République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique
Spécialité Génie Mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Option : Energétique et thermiques des systèmes

THÈME

Etude de l'écoulement de l'air autour d'un obstacle. Effet de la forme du toit

Proposé et dirigé par :

Dr. ALLICHE Mounir

Co- Encadré par :

Dr. REBEHI Ridha

Présenté par :

BELLATRECHE Rabah

HOSNI Sidali

2016/2017

Remerciements

Tout d’abord, on tient à remercier en premier lieu notre DIEU Miséricordieux qui nous a donné la volonté, la force et la patience à achever ce travail.

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance et remercîments à notre promoteur **Dr ALLICHE Mounir**, qu’il a fait preuve d’une grande patience et a été un grand apport pour la réalisation de ce travail. Ses conseils, ses orientations ainsi que son soutien moral et scientifique m’ont permet de mener à terme de se projet.

On tient à remercier particulièrement **Dr REBEHI Ridha**, notre Co-encadreur pour ses conseils, son assistance, son suivi et son soutient.

Nous tenons à remercier aussi touts nos enseignants qui nous ont guidé tout au long de notre formation.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin, à la réalisation dece travail.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes parents qui ont tout sacrifié pour moi,

c'est grâce à eux que je suis la, et je serai très loin,

Vous restrez toujours dans mon cœur.

A mes frères :Mohamed , Fateh, Hamidet mes sœurs.

Pour leurs encouragements, soutien moral, et leur compréhension,

A mes chères amis Houssam, Sidali, Ahmed, Marouane, Amine, Nasro,

Youcef.

Je leur souhaite tout le bonheur du monde.

A toute personne de ma grande famille.

Rabah

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes chers parents qui m'ont tout poussé et motivé dans mes études.

C'est grâce à eux que je suis la, et je serai très loin,

Vous restrez toujours dans mon cœur.

A mes frères Boualem , Mohamed, Mourad, Saidetmes sœurs.

Aussimes chères amies: Rabah, Houssam, Marouane, Ahmed,

Je leur souhaite tout le bonheur du monde.

A toute personne de ma grande famille.

A tous ceux et celles qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

SID ALI



Sommaire

Remerciement……I

Dédicaces.....II

Résume.....II

Sommaire.....III

Liste des figures……..……..…… IV

Liste des tables……..……..…V

Nomenclature.....VI

Introduction ……1

CHAPITREI : RERCHRCHE BIBLIOGRAPHIQUE

RERCHRCHE BIBLIOGRAPHIQUE……..……11

CHAPITRE II : MODÉLISATION DE LA TURBULENCE ATMOSPHÉRIQUE

II.1 Introduction……13

II.2 Modélisation de la turbulence……14

II.2.1 Modèles à une équation : modèle Spalart-Allmaras (AS)…….……20

II.2.2Modèles à deux équations……...21

II.2.2.1 Modèle k-ε standard…….……..….22

II.2.2.2 Modèle k-ε réalisable……..…..…….…..…23

II.2.2.3 Modèle RNG k-ε……...……..……24

II.2.2.4 Modèle k-ω standard…….…...……..……25

II.2.2.5 Modèle SST k-ω :(Shear Stress Transport) ……..…….……26

II.3 Traitement de la paroi……...…….……..28

CHAPITRE III: ETUDE NUMERIQUE DE L'ECOULEMENT

III.1 Etapes d'utilisation le meilleur ICEM……..……..……34

III.1.1 Ouverture du programme, emplacement disque de travail et sauvegarde…….…….…….34

III.1.1.2 : Choix de l'emplacement de travail……...…….…….……...36

III.1.1.3 : création un Géométrie……...……...……36

III.1.1.4 : création des point……..…….…….…37

III.1.1.5 La nomination des point « Show Point Names» ……..……...…38

III.1.1.6 création de lignes……..…...……..….…39

III.1.1.7 créé le blocs……...……...……41

III.1.1.8 créer des sous blocs ……...…42

III.1.1.9 Effacer un blocs……..….43

III.1.1.10 Associe les lignes au courbes……..……..…..…44

III.1.1.11 généré le maillage……...…45

III.1.1.12 sauvegarder le projet……..……..……..…46

III.1.2 importe le maillage vers le solver CFX…….……..……..47

III.1.2.1 FCX-Post …….……...…48

III.1.2.2 la configuration…….……...…49

III.1.2.3 CFX-Solver (la solution) …….…58

III.1.2.3.1. La solution……..…….……..…58

III.1.2.4 CFX-Pos (lest résultat) ……...……58

CHAPITRE IV : PROBLEME PHYSIQUE

IV.1 Introduction …….……61

IV.2 configuration étudiée…….……..…..…61

IV.2.1 configuration géométrique……..…..…..61

IV.3 Sensibilité au maillage…….....64

IV.3.1 le maillage……..……..……64

IV.3.2 effet de maillage ICEM…….…….…….……..…..……64

IV.3.3 les graphes de Y plus …….…….……65

IV.3.4 Effet de maillage……..…66

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONE

V.1 Introduction…….....71

V.2 V.2 interprétation des résultats : …….75

Conclusion générale……...……..87

Référence Bibliographiques

Liste des figure

Figure désignation

Figure II-1 : Représentation schématique de la couche limite atmosphérique……..……14

Figure II-2 : La cascade d'énergie de turbulence……...……14

Figure II-3 **:** Modélisation de la couche limite……...…..……29

Figure II-4 **:** Subdivisions de la région près de la paroi……...……..30

Figure III-1 : Fenêtre d'accueil d'ICEM CFD…….....……35

Figure III-2 : Zone de visualisation / travail……...……...……35

Figure III-3 : Axe x, y, z……...…….……....…36

Figure III-4 : Save projet as…….…..……36

Figure III-5 : onglet de travail…….…….……..…37

Figure III-6 : boite de dialogue pour la création de point…….……..…37

Figure III-7 : visualisation point…….…...……38

Figure III-8 : la nomination des points……..……39

Figure III-10 : boite de dialogue……..…...…...…40

Figure III-11 : création des lignes…….…..…..…40

Figure III-12 : création des lignes final…….……..…....41

Figure III-13: SIDEBAR……..….41

Figure III-14: block initial……...……..…...…42

Figure III-15 : créer SPLIT BLOCK……...…….…….....…42

Figure III-16 : 10 sous block…….…..……..43

Figure III-17 : supprimer un bloc…….…..……..44

Figure III-18 : Blocking Associations……..……44

Figure III-19 : Paramètres des lignes **«** Edge **»** ……..…..…45

***Figure III-20* :** Select solver……..……46

***Figure III-21* :** save current projet first……...…..……47

***Figure III-22* :** CFX Option……..….……47

Figure III-23 : CFX……...…….……..…….48

Figure III- 24 : Import maillage au CFX…….……..……49

Figure III- 25: Edit Mesh……..……49

Figure III- 26: Flood select…….....50

Figure III- 27: basic setting…….....51

Figure III- 28: Fluid Models…….....51

Figure III- 29: User Function.……..…..…....52

Figure III- 30: details of unite……..…….....52

Figure III- 31 : Détails Expressions……...……53

Figure III- 32 : création les variables……53

Figure III- 33: Insert boundary……..……..….....54

Figure III-34: boundary Detaits Inlet……....…55

Figure III-35: Insert bounary.……..…..….....55

Figure III-36: boundary Detaits OUTLET.……...…...…56

Figure III-37: boundary Detaits OUTLET.……...…57

Figure III-38 : Solver control. ……..…….....…...57

Figure III-39 : Solution……...…….....58

Figure III-40 : position des lignes. ……..…….……59

Figure III 41 **:** contour de vitesse……..……..59

Figure IV-1 **:** géométrie…….....61

FigureIV-2 **:** Les autres formes géométriques de toit……62

Figure IV- 3 **:** géométrie du problème et condition aux limite……..62

Figure IV- 4 **:** les trois maillages réalisés……...64

Figure IV- 5 **:** influence du maillage sur le profil de Y plus…….….65

Figure IV- 6 **:** position de la ligne qui est créer. ……..….66

Figure IV- 7 **:** Evaluation du profil TKE par rapport aux données des résulte expérimentale

la section y/H=0.0…….....**.....**68

Figure IV- 8 **:** L'évaluation de composantes de vitesse horizontales par rapport

Aux données expérimentale à la section y/H = 0.0.……67

Figure IV- 9 **:** Evaluation des composants de la vitesse verticale par rapport aux Données

expérimentale à la section y/H = 0.0 ……..…68

Figure IV- 10 **:** le maillage moyenne de déférent forme étudié…….69

Figure V.1 : Courbe de convergence pour le maillage raffiné avec modèle de turbulence

k-ε…...……74

Figure V.2 : Effet du maillage……..…… .75

Figure V.3 : Profils de vitesse, u……77

Figure V.4 : Profils de vitesse, v ……...……78

Figure V.5 : Profils de l'énergie cinétique…….……79

Figure V.6 : Profils de l'énergie de dissipation, ε …….……80

Figure V.7 : Profils de pression, P ……81

Figure V.8 : Comparaison des contours de pression dans le plan de symétrie y/H = 0 pour les différents toits…….....…….....84

Figure V.9 : Comparaison des contours de vitesse dans le plan de symétrie y/H = 0 pour

Les différents toits…….....…….....…….....84

Figure V.10 **:** Comparaison des contours de l'énergie cinétique dans le plan

De symétrie y/H = 0 pour les différents toits…….....…….....…….....85

Figure V.11: Comparaison des lignes de courant dans le plan de symétrie y/H = 0

pour les différents toits…….....…….....……86

Liste des tableaux

Tableau 2.1. Les constantes de modèle Spalart-Allmaras SA…….....…….21

Tableau 2.2. Échelle de la vitesse et l'échelle de longueur pour les modèles k-ε et k-ω……...……22

Tableau 2.3 Les constantes du modèle k-ε standard…….. 23

Tableau 2.4 Les constantes du modèle k-ε réalisable……..…..24

Tableau 2.5 Valeurs des constantes du modèle RNG k-ε……...…25

Tableau 2.6 Valeurs des constantes du modèle k-ω……..……..…26

Tableau 2.7. Valeurs des constantes du modèle SST k-ω……..…27

Tableau III-1 : représente les points et les coordonnées……..……...…38

Tableau IV.1 : positions des1^{er} nœud et le nombre des cellules pour les trois maillages ……..65

Tableaux V.1 : positions des lignes…….....73

Tableaux V.2 : les point de circulation est séparation……77

Nomenclature :

Notation	Signification	Unité
Notations latines		
U	Vitesse selon X	$m\ s^{-1}$
V	Vitesse selon Y	$m\ s^{-1}$
W	Vitesse selon Z	$m\ s^{-1}$
$B_1\ B_2$	constantes d'intégration	
K	Cinétique énergie	m^2S^{-2}
U	la vitesse moyenne de fluide	$m\ s^{-1}$
ε	Dissipation énergie	m^2s^{-3}
$C_\mu C_{1\varepsilon}\ C_{2\varepsilon}\ C_{3\varepsilon}$	Constantes du modèle k-ε	
C_w, C_{w2}, C_{w3}, C_{b1}, C_{b2}	Constantes de modèle SA	
C_1	coefficient de terme source d'impulsion proportionnelle à vitesse	s^{-1}
C_2	coefficient de terme source d'impulsion proportionnelle à Le carré de la vitesse	m^{-1}
P	pression	Pa
Γ	Coefficient de diffusion	
τ	Tenseur de contraintes	
s	Distance	m
Re	Nombre de Reynolds	
Y_P	Distance du point p à la paroi	m
h	Hauteur du canal	m
H	Coté du cube	m
s	Module du tensor du taux de déformation, équation(2.45)	s^{-1}
g	Gravité	$m\ s^{-2}$
u^+, y^+	coordonnées de paroi	
f_{v1} f_{v2}, f_w	Paramètres du modèle SA	
Z_0	La longueur de la rugosité	m

δ	Épaisseur De la couche limite	m
u_*	vitesse de frottement à la paroi	m s^{-1}
Notations grecques		
G_K G_b	Terme de production de l'énergie cinétique Turbulent	Kg $m^{-1}s^{-3}$
G_v	terme de production du modèle SA	kg m^{-1} s^{-2}
σ_k , σ_ε	Constant Nombres de Prandtl turbulents	
k	Constante de Von Karman (~0,42)	
Ω_{ij}	Tenseur de taux de rotation	
μ	Viscosité dynamique	Kg $m^{-1}s^{-1}$
μ_t	Viscosité dynamique turbulente	Kg $m^{-1}s^{-1}$
ν_t	Viscosité cinématique turbulente	m^2 s^{-1}
Φ	Variable générique, latitude	
ρ	Masse volumique	Kg m^{-3}
β_T	coefficient d'expansion volumique thermique	
δ_{ij}	delta de Kronecker	

Abréviations :

CFD: Computational Fluid Dynamics

CL: Couche Limite

CLU: Couche limite urbaine

RANS: Reynolds Averaged Navier Stockes

EARSM: Explicit Algebraic Stress Modelling

AS: Spalart-Allmaras

DNS : Direct Numerical Simulation

TKE : Turbulence kinetic energy

Résumé

Notre présent mémoire consiste à étudierl'écoulement de d'air autourd'obstacles dans un canal.On a utilisé une approche CFD. Le schéma physique du problème et le modèlemathématique utilisé sont présentés. Ona employé le modèle de turbulencek-ε enutilisant le code de calcul AnsysCFX.Ce travail porte principalement sur l'étude de l'influence du changement de forme du toit(carré, cercle, toit incliné à droit, toit incliné à gauche et toit incliné des deux cotés).Enfin, les résultats de simulation obtenus sont satisfaisants et encourageants.L'influence de l'inclinaison de la première arrête de l'obstacle sur les paramètresconsidérés de l'écoulement est bien observé.

Mots clés : écoulement turbulent, modèle k-ε, CFD, forme du toit. rue-canyon

Abstract

Our note aims to study the impact the Barriers around a turbulent airway We will see the effect of surface morphology, Numerical simulation is used for the study We showed the actual sche Using CFX arithmetic. me of the problem And the mathematical model using the k-ε disturbance model This work presents the basis of the impact of various forms of roof(Square, circle, inclined roof has right, roof sloped to the left and sloping roof two sides) Finally, the results obtained by digital simulation They are encouraging and satisfying Satisfactory and the effect of surface change on the troubled airway was very noticeable.

Key words: Turbulent flow, Model k-ε, CFD, form of roof, street-canyon

ملخص

تهدف مذكرتنا إلى دراسة تأثير الحواجز حول مجرى هواء مضطرب وسنرىتأثير تغير شكل السطح،يتم استخدام المحاكاة العددية للدراسة أظهرنا المخطط الفعلي للمشكلة والنموذج الرياضي باستخدامنا نموذج الاضطراب k-ε باستخدامنا رمز الحساب CFX.هذا العمل يعرض أساسا تأثير مختلف أشكال السقف (مربع, دائرة, سقف مائل يمينا, سقف مائل يسارا ,وسقف مائل على كلى الجانبين يمينا ويسارا).

وفي الأخير فان النتائج المتحصل عليها بالمحاكاة الرقمية فهي مشجعة ومرضية وتأثير تغير السطح على مجرى الهواء المضطرب كانت جد ملاحظة.

الكلمات المفتاحية :

التدفق المضطرب ,نموذج ,,k-εCFDشكل سقف الحاجز,

Introduction générale

L'augmentation continue des performances de calcul dans le domaine de la dynamique desfluides (CFD : Computational Fluids Dynamics), permet aujourd'hui de mettre en œuvre les simulations très complexes pour une grande variété d'écoulement appliquée àl'étude de l'environnement. Cependant, la majorité des études CFD concernant la dispersion de polluants sur des sites industriels et urbains, est encore réalisée à l'aide des modèles Reynolds AveragedNavier-Stokes (RANS), et plus particulièrement avec le modèle *k-ε*.Les analyses des performances des modèles RANS sont très souvent basées sur les capacités àprévoir les champs des vitesses moyennes et de l'énergie cinétique turbulente.

Notre présent travail consiste à étudierl'écoulement de d'air autourd'obstacles dans un canal. On a utilisé une approche CFD pour faire cette étude. Ona employé le modèle de turbulence k-ε enutilisant le code de calcul Ansys CFX.

Ce travail porte principalement sur l'étude de l'influence du changement de forme du toit ; en occurrence : bloc carré, toit en coque, toit incliné à droite, toit incliné à gauche et toit incliné aux deux côtés.Ce travail est inspiré des expériences en soufflerie qui ont été réalisé au sein du projet de Solazzo et al. [59] dans le but de comparer avec nos résultats numériques.

Pour ce faire, on a adopté la structure du mémoiresuivante :

- ✓ Une étude bibliographique consistant à une recherche sur les écoulements est les modèles de turbulence
- ✓ Modalisation de la turbulence atmosphérique
- ✓ Etapes d'utilisation de ICEM est le guide d'utilisation du solveur CFX
- ✓ Une représentation de la configuration géométrique étudie est la sensibilité aux maillage
- ✓ Résultat numérique est discutions
- ✓ Conclusion

CHAPITRE I

RERCHRCHE BIBLIOGRAPHIQUE

Les écoulements turbulents autour les obstacles carrés sont considérés comme une branche fondamentale dans la mécanique des fluides et sont largement utilisés dans les applications industrielles, on peut citer : l'écoulement du vent autour les bâtiments, les écoulements dans les turbomachines etc. Pour cette raison, on a présenté dans ce chapitre une synthèse bibliographique comporte des plusieurs travaux effectués dans ce domaine. Il est bien apparu que les recherches sont nombreuses et riches, et en plus ils sont dominants. Yeung et al. (1985) les équations modélisées de l'écoulement turbulent sont résolues numériquement pour des différentes configurations géométriques (un bloc rectangulaire, triangulaire et semi-circulaire) avec un modèle de turbulence k-ε. Les conditions en amont ont été choisies pour simuler une couche limite atmosphérique neutre stable. A faible nombre de Reynolds le modèle de turbulence k-ε a été utilisé fin d'accommoder les effets visqueux proche de la paroi et un certain effort a été consacrée aux choix des constantes empiriques basé sur une comparaison avec des données empiriques. Les résultats montrant que les longueurs de rattachement prévus sont probablement plus courtes que dans la réalité physique [1]. Murakami et al. (1988) dans cette étude, une simulation numérique tridimensionnelle (3D) de l'écoulement d'air autour d'un cube avec le modèle de turbulence k-ε a été étudiée en vue d'estimer l'influence d'un système de division de maille et des conditions aux limites sur les résultats simulent. Les résultats numériques sont comparés avec des expériences en soufflerie. Les résultats confirment que la simulation numérique à l'aide du modèle de turbulence k-ε reproduit fidèlement les champs de vitesse et de pression avec une résolution du maillage fine autour d'un obstacle [2]. Murakami et al. (1990)les modèles de turbulence k-ε et de grandes échelles LES sont utilisés pour produire le champ d'écoulement autour dans un cube 3D. La comparaison des résultats de modèle de turbulence k-ε avec ceux d'un essai en soufflerie révèle plusieurs différentes importantes et les résultats de modèle LES concordent assez bien avec les données expérimentales [3]. Paterson (1990) considère l'écoulement autour d'un cube placé dans une couche limite turbulente. L'écoulement est considéré comme incompressible et perpendiculairement à la direction d'écoulement. Cet écoulement est simulé par la solution de l'équation de Reynolds et l'équation de continuité à l'aide de modèle de turbulence k-ε. Les résultats des simulations numériques sont comparés avec des mesures expérimentales. Les résultats montrent un très bon niveau de concordance

pour des vitesses et des pressions moyennes dans le voisinage du cube. Et d'un accord adéquat est obtenue pour des fluctuations des vitesses. La zone de recirculation à l'arrière du cube est caractérisée par un tourbillon vers la haut autour d'un axe qui est à peu près parallèle à la face arrière du cube et inclinée à 25° avec l'axe verticale. La zone de recirculation latérale est grande dans la partie inferieur du cube et plus petite dans la partie supérieure, et on observe une légère turbulence vers l'extérieur. L'imprécision principale du modèle k-ε est sa surestimation de la valeur de l'énergie cinétique *k* et de son sous-estimation de la valeur de la composante latérale de la contrainte normale dans la zone de recirculation derrière le modèle [4]. Sini et al. (1996) ont utilisé un modèle de turbulence k-ε standard pour étudier la dispersion des polluants et des effets thermiques dans une rue canyon (2D). Il a été constaté que le chauffage au sol ou façade du bâtiment sous le vent augmente la recirculation de l'écoulement dans la rue [5]. Lakehal. D. (1998) l'application du modèle de turbulence k-ε à s'écouler sur un immeuble situé en sous-couches de rugosité différents avec une composante de vitesse de courant principal à des angles différents. Les distributions de pression sont comparées à des mesures en soufflerie. L'effet des caractéristiques de l'écoulement turbulent en sens inverse sur la répartition de pression est indiqué il a été décrit par la simulation de sous-couches des différentes rugosités. Les différents résultats suggèrent que seulement la répartition de pression de base est sérieusement effectuée par l'intensité de la turbulence et de la rugosité de la surface. En outre, les calculs ont montré que le champ d'écoulement est très sensible à la spécification des conditions d'entrée pour le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente. Enfin et compte tenu des résultats différents, il apparait que la procédure adoptée dans notre cas, peut être utilisé pour simuler de réaliste les effets induit par la pression d'un écoulement turbulent sur un modèle du bâtiment, placé dans une couche limite naturelle [6]. Meroney et al. (1999) ont comparé le modèle de Reynolds Stress (RSM), k-ε Standard et RNG k-ε avec les résultats des tests en soufflerie, et a constaté que le modèle de turbulence (RSM) à produit des résultats plus réalistes que les deux autres modèles k-ε[7]. Murizi (2000) simulation numérique de l'écoulement turbulent sur les vallées 2D pour comparer le comportement des trois versions de modèle de fermeture k-ε mis en œuvre dans le logiciel PHONICS. Les résultats numériques sont comparés avec les données mesurées à partir de l'expérience en soufflerie RUSVAL. Les résultats numériques montrent un très bon accord avec les mesures expérimentales [8]. Iaccarino et Durbin

