.5 Critère de convergence

La figure III.5 montre la courbe de résidus, tracée en fonction du nombre d'itérations, durant la phase de simulation avec un critère de convergence double précision, Dans notre cas, la valeur de 10^{-4} a été prise.

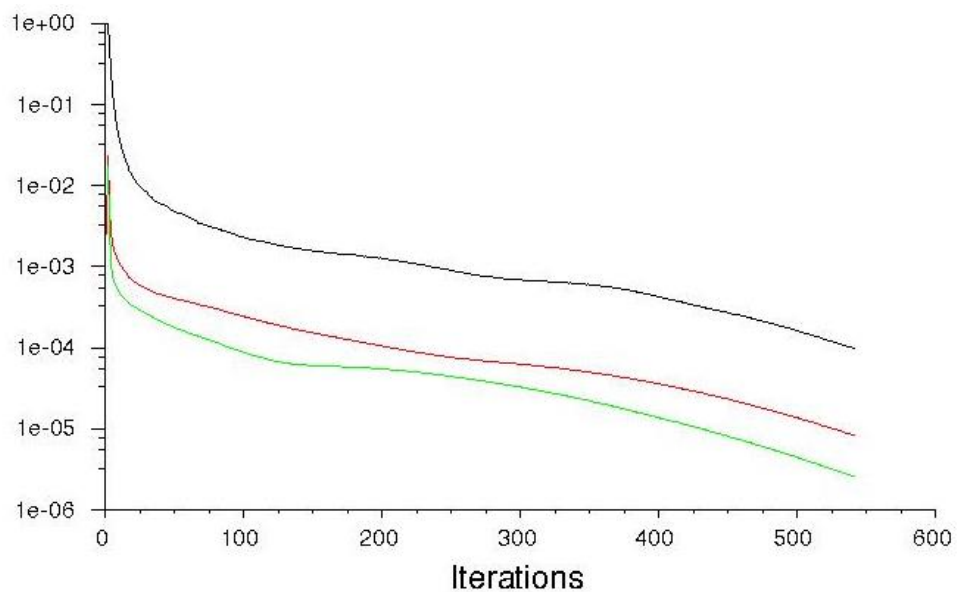


Figure III.5 : Courbe de convergence

III.6 Les lignes de courants

La figure **III.6** représente les lignes de courant correspondant aux nombres de Reynolds : 2, 20, et 40 pour des valeurs d'angle d'inclinaison $\theta=15^\circ$, $\theta=30^\circ$ et $\theta=45^\circ$ tout en fixant la valeur de Prandtl $Pr = 0.71$.

Pour un nombre de Reynolds inférieur à cinq ($Re \leq 5$), l'écoulement est dit rampant. Les forces visqueuses sont grandes (dominantes) l'écoulement reste attaché à la paroi (pas de décollement de la couche limite). L'écoulement est symétrique en amont et en aval de l'obstacle.

Pour un nombre de Reynolds situé dans l'intervalle $5 \leq Re \leq 48$, la force d'inertie accroît, le décollement de la couche limite apparaît en entraînant une dépression derrière l'obstacle donnant naissance à une zone de recirculation de forme de lobe d'oreille dans le sillage. L'écoulement reste stable et symétrique par rapport au centre du domaine. Au fur et à mesure que le nombre de Reynolds augmente le sillage et la zone de recirculation grandie, on remarque que :

- ❖ Si Re et l'angle augmente, les lignes de courant s'étendent au-delà de l'obstacle puis forme une zone de recirculation.
- ❖ Les lignes de courants dans l'angle ($\theta=0^\circ$ et $\theta=45^\circ$) ont la même distribution. Alors que nous remarquons que dans l'angle ($\theta=15^\circ$ et $\theta=30^\circ$) il existe une différence de la répartition de sorte que la répartition des lignes de courants dans la partie inférieure est plus que à la partie supérieure de l'obstacle.

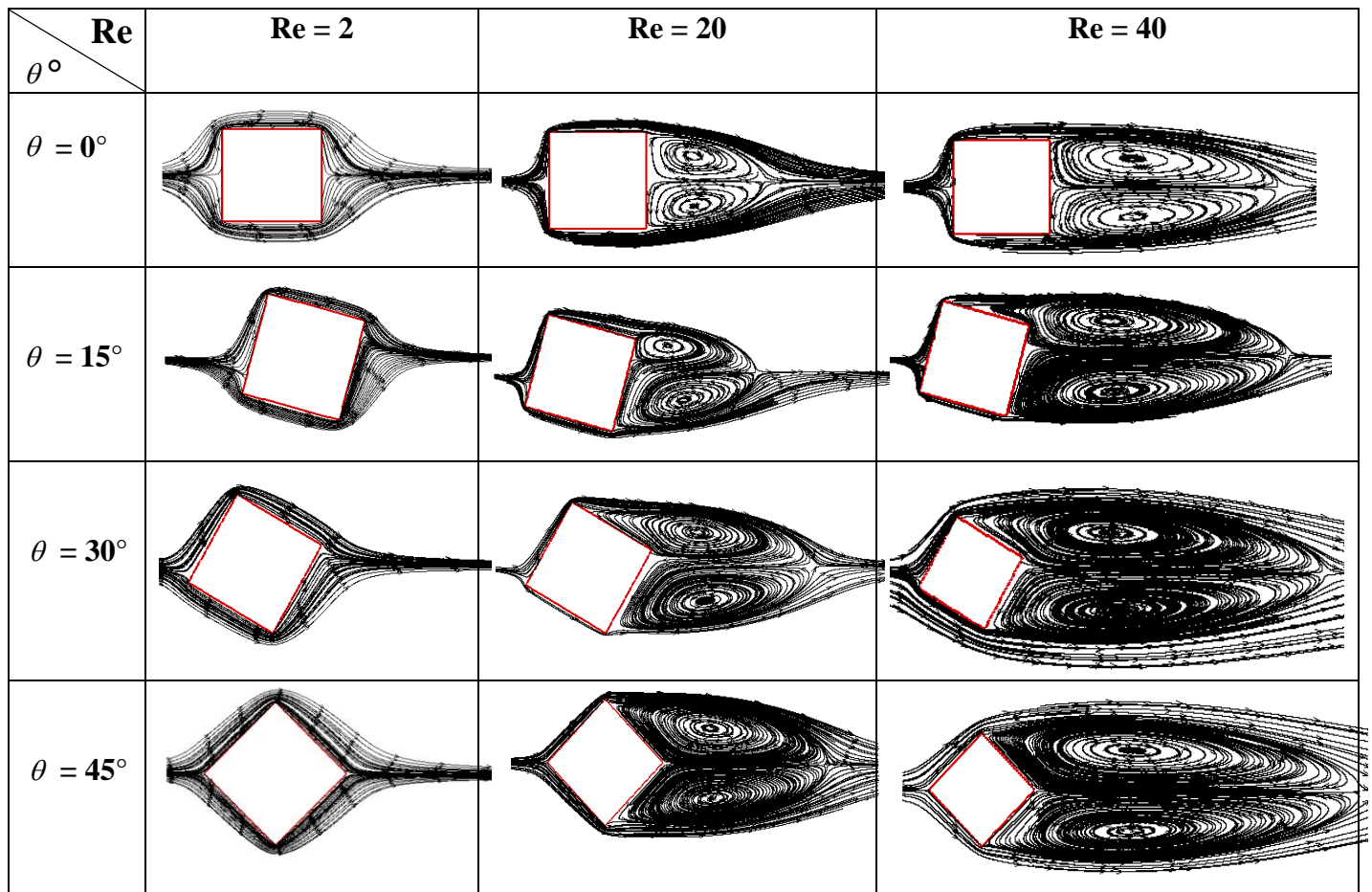


Figure III.6 : Représentation des lignes des courants

III.7. Les zones de recirculation

La figure III.4 représente la longueur de la zone de recirculation en fonction du nombre de Reynolds Re et la variation de l'angle d'inclinaison θ on remarque que lorsque l'angle d'inclinaison et le nombre de Reynolds augment la zone de recirculation augment progressivement.