(2000) s'intéressent sur la zone de recirculation en aval XR/h et à la deuxième zone de recirculation dans le cas du régime non permanent et le régime permanent. Ils comparent plusieurs résultats s'appuyant sur l'expérimentation et d'autres s'appuyant sur des modèles de turbulence tels que LES et RANS [9]. Kim et al. (2001) étude numérique un modèle bidimensionnel 2D avec un fermenteur de turbulence k-ε et un système de maillage non-uniforme pour examiner l'effet d'une seule colline et/ou deux bâtiments sur l'écoulement et la dispersion des polluants. Dans une configuration à une seule colline, la pente de la colline est un facteur important pour déterminer l'existence d'une zone de recirculation derrière la colline. Lorsque la pente de la colline augmente, la zone de recirculation devient large [10]. Kim et Baik. (2001) ont présente une étude numérique et expérimentale dans une rue canyon 2D avec la paroi bas chaude. Pour l'étude numérique on utilise le modèle de fermeture de turbulence k-ε. Les résultats ont indiqué que le chauffage thermique joue un roule important dans la détermination des champs d'écoulement dans les canyons urbains. Le mouvement vers le haut induit par la force de flottabilité peut soit renforcer ou d'affaiblie le vortex et modifier la structure tourbillonnaire[11]. Jeong et Andrews (2002) application du modèle de turbulence k-ε dans le champ du nombre de Reynolds à haut débit dans une rue urbaine. La grande valeur de l'énergie cinétique se trouve dans la partie sous le vent. Ce modèle est à peu près semblable mais que le rapport d'aspect diminue [12]. Shmidit et al. (2002) simulation numérique des modèles de turbulence (DNS, LES et RANS) sur l'écoulement instable autour d'un cylindre carré. L'objectif principale de cette étude est évaluer la performance de modèle de turbulence DNS par rapport aux modèles (LES et RANS). Les résultats montrent que le modèle de turbulence DNS est capable de capture les modèles d'écoulement plus dominantes par rapport les modèles (LES et RANS) [13]. Garcia Sagrado et al. (2002)ont effectué des études numériques et expérimentales de la dispersion des polluants dans une rue canyon 2D. Le résultat expérimental, il a été vérifié que l'augmentation de la hauteur du bâtiment en aval diminue la concentration des polluants dans la rue [14]. Iaccarnio et al. (2003)ont étudié la simulation numérique de l'écoulement instable autour d'un cylindre carré avec l'équation de Navier Stocks (RANS). Les résultats ont montré un bon accord avec les données expérimentales [15]. Bouterra et al. (2003) ont présenté une étude numérique bidimensionnelle de la dispersion d'un polluant autour d'un obstacle soumis à un écoulement turbulent. Cette étude a été effectuée par la technique de simulation de

grosses structures LES. Ce travail contient deux études : le premier cas étudie la dispersion du polluant ayant la même densité que l'air ambiant et le deuxième cas étudie l'effet de la stratification thermique sur les mécanismes de la dispersion du polluant. Les évolutions spatio-temporelles des champs de vitesse, de température et de concentration sont régies par l'équation de Navier Stokes (RANS). Les équations de conservation de l'énergie et de diffusion ont été résolues pour un écoulement turbulent instationnaire et incompressible. La résolution des équations est réalisée par la méthode de prédiction-projection pour découpler le calcul de vitesse et de pression. Les résultats montrent dans le cas isotherme, le champ moyen caractérisé par la présence des zones de recirculation et par la turbulence générée par le cisaillement et la présence de l'obstacle est les principaux facteurs qui influent sur le transport et la dispersion du polluant. La couche de polluant émis joue un rôle de couvercle thermique [16]. Kim et Baik (2004) testent le modèle RNG k-ε dans une rue canyon tridimensionnelle. Le modèle RNG k-ε a été utilisé pour étudier les effets de la direction du vent sur l'écoulement et la dispersion de polluant autour d'un groupe des bâtiments. Ce modèle a été appliqué sur trois types de configuration : rue canyon infinie, rue canyon longue mais de longueur finie et l'intersection entre les deux rues. Les résultats obtenus indiquent que selon la direction de vent ambiant, on trouve trois modèles de l'écoulement peuvent être classées selon les caractéristiques de la circulation du l'écoulement moyen du vent généré derrière le bâtiment. Dans le premier modèle d'écoulement : généré un vortex derrière le mur de bâtiment, le vent est symétrique autour du centre de la rue canyon, pour le deuxième modèle : lorsque l'angle de vent 45°, l'écoulement est symétrique diagonale derrière le mur de bâtiment contre le vent et pour le troisième modèle : génère un vortex située derrière le mur et nord du bâtiment [17]. Xiang et al. (2005) développement le modèle de la turbulence k-ε pour la détermination du taux de change de l'air pour un canyon urbain. Le modèle de turbulence k-ε a été appliquée pour des différents rapports d'aspects ce modèle a été validé par rapport à la modélisation des (simulations des grandes échelles LES et RNG k-ε) et les résultats en soufflerie. Les vitesses moyennes et l'intensité de la turbulence calculée par le modèle k-ε sont en bon accord avec les résultats en soufflerie disponible dans la littérature. Les résultats indiquent que le modèle de turbulence k-ε est efficace et plus rapide que celle de modèle LES [18]. Yakhot et al. (2006) simulations numériques directs DNS ont été effectuées sur l'écoulement autour d'un cube dans un canal pour un nombre de Reynolds *Re*=5610

basée sur la vitesse apparente et de la hauteur du canal. Les résultats confirment l'instabilité de l'écoulement causée par l'interaction d'un vortex en face du cube et sur ses deux faces avec un vortex derrière le cube. Pour le modèle de turbulence DNS, les zones de recirculation et les caractéristiques de vortex ont été jugée en bon accord avec les résultats expérimentaux [19]. Olivera et Choudhuri (2006) une dynamique des fluides computationnelles (CFD) utilisant le modèle de turbulence k-ε a été appliquée pour simules les dispersions de l'hydrogène et du méthane autour d'un bâtiment cubique. La dispersion calculé montre un potentiel plus grand risque d'hydrogène par rapport au méthane lorsqu'est libéré dans le voisinage d'un bâtiment. Les résultats montrent aussi les interactions complexes des modèles de dispersion d'hydrogène en raison de forte force de flottabilité [20]. Evolaet Popov (2006). L'équation de Navier Stockes (RANS) est appliquée sur la ventilation naturelle entrainée dans un bâtiment cubique. La vitesse de vent, la distribution de la pression à l'intérieur et le débit de ventilation sont déterminées pour les trois configurations différentes : ventilation transversale, ventilation simple avec une ouverture sur la paroi exposée au vent et une ventilation simple avec une ouverture sur la paroi sous le vent. Les résultats numériques sont comparés avec les données expérimentales. Les résultats montrant un bon accord pour le modèle de turbulence RNG. La différence dans la détermination de la vitesse de ventilation est raisonnable et la distribution de l'écoulement à l'intérieur du bâtiment est bien d'écrit lorsque le modèle de turbulence RNG est utilisé. Le modèle de turbulence k-ε ne parvient pas à déterminer les composantes de vitesse correcte à proximité des surfaces horizontales. Selon ces résultats le modèle de turbulence RNG peut être considère comme un utile pour l'étude de la ventilation naturelle entrainée par le vent, en particulier pour l'évaluation du taux de ventilation de l'air dans un bâtiment [21]. Sedighi et Farhadi (2006) étude numérique de l'écoulement turbulent autour d'un cube placé sur un canal par la simulation des grandes échelles LES. Les études ont été réalisés pour les écoulements avec le nombre de Reynolds varie entre 1000 à 40000. Pour évaluer les résultats du calcul. Les résultats des calculs montrent que l'augmentation du nombre de Reynolds et l'intensité de turbulence, le centre de tourbillon augment [22]. Sohankar (2006) simulation des grandes échelles (LES) est effectuée pour étudier le flux d'approche uniforme sur un cylindre à section carrée avec des différentes valeurs de Reynolds, allant de 10^3 à 5×10^6. Deux modèles sont employés : le modèle Smagorinsky (LES) et un modèle d'une équation dynamique. Les résultats globaux montrent un bon accord

avec l'expérience pour le nombre de Reynolds supérieur à 2×10^4, et le rapport entre les coefficients de la traînée moyen et la pression d'aspiration de base est sensiblement constante pour les différents nombres de Reynolds. En fin, alors que les structures d'écoulement instantané à grand échelle deviennent approximativement similaires pour les différents nombres de Reynolds, mais il ya une certaine dissemblance dans la taille et la force des petits structures à des nombres de Reynolds élevées [23]. Aliane et al. (2006) ont étudié l'écoulement bidimensionnel autour d'un obstacle en fonction du nombre de Reynolds Re_h et du rapport sans dimension h/H (hauteur de l'obstacle/hauteur du canal), pour les deux modèles, un obstacle rectangulaire et un obstacle rectangulaire à bout arrondi. Deux régions importantes en aval de l'obstacle on tété étudiées: la première c'est la zone de recirculation générée en aval de l'obstacle où on étudie les dimensions des longueurs de ré-attachement X_R/h et dans la deuxième région est la zone de recirculation secondaire. Les résultats obtenus montrent que l'obstacle rectangulaire arrondi possède des longueurs de rattachement plus faibles avec celle de l'obstacle rectangulaire quelque soit le rapport h/H. L'obstacle rectangulaire crée un changement brusque de pression en aval de l'obstacle tandis que l'obstacle rectangulaire à bout arrondi crée une variation progressive en aval de ce modèle, ce qui permet de diminuer considérablement les dimensions des longueurs de ré-attachement [24].Hang Yang et al. (2007) font une étude numérique sur l'air et la dispersion de polluant dans un milieu urbain (les bâtiments de milieu urbain sont des toits inclinés). Cette étude est basée sur la technique de CFD. La simulation des champs de vent et de concentration a été étudié en fonction des différentes rapports d'aspect (W/H, W/h et h/H : avec W la largeur de rue et H, h sont les hauteurs des bâtiments respectivement). Ces paramètres sont des factures essentielles pour déterminer la structure de vortex et la répartition des polluants dans la rue canyon [25]. Jia-Song et Zhen. (2007) ont étudié la simulation numérique par la méthode des différences finies un écoulement visqueux incompressible basé sur la méthode Pseudo-compressibilité par un couplage de l'équation de Navier Stockes (RANS), l'équation de continuité, pression relative et différents modèles de turbulence k-ε. La simulation numérique de l'écoulement autour d'un obstacle carré a été validée à l'aide des données expérimentales de soufflerie. Les résultats montrant que les modèles de turbulence RNG et Chen-Kim k-ε sont beaucoup mieux de prédire les caractéristiques de la structure du tourbillon et la séparation de l'écoulement par rapport au modèle de turbulence k-ε Standard [26].

Louriero et al. (2008) le présent travail procède à une comparaison détaillée entre les calculs numériques avec six modèles de turbulence (k-ε, RNG k-ε, k-ω et SST k-ω) et deux modèles instants (SSG-RSM-ε, BSL-RSM-ω) et les données expérimentales pour l'écoulement autour d'une colline a deux dimensions 2D. Les expériences ont été effectuées dans un canal à d'eau. Les résultats montrent que les modèles de base ω-équation beaucoup plus performant que les modèles de base ε-équation. Les propriétés de la turbulence dans la zone d'écoulement inversé simulés par le modèle BSL-RSM étaient les meilleurs [27]. Cai et al. (2008) ont étudié la simulation numérique avec le modèle de la turbulence de grande échelle LES dans un canyon urbain pour déterminer le champ de vent, la turbulence, la concentration et la fluctuation de concentration. Le vent à un angle droit par rapport à l'axe du canyon et l'émission est spécifié sous la forme d'une source en ligne avec un taux d'émission constant sur la rue/ou la surface du bâtiment. Les résultats numériques ont été comparés avec des expériences en soufflerie. Les simulations numériques ont été réalisées pour différents rapports d'aspect de la rue canyon. Le modèle LES donné des résultats assez bien avec celles des données de soufflerie. Les résultats de modèle LES montrent que $(\overline{C}_D)$ est insensible à l'emplacement de l'émission (l'émission en milieu a gauche ver la droit) mais $(\overline{C}_U)$ est très sensible, en particulier dans les bâtiments des petites hauteurs [28]. Ratnam et Vengadesan (2008) ont étudié la performance des modèles de turbulence pour prédire l'écoulement et le transfert de chaleur sur un mur de cube. Les calculs sont effectués l'aide de cinq modèles des turbulences, k-ε standard, k-ε à faible nombre de Reynolds, k-ε non-linéaire, k-ω standard et l'amélioration de modèle k-ω pour résoudre le problème de fermeture. Les résultats montrent que le modèle de turbulence k-ω amélioré il donne un meilleur accord avec l'étude expérimentale. Le modèle k-ε non-linéaire il donne une meilleure prédiction par rapport le modèle de turbulence k-ε à faible nombre de Reynolds et k-ε standard. La structure complexe de vortex autour du cube entraine une grande variation dans le coefficient de transfert de chaleur [29]. Tominage et Stathopoulos (2009) la précision de la prédiction de l'écoulement et la dispersion de polluant autour d'un bâtiment cubique à l'aide des différents modèles de turbulence k-ε. Les résultats numériques ont été comparés avec les données de soufflerie. Cette étude a été comparée par quatre types des modèles de turbulence, k-ε standard, RNG k-ε, k-ε réalisable et k-ε modifié par Kato et Launder. Le modèle RNG k-ε montre un très bon accord avec

l'expérience, tandis que le modèle k-ε fournie des résultats insuffisants pour le champ de concentration. La concentration prédite par le modèle CFD étaient moins diffusif [30]. Santos al. (2009) ont étudié l'écoulement atmosphérique et la dispersion des polluants dans les environs du bâtiment isolée à des conditions atmosphériques stables ou instables. Le modèle mathématique utilisé est basé sur la solution des équations de conservation de masse, quantité de mouvement et l'équation de l'énergie cinétique avec l'utilisation d'un modèle de turbulence non-standard k-ε. Les modifications proposées dans le modèle de turbulence k-ε sont inclusions de la correction de Kato et Launder dans la production de l'énergie cinétique turbulente et l'utilisation d'une fonction de la paroi modifiée. Les résultats des simulations numériques montrent un accord raisonnable avec les données expérimentales [31]. Solazzo et al. (2009) utilisent le modèle de turbulence standard k-ε fournie par logiciel commercial Fluent pour la simulation de l'écoulement de vent et de la dispersion de polluant dans une rue canyon. Pour améliorer la norme de performance de modèle de fermeture k-ε on modifier les paramètres du modèle en fonction de forme choisie des profils de la vitesse d'entrée $u(z)$, de l'énergie cinétique de turbulente $k(z)$ et le taux de dissipation de l'énergie $\varepsilon(z)$. Les résultats obtenus (champs de vitesse, turbulences, et de concentration) sont comparés avec les résultats expérimentaux et montrent une certaine divergence entre les deux analyses [32]. Köse et Dick (2010) ont étudié numériquement l'écoulement autour d'un bâtiment cubique dans une couche limite atmosphérique. Les différentes types des modèles de turbulence sont utilisées : RANS (l'état d'équilibre), RANS hybride/LES et LES. Les résultats de simulation sont comparés avec les données expérimentales. L'objectif est de construire une approche pour effectuer des simulations sur des maillages grossiers à faible cout de calcul. Les résultats montrant que la méthode implicite LES est la plus précise pour les simulations du maillage grossier. Les résultats montrant aussi que le nombre Reynolds *Re* inferieur, l'approche LES conduite à des résultats assez bons [33]. Yassin (2011) étudie l'impact de la hauteur et la forme de construction de toit sur la qualité de l'air dans une rue de canyon urbain par la technique de dynamique des fluides computationnels CFD. La dispersion des polluants gazeux a été analysée par le modèle de turbulence k-ε standard. Le champ de diffusion dans les canyons urbains a été examiné avec trois hauteurs et cinq formes des toits. Le modèle numérique a été validé et assez en bon accord avec les résultats en soufflerie. Les résultats obtenus indiquent que la concentration des polluants augmente lorsque la hauteur du toit

diminue et elle a également diminue avec les toits en pente et en forme de trapézoïdale, mais augmente avec le toit en forme plat. La distribution de concentration de polluant simulée dans le présent travail, a indiqué que les variabilités des formes des toits et des hauteurs des bâtiments sont des facteurs importants pour estimer la qualité de l'air dans les canyons urbains [34]. Vardoulaskis et al. (2011) étude de comparaison a été effectuée afin d'évaluer la capacité de quatre modèles RAMS CFD (CHENSI, MIMO, VADIS et Fluent) pour simuler l'écoulement du vent et de la turbulence autour d'un bloc isolée avec l'utilisation de système de fermeture k-ε. En particulier, les quatre modèles surestimaient l'énergie cinétique turbulente générée dans la zone près du mur de cube. Les résultats montrant que les modèles CHENSI, MIMO et Fluent surestimés la longueur de la zone de recirculation sur le côté sous le vent de cube, tandis que VADIS prédit légèrement cette longueur. Les résultats indiquent aussi un certain écart observée entre les modèles sont dues à différentes implémentations des fonctions de paroi pour le traitement près de la paroi [35].Salim et al. (2011) comparaison dans la prédiction de l'écoulement d'air et la dispersion des polluants dans un milieu urbain par les trois différents techniques numériques RANS, URANS et LES. Le code CFD sont évalues par rapport les données expérimentales en soufflerie [36]. Tominaga et Stathopoulas (2012)en comparant des mesures en soufflerie avec des simulations numériques par un code CFD (Computationnels Fluide Dynamics) sur la dispersion des polluants autour des bâtiments avec une source ponctuelle est située entre des bâtiments centraux. On utilise pour cette étude deux approches de modélisation, une approche RANS avec un modèle de fermeture RNG k-ε et la deuxième approche avec un modèle de LES pour étudier l'influence des champs de vitesse et de concentration [37]. Gousseau et al. (2012) ont utilisé le modèle de turbulence de grande échelle LES pour étudier le mécanisme de transport de masse turbulent dans le cas de dispersion de gaz autour dans un bâtiment cubique. La simulation numérique donnée un très bon accord avec les mesures en soufflerie. Les grandes structures tourbillonnaires autour du bâtiment sont présentes pour jouer un roule essentiel dans le transport de masse turbulente [38]. Lateb et al. (2013)ont étudié la dispersion des polluants dans une configuration à deux bâtiments en utilisant différents modèles de turbulence RANS (k-ε standard, k-ε réalisable et RNG k-ε) les résultats numériques ont été comparés avec les données expérimentales. Il a été constaté que le modèle de la turbulence k-ε réalisable donné le meilleur accord avec les résultats en soufflerie pour la plus faible hauteur du bâtiment,

tandis que pour la hauteur maximale du bâtiment, le modèle de turbulence RNG k-ε fournie une grande concordance avec les résultats expérimentaux. Le modèle de turbulence k-ε réalisable était le seul modèle capable de fournier la bonne tendance pour la distribution de la concentration dans la région inferieure. Généralement le modèle de turbulence k-ε est insuffisant pour la reproduction de la distribution de la concentration verticale [39].Tian et al. (2013) l'objectif de cette étude est évaluer la validité des simulations numériques 2D URANS avec le modèle de turbulence SST k-ω pour l'écoulement autour d'un cylindre rectangulaire. Les caractéristiques hydrauliques ont été calculées et comparées avec les résultats expérimentaux [40].

CHAPITRE II

MODÉLISATION DE LA TURBULENCE ATMOSPHÉRIQUE

II.1 Introduction :

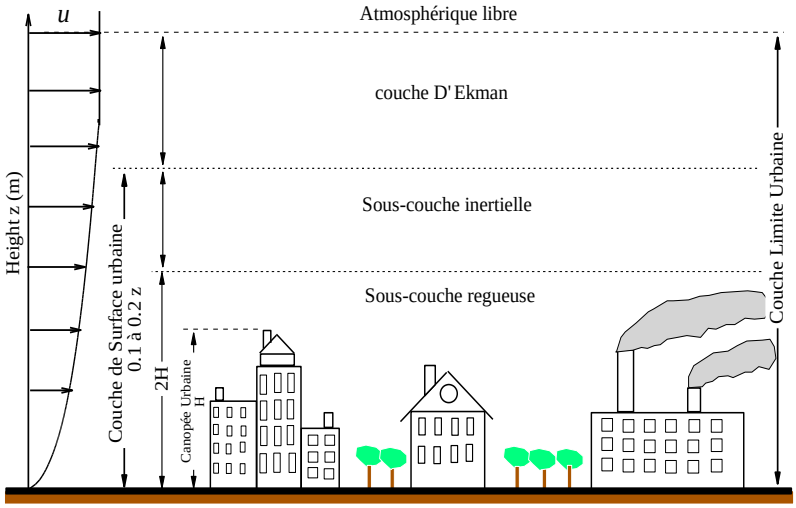
La couche limite atmosphérique ne représente qu'une petite partie de l'atmosphère où la présence du sol perturbe le champ de vitesse du vent. La structure de la couche limite atmosphérique est maintenant bien comprise et une description peut en être trouvée dans différents publication (Stull, 1988 ; Garratt, 1992) [41.42].En résumé, son épaisseur notée δ, dont les dimensions étant de quelques centaines de mètres à plusieurs kilomètres en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité des sols, de l'ensoleillement variables suivant les lieux et l'heure de la journée, mais elle joue un rôle important dans de nombreux processus physique dans l'atmosphère.

La Fig. II-1 rappelle schématique de la structure de la couche limite atmosphérique, appelée couche limite urbaine CLU dans le cas particulier de l'atmosphère au-dessus de la ville. Elle est constituée de trois parties distinctes :

La couche d'Ekman c'est la partie supérieure de la couche limite atmosphérique. Dans cette région, la structure du vent est influencée à la fois par le frottement de l'air sur la surface terrestre, par la stratification thermique de l'air et par la force de Coriolis. Avec l'altitude, les effets du frottement au sol deviennent négligeables devant l'effet de la force de Coriolis, la direction du vent subit une rotation et atteint à son sommet celle du vent géostrophique.

La couche de surface urbaine est une partie de couche limite atmosphérique en contact directement avec la surface terrestre. Dans cette région, les effets de la force Coriolis sont négligeables, la direction du vent est constante et la production de turbulence est d'origine dynamique, due au frottement de l'air sur la surface solide et thermique liée au transfert de chaleur entre l'air et la surface. Ces deux éléments ne se réchauffant/refroidissant pas de la même manière. La couche de surface urbaine est divisée en plusieurs sous-couches caractéristiques des propriétés moyennes et turbulentes de l'écoulement. La sous-couche inertielle est la partie supérieure de la couche de surface urbaine définie comme une couche homogène dans laquelle les flux verticaux varient de moins de 10%. L'écoulement et la température potentielle y sont homogènes horizontalement et les flux verticaux de la quantité de mouvement, de la chaleur et de l'humidité sont considérés comme constants. La sous-couche rugueuse s'étend du sol à une hauteur $(\sim 2H)$ et caractérisée par une grande inhomogénéité de l'écoulement et des échanges thermique. C'est une couche de transition directement influencée par des échelles liées aux éléments de rugosité de la surface et où les propriétés de l'écoulement turbulent sont souvent tridimensionnelles. Il arrive que dans des

conditions de forte instabilité la hauteur $(\sim 2H)$de la sous-couche rugueuse dépasse celle de la sous-couche inertielle.



FigureII-1. Représentation schématique de la couche limite atmosphérique.

II.2 Modélisation de la turbulence

Dans la couche de surface urbaine, les écoulements sont fortement turbulents. La turbulence provoque la formation de nombreux tourbillons des différentes échelles de longueur comme indiqué par Richardson (1924) [43]. Les plus grands tourbillons contiennent la plupart de l'énergie cinétique qu'ils tirent de l'écoulement principal. Le transfert de l'énergie cinétique des gros tourbillons vers les plus petits tourbillons est connu comme la cascade de l'énergie. Le processus continue la création de plus petites structures produisant ainsi une hiérarchie des tourbillons. Finalement, les structures deviennent suffisamment petites, la diffusion moléculaire devient importante et les plus petits tourbillons aux échelles de longueur de Kolmogorov (Kolmogorov, 1941) [44].Convertissent leur énergie cinétique en énergie thermique par dissipation visqueuse. La cascade d'énergie est illustrée dans la FigII-2

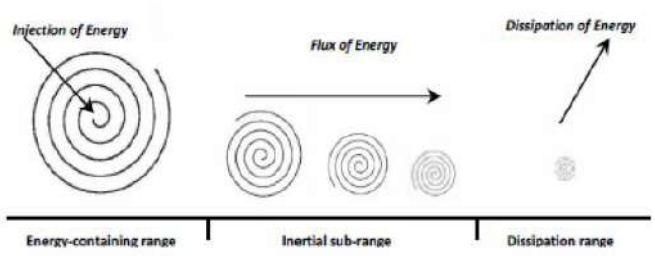


Figure II-2. La cascade d'énergie de turbulence.

Les équations gouvernant la mécanique des écoulements incompressibles sont rappelées et on présente comment les équations RANS sont obtenues à partir de celles-ci. Le problème de fermeture est ensuite brièvement abordé, ce qui mène à la description de cinq modèles de turbulences : k-ε standard, k-ε réalisable, RNG k-ε, k-ω et SST k-ω (Shear Stress Transport). La modélisation RANS (Reynolds Averaged Navier Stockes) utilise la décomposition des variables décrivant le mouvement (vitesse et pression dans le cas d'un écoulement incompressible) en leur moyenne statistique et la fluctuation autour de cette moyenne. Dans une première approche, le mouvement moyen est considéré stationnaire et la totalité du mouvement fluctuant est considéré aléatoire. Le moyennage des équations de Navier-Stockes régissant l'écoulement associé à cette décomposition conduit à un système d'équations pour le mouvement moyen dans lequel apparaît des termes inconnus.

La résolution de ce système nécessite des lois de fermeture modélisant ces termes. Parmi les modèles les plus répandus, on distingue les modèles au premier ordre qui relient algébriquement le tenseur de Reynolds au mouvement moyen, et les modèles au second ordre qui utilisent les équations de transport de ces contraintes dans lesquelles les termes inconnus sont modélisés. Les corrélations doubles des vitesses fluctuantes jouent le rôle des contraintes.

Les modèles au premier ordre les plus répandus sont les modèles linéaires qui utilisent une hypothèse de fermeture Newtonienne basée sur une analogie avec la loi de comportement de fluide Newtonien. Le tenseur des contraintes turbulentes est dans ce cas relié linéairement au tenseur de taux de déformation moyenne, via une viscosité turbulente qui est déterminée à partir d'une échelle de vitesse et d'une échelle de longueur turbulente. Une classe intermédiaire des modèles de turbulence consiste à adopter des lois constitutives non-linéaires reliant le tenseur de Reynolds au tenseur de déformation et de rotation du mouvement moyen. Ces lois constitutives peuvent découler du concept rhéologique par analogie aux fluides viscoélastiques[45], ou bien de dégénérescence des équations de transport des tensions de Reynolds vers les équations de transport algébriques, approche Explicit Algebraic Stress Modelling (EARSM) [46]. Cette classe intermédiaire vise à restituer le caractère anisotrope du tenseur turbulent notamment dans les régions proches de la paroi, alors que les modèles linéaires de la loi Boussinesq rendent le comportement des tensions normales isotrope. En regardent à une échelle de temps plus large que celles des fluctuations de la turbulence, le flux turbulent peut être vu comme présentant des caractéristiques moyennes avec une composante fluctuante additionnelle variant dans le temps. Les modèles

de turbulence basés sur les équations RANS sont connus comme des modèles de turbulence statistique à cause de la procédure de moyenne statistique utilisée pour obtenir les équations.

La simulation des équations RANS réduit grandement le besoin de calcul par les autres modèles et est généralement utilisée pour les calculs d'ingénierie pratique. Cependant, la procédure de moyenner introduit des inconnues supplémentaires contenant les produits des quantités fluctuantes, agissent comme des contraintes additionnelles dans le fluide. Ces termes appelés contraintes (de turbulente) ou (de Reynolds), sont difficiles à déterminer directement. Les contraintes de Reynolds ont besoin d'être modélisées par des équations supplémentaires à partir de la quantité connue afin de clore le système. Comme décrit ci-dessus, les modèles de turbulence cherchent à résoudre un système modifié des équations de transport en introduisant des composantes moyennées et fluctuantes. Par exemple, une vitesse U peut être divisée en une composante moyennée$\overline{U}$, et une composante variant en fonction du temps.

$$U = \overline{U} + u \qquad (2.1)$$

Le composante moyenne est donnée par :

$$\overline{U} = \frac{1}{\Delta t}\int_{t}^{t+\Delta t} U dt \qquad (2.2)$$

où Δt est une échelle de temps suffisamment large par rapport aux fluctuations turbulentes, mais assez petite par rapport à l'échelle de temps à laquelle les équations sont résolues.

Les équations de la mécanique des fluides sont : équations de la conservation de la masse, équation de Navier Stockes et de l'énergie. Pour les hypothèses d'écoulement incompressible réduisant les forces extérieures au seul champ de pesanteur (la force Coriolis est négligeable car le nombre de Rossby est inférieur à 1),les équations de la mécanique des fluides s'écrivent alors :

L'équation de continuité :

$$\nabla u = 0 \qquad (2.3)$$

L'équation de mouvement :

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u.\nabla)u\right) = \nabla.\Sigma + \rho g \qquad (2.4)$$

Où Σ est le tenseur des contraintes et défini pour un fluide Newtonien par la relation suivante :

$$\Sigma = -pI + \mu\left(\nabla u + {}^{t}\nabla u\right) \qquad (2.5)$$

avec : $-pI$ et $\mu\left(\nabla u + {}^{t}\nabla u\right)$ sont la pression et les contraintes visqueuses.

L'équation de l'énergie :

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u.\nabla T\right) = \nabla.\left(\lambda \nabla T\right) - \nabla.\varphi \qquad (2.6)$$

La masse volumique est ici variable en fonction de la température. Le système composé des équations (2.3) à (2.6), est complété par la loi suivante :

$$\rho = \rho_0\left[1 - \beta_T\left(T - T_0\right)\right] \qquad (2.7)$$

où ρ_0 et T_0 sont la masse volumique et la température de référence, et β_T le coefficient d'expansion volumique thermique de fluide, défini par :

$$\beta_T = -\frac{1}{\rho_0}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P \approx \frac{1}{T_0} \qquad (2.8)$$

L'étude d'écoulements atmosphériques est un domaine passionnant de la mécanique des fluides de par les enjeux rencontrés (climatologie, prévisions, métrologiques, protection de l'environnement…). Deux nombres sans dimension caractérisent en général le régime turbulent : Le premier est le nombre de Reynolds qui est le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité, est donnée par :

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho UL}{\mu} = \frac{UL}{\upsilon} \qquad (2.9)$$

où U, L et υ sont la vitesse moyenne de fluide, la longueur caractéristique de l'écoulement et la viscosité cinématique du fluide.

La turbulence peut aussi provenir du mouvement convectif provoqué par des variations de températures induites par les forces d'Archimède des mouvements ascendants. Le second nombre c'est le nombre de Rayleigh R_T définir comme le rapport des forces convectives liée à un gradient de température aux forces de viscosité. Dans le cas d'un écoulement entre deux plaques horizontales séparées d'une distance L, la plaque supérieure à la température T_0, l'autre à la température $T_0+\Delta T$, ce nombre de Rayleigh est donné par la relation suivante :

$$R_T = \frac{gK\beta_T \Delta TL}{\alpha\upsilon} \qquad (2.10)$$

Lorsque l'écoulement est turbulent, il est possible de décomposer toutequantité vectorielle ou scalaire en une partie moyenne et une partie fluctuante. C'est la décomposition

de Reynolds, présentée par l'équation (2.11). On note généralement la partie moyenne avec une lettre majuscule et le terme fluctuant par une minuscule à laquelle on ajoute un « prime » en exposant. Il est à noter que différents types de moyennage peuvent être fait selon la situation. Lorsqu'une solution stationnaire est recherchée une moyenne temporelle peut être utilisée. Le passage des équations déterministes aux équations statiques repos sur la décomposition de Reynolds où tout champ $\Gamma\left(\Gamma = u,\ T \text{ ou } p\right)$ se décompose en un champ moyen $\overline{\Gamma}$ et un champ fluctuant de moyenne nulle :

$$\Gamma(x,t) = \overline{\Gamma}(x,t) + \Gamma'(x,t) \qquad (2.11)$$

La moyenne est à l'origine une moyenne d'ensemble (moyenne stochastique), c'est-à-dire qu'elle est prise sur un ensemble d'expériences effectuées dans des conditions identiques. Selon l'hypothèse d'ergodicité Favre (1976) [47], où il est équivalent de considérer une expérience répétée une infinité de fois ou une seule expérience menée à l'infini dans le temps, permet le passage à des moyennes temporelles, et par conséquent un traitement statistique des équations. Les équations ne sont alors a priori valables que pour des écoulements stationnaires mais dans la pratique elles sont largement utilisées pour les cas in stationnaires.

En remplaçant dans les équations fondamentales les expressions instantanées des champs par leur expression sous la forme de la relation (2.11), et en moyennant les équations obtenues, on obtient le système suivant :

$$\nabla\overline{u} = 0 \qquad (2.12)$$

$$\rho\left(\frac{\partial\overline{u}}{\partial t} + \left(\overline{u}\nabla\right)\overline{u}\right) + \nabla\left(\rho\overline{u'\otimes u'}\right) = \nabla\overline{\Sigma} + \rho g \qquad (2.13)$$

$$\rho C_p\left(\frac{\partial\overline{T}}{\partial t} + \left(\overline{u}\nabla\right)\overline{T}\right) + \nabla\left(\rho C_p\overline{u'T'}\right) = \nabla\left(\lambda\nabla\overline{T}\right) \qquad (2.14)$$

$$\rho = \rho_0\left(1 - \beta_T\left(\overline{T} - T_0\right)\right) \qquad (2.15)$$

De parte la non-linéarité des équations de Navier-Stockes et de l'énergie, des inconnues supplémentaires apparaissent. Ces corrélation doubles (termes de Reynolds $\rho\overline{u'\otimes u'}$ et $\rho C_p\overline{u'T'}$) rendent le système ouvert, il comporte plus d'inconnues que l'équation. Différentes méthodes de fermeture ont été proposées. En considérant que l'interaction entre le champ moyenné et le champ fluctuant se réduit à un terme de dissipation et en suivant une approche analogue à celle développée pour exprimer le terme de contraintes visqueuses dans

le cas de fluide Newtonien, les contraintes de Reynolds peuvent être modélisées par la relation de Boussinesq suivant :

$$\tau_{ij} = \overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \qquad (2.16)$$

où δ_{ij} est le delta de Kronecker, μ_t est la viscosité turbulent.

Le dernier terme à droit de l'équation (2.16) est nécessaire pour que les termes diagonaux du tenseur de Reynolds ainsi que l'énergie cinétique turbulente soient bien modélisés. En effet en prenant la trace du tenseur de Reynolds $\tau_{ii} = \tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz}$, on obtient

$$-\rho\left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{\omega'^2}\right) = 2\mu_t \left(\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} \right) - 3\left(\frac{2}{3} \rho k \right) \qquad (2.17)$$

Par l'équation de continuité, on remarque que le terme entre crochets est nul. Le dernier membre à droite est donc nécessaire à ce que la définition de l'énergie cinétique turbulente k soit respectée :

$$k = \frac{1}{2}\overline{u_i u_i} = \frac{1}{2}\left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{\omega'^2}\right) \qquad (2.18)$$

Dans l'équation (2.16), on remarque la présence de deux variables servant à modéliser les tensions de Reynolds, μ_t et k . Il faut effectivement deux informations pour fermer le système d'équation RANS. Différentes variables peuvent être utilisées mais elles doivent nécessairement permettre de déduire deux informations parmi la vitesse, la longueur et le temps caractéristique des fluctuations. Les modèles de turbulences à deux équations sont alors dits « complets » parce qu'ils ne nécessitent pas d'information extérieure au système d'équations pour approximer τ_{ij} . Notons que certains modèles à une équation peuvent aussi être complets mais ils s'appuient sur une version différente de (2.16). C'est le cas du modèle Spalart-Allumaras.

Les modèles de turbulence d'ANSYS CFX peuvent être répertoires en deux catégories, les modèles basés sur la viscosité tourbillonnaire (Eddy Viscosity Turbulence models) et ceux basés sur la contrainte de Reynolds (Reynolds Stress Turbulence models). Les modèles de turbulence utilisant pour ce travail sont le modèle k-ε standard, k-ε réalisable, RNG k-ε, k-ω standard et SST k-ωet appartiennent à la première catégorie de modèles.

II.2.1 Modèles à une équation : modèle Spalart-Allmaras (AS)

Le modèle de turbulence Spalart-Allmaras [48] est un modèle de l'équation de transport pour la viscosité turbulente. L'équation différentielle est calculée en « utilisant l'empirisme et les arguments de l'analyse dimensionnelle, invariance Galilean et la dépendance sélectionnée sur la viscosité moléculaire ». Ce modèle ne nécessite pas de résolution de la grille plus fine pour capturer les gradients de champ de vitesse avec des modèles algébriques. Dans le modèle SA une autre équation de transport (2.19) pour une viscosité turbulent modifié $\tilde{\upsilon}$ est utilisé pour fermer le système d'équation RANS.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho\tilde{\nu}\right)+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho\tilde{\nu}u_i\right)=G_\nu+\frac{1}{\sigma_{\tilde{\nu}}}\left[\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left(\mu+\rho\tilde{\nu}\right)\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\right\}+C_{b2}\rho\left(\frac{\partial\tilde{\nu}}{\partial x_j}\right)^2\right]-Y_\nu \qquad (2.19)$$

où G_ν est la production de la viscosité turbulent et Y_ν est la destruction de la viscosité turbulente qui se produit dans la région proche de la paroi en raison de blocage de la paroi et de l'amortissement visqueux. $\sigma_{\tilde{\nu}}$ et C_{b2} sont des constante et ν est la viscosité cinématique moléculaire.

La viscosité turbulente est calculée par :

$$\mu_t=\rho\tilde{\nu}f_{\nu1} \qquad (2.20)$$

où : $f_{\nu1}=x^3/x^3+C_{\nu1}^3$ et $x\equiv\tilde{\nu}/\ \nu$.

Le terme de production G_ν est modélisé par :

$$G_\nu=C_{b1}\rho\tilde{S}\tilde{\nu} \qquad (2.21)$$

Avec : $\tilde{S}\equiv S+\frac{\tilde{\nu}}{\kappa^2d^2}f_{\nu2}$

où C_{b1} est une constante du modèle, ρ la densité du fluide et $\tilde{S}$ donné par l'équation précédente, définie comme la somme de S , en fonction de la déformation et tenseur de rotation, κ est la constante de Von Karman (0.41 dans ANSYS CFX) et la fonction $f_{\nu2}$ est évaluée par,

$$f_{\nu2}=1-\frac{x}{1+xf_{\nu1}} \qquad (2.22)$$

Dans la forme originale du modèle SA, le scalaire S est calculée par la grandeur de tenseur de taux de rotation Ω_{ij} .

$$S=\sqrt{2\left(\Omega_{ij}\Omega_{ij}\right)} \qquad (2.23)$$

Avec :

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_J}{\partial X_i} \right) \tag{2.24}$$

Le terme de destructionY_n est modélisé par

$$\left.\begin{aligned} Y_v &= C_w \rho f_w \left(\frac{\tilde{v}}{d} \right)^2, \qquad g = r + C_{w2}\left(r^6 - r \right) \\ f_w &= g\left(\frac{1+C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right)^{1/6}, \qquad r \equiv \frac{\tilde{v}}{\tilde{S}\kappa^2 d^2} \end{aligned}\right\} \tag{2.25}$$

Où g agit comme un limiteur qui empêche les grandes valeurs de f_w . Les constantes du modèle sont présentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1. Les constantes de modèle Spalart-Allmaras SA.

C_{b1}	C_{b2}	σ_v	C_{v1}	C_{w1}	C_{w2}	C_{w3}	κ
0.1355	0.622	2/3	7.1	$\frac{C_{b1}}{\kappa^2} + \frac{(1+C_{b2})}{\sigma_{\tilde{v}}}$	0.3	2.0	0.41

II.2.2 Modèles à deux équations

Dans les modèles de fermeture à deux équations, la première équation est généralement l'équation de l'énergie cinétique de la turbulence k qui fournit l'échelle de vitesse caractéristique du champ turbulent. Par contre, la deuxième équation est une équation de transport pour une échelle de turbulence ℓ ou bien pour une variable ε à partir de laquelle on peut tirer une échelle de longueur $\varepsilon = k^m \ell^m$, et il existe une grande variété des formulations dans la littérature scientifique. Le modèle à deux équations le plus connu est le modèle k-ε mais on rencontre dans la pratique des nombreux modèles utilisant des équations à une autre variable que ε pour calculer l'échelle de longueur. Ces modèles ont un caractère souvent plus empirique et l'équation de ε est alors souvent construite sur des bases purement intuitives. Les raisons de ce choix peuvent provenir de la recherche d'une meilleure robustesse numérique ou la facilité d'introduction des conditions aux limites. La vitesse et l'échelle de longueur pour les modèles k-ε et k-ω sont indiquées dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2. Échelle de la vitesse et l'échelle de longueur pour les modèles k-ε et k-ω.

V	ℓ
k-ε $k^{1/2}$	$k^{3/2}/\varepsilon$
k-ω $k^{1/2}$	$k^{1/2}/\omega$

II.2.2.1 Modèle k-ε standard

Ce modèle est initialement proposé par Harlow et Nakayama (1968) [49] et ensuite complété par Jones et Launder (1972) [50], Launder et al (1972) [51], puis Launder et Spalding (1974) [52]. En plus de l'équation de continuité et des trois équations RANS, le modèle de turbulence k-ε ajoute deux équations de transport supplémentaires au système. La première est l'équation de transport de l'énergie cinétique turbulente k alors que la seconde fait intervenir ε, son taux de dissipation. Avec ces deux variables, la viscosité turbulente μ_t peut être calculée et l'équation (2.26) est entièrement définie. Les différentes équations de ce modèle sont les suivantes :

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k}{\varepsilon} \tag{2.26}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b - \rho\varepsilon - Y_M + S_k \tag{2.27}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \tag{2.28}$$

Le modèle de turbulence k-ε est largement répandu en industrie ce qui en fait probablement le modèle le mieux connu à ce jour. Il a été validé de nombreuses fois et donne d'excellents résultats pour plusieurs écoulements communs dans les applications industrielles, ce qui suffit souvent à justifier son utilisation. Par contre, comme tout modèle reposant sur l'hypothèse de Boussinesq, ce modèle est aussi connu pour être physiquement incorrect sur certaines conditions.

Les constantes déterminées empiriquement par les auteurs modèles, sont données dans le tableau 2.3.

Tableau 2.3 Les constantes du modèle k-ε standard.

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	σ_k	σ_ε	σ_t	$C_{\varepsilon 3}$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3	1.0	0.7

II.2.2.2 Modèle k-ε réalisable

Le modèle de turbulence réalisable par Shih [53] diffère de modèle k-ε standard en deux moyens importants. Premièrement il contient une nouvelle formulation de la viscosité turbulente, et deuxièmement, une nouvelle équation de transport pour, ε , est dérivé à partir d'une équation exacte pour le transport de la fonction quadratique moyenne de verticité. Dans le modèle de turbulence k-ε Réalisable, l'équation de transport de l'énergie cinétique *k* est identique à celle du modèle k-ε standard Eq. (2.27), et l'équation de transport pour ε étant donné comme :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+\rho C_1 S\,\varepsilon-C_2\rho\frac{\varepsilon^2}{k+\sqrt{\upsilon\varepsilon}}+ C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}C_{3C}G_b+S_\varepsilon \tag{2.29}$$

Dans l'équation (2.29), C_2 est une constante, tandis queC_1 est définie par :

$$C_1=\max\left[0.43,\frac{\eta}{\eta+5}\right]$$

$$\eta=S\frac{k}{\varepsilon}$$

De même que pour le modèle de turbulence de type k-ε, la viscosité turbulente est calculée en utilisant l'équation (2.26), cependant, C_μ n'est plus une constante. C_μ est calculée en utilisant l'équation suivante :

$$C_\mu=\frac{1}{A_0+A_s\dfrac{kU^*}{\varepsilon}} \tag{2.30}$$

Où

$$U^*=\sqrt{S_{ij}S_{ij}+\tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}},\qquad \tilde{\Omega}_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial\bar{u}_i}{\partial x_j}-\frac{\partial\bar{u}_j}{\partial x_i}\right)$$

Dans l'équation (2.30), A_0 est une constante qui définit par :

$A_0=\sqrt{6}\cos\phi$

Où

$$\phi=\frac{1}{3}\cos^{-1}\left(\sqrt{6}W\right),\qquad W=\frac{S_{ij}S_{jk}S_{ki}}{\tilde{S}^3},\qquad \tilde{S}=\sqrt{S_{ij}S_{ij}}$$

Les constantes appliquées dans le modèle de turbulence k-ε Réalisable sont données dans le tableau 2.4.

Tableau 2.4 Les constantes du modèle k-ε réalisable.

$C_{1\varepsilon}$	C_2	σ_k	σ_ε	A_0
1.44	1.9	1.0	1.2	4.04

II.2.2.3 Modèle RNGk-ε

Le modèle RNG, développé par le groupe de normalisation Yakhot [54] consiste en une estimation au cours du calcul de la constant $C_{1\varepsilon}$, remplacée dans l'équation de dissipation par $C_{1\varepsilon}^{'}$ donnée par l'expression (2.31). Cette expression ajoute un terme en fonction du taux de déformation η à l'équation du taux de dissipation.

$$C_{1\varepsilon}^{'} = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta\left(1-\frac{\eta}{\eta_0}\right)}{1+\beta\eta^3} \qquad (2.31)$$

Avec :

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon}\sqrt{\frac{P}{\eta_t}} \quad (2.32)$$

La différence principale entre la version k-ε standard et RNG k-εest dans l'équation du taux de la dissipation turbulente. Dans les écoulements à taux de contraintes élevés, le modèle RNG prévoit une faible viscosité turbulente (c'est-à-dire un taux de dissipation ε élevé et une production de l'énergie turbulence k faible) que le modèle standard. Bien que le modèle RNG k-εa été découvert pour faire mieux que le modèle standard pour les écoulements avec une grande courbure des lignes de courant.Les deux modèles de la turbulence k-εstandard et RNG k-εsont valides pour les écoulements turbulents loin des parois. Les constantes appliquées dans le modèle de turbulence RNG k-εsont données dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 Valeurs des constantes du modèle RNG k-ε.

C_μ	$C_{1\varepsilon}$	$C_{2\varepsilon}$	σ_ε	η_0	β
0.085	1.42	1.62	0.7179	4.38	0.015

II.2.2.4 Modèle k-ω standard

Wilcox [55] propose plutôt d'utiliser la fréquence turbulente ω (qu'il appelle specific dissipation rate) pour construire la deuxième équation de transport. On relie les variables ω et ε grâce à l'équation suivante :

$$\varepsilon = \beta^* \omega k \qquad (2.33)$$

Le choix de la fréquence turbulente comme variable est intéressant puisque l'inverse de ω définit l'échelle de temps à laquelle la dissipation de la turbulence survient. Aussi, ω est directement associé aux processus dissipatifs puisque le taux de dissipation survenant aux petites échelles est également le taux de transfert d'énergie des grandes structures vers les petites échelles. La fréquence est alors reliée aux propriétés macroscopiques par :

$$\omega \sim k^{1/2}/l \qquad (2.34)$$

L'un des avantages de la formulation k-ω est le traitement proche du mur pour des simulations à faible nombre de Reynolds. Les modèles k-ω font l'hypothèse que la viscosité de turbulence est liée à l'énergie cinétique de turbulence et à la fréquence turbulente par la relation :

$$\mu_t = \rho \frac{k}{\omega} \qquad (2.35)$$

L'énergie cinétique de turbulence, k , et le taux spécifique de dissipation, ω , sont obtenus respectivement à partir des deux équations de transport suivant :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k1}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \qquad (2.36)$$

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho U_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \alpha \frac{\omega}{k} \tau_{ij} \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right] \qquad (2.37)$$

La performance de ce modèle en présence d'un gradient de pression adverse ou d'une surface courbe est connue pour être meilleure que celle du k-ε. Comme autre avantage du modèle k-ω, Mentrer [56] mentionne sa simplicité qui le rend numériquement plus stable que

les autres modèles. Par contre, ce modèle est aussi renommé pour être très sensible à la valeur de ω_f , (la fréquence turbulente dans l'écoulement libre). Cette sensibilité a freiné l'utilisation du modèle dans plusieurs applications, notamment en aérodynamique. Finalement, les constantes du modèle adopté par ANSYS CFX sont les suivantes :

Tableau 2.6 Valeurs des constantes du modèle k-ω.

α	β	β^*	σ_{k1}	$\sigma_{\omega 1}$

0.5	0.075	0.09	2.0	2.0

II.2.2.5 Modèle SST k-ω :(Shear Stress Transport)

Afin de profiter des avantages respectifs des modèles k-εet k-ω, Menter [57] a développé une version hybride de ceux-ci. Le modèle SST (Shear Stress Transport) utilise les équations du modèle k-ω près des parois et se transforme graduellement à un modèle k-ε modifié au centre de l'écoulement. On peut imager le modèle SST comme suit :

$$SST = F1(k-\omega)+(1-F1)(k-\varepsilon) \qquad (2.38)$$

où $F_1 = 0$ au centre de l'écoulement et $F_1 = 1$ à la paroi. L'idée soutenant ce modèle est d'utiliser le bon comportement du k-ω en présence d'un gradient de pression adverse sans avoir le désavantage d'un modèle sensible aux valeurs de ω de l'écoulement libre. Pour formuler correctement ce problème, les équations du modèle k-ε sont réécrites en fonction de la fréquence turbulente ω et la définition de la viscosité turbulente est ensuite modifiée pour prendre en compte le transport de contraintes de cisaillement. L'équation de transport d'énergie cinétique turbulente est redonnée ici mais elle est équivalente à celle du modèle k-ω. Toutefois, l'équation de transport de la fréquence turbulente est modifiée :

$$\rho\frac{\partial k}{\partial t}+\rho U_j\frac{\partial k}{\partial x_j}=\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\beta^*\rho k\,\omega+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_{k3}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] \qquad (2.39)$$

$$\rho\frac{\partial \omega}{\partial t}+\rho U_j\frac{\partial \omega}{\partial x_j}=\frac{\alpha_3}{\upsilon_t}\tau_{ij}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\beta_3\rho\omega^2+\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right]+ 2\rho(1-F_1)\frac{1}{\sigma_{\omega 2}}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} \qquad (2.40)$$

Les constantes utilisées par le modèle SST sont elles aussi une transition entre les constants respectives de chacun des modèles, c'est-à-dire : $\gamma_3 = F_1\gamma_1+(1-F_1)\gamma_2$. On a donc deux groupes des constantes. Les constantes dans ANSYS CFX sont données dans le tableau 2.7.

Tableau 2.7. Valeurs des constantes du modèle SST k-ω.