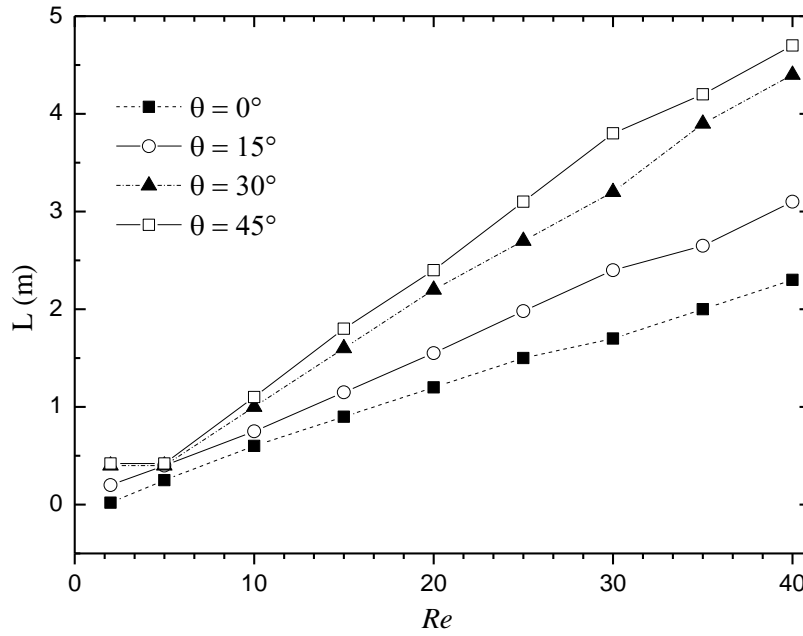


Figure III.7 : la longueur de la zone de recirculation pour chaque angle en fonction de Re

III.8. Coefficient de trainé (Drag coefficient)

La figure III.8 représente la variation du coefficient de trainé C_D en fonction du nombre de Reynolds Re et la variation de l'angle de position de l'obstacle dans lequel l'évolution et l'allure des graphes sont pratiquement de la même forme. On note que, si l'angle θ et Re augment le coefficient de trainé augment.

Les courbes nous montrent que la position optimale par-rapport à la force de trainée qui une force nuisible origine d'un cisaillement important est la position $\theta = 0^\circ$. Le coefficient de trainée atteint une valeur maximale à $C_D = 5.8922 \cdot 10^{-7}$, et une valeur minimale à $C_D = 3.6798 \cdot 10^{-8}$.

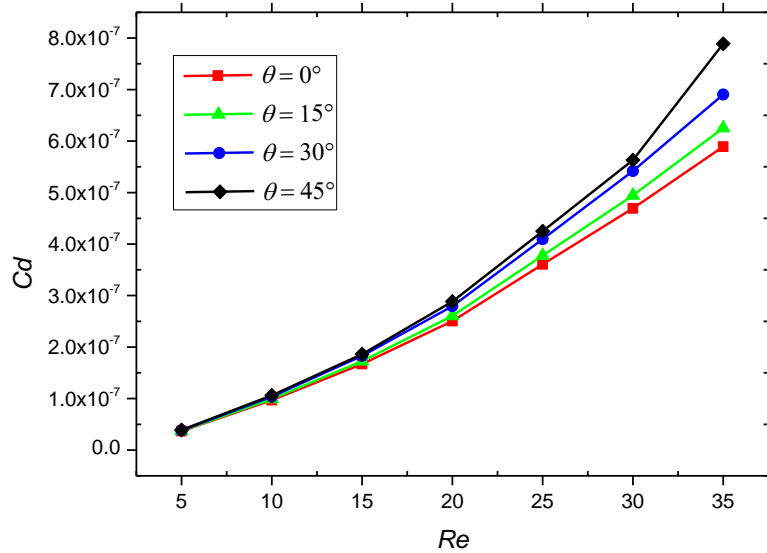


Figure III.8 : coefficient de trainée pour chaque angle d'inclinaison en fonction de Re

III.9. Coefficients de pression

La figure donne l'aspect des courbes du coefficient de pression à un nombre de Reynolds $Re = 20$ pour différents angles d'inclinaison. On remarque que l'inclinaison $\theta = 0^\circ$ donne un coefficient de pression C_p le plus favorable générant une zone de recirculation la plus faible. La réduction du C_p crée un gradient inverse en aval de la cavité, en produisant un écoulement inversé donnant naissance à une recirculation.