Groupe 1 ($k-\omega$)	Groupe 1 ($k-\varepsilon$)

α_1	β_1	β^*	$\sigma_{\omega 1}$	σ_{k1}	α_2	β_2	β^*	$\sigma_{\omega 2}$	σ_{k2}
0.5	0.075	0.09	2.0	2.0	0.44	0.02828	0.09	1/0.856	1.0

La première fonction de transition du modèle SST, F_1, définit le modèle k-ε ou k-ω. Elle s'écrit comme suit :

$$F_1 = \tanh\left(\Phi_1^4\right) \tag{2.41}$$

Avec :

$$\Phi_1 = \min\left[\max\left(\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y};\frac{500\upsilon}{y^2\omega}\right);\frac{4\rho k}{CD_{k\omega}\sigma_{\omega 2}y^2}\right] \tag{2.42}$$

Où : y est la distance normale à la surface. Le modèle SST doit donc résoudre une équation supplémentaire pour calculer la distance de chaque nœud au mur le plus prés. Le terme $CD_{k\omega}$ est la portion positive du terme de diffusion croisée de l'équation (2.42):

$$CD_{k\omega} = \max\left(2\rho\frac{1}{\sigma_{\omega 2}}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j};10^{-10}\right) \tag{2.43}$$

Cette transition entre les modèles k-ε et k-ω n'est pas la seule caractéristique duSST. Remarquons que la viscosité cinématique turbulente ν_t apparait dans l'équation (2.40) sous la forme $\nu_t = \mu_t / \rho$. La définition de celle-ci est différente de ce qui est utilisé par les autres modèles puisqu'elle limite la valeur maximale de la viscosité pour éviter sa surévaluation :

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max\left(a_1\omega; SF_2\right)} \tag{2.44}$$

où $a_1 = 0.31$ est une constants, S est la mesure invariante du taux de déformation donnée par :

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \tag{2.45}$$

avec : $S_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$

et F_2 et la deuxième fonction de transition qui pour rôle de restreindre la limitation de ν_t à la couche limite seulement.

$$F_2 = \tanh\left(\Phi^2\right) \tag{2.46}$$

$$\Phi = \max\left(2\frac{\sqrt{k}}{0.09\omega y};\frac{500\nu}{y^2\omega}\right) \qquad (2.47)$$

Le modèle SST implémenté dans ANSYS CFX inclut donc par défaut un limiteur agissant sur la viscosité turbulente ν_t comme le montre l'équation (2.44). En plus de cela, le terme de production d'énergie cinétique turbulente est aussi limité pour prévenir l'accumulation de turbulence dans les régions de stagnation :

$$P_k = \mu_t \frac{\partial U_i}{\partial x_j}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right) \xrightarrow{devient} \tilde{P}_k = \min\left(P_k ; C_{\lim}\varepsilon\rho\right) \qquad (2.48)$$

Dans le CFX, les modèles basés sur ω utilisent par défaut un facteur limitant $C_{\lim} = 10$ alors que l'utilisation d'une limite sur le terme de production est optionnelle pour les autres modèles de turbulence.

II.3 Traitement de la paroi

Les développements de champ d'écoulement dans rue de canyon urbain sont complexes à cause de séparation de l'écoulement, le rattachement et la recirculation résultants du bâtiment obstruant le vent. Pour obtenir des résultats significatifs et numériques précises, il est important prendre en compte les forts gradients des variables de champ d'écoulement. Le traitement de la paroi est très important pour la simulation numérique d'un écoulement turbulent.

La présence d'une condition de non glissement provoque la formation d'un cisaillement dont les propriétés sont déterminantes pour la justesse de la prédiction. En effet, les forces de frottement pariétal sont fonctions des gradients de vitesse dans la couche limites et la prédiction de la séparation passe par la simulation de cette région critique. Deux méthodes sont couramment utilisées pour prendre en compte cette région critique de l'écoulement. La première approche consiste à résoudre les équations de Navier-Stockes jusqu'à la paroi solide sur laquelle la condition limite est appliquée. L'autre alternative pouvant être envisagée est d'arrêter le calcul à une certaine distance de la frontière et d'utiliser une loi de paroi pour faire le lien entre la région calculée et le mur. Dans ce cas, la loi de paroi ne sert pas à résoudre l'écoulement mais plutôt à calculer les conditions limites appropriées devant s'appliquer au premier nœud. On exprime la distance à la paroi par la variable adimensionnelle y^+.

L'approche y^+ fournit des conseils dans le choix d'une configuration appropriée de la grille et le modèle de turbulence dans des investigations de CFD sur des écoulements turbulents liés par mur. Dans ANSYS CFX propose deux approches de modélisation des régions proches de la paroi. Dans la première approche consiste à ne pas résoudre l'écoulement dans les régions de la sous-couche visqueuse et couche tampon et d'appliquer des fonctions empiriques dites fonction de paroi. Cependant, l'utilisation de ces fonctions exige la modification et l'adaptation des modèles de turbulence pour tenir compte de la présence des parois dans l'écoulement. Dans la deuxième approche, les modèles de turbulence sont adaptés afin de résoudre toutes les sous-couches y compris la sous-couche visqueuse, cette approche appelée modélisation proche de la paroi nécessite un maillage très raffiné près des parois. Ces deux approches sont illustrées schématiquement sur la FigII-3.

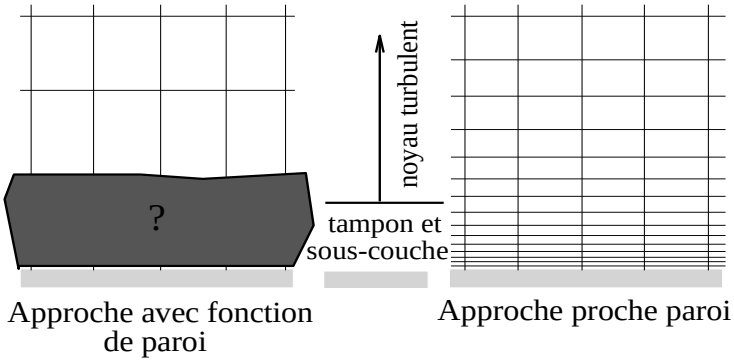


Figure II-3. Modélisation de la couche limite.

La valeur de y^+ est une distance non-dimensionnelle semblable à un nombre de Reynolds local. Dans le cadre de CFD, il est utilisé pour décrire comment grossière ou raffiné un maillage. Il détermine si les influences dans les cellules de la paroi adjacent sont laminaires, transitoire ou turbulent, donc indiquer la partie de la couche limite turbulente qui est résolu par ANSYS CFX. Il est décrit comme :

$$u^+ = \frac{u}{u_*}, \qquad y^+ = \frac{u_* y}{\nu} \tag{2.49}$$

où $u_* = \sqrt{|\tau_\omega| / \rho}$ est la vitesse de frottement, τ_ω étant le cisaillement pariétal. Le profil de vitesse typiquement retrouvé près de la paroi est illustré à la Fig II-4. Comme on peut le voir à la Fig 04, il existe différentes zones qui sont représentées par différentes fonctions ou lois de paroi.

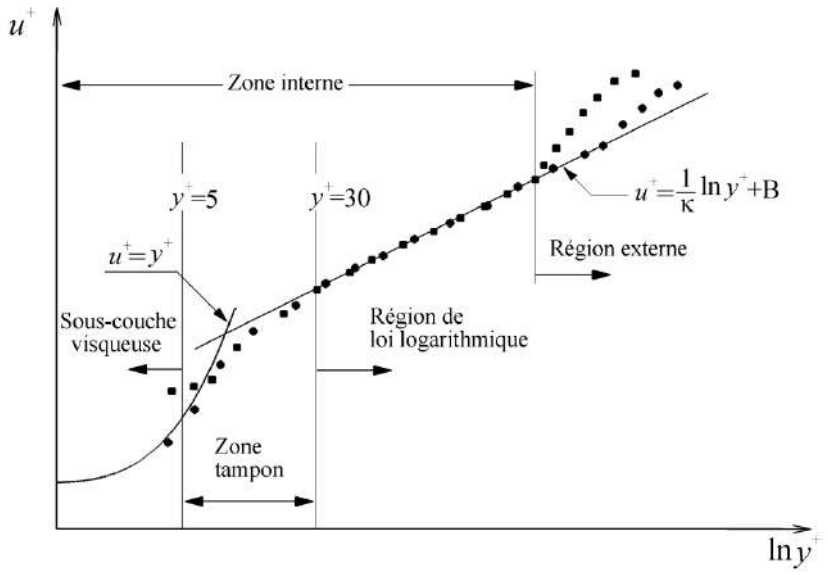


Figure II-4. Subdivisions de la région près de la paroi.

Dans la sous-couche visqueuse ($0 \leq y^+ < 5$), l'écoulement est laminaire et la viscosité moléculaire joue un rôle important. Il supposé que la contrainte de cisaillement est constantes et environ égale à la contrainte τ_w , soit :

$$\tau(y) = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \cong \tau_w \qquad (2.50)$$

On déduire donc que dans cette zone

$$u^+ = y^+ \qquad (2.51)$$

La zone intermédiaire ($5 \leq y^+ < 30$), dans cette couche dite zone tampon, les effets de la viscosité moléculaire et de la turbulence sont d'égales importances. On définit une fonction qui assure la continuité entre la loi de la sous couche visqueuse et la région à la loi logarithmique qui s'écrit :

$$u^+ = \frac{U_t}{u_*} = \frac{1}{\kappa}\ln y^+ - B_1 \qquad (2.52)$$

La couche pleinement turbulente$y^+ > 30$, c'est la zone éloignée de la paroi dans laquelle l'écoulement est conditionné par la vitesse maximale et il est peu influencé par les effets de la viscosité moléculaire. L'écoulement suit une loi logarithmique de la forme :

$$u^+ = \frac{1}{\kappa}\ln y^+ + B_2 \qquad (2.53)$$

avec κ est la constante de Von Karman, B_1 et B_2 sont des constantes d'intégration, selon Graf et Altinakar (1991), $\kappa = 0.41$, $B_1 = 3.05$ et $B_2 = 5.5$.

Les calculs faits avec le modèle de turbulence k-ε standard utilisent généralement l'approche de la loi de paroi puisque, comme Wilcox [55] le démontre, les résultats obtenus avec ce modèle ne sont pas satisfaisant à proximité d'un mur. En k-ε, le premier point de calcul de maillage doit donc être situé au-dessus de $y^+ \approx 30$, dans la région logarithmique illustrée sur la Fig 2.4. Un avantage de cette technique est qu'elle ne nécessite pas un maillage très raffiné près des parois solides car lorsque le nombre de Reynolds est grand, la couche limite qui se forme près des murs est très mince et sa résolution requiert un grand nombre de cellules de calculs. Ce problème ne se pose pas si on utilise la loi de paroi mais désavantage de cette méthode est son inapplicabilité dans les régions d'écoulements séparés, dans les recirculations et surtout près des points de décollement et de rattachement puisque les conditions ayant servi à la formulation de la loi de paroi ne sont pas respectées, comme le font remarquer Ferziger [58].

Le modèle SST k-ω se comporte quant à lui beaucoup mieux en paroi et il est habituel de l'utiliser pour résoudre en détail l'écoulement à traverse la sous couche visqueuse, jusqu'au mur. Le premier nœud de maillage est situé à $y^+ < 2$ pour que la couche limite soit bien prise en compte. Le Fig 4.2 montre que la sous-couche visqueuse se rend jusqu'à $y^+ = 5$ mais l'utilisation d'une valeur plus petite a comme avantage d'aider à ce qu'un nombre suffisant de nœud se retrouvent à l'intérieur de la couche limite.

Dans ANSYS CFX, il est possible de travailler avec ou sans loi de paroi. Plusieurs fonctionnalités ont été intégrées au code de façon à faciliter son utilisation. Ainsi dans certain cas le solveur peut outrepasser ce qui avait été initialement prescrit par l'utilisateur. D'un autre côté, d'autres fonctionnalités permettent d'utiliser des lois de paroi seulement dans certaines parties d'un même calcul, ce qui peut s'avérer très utile.

La fonctionnalité « *scalable wall fonction* », utilisée avec le modèle k-ε permet d'utiliser pratiquement n'importe quelle distribution d'éléments près de la paroi. Comme cela été vu à la Fig 2.4, la loi logarithmique est valide au-delà de $y^+ = 30$.

Dans le cas du modèle SST k-ω, l'option « *automatic wall treatement* » permet de coupler la résolution jusqu'à la paroi avec l'utilisation d'une loi de paroi au sein d'un même calcul. De cette façon, l'utilisateur peut décider de traiter les parois critiques en utilisant un

maillage très fin $y^+ \approx 1$ et les autres parois avec un maillage plus grossier $y^+ \approx 30$. Qui plus et la formulation permet de faire la transition pour une même paroi selon la résolution locale du maillage.

Les principaux résultats et conclusion basées sur l'approche de y^+ dans la détermination de la configuration du maillage et le modèle de turbulence le plus approprié sont discutés et présentés dans la section prochaine. Cela comprend la discussion sur le traitement proche de la paroi pour toute étude générique de gestion des écoulements turbulent sur des surfaces rugueuses. L'approche y^+ n'est pas connue a priori et nécessite d'abord de construits quelques maillages suivis par des simulations à l'aide de modèle de turbulence. Une fois que la solution a converge, la valeur de y^+ est calculée et la résolution de la grille est accessible pour voir s'il est approprié en fonction du nombre de Reynolds de l'écoulement principal. Le choix du modèle de turbulence et de traitement proche de la paroi à appliquer et alors décider.

CHAPITRE III

ETUDE NUMERIQUE DE L'ECOULEMENT

III.1 Etapes d'utilisation du mailleur ICEM

C'est un pré processeur intégré pour l'analyse en CFD (computation fluide Dynamics).

Il est utilisé pour construire une géométrie et générer son maillage.

Les options de génération de maillage de ICEM offrent une flexibilité de choix. La

Géométrie peut être décomposé en plusieurs parties pour générer un maillage structuré, sinon ICEM génère automatique un maillage non structure adapté au type de géométrie construite.

Les défauts sont détectés à l'aide de son interface comportant plusieurs fenetresd'outils de création, génération, vérification du maillage du modèle étudié et l'incorporation des conditions aux limites.

Dans le présent travail, ICEM offre cette possibilité de définir des obstacles carré, créer un volume représentent le domaine d'étude et générer son maillage.

III.1.1 Ouverture du programme, emplacement disque de travail et sauvegarde :

Pour une première étape est la mise en marche

a. Allez dans le menu, tous programmes :

Choisis < ansys 15.0 <Meshring <

b. Double –clique sur cette dernière pour lancer ICEM.

c. La zone de travail et les onglets d'options :

C'est dans cette zone que sera affiché le résultat du travail, la navigation s'y fait au moyen de la souris

- ✓ Clic gauche maintenu=rotation libre de l'image.
- ✓ Clic droit maintenu +haut/base=zoom centré.
- ✓ Clic droit maintenu+gauche/droit=rotation suivant l'axe sortant.
- ✓ Molette haut/bas=zoom.
- ✓ Clic central/molette=déplacement dans le plan.

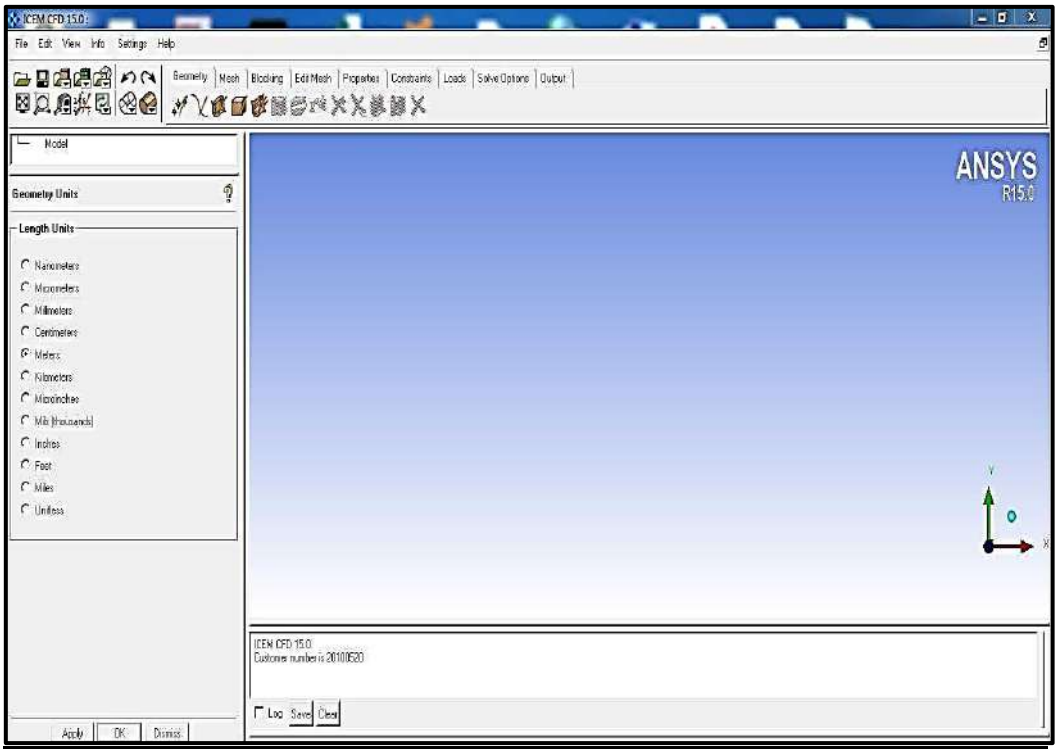


Figure III-1 :Fenêtre d'accueil d'ICEM CFD

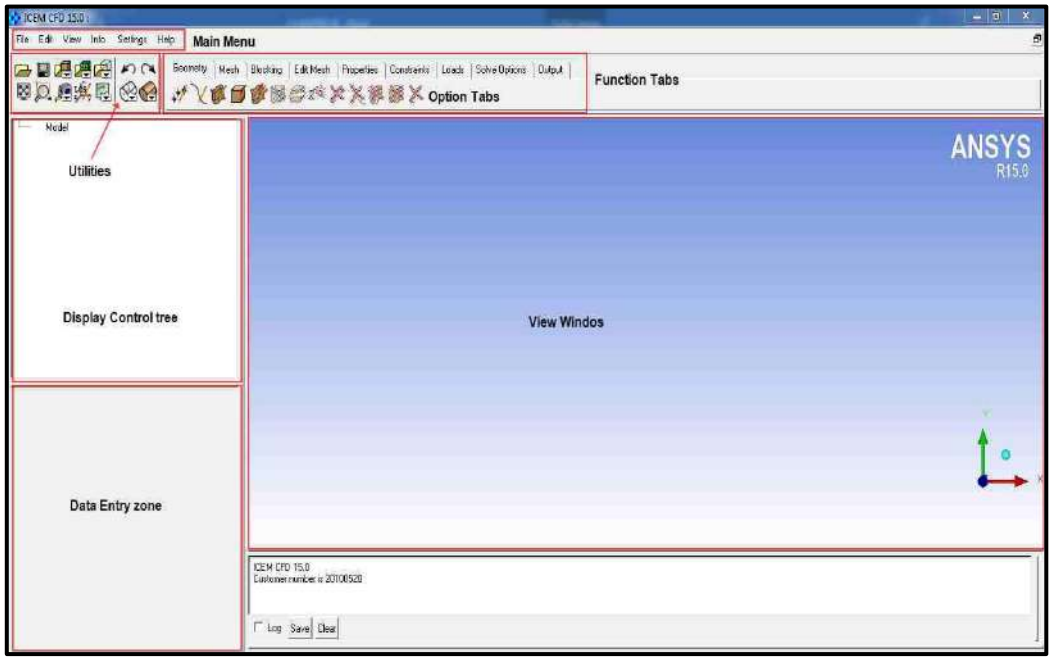


Figure III-2:Zone de visualisation / travail

Pour revenir à un normée il suffit de cliquer sur un des axes :

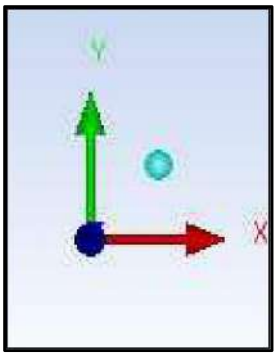


Figure III-3 :Axe x, y, z

- **III.1.1.2 : Choix de l'emplacement de travail**

Afin d'éviter des erreurs lors des sauvegardes ou lors de la création du ficher pour le maillage

Il faut s'assurer que le logiciel stock ses fichiers sur un disque ou l'on possède les droit d'accès et de modification.

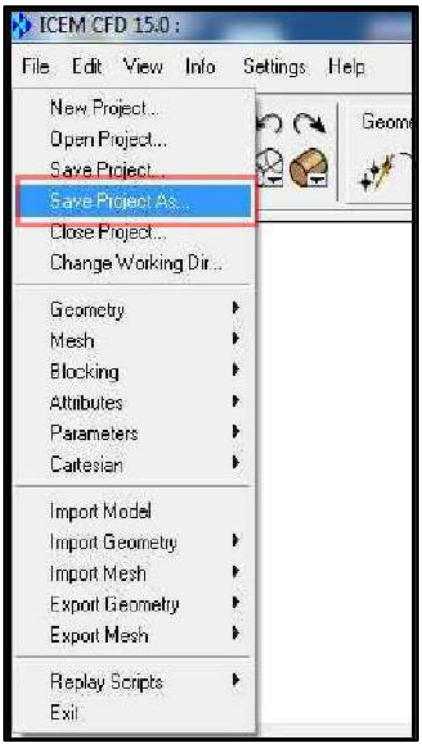


Figure III-4 : Save projet as…

III.1.1.3 :création un Géométrie

Choisir la **«géométrie »**de l'option **Tabs,** la géométrie sera créé dans les unités métriques **(mm** ou **m)**



Figure III-5 : onglet de travail

- **III.1.1.4 : création des points :**

  Dans la géométrie on choisir**«creat point» de l'option Tabs ,le nouveau sidebar est ouvert**  **.**

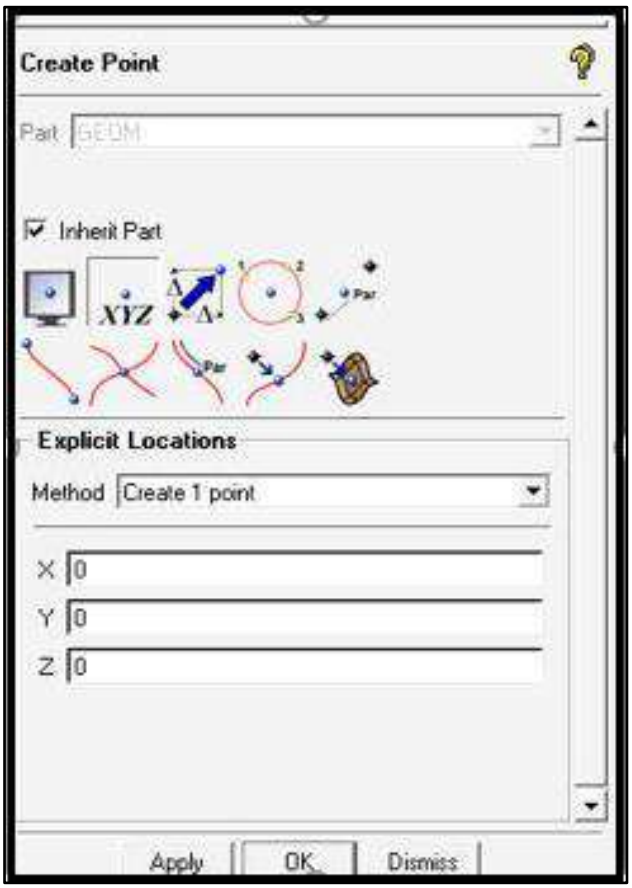


Figure III-6 :boite de dialogue pour la création de point

Coord /point	Pnt 01	Pnt 02	Pnt 03	Pnt 04	Pnt 05	Pnt 06	Pnt 07	Pnt 08	Pnt 09	Pnt 10	Pnt 11	Pnt 12
X	0	0	4	4	1.28	1.28	1.12	1.12	0.96	0.96	0.8	0.8
Y	0	1.6	1.6	0	0	0.16	0.16	0	0	0.16	0.16	0
Z	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6

TableauIII-1 : représente les point et les coordonnées.