Le coefficient de pression est maximal au point $C_p = -0.04695$ et chute à une valeur minimale jusqu'au point d'arrêt (point de stagnation) $C_p = -3.52421$, puis reprend son augmentation pour devenir après constante à $C_p = -2.50125$.

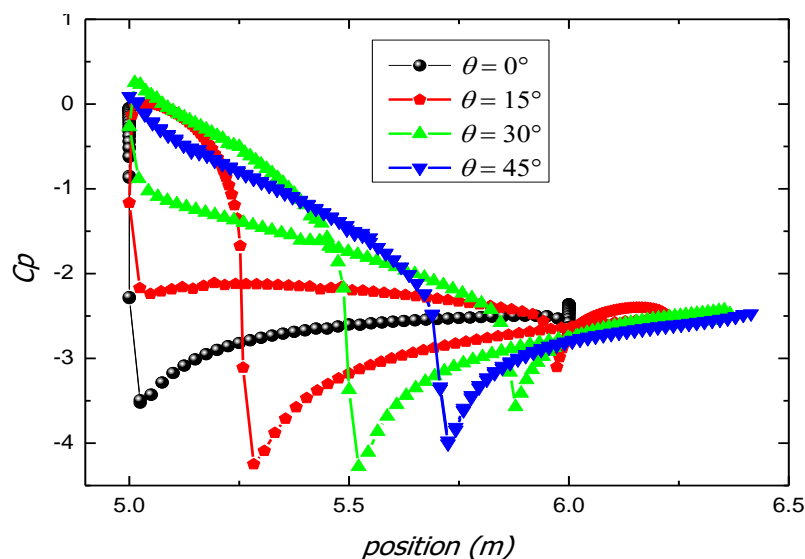


Figure III.9 : Coefficient de pression pour chaque angle d'inclinaison

Sur les figures **III.10**, les contours du coefficient de pression sont mis en évidence à un nombre de Reynolds $Re = 20$. On remarque que le point de stagnation change de position en fonction que l'angle augmente.