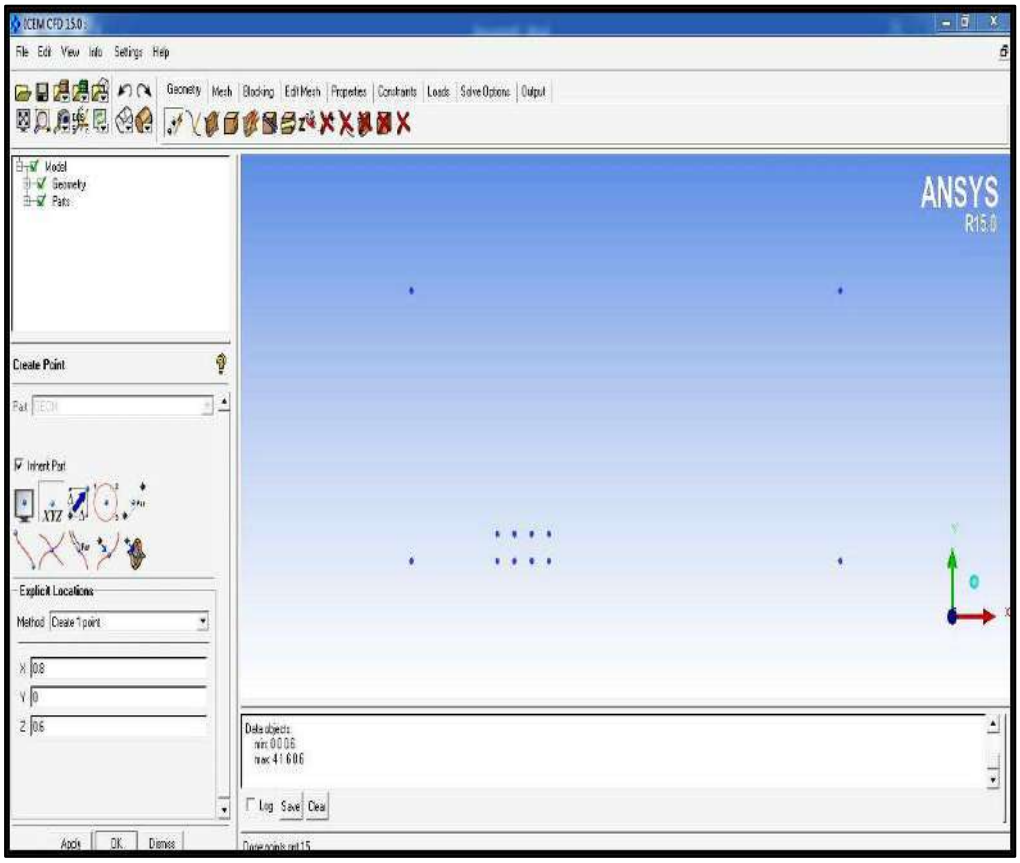


Figure III-7 : visualisation point

➢ III.1.1.5 la nomination des point «Show Point Names» :

Nous souhaitons maintenant montre les noms des points pour une consultation plus facile. Pour faire ceci, choisir le signe « + » à côté du mot la « géométrie » dans l'arbre modèle, puis clique droit le mot «point» et choisir «Show Point Names »

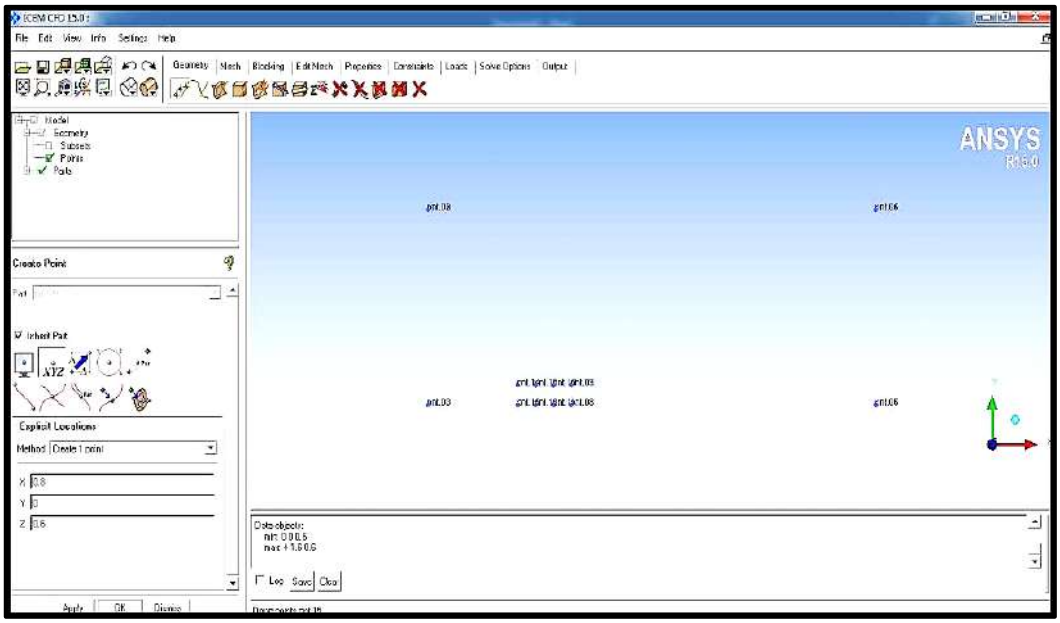


Figure III-8 : la nomination des points

➢ III.1.1.6 création de lignes :

Toujours dans 

on choisis 

Boite de dialogue suivante s'ouvre en base à gauche :

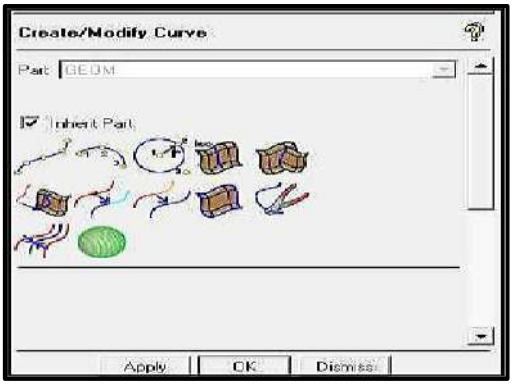


Figure III-9 :boite de dialogue création / édition de lignes

Icone  nous permet de tracer des lignes suivant des points et  permet l'ouverture dans la zone de travail de la :



Figure III-10 :boite de dialogue

Mais aussi de l'apparition du texte suivant en bas à gauche :

Select locations with left button, middle=done, right=cancel

Il est donc possible via la souris de :

- Sélectionner un point par le clic gauche
- Désélectionner le dernier point choisi par le clic droit
- Valider la sélection de point par le clic central/molette par la création de la ligne

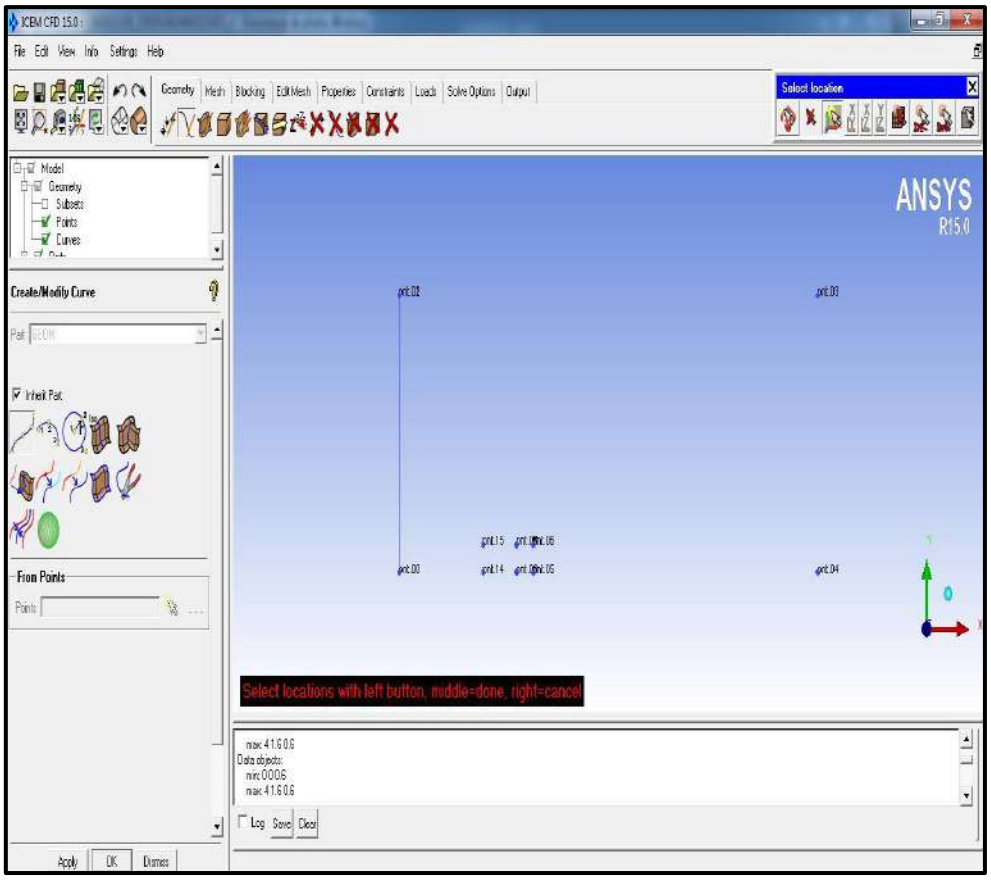


Figure III-11 : création des lignes

Après avoir créé tous les ligne on obtient la figure suivant :

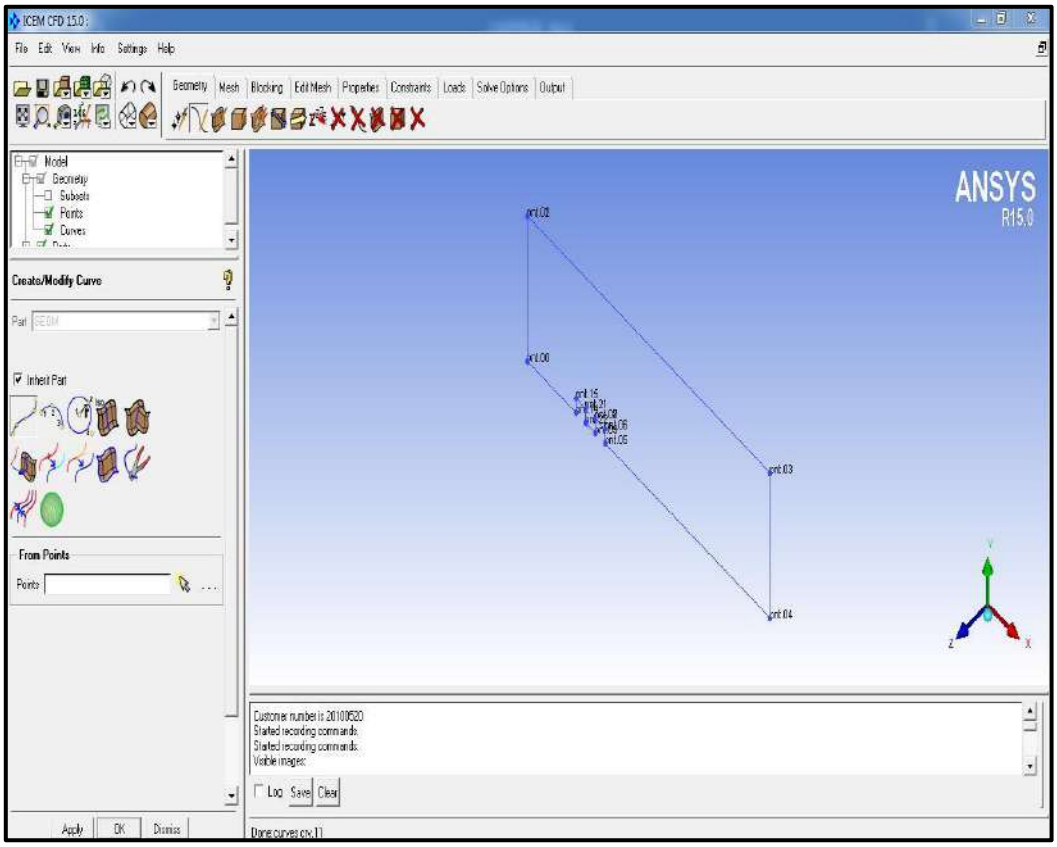


Figure III-12 : création des lignes final.

- **III.1.1.7 créé le bloc**

a. Créer un bloc initial

Choisir « create block » des option Tabs. Le nouveau SIDIBAR est ouvert :



Figure III-13: SIDEBAR.

Blocking >create blocks  **> initialize blocks** 

a) Cliquez sur  dans la barre **Data entry zone**
b) Cliquez sur le bouton gauche de la souris et sélectionnez tous les bords jusqu'à ce qu'il devienne noir
c) Cliquez sur **Apply**

On obtient la figure suivante

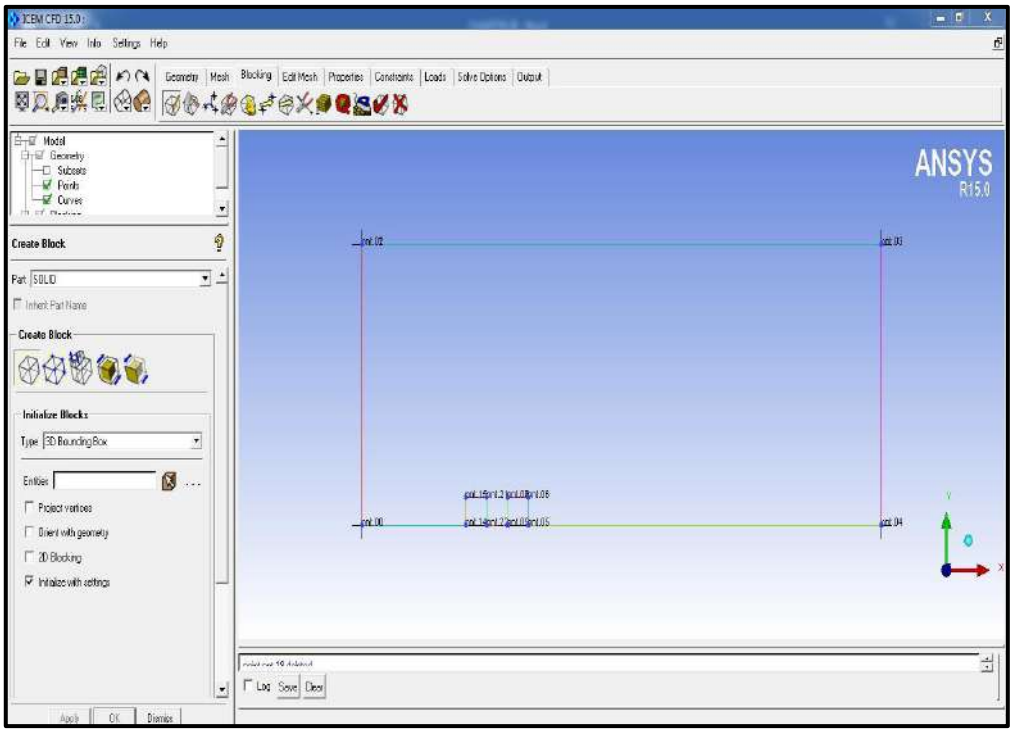


Figure III-14: block initial

- **III.1.1.8 créer des sous blocs :**

Dans cette étape on devise le bloc initial en plusieurs « split block »

Blocking > split block  **> split block** 

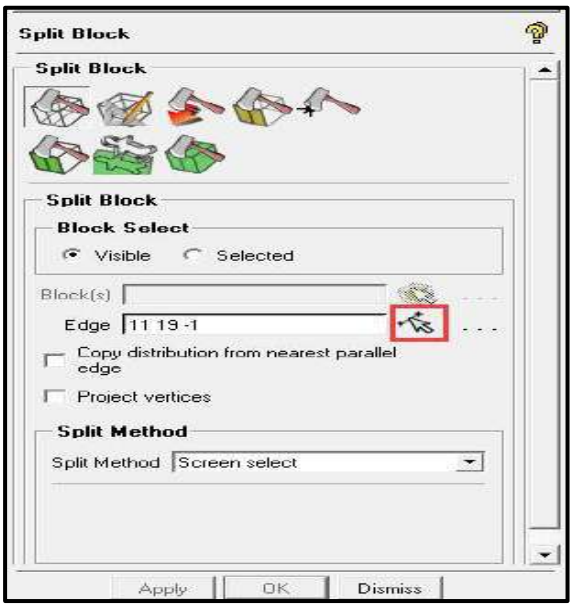


Figure III-15 :créer SPLIT BLOCK.

On obtient la figure suivante :

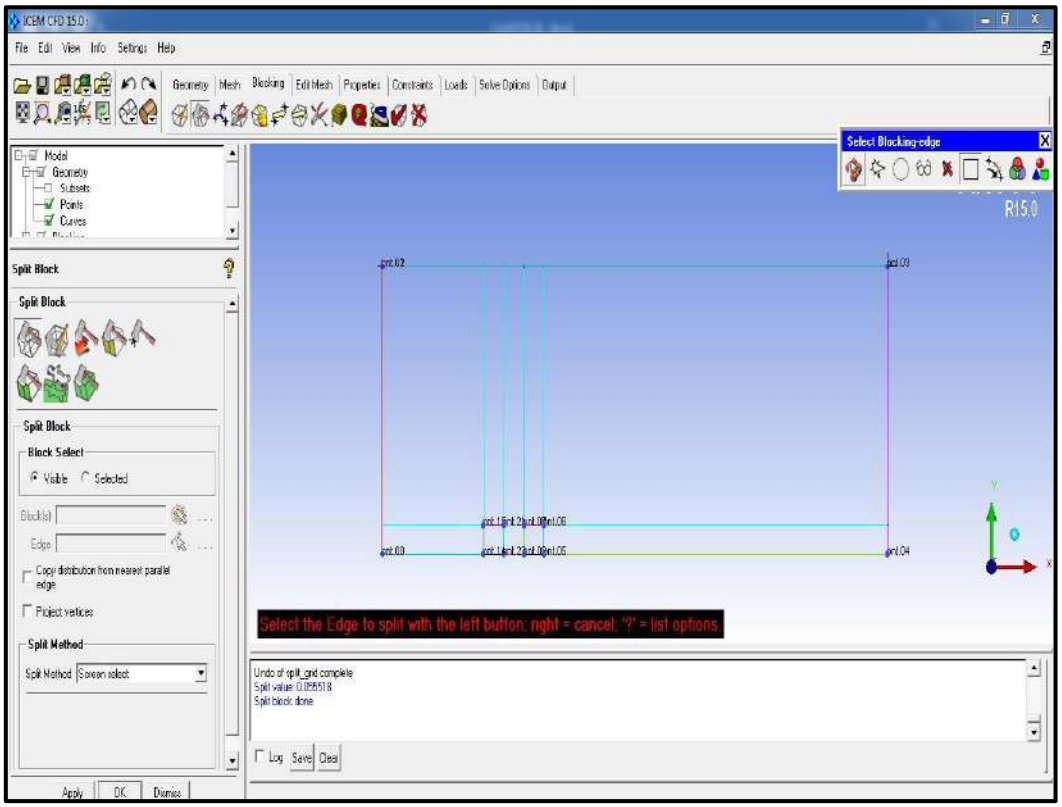
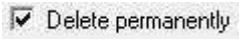


Figure III-16 : 10 sous block.

- **III.1.1.9 Effacer un bloc**

Dans chaque géométrie il se trouve des endroits « bloc » ou on n'aura pas besoin, une surface en plus ou bien elle rentre pas dans la simulation, alors on doit supprimer ce bloc.

Blocking > delet blocks  **> select block (s)** 

a. Assurerle paramètre supprimer 

b. On clique sur le bloc sélectionné 

c. Avec sur le bouton au milieu de la souri pour pouvoir supprimer le bloc.

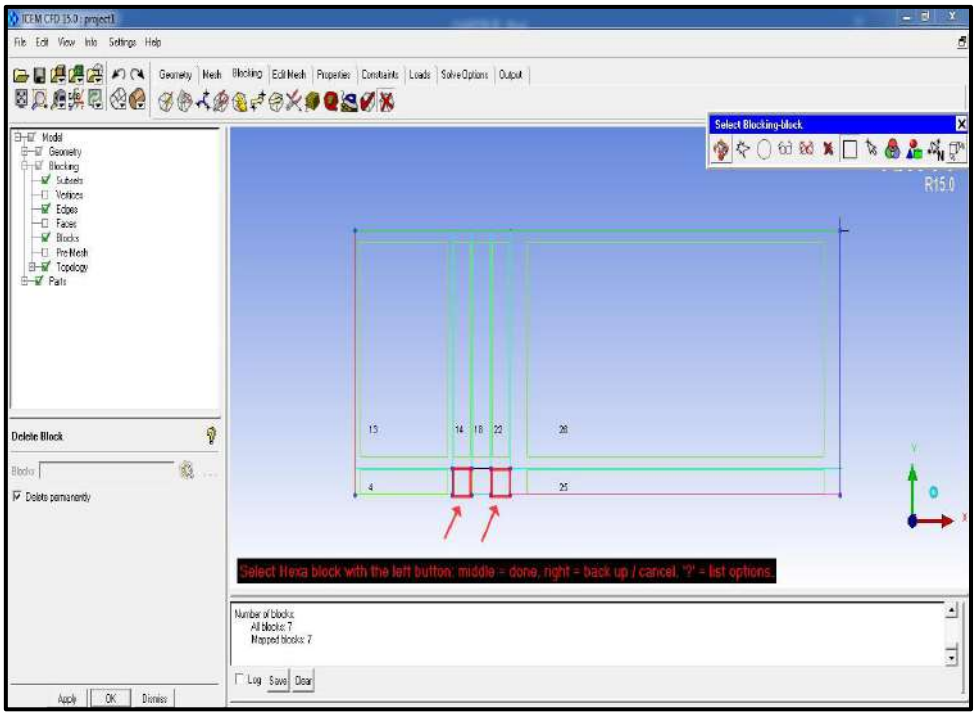


Figure III-17 : supprimer un bloc

III.1.1.10 Associe les lignes au courbes

Blocking > Associate  **> Associate edge to curve** 

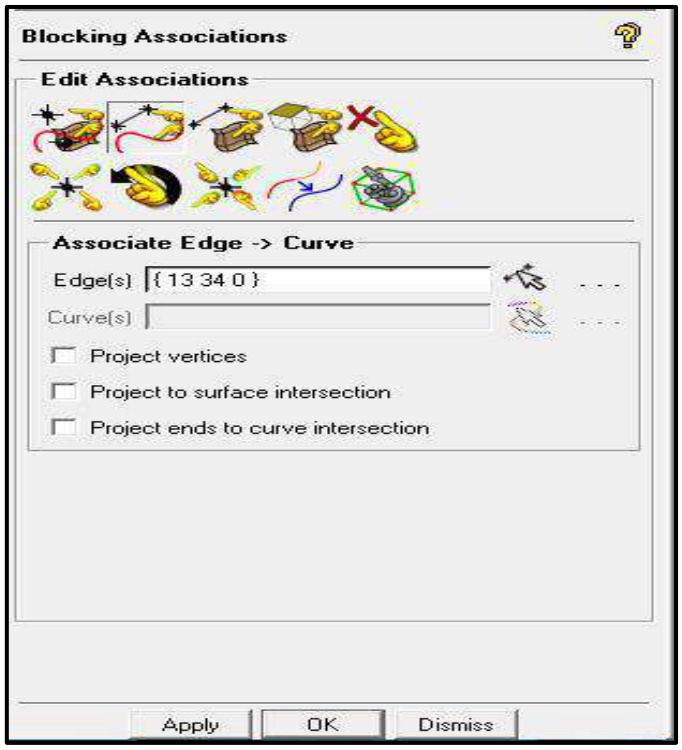


Figure III-18 : Blocking Associations

a) Assurer que le **projecte vertices** sue le sidebar à gauche, est désactivé.

b) Cliquez sur et sélectionnez bord de la ligne. Cliquez sur le bouton central de la souris pour accepter la sélection.

c) Cliquez sur (sélectionnez compcurve (s)) et sélectionnez la courbe et cliquez sur le bouton central de la souris pour accepter la sélection.

d) Cliquez sur Apply pour valider.

Les ligne (edgeassocié) serrant d'un couleur vert.

III.1.1.11 généré le maillage

Blocking > Pre-Mesh Params Edge Params

a. Cliquer sur et sélectionner la ligne (Edge)

b. Faire rentrer les nombres de nœuds désirés Ex : 50, cliquer sur Apply

c. On choisit le choix (hyperbolic) dans la case **mesh law.**

d. Faire rentre tous les paramètres et cliquer ok.