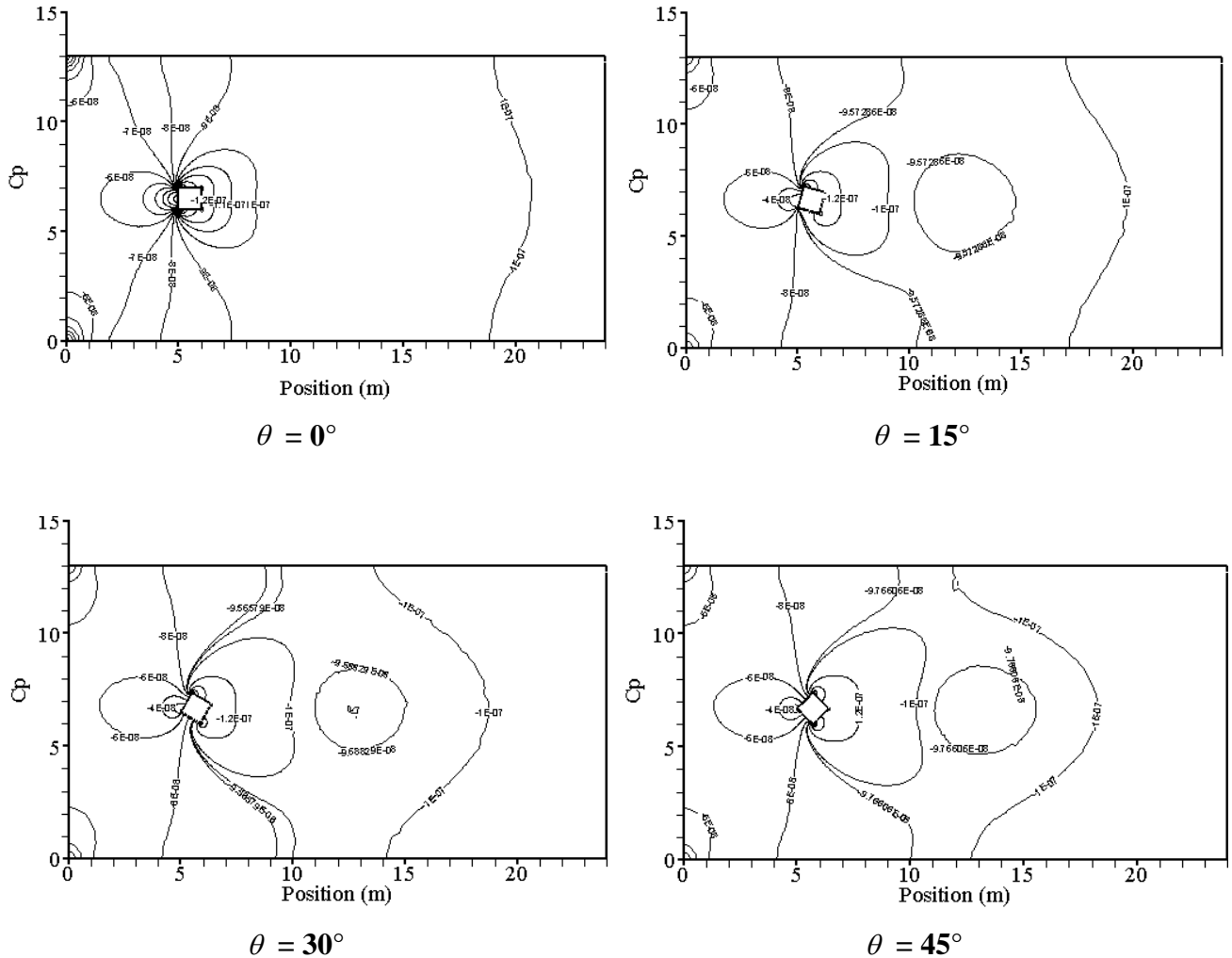
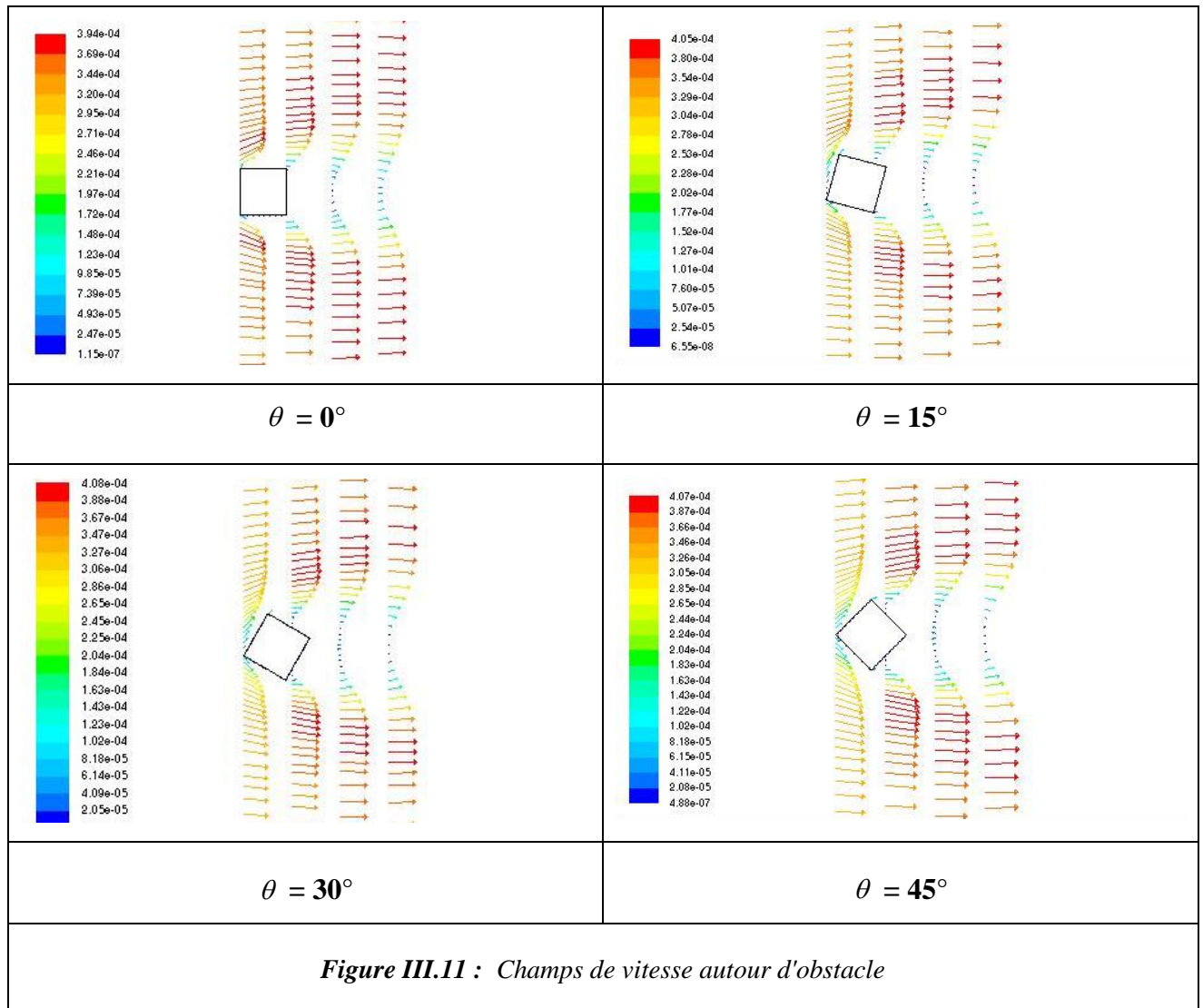


Figure III.10 : coefficient de pression pour chaque angle d'inclinaison

III.10. Champs de vitesse autour d'obstacle

Les figures **III-11** exposent le champ de vitesse suivant l'axe x, autour de l'obstacle carrée pour chaque inclinaison et zone où s'effectue la recirculation. A l'entrée, la vitesse est uniforme égale à U_∞ , comme condition initiale. On distingue une accélération de la vitesse entre, Selon le nombre de Reynolds et de l'inclinaison de l'obstacle, l'écoulement montre le point de décollement de la couche limite et la zone de sillage



III.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons, tout d'abord, présenté le modèle géométrique en deux dimensions que nous avons construit à l'aide du logiciel "GAMBIT" dans sa version 2.2.30, Nous avons, ensuite, présenté le type de maillage généré, et nous avons identifié et défini les types de conditions aux limites appropriées.

Finalement nous avons visualisé les résultats de simulation. Ces résultats ont été validés en respectant les critères de validation du processus CFD. Les simulations ont été, généralement, effectuées en régime laminaire et stationnaire.

Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire est une étude numérique de l'influence de l'angle d'inclinaison d'un écoulement autour d'un obstacle carré. Le fluide utilisé comme écoulement est l'air. La modélisation mathématique de ce problème physique est basée sur les équations de conservation de la quantité de mouvement. Des hypothèses simplificatrices ont été introduites et justifiées. Le système d'équations simplifié résultant est résolu numériquement par la méthode des volumes finis. Le couplage vitesse-pression est traité par l'algorithme SIMPLE.

La simulation numérique a été faite avec le code Fluent dans sa version 6.3. La validation dynamique de cette simulation a montré une bonne concordance entre nos résultats et ceux de [32].

Les principaux résultats tirés de ce travail peuvent être résumés comme suit :

- ❖ Pour un nombre de Reynolds inférieur à cinq ($Re \leq 5$), l'écoulement est dit rampant. Les forces visqueuses sont grandes (dominantes) l'écoulement reste attaché à la paroi (pas de décollement de la couche limite). L'écoulement est symétrique en amont et en aval de l'obstacle, et si $5 \leq Re \leq 48$, la force d'inertie accroît, le décollement de la couche limite apparaît en entraînant une dépression derrière l'obstacle donnant naissance à une zone de recirculation de forme de lobe d'oreille dans le sillage.
- ❖ La longueur de la zone de recirculation augmente progressivement lorsque le nombre de Reynolds et l'angle d'inclinaison θ augmente.
- ❖ L'angle $\theta = 0^\circ$ donne un coefficient de pression C_p le plus favorable générant une zone de recirculation la plus faible. La réduction du C_p crée un gradient inverse en aval de la cavité, en produisant un écoulement inversé donnant naissance à une recirculation.