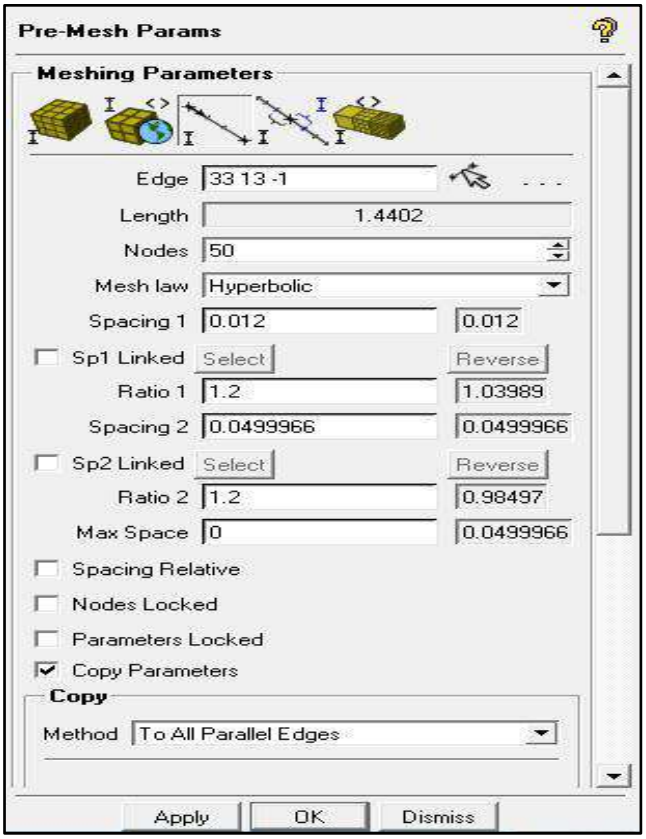


Figure III-19 : Paramètres des ligne **« Edge »**

e) Active le **Pre-Mesh**dans la bar **Display control tree**

f) Montrez-nous une nouvelle fenêtre, cliquez **yes**

g) Activé **project Edge** dans la meme bar cliquez sur **pre-Mesh** avec le bouton droit de la souris et cliquez sur **project Edge > yes**

h) Cliquez bouton droit de la souris**pre-Mesh** >covert to MultiBlock Mesh>yes

Nous allons réaliser 3 maillage

- ❖ Maillage grossier
- ❖ Maillage moyen
- ❖ Maillage fin

III.1.1.12 sauvegarder le projet

a) Sur la bar **Function tabs** choisir **Output**>**select solver**  et remplir le champ vide de **Output solver** par « **CFX-4** » et le champ **common structural solver** par « ANSYS

b) Cliquez sur Aplly

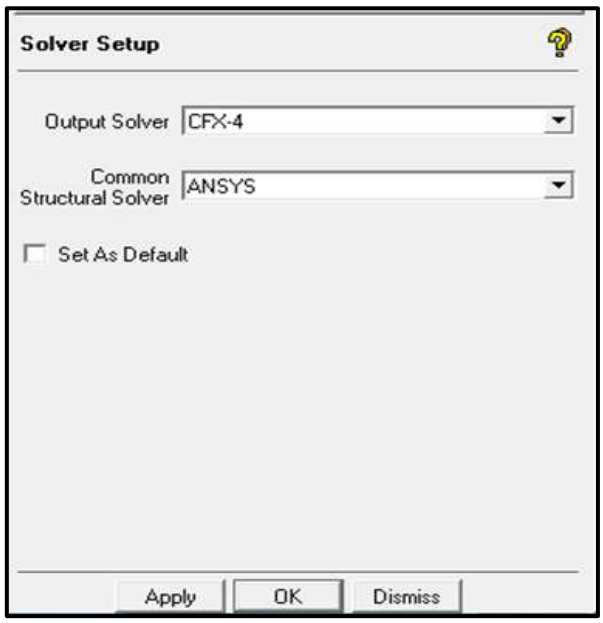


Figure III-20 **:**Select solver

a) Choisir **« writeimput »** sur la bar **OPTION BOTTON**

Output >Write imput 

b) Montrez-nous une nouvelle fenêtre



Figure III-21 **:** save current projet first.

c) Cliquez ok

d) Une nouvelle fenêtre boit de dialogue sur le titre « CFX4 » apparaitra. Mettre en place et placer « Thichness (only for planer 2D grids) » est de 0.6 pour notre cas

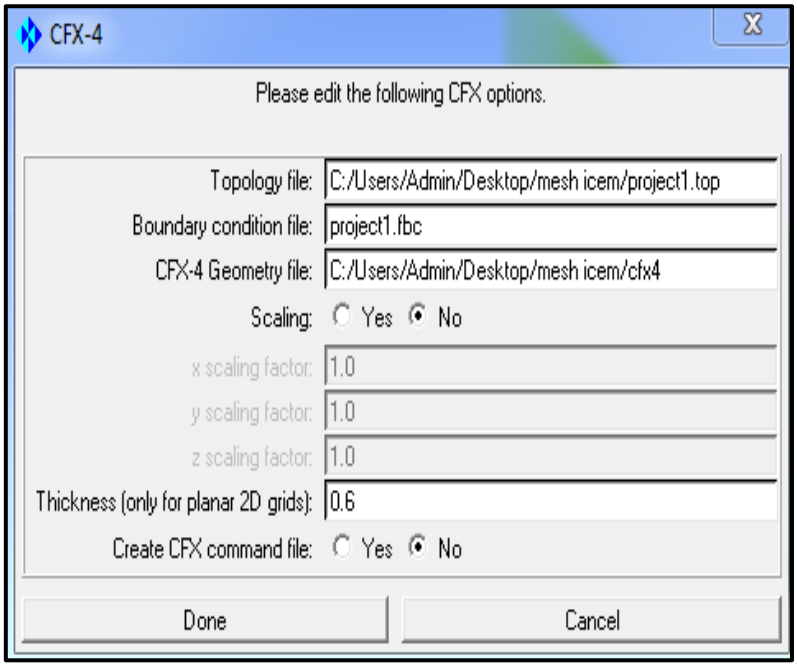


Figure III-22 **:** CFX Option.

e) Cliquer sur « Done »

III.1.2 importe le maillage vers le solver CFX

Le code CFX et un code de CFD commercial, sans option bidimensionnelle ayant des champs d'application assez vastes.

L'un des avantages de CFX est qu'il résout les trois dimensions spatiales, permettant ainsi de simuler des problèmes de géométries qui ne sont pas nécessairement 2D ou Simplifiable on deux dimension. Ceci ouvre la porte à la résolution de problème plus près de la réalité des géomètres industrielle.

Par contre, l'un de ses désavantages est qu'il fonction en trois dimension, nécessitant des maillages avec plus d'élément qu'un calcule en deus dimension spatial pour

Obtenir une précision similaire. Ceci a pour effet d'longer beaucoup les temps de calcule, ou de réduire la précision des résultats.

Mettre en place une simulation à l'aide d'ANSYS CFX se fait en trois étapes :

- **CFX-Pre :** pour construire une géomètre et générer sont maillage, ainsi que l'incorporation des conditions aux limites.
- **CFX-solver :** qui résout les équations et afficher les différents résidus à chaque itération.
- **CFX-Post :** ou l'on exploite les résultats.

III.1.2.1 FCX-Pre :

Nous allons présenter la procédure suivie pour réaliser une simulation avec CFX.

Démarrer > tous les programme > Ansys 15.0 > Workbench 15.0 > CFX.

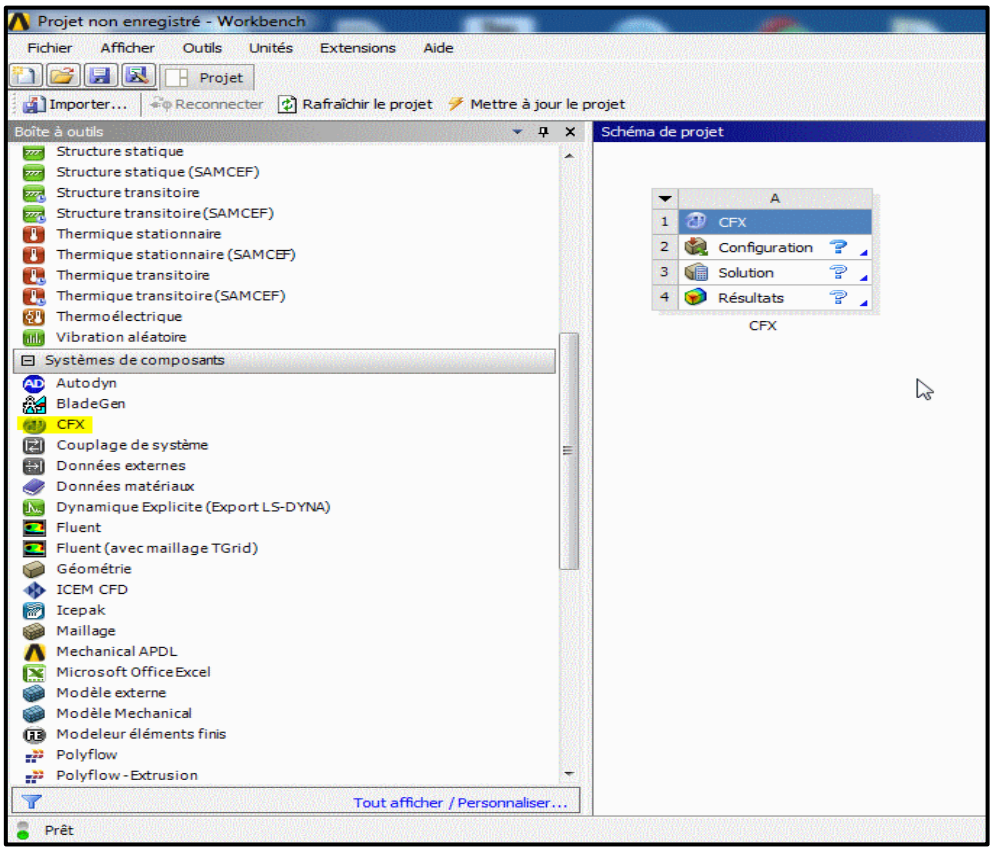
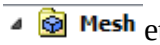


Figure III-23 : CFX.

III.1.2.2 la configuration :

- Import une Mesh cliquer sur configuration, à l'aide du bouton gauche de la souris cliquer sur l'icône de Mesh 

et choisir **ImportnMesh**et **CFX-4** puis on recherche le maillage au format **CFX-4(*geo).**

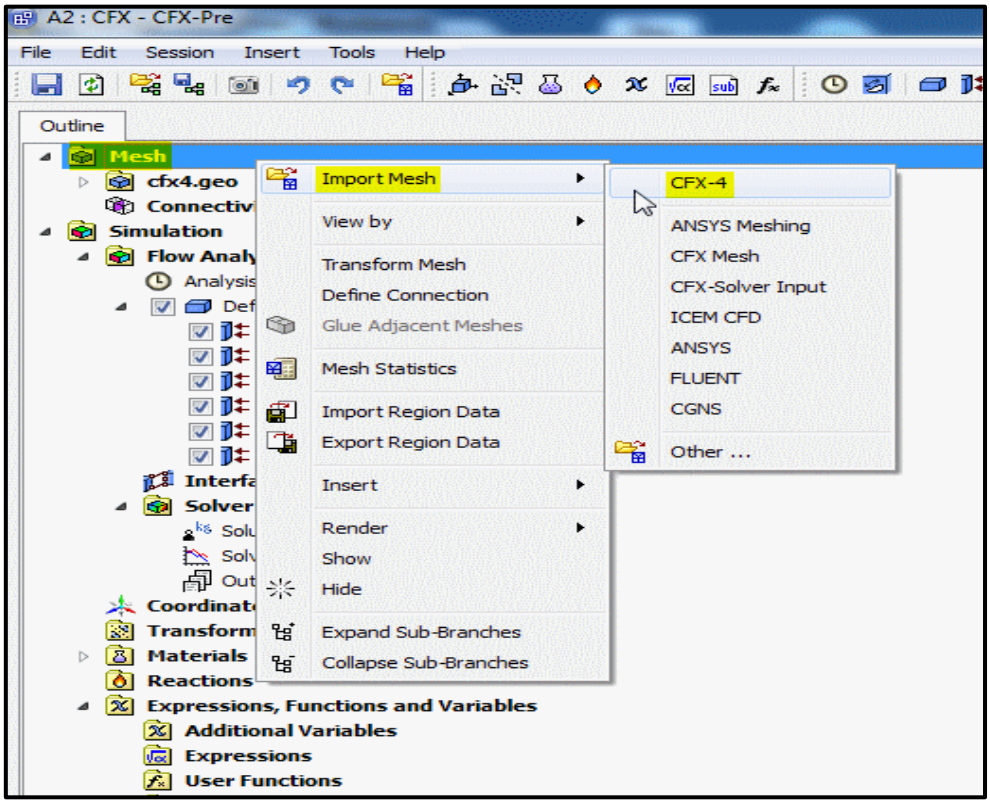


Figure III- 24 : Import maillage au CFX.

Après import Mesh, cliquer sur le petit triangle à coté de **cfx4.geo** avec le bouton droit droite de la souris cliquer sur 

puis cliquer sur **Edit Mesh**

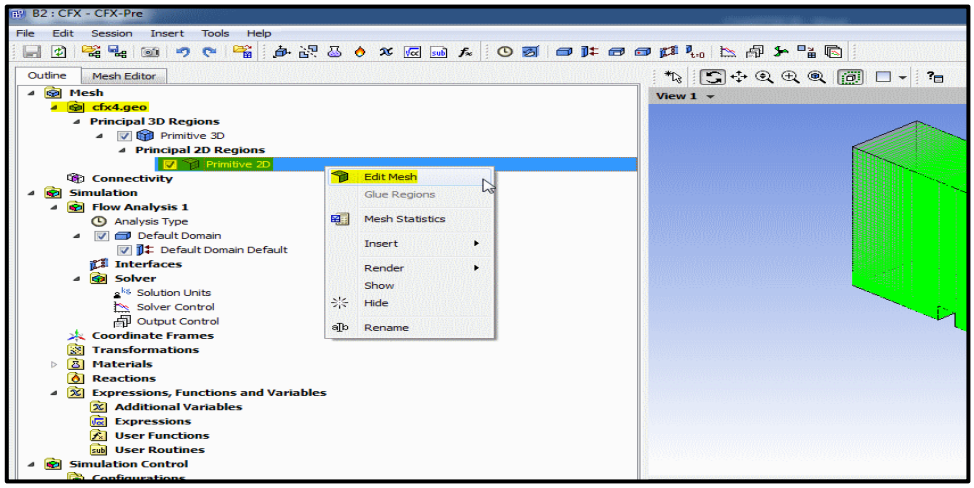


Figure III- 25 :Edit Mesh.

Poursélectionner la surface, dans l'onglet **MoveFace To Optios** on crée le nom de la surface par exemple l'entré « INLET »

Puiscliquer sur l'icône**Start Picking,** et cliquer aussi sur le petite triangle à côte de **SingleSelect** et choisir **FloodSelect** Flood Select puis cliquer sur la surface de l'entré et cliquer sur Aplly.

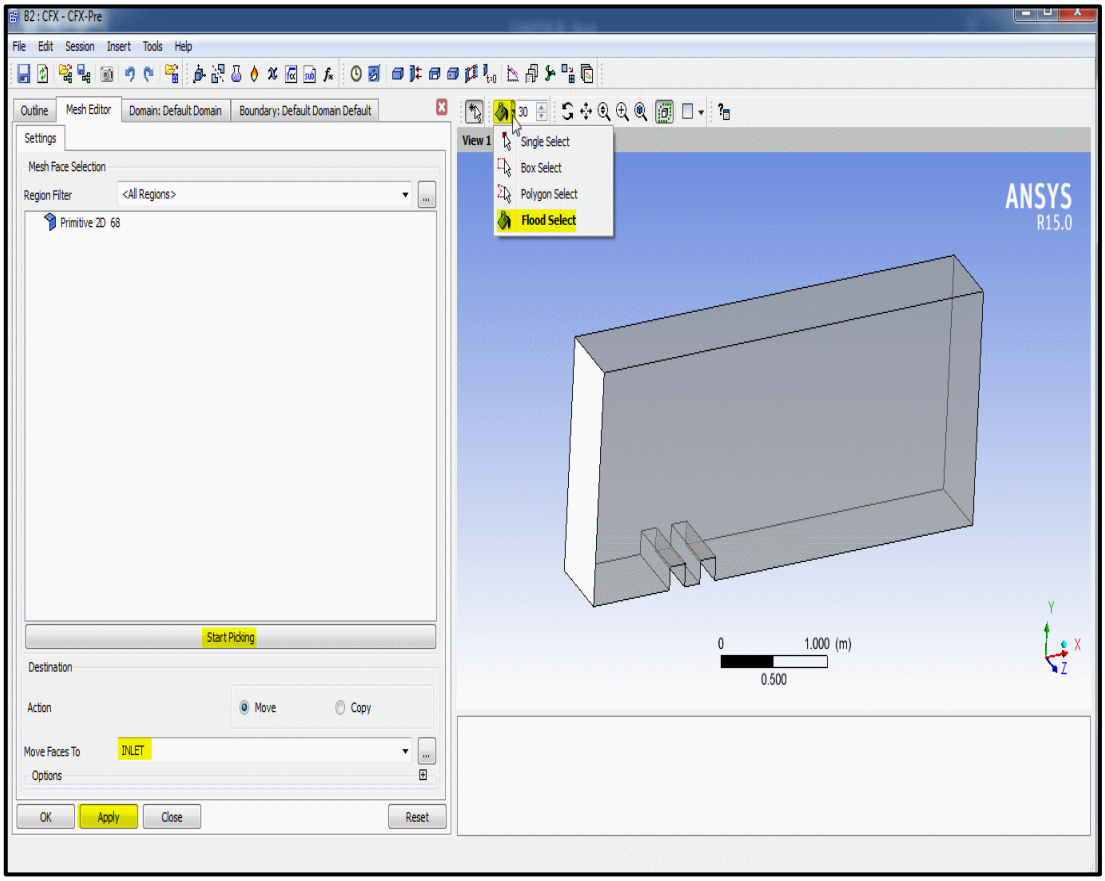


Figure III- 26 :Flood select

Le même processus pour le reste des surfaces « OUTLET « si la surface de sortie », SYMMETRY1 « la surface de face», SYMMETRY2 « la surface de l'arrière », SYMMETRY3 « la surface de la haute», etWALL « les surfaces de la base » et enfin cliquer sur Ok

- On commence avec **Create a Domain** Fuide on crée un domaine que l'on nomme **Fluide,** apparaissent alors les détails de ce domaine
  - Basic settings

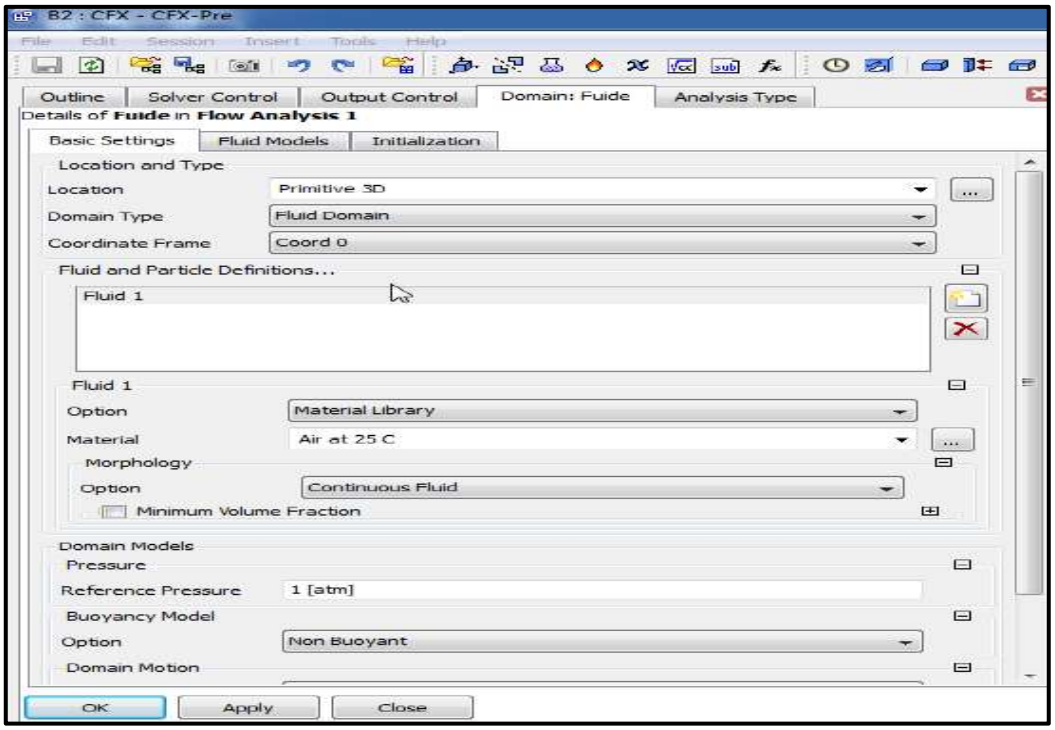


Figure III- 27 : basic setting

- Fluid Models

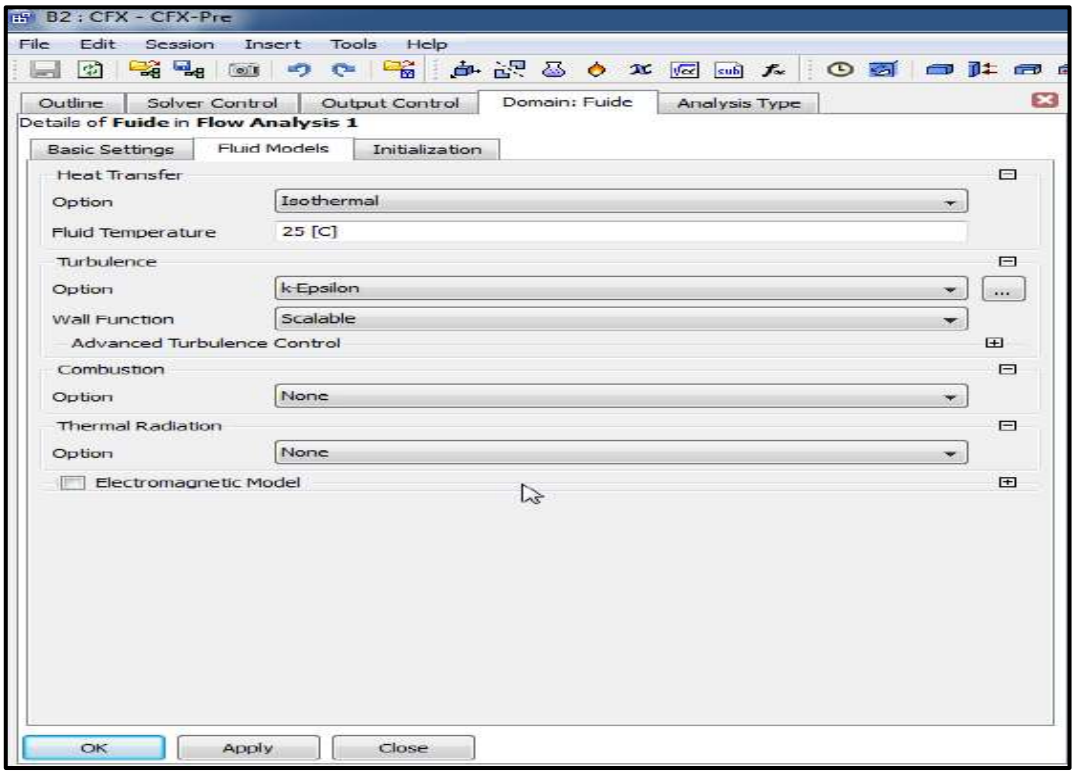


Figure III- 28 : Fluid Models

Vérifier que le model de Turbulence c'est **k-ε**

Cliquer sur **Apply> OK**

- Inséré les expressions et les fonctions de **K** et **Ɛ** et profile de vitesse **v**

❖ **User Function** de Profile de vitesse **v**

Expressions, Functions and Variables > User Functioncliquez avec bouton droit de la souris>**Insert > User Function > Name** >on crée le nom de la fonction**Unite**et cliquez OK

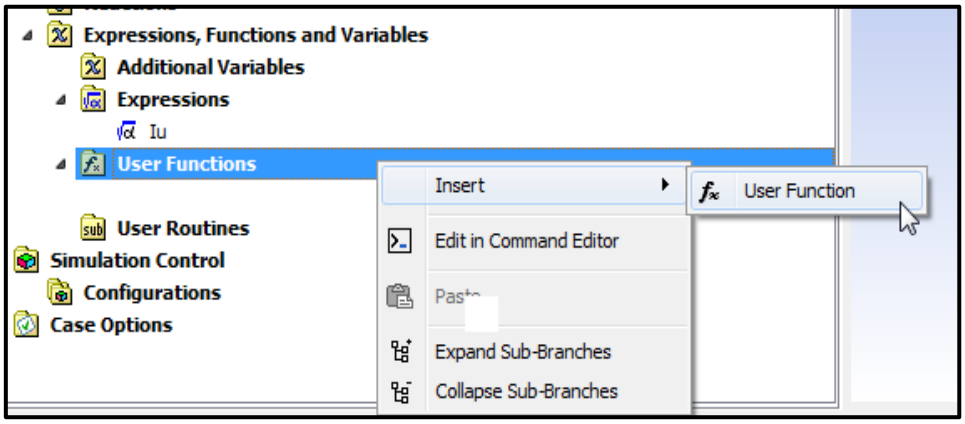


Figure III- 29 : User Function.