Perspectives

Dans ce travail, le processus itératif CFD nous a permis de prendre et de mieux comprendre en compte les paramètres adéquats pour dresser un modèle satisfaisant dans le but d'utilisations futures.

Dans un travail futur, l'étude de ce type de problème en 3D et en régime instationnaire ou turbulent, par exemple. Cette dernière constituera une perspective intéressante afin de mieux prendre en compte le caractère tourbillonnaire et instationnaire du sillage en aval de l'obstacle.

Bibliographie

[1]	Samir khene , <i>mécanique des fluides</i> publications de l'université de Baji Mokhtar, Annaba, 2000 .
[2]	Batchelor , Introduction to Fluid Dynamics. Cambridge University Press 1970
[3]	Y.H. Madani, M.Abidat . <i>Etude numérique de l'écoulement d'un fluide visqueux Incompressible autour de corps profilés par une méthode combinée d'ordre 0(h2) et 0(h4). Séminaire international de Génie Mécanique. 28 & 29 AVRIL 2002</i>
[4]	Dr YUCEFI Sarra <i>mécanique des fluides</i> cours et applications Année Universitaire 2016-2017
[5]	https://lesfluides8sciences.weebly.com/les-proprieacuteteacutes-des-fluides.html . Site web consulté le 10 aout 2020
[6]	https://ridha.users.lmno.cnrs.fr/pdf/HOutDynFluidM1-4.pdf . Site web consulté le 10 aout 2020
[7]	ION Paraschivoiu , <i>Aérodynamique subsonique</i> Editions de l'école polytechnique de Montréal (Québec), canada, 1998 .
[8]	DANIEL Cauvin , <i>Aérodynamique, mécanique de vol</i> , université aéronautique Jean Mermoz, France, 1990
[9]	B. E. Lee . <i>The éjecte of turbulence on the surface pressure old of a square prism. J. Fluid Méché.</i> , 69 :263{282, 1975
[10]	Khabbouchi, M.S. Guellouz . <i>Ecoulement autour d'un cylindre circulaire proche d'une paroi, Effet de l'écoulement type jet</i> . Laboratoire d'Etude des Systèmes Thermiques et Energétiques Ecole Nationale d'Ingénieurs Monastir, Tunisie. 2008
[11]	Benjamin Renaud , <i>Instabilité de Bénard –Von Karman derrière obstacle oscillant</i> . Rapport de stage expérimental, Laboratoire de Physique et de Mécanique des Milieux Hétérogènes, Paris, 2000
[12]	M. Cheng, D.S. Whyte, J. Lou <i>Numerical simulation of flow around a square cylinder in uniform-shear flow</i> Journal of Fluids and Structures 23 207–226 2007

[13]	R. Belakroum, M. Khadja, H. Zibouche. <i>Simulation numérique du phénomène d'éclatement tourbillonnaire dans la zone de sillage d'un obstacle de section circulaire.</i> International Conférence on Energetics and pollution Constantine .2007.
[14]	http://ressources.univlemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/divers/ecoulami.html . Site web consulte septembre 2020
[15]	D.Calluud, L.David, S. Rouvreau, P. Joulain. <i>étude expérimentale et numérique d'un écoulement autour d'obstacle carre et cylindrique Présenté pour obtenir le diplôme de magistère</i> 2009/2010
[16]	BEDJEGHIT EL-HOUAS. <i>Etude expérimentale et numérique d'un écoulement autour d'obstacle carre et cylindrique.</i> Cour L'année universitaire 2009/2010
[17]	MarcinHuptas, Witold Elsner. Steady and unsteady simulation of flow structure of two surface-mounted square obstacle Taskquarterly 12 N 3,197-207
[18]	M.Breuer , J.Bernsdorf , T.Zeiser, F.Durst. <i>Accurate computations of the laminar Flowpast a square cylinderbased on twodifferentmethods: Lattice-Boltzmann and finite-volume.</i> International Journal of Heat and Fluid Flow 21 ,2000
[19]	JirapornYojina, WaipotNgamsaad, NarinNuttavut, DarapondTriampo, Yongwimon Lenbury, PaisonKanthang, SomchaiSriyab, wannapongTriampo. <i>Investigating flow patterns in a channel with comlex obstacles using the lattice Boltsmann method.</i> Journal of Mechanical Science and Technology 24/10/2010
[20]	Gera.B, PavanK.Sharma, Singh R.K. <i>CFD analysis of 2D unsteady flow around a square cylinder.</i> Intrenanational Journal of Applied Engineering Research, DINDIGUL, Volume , 2010.
[21]	Hafida DaaouNedjari, Mohamed Saighi. <i>Etude numérique des effets d'obstacles sur le profil du vent</i> Revue des énergies renouvelable SMEE'10 Bou Ismail –Tipaza 2010
[22]	R. Belakroum, M. Khadja, H. Zibouche. <i>Simulation numérique du phénomène d'éclatement tourbillonnaire dans la zone de sillage d'un obstacle de section circulaire.</i> International Conférence on Energétiques and pollution Constantine .2007
[23]	KORIB Kamel. <i>Etude des écoulements autour des obstacles étude de simulation</i> Mémoire de magistère, Université Abou Bekr Belaid-Tlemcen
[24]	Trad.Nabila. <i>Simulation numérique d'un écoulement transsonique autour d'une aube d'une turbine à gaz axiale.</i> Soutenue le: 26 / 09 /2017
[25]	ANSYS,Inc ANSYS Fluent. User's Guide Novembre 2013

[26]	D. Lakehal, W.Rodi. <i>Calculation of the flow past a surface-mounted cube with two-layer turbulence models</i> . journal of wind engineering and industrial aerodynamics 1997 .
[27]	MEKROUSSI Saïd. <i>Simulation du transfert convectif dans une couche limite turbulente en présence d'obstacle décollé de la paroi</i> Mémoire de magister, Université Ibn Khaldoun-Tiaret, 2007 .
[28]	Pellerin et Nore <i>Ecoulement autour d'un obstacle a section carrée</i> université Paris-Sud

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة الظواهر الهيدروديناميكية التي تنشأ عند اصطدام تدفق هوائي بحاجز ثابت على شكل مربع ، كما تتضمن إظهار تأثير زاوية ميلان هذا الحاجز على التدفق .
ولقد أجريت محاكاة رقمية بواسطة برنامج "FLUENT" للمعالجة الرقمية لحركة الموائع الذي يعتمد على طريقة الحجم التامة، و خلصت الدراسة إلى أن التغير في الزاوية له أهمية كبيرة على شكل التدفق .
كما قمنا بمقارنة النتائج المتحصل عليها (الجانب الديناميكي) بنتائج تجارب عملية أجريت من طرف ، بليرين و نور و حصلنا على نتائج جيدة .
الكلمات المفتاحية: التدفق الصفحي ، عقبة مربعة ، حجم محدود

Résumé :

L'objectif de ce mémoire est d'étudier le phénomène hydrodynamique d'un écoulement d'air autour d'un obstacle carré, ainsi que l'effet de l'angle d'inclinaison sur la structure de l'écoulement.

Une simulation numérique est effectuée dans le but de tester l'efficacité du code de calcul industriel "FLUENT" qui est basé sur la méthode des volumes finis, et L'étude a conclu que le changement d'angle est d'une grande importance sur la forme de l'écoulement.

Nous avons également comparé les résultats obtenus (coté dynamique) avec les résultats des expériences menées par Blairin et Nor, et nous avons obtenu des bon résultats.

Mots clés : écoulement laminaire, obstacle carré, volume finis.

Abstract:

The objective of this dissertation is to study the hydrodynamic phenomenon of an air flow around a square obstacle, as well as the effect of the angle of inclination on the structure of the flow.

A numerical simulation is carried out for the purpose of testing the efficiency of the industrial calculation code "FLUENT" which is based on the finite volume method, and the study concluded that the change of angle is of great importance for the shape of the flow.

We also compared the results obtained (dynamic side) with the results of the experiments carried out by Blairin and Nor, and we obtained good results.

Keywords: laminar flow, square obstacle, finite volume.