Montrez-nous une autre interface**basic settings**

- **Argument Units:** [m]
- **Result Units:**[m s^-1]
- **Interpolation Data > Tree dimensional**
- Cliquez avec le bouton droit de la souris dans la fenêtre >**Import Data**

  Et importer le profil de vitesse

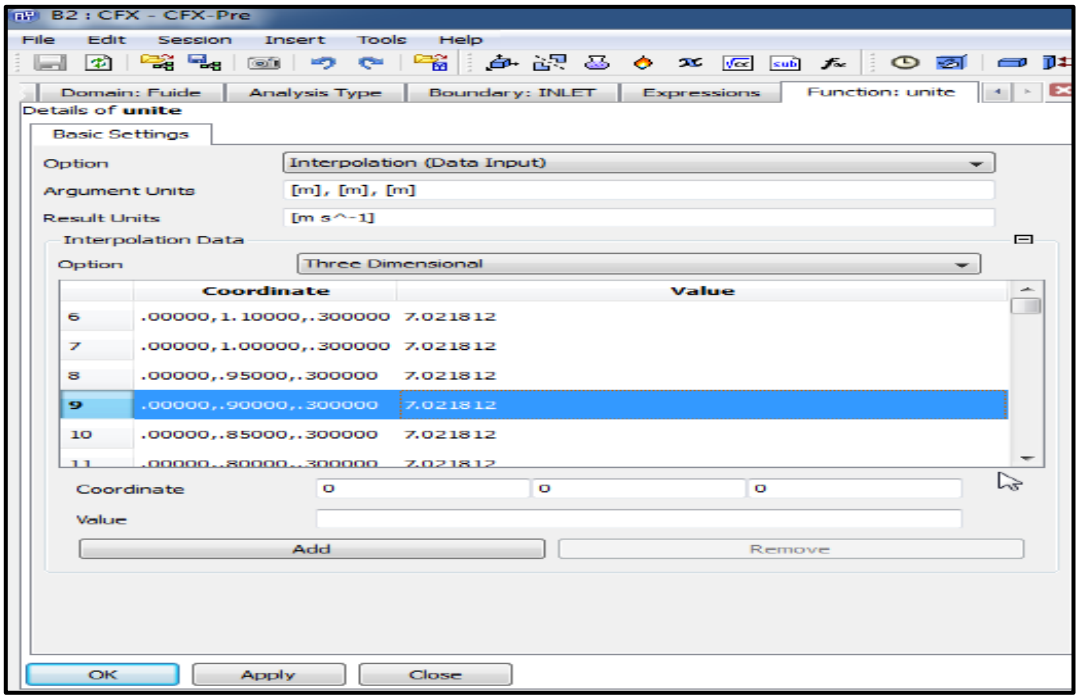


Figure III- 30: details of unite

- Cliquez sur Apply puis OK

❖ **Création d'une expression**

- Cliquez avec le bouton droit de la souris sur **Expressions > insert > Expression**
- On crée le nome de l'expression **Iu > OK**
- Dans la fenêtre**Details of Iu definition**Cliquez avec le bouton droit de la souris>**Functions** >**User**> et cliquez sur **Unite**

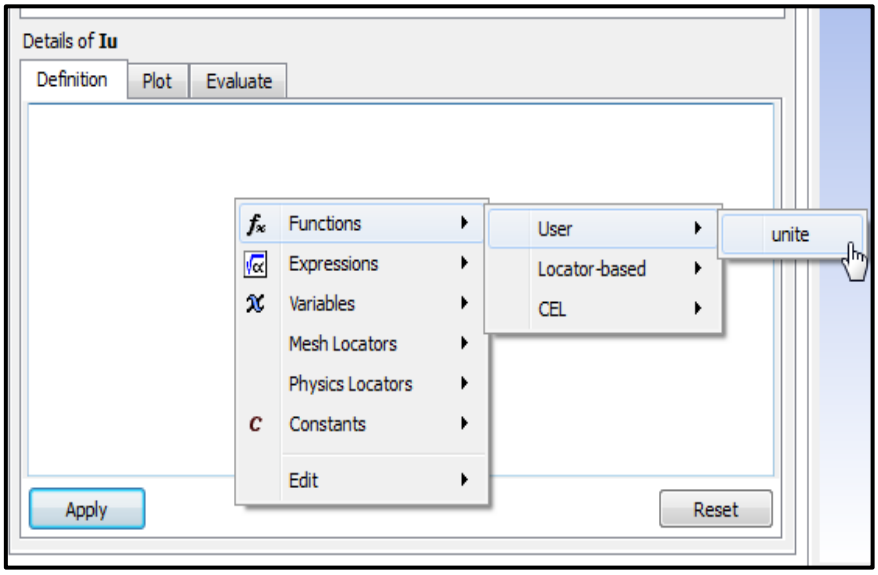


Figure III- 31 : Détails Expressions.

- Dans la même fenêtrenous écrivons les variables x, y, z

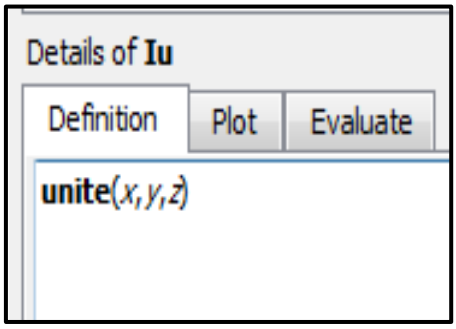


Figure III- 32 : création les variables.

- Cliquez Apply
- Le même processus pour **K et Ɛ**
  - On changer seulement le nom de User Function de **K** c'est **kinetic**,l'expression **Ik**,result units [m^2 s^-2] et Import Data profil de **K**
  - Le nom de User Function de **Ɛ**c'est **Epsilon**, l'expression**Ie**,result units[m^2 s^-3] puis Import Data profil de**Ɛ**

❖ **Création des boundary** : pour définie les conditions aux limite

➢ 1er Condition aux limite : INLET

Cfx4.geo > principal 2D Regions >cliquer à droit sur **INLET > Insert > boundary > Inlet**

Il est permis de définir les propriétés aux surface d'entrée, apparaît alors les détails sur Inlet en différent onglet suivant le type de frontière

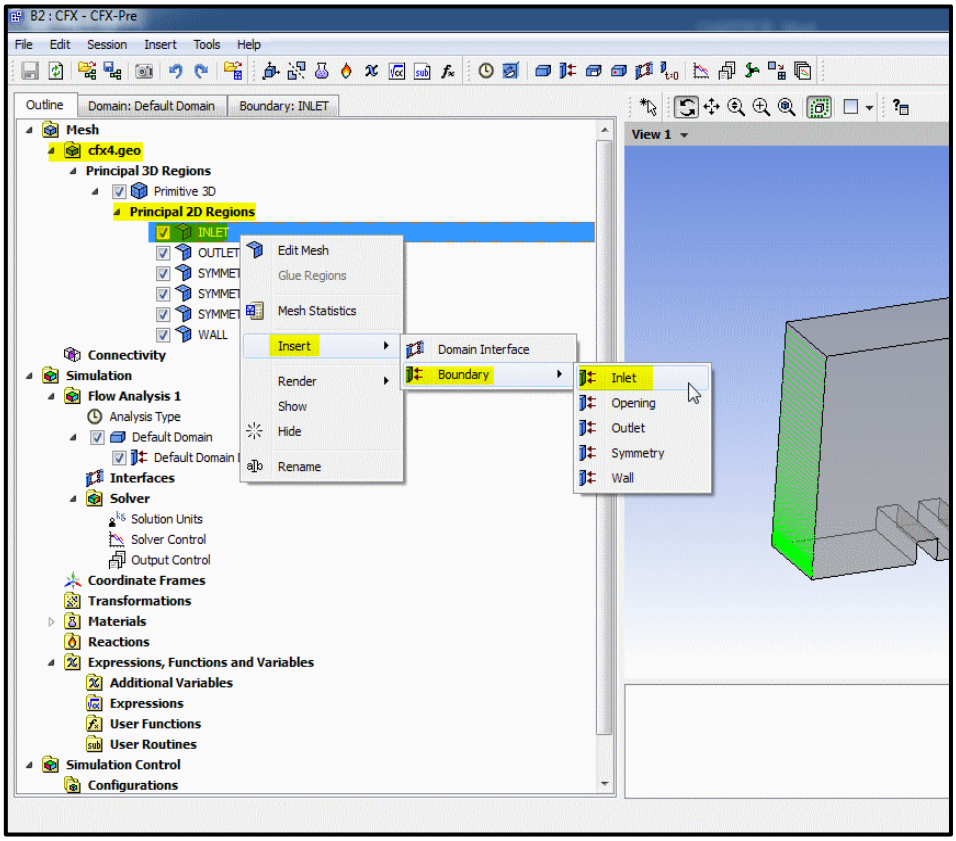


Figure III- 33 : Insert bounary

Montrez-nous une nouvelle fenêtre, cliquer sur **boundary Detais**

- Flaw rigime Option > subsonic
- Mass and Momentum Option > Cart. Vel. Components
  - Dans la case **U**>entrée l'expression du profile de vitesse **Iu**
  - La vitesse **v > 0**
  - La vitesse **W >0**
- Turbulence
  - Option > k and Epsilon
  - Turb. Kinetic Energy >entrée l'expression de Kinetic Energy>**Ik**

- Turb. Eddy Dissipation >entrée l'expressiond'Epsilon>**Ie**

- Cliqer sur Apply > OK

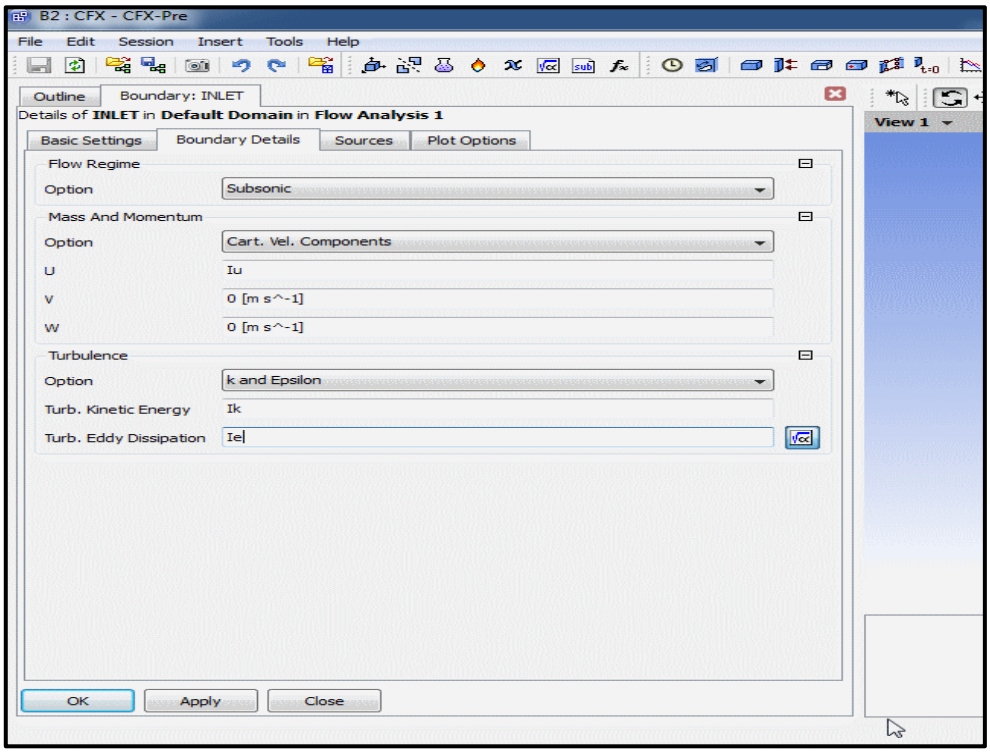


Figure III-34:boundary Detaits Inlet

- 2^{eme} Condition aux limite : OUTLET

Cfx4.geo > principal 2D Regions >cliquer à droit sur**OUTLET> Insert > boundary > OUTLET** correspondra à la surface de sortie

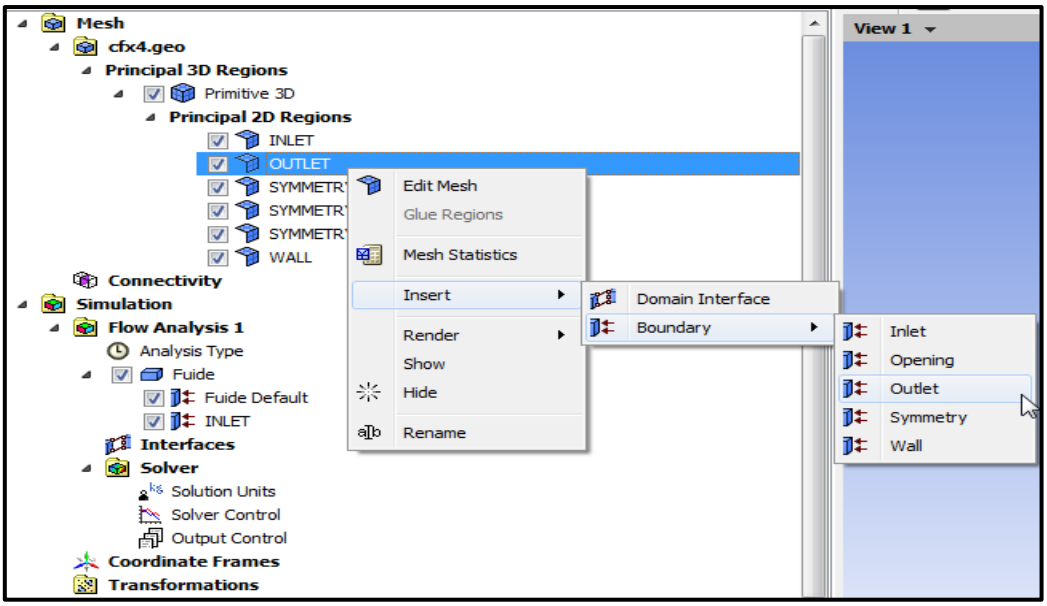


Figure III-35:Insert bounary.

boundary Detais

- Flaw rigime Option > subsonic
- Mass and Momentum Option > Static Pressure
- static pressure > 0 Pa
- Cliqer sur Apply > OK

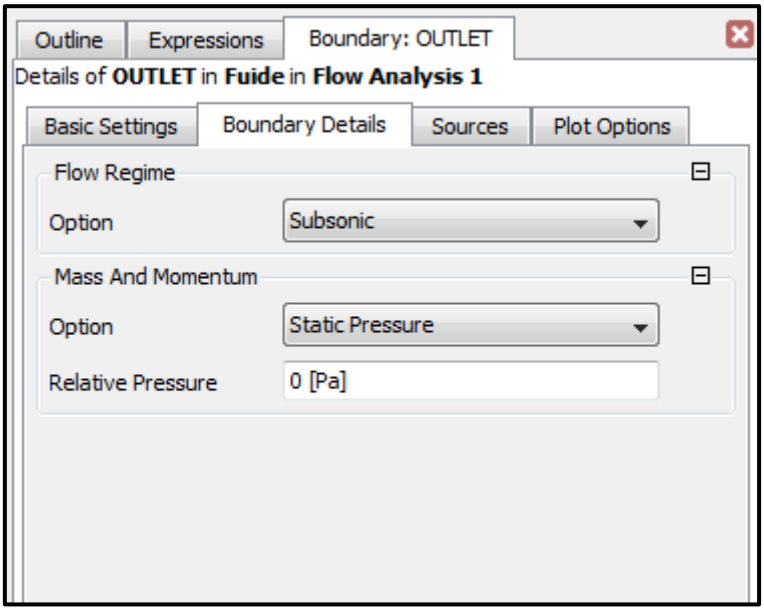


Figure III-36:boundary Detaits OUTLET.

- 3^{eme} Condition aux limite : SYMMETRY 1

  Cfx4.geo > principal 2D Regions >cliquer à droit sur**SYMMETRY1> Insert > boundary >Symmetry**

  - Cliquez sur Apply > OK

    Le même processus pour**SYMMETRY2** et **3**

- Dernier condition aux limite : WALL

  Cfx4.geo > principal 2D Regions >cliquer à droit sur**WALL> Insert > boundary >WALL**

boundary Detais

- Mass and Momentum Option>No Slip Wall
- Wall roughness Option > Rough Wall > Sand Grain Roughness > 0.0007 [m]
- **Cliqer sur Apply> OK.**

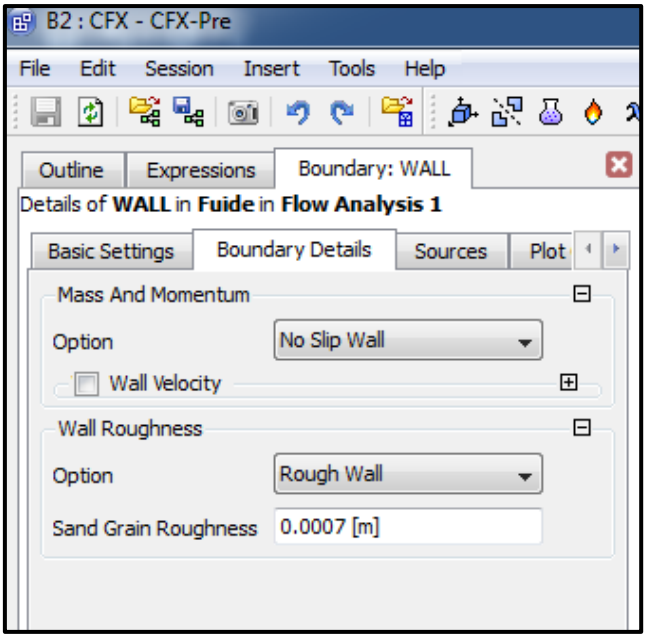


Figure III-37:boundary Detaits OUTLET.

❖ Et le dernier pas dans CFX-Pre, on définit les contrôles de résolution dans **solver control** dans l'onglet **basic settings,** on choisit **High resolution** dans **Advection scheme** et dans **Turbulence Numerics,** et dans **Convergence Control** on choisit le nombre d'itération maximal et minimal et timescale factor >0.1

Dans le même onglet on définit aussi **Risedual Type** <RMS>

Les autres onglets sont laissés intacts Equation Class Setting et Advanced Option.

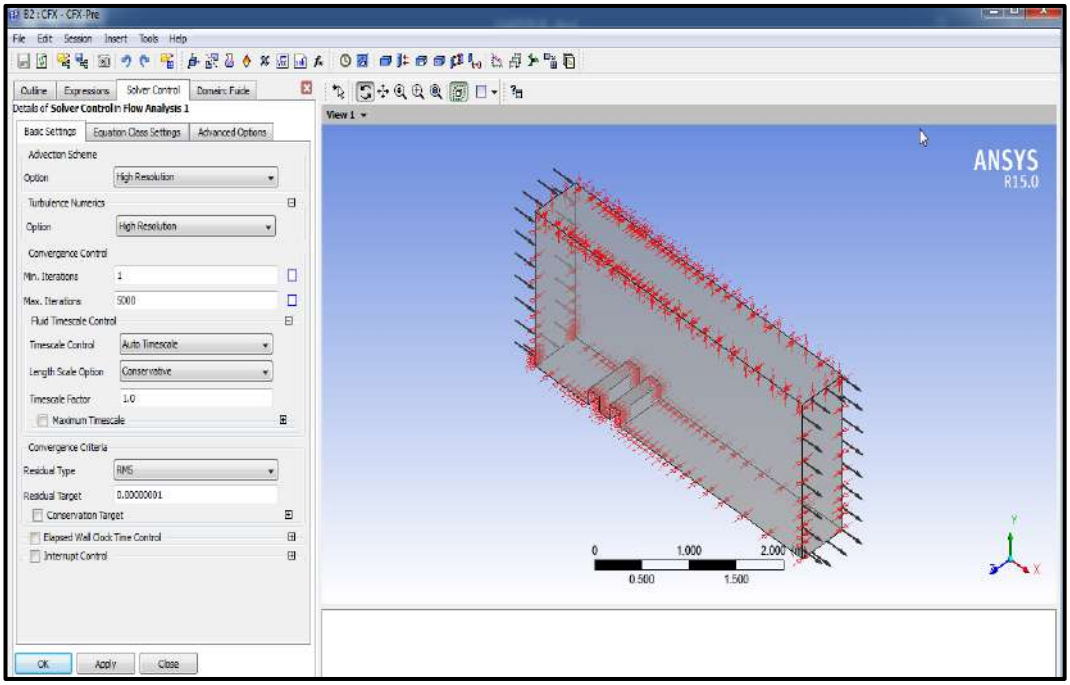


Figure III-38 :Solver control.

III.1.2.3 CFX-Solver (la solution

III.1.2.3.1. La solution :

Pour lancer la solution cliquez sur la cellule solution puis cliquez Solution Itérative

Pour assigner les valeurs initiales avant de calculer une solution.

Les valeurs initiales peuvent être définies de trois manières :

- Introduites automatiquement par le logiciel (par défaut).

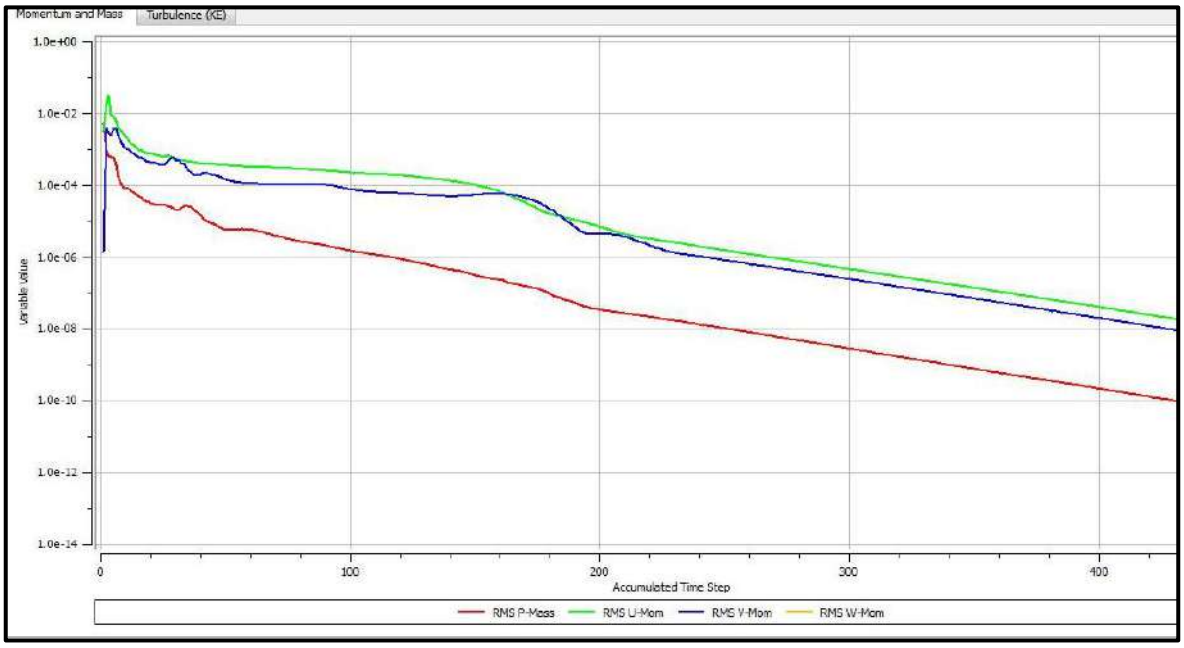


Figure III-39 :Solution

- Imposées par l'utilisateur.

- Obtenues à partir d'une solution précédente.

Click Start Run pour lancer les calculs

III.1.2.4 CFX-Post :(les résultat)

C'est une dernière opération de la simulation. ANSYS (CFX) crée tous les objets de

Traçage prévus : surface, vecteurs, lignes profilées, découpes animations …

Pour lancer le résultat double clic sur la cellule **résultat**

On peut créer beaucoup de différents objets dans résultat. Le menu d'insertion montre unePleine liste, mais il y a des raccourcis pour tous les articles. Un certain objet commun est :

- Location de : Points, Lignes, plantes, Surfaces, Volumes
- Vector : pour affiche le profil de vitesse.

- Contour : pour affiche les contours de vitesses et pression
- Streamlines

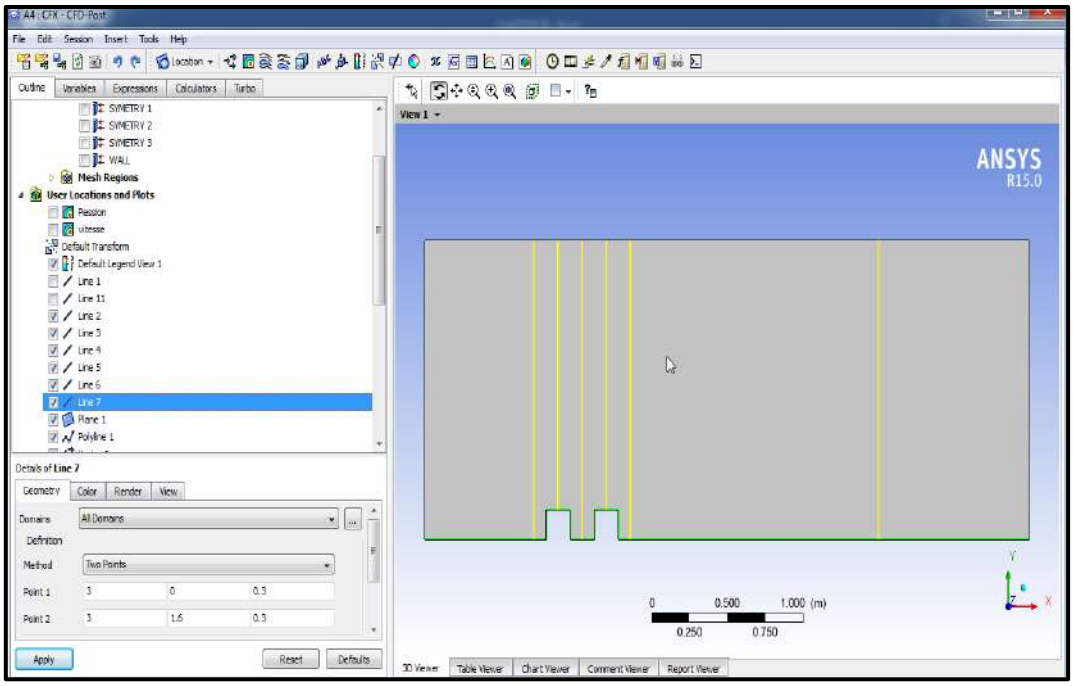


Figure III-40 :position des lignes.

- Chart : pour dessiner les graphes dans les ligne qui est créé

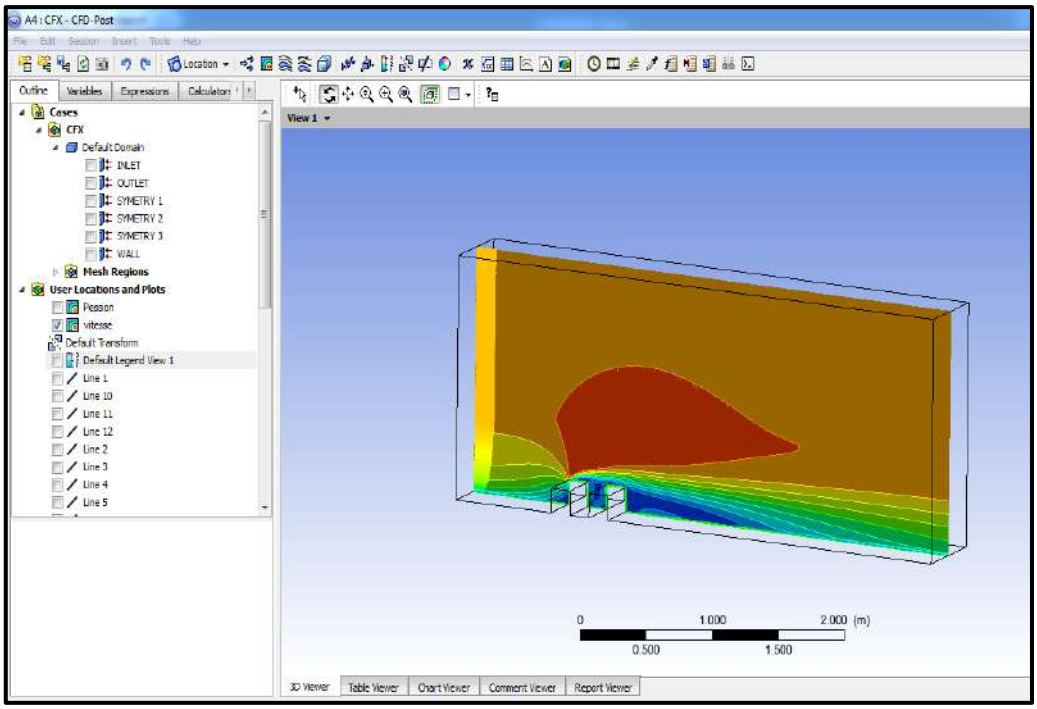


***Figure III 41* : contour de vitesse**

CHAPITRE IV

PROBLEME PHYSIQUE

IV.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on décrit les configurations géométriques étudiée et la sensibilité au maillage qui ont élaborée dans l'ICEM et l'ANSYS CFX.

Dans notre cas, on a utilisé le modèle ***k-ε***

IV.2 configuration étudiée.

IV.2.1 configuration géométrique :

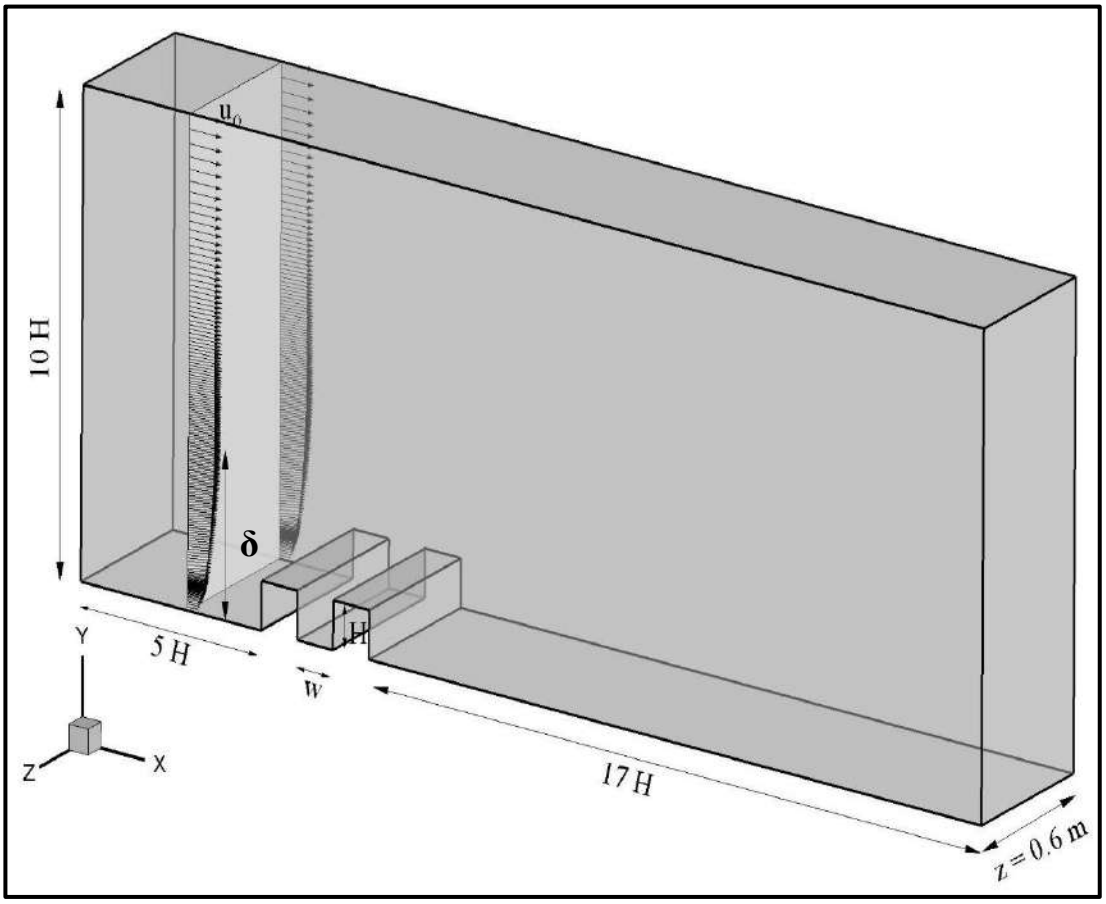


Figure IV-1 : géométrie

Avec

$$H = 0.16\,m$$

$$w = H$$

$$\delta = 3H = 0.48\,m$$

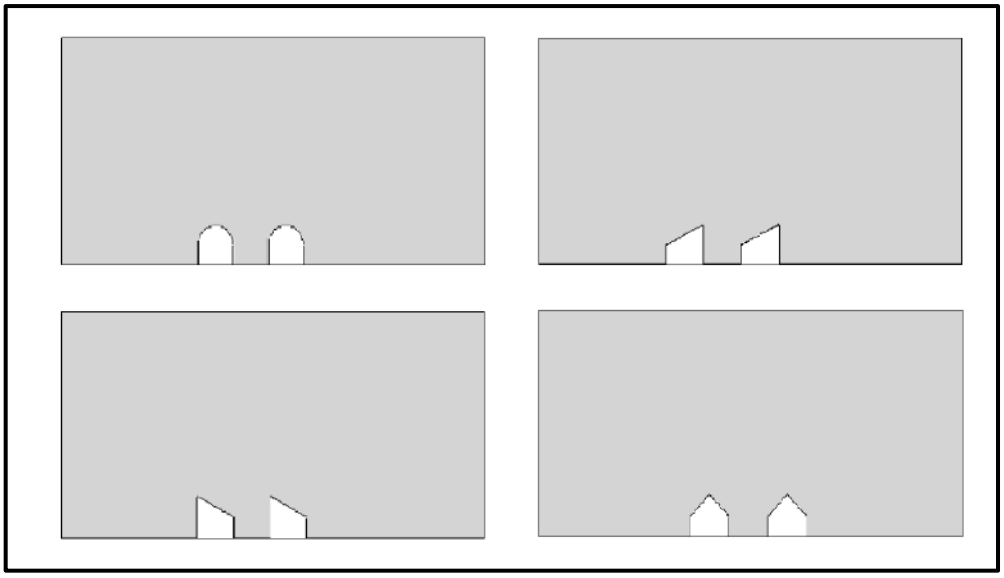


***Figure IV-2*:** Les autres formes géométriques de toit

La figure (IV.2) est représentée les défirent forme de toit qui il va étudie avec le même dimensionnement de H et w le même positionnement de chaque obstacle

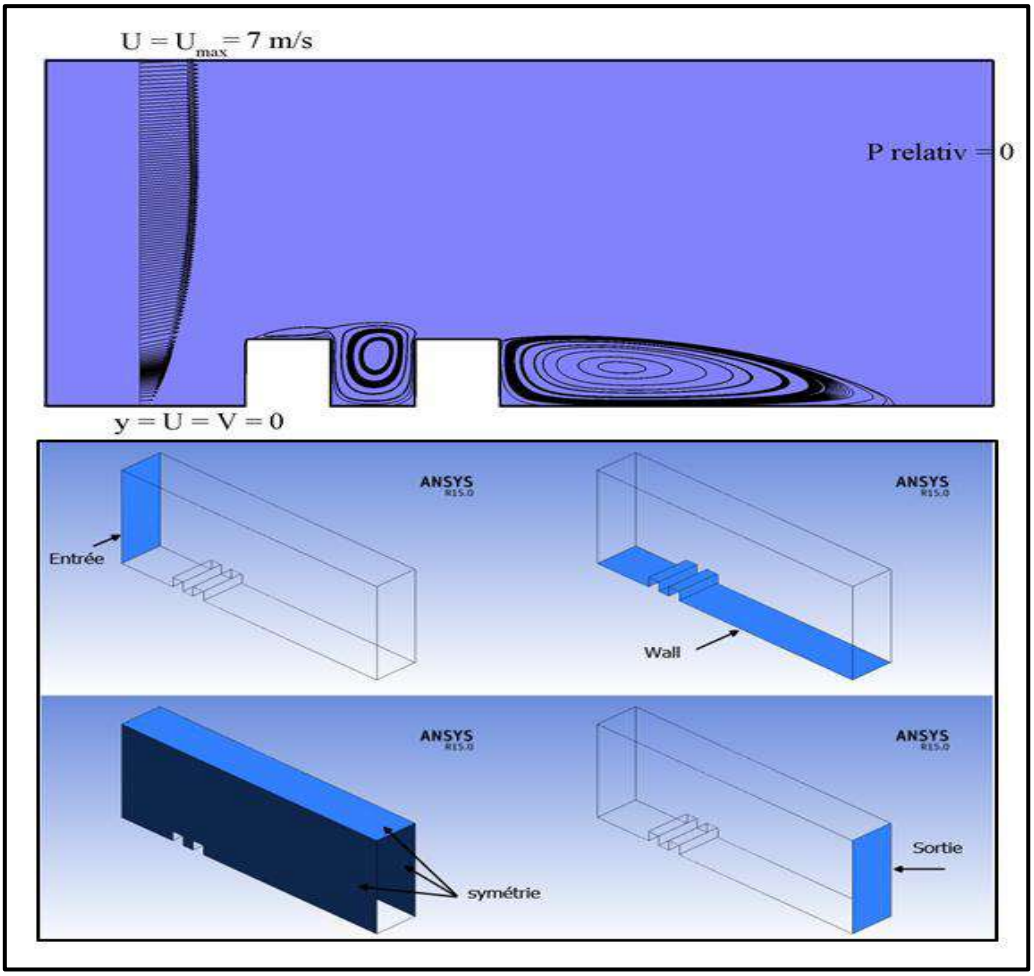


***Figure IV- 3* :**géométrie du problème et condition aux limites**.**

Le domaine de calcul est montré sur la Fig.IV. 1. Un écoulement entièrement turbulent à un nombre de Reynolds de Re = 1.6 * 10^4 a été considéré. L'axe x aligné le long de l'écoulement d'entrée et l'axe z perpendiculaire à l'axe de cube. Les dimensions du domaine du calcul sont 25H et 10H pour la longueur et la hauteur respectivement. Les conditions aux limites d'entrée et de sortir ils sont placés à des endroits comme le montre sur la Fig.IV. 3. De telles distances sont choisies de sorte que la longueur d'entrée n'a pas d'effet sur les résultats de la zone de recirculation est à l'intérieur du domaine de calcul et la sortir n'a aucun effet sur les variables physiques étudiées. Le domaine de calcul est délimité par le planché de la soufflerie l'obstacle ''Wall'' pour laquelle une condition de non-glissement est appliquée u=v=w=0.et rugosités = 0.0007 m. Dans la partie supérieure et arrière et de face du domaine un plan de symétrie au a la mi-hauteur de la veine d'essaye ''Symmetry''. A l'entrée ''Inlet '' en amont, un profile de vitesse mesurée a été appliqué est imposée par Eq. (3). Et le sorite ''Outlet'' en aval à une pression relative nulle a été appliquée. De plus, comme le logiciel ANSYS CFX ne calcule pas directement en 2D, les maillages sont construits en 3D avec une seule cellule d'épaisseur. Le maillage est donc pseudo-bidimensionnel et une condition de symétrie est imposée sur les deux côtés du domaine. Les paramètres expérimentaux de soufflerie utilisée par Solazzo [E. Solazzo et al. / Environnemental Modelling & Software 24 (2009) 381–388]. A l'entrée de domaine, située à $x/\mathrm{H}=5$, un profile de vitesse pleinement développé est imposé. Celui-ci est extrait directement du calcul préalable d'une conduite de hauteur 10H et de 25H de longueur, ce qui est suffisamment long pour permettre au profil de vitesse de se développer, d'autant plus qu'une approximation d'un profile de vitesse turbulent était imposée en entrée. L'utilisation d'un calcul préalable pour obtenir les conditions d'entrée permet d'éviter d'avoir à utiliser pour chaque simulation un domaine long en amont de la géométrie et réduit ainsi la puissance et le temps de calcul requis à l'obtention d'une solution. A l'aval, la condition spécifiée est une sortir de pression statique dont la valeur moyenne relative est de $\overline{P}_{stat}=0\,\mathrm{Pa}$. Cette condition limite ne permet pas au fluide de pénétrer dans le domaine en cas de recirculation dans le plan de sortie et, conséquemment, aucune spéciation ne doit être faite relativement aux quantités turbulentes dans ce plan puisqu'elles sont alors

calculées par le solveur. Ce type de condition limite est tout à fait indiqué puisque le plan de sortie est situé loin à l'aval de la géométrie et qu'aucune recirculation n'est attendue à cette position. Pour émettre les conditions de l'écoulement à l'entrée, les profiles de l'énergie cinétique, k , Eq. (5a), taux de dissipation, ε , Eq. (5b) et le profil mesuré de la vitesse Eq. (3) sont considérés comme des conditions à l'entrée.

IV.3 Sensibilité au maillage

IV.3.1 le maillage

Un maillage est une partition de l'espace ou d'un domaine en cellules appelées élément. Pratiquement il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, cependant il existe différentes approches qui permettant 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 bonne Lissage d'un les zone de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier.
- Minimiser le nombre total des éléments (tempe de calcule raisonnable).

IV.3.2 effet de maillage ICEM :

On utilise un maillage créé à l'aide du logiciel **ICEM CFD** et on le vérifie par L'ANSYS CFX en analysant le profil de **Y+**

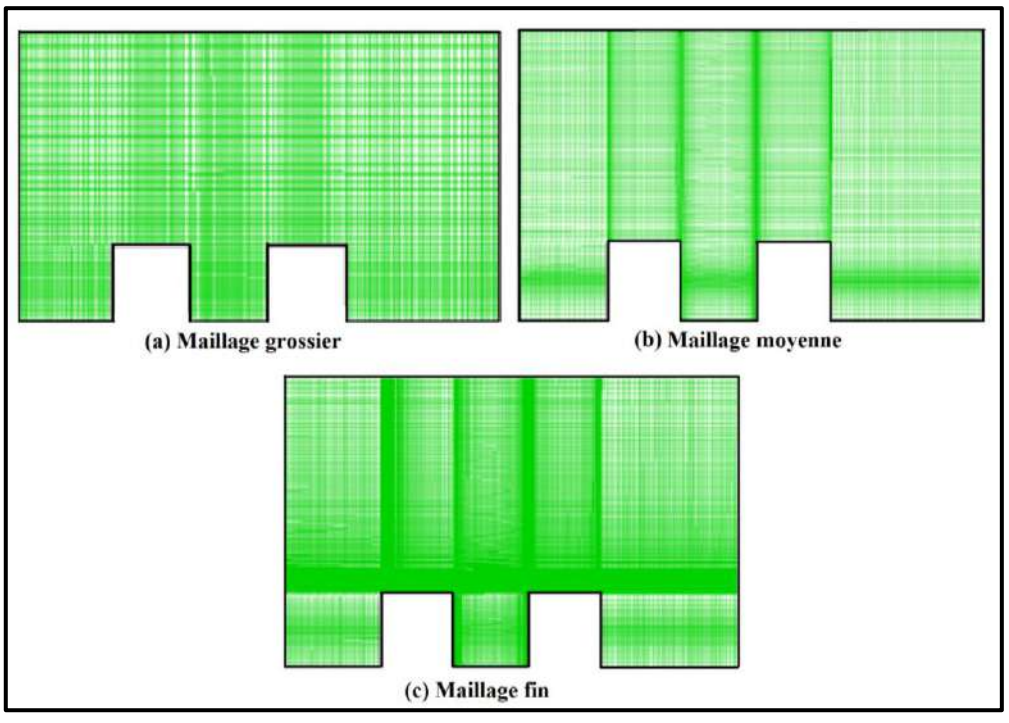


***Figure IV- 4* :**les trois maillages réalisés

IV.3.3 les graphes de Y plus :

Pour chaque maillage on a étudié validation de fonction Y+ afin de tester l'efficacité du maillage proposé pour étudié la turbulence en utilisant le modèle adopté.et étudie l'influence du maillage sur le profil de Y+

Tableau IV.1 **:** positions des1^{er} nœud et le nombre des cellules pour les trois maillages :

	Position du 1er nœud (spacinge 1)	**Nombre des éléments**	**Nombre** des **nœuds**	**Y+**
Maillage grossier M_1	**0.012**	**13218**	**27060**	**85**
Maillage moyenne M_2	**0.01**	**46728**	**94560**	**100**
Maillage fin M_3	**0.012**	**58568**	**118300**	**40**

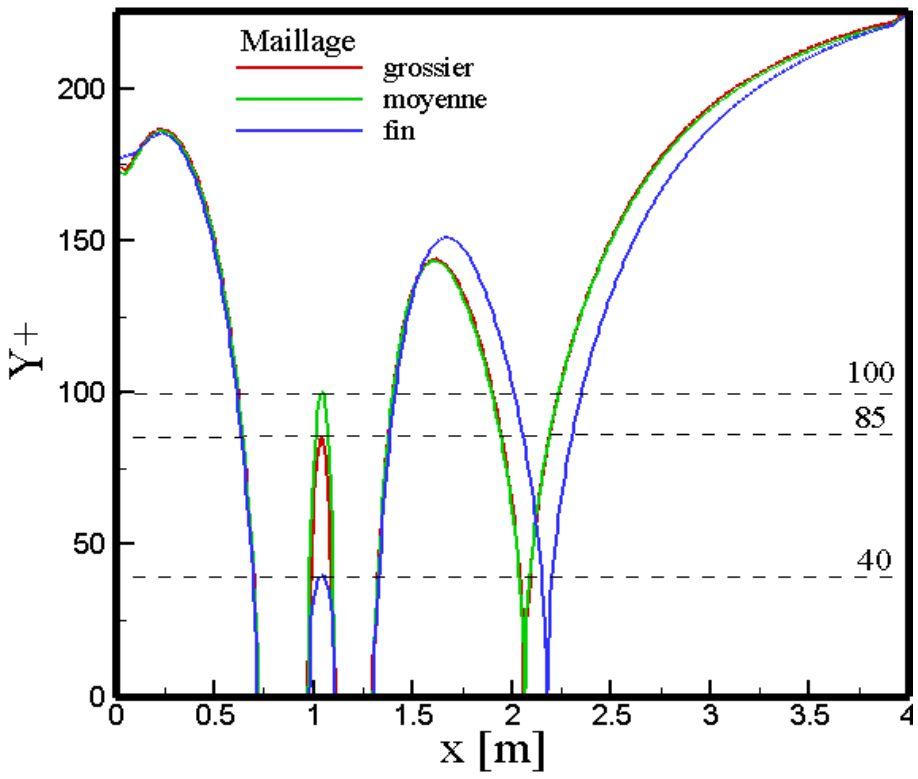


Figure IV- 5 : influence du maillage sur le profil de Y plus

Nous considérons que le maillage moyenne parce que Y+ = 100 qui correspond au régime complètement turbulent.

IV.3.4 Effet de maillage:

Pour montrer l'effet du maillage, nous allons utiliser trois maillage différents sur deux bloc, et chaque maillage dessine un seul ligne (entre les obstacles X/H=0.0)

Pour extraire leprofil de l'énergie cinétique turbulente (***k***) et la vitesse globale, pour comparer avec les résulte de l'expérimentale.

Etla figure suivant représenté la position de la ligne pour tracé les graphes Dont nous avons parlé plus tôt

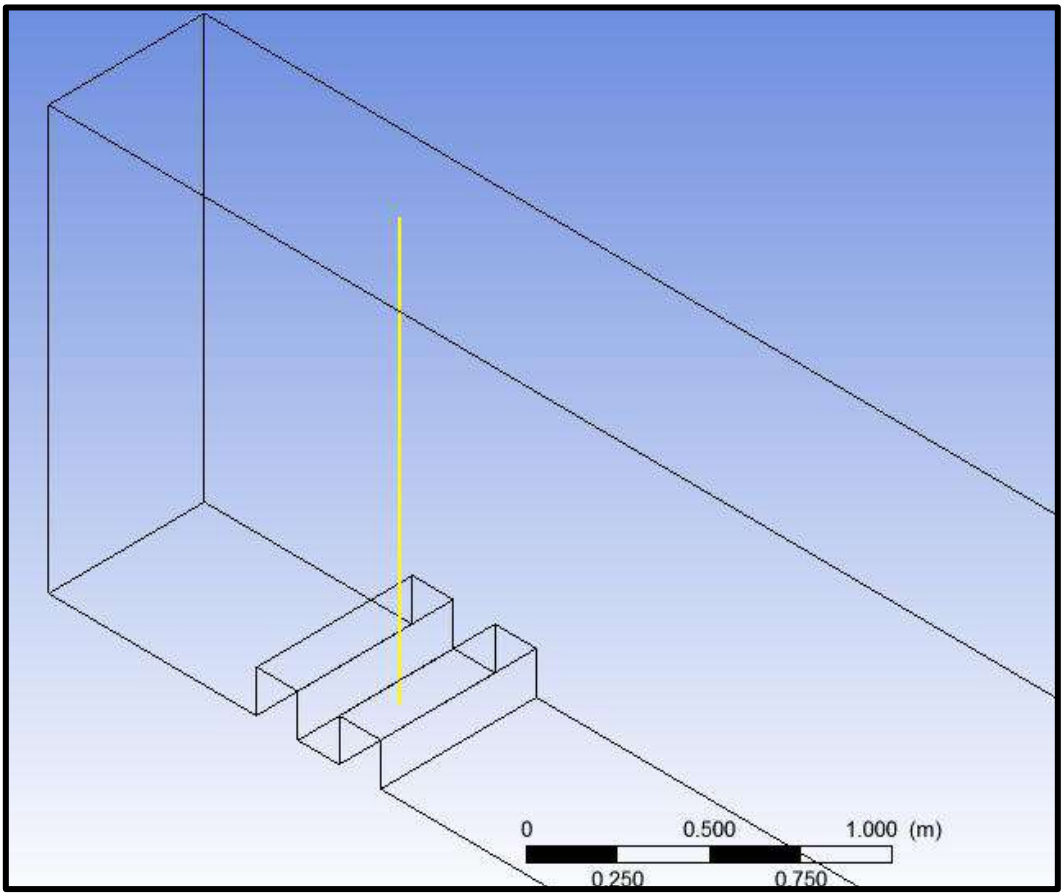


Figure IV- 6 : position de la ligne qui est créer.

Les graphes suivants présentant évaluation les profils de **TkE** et vitesse **u** et **w** pour les trois maillages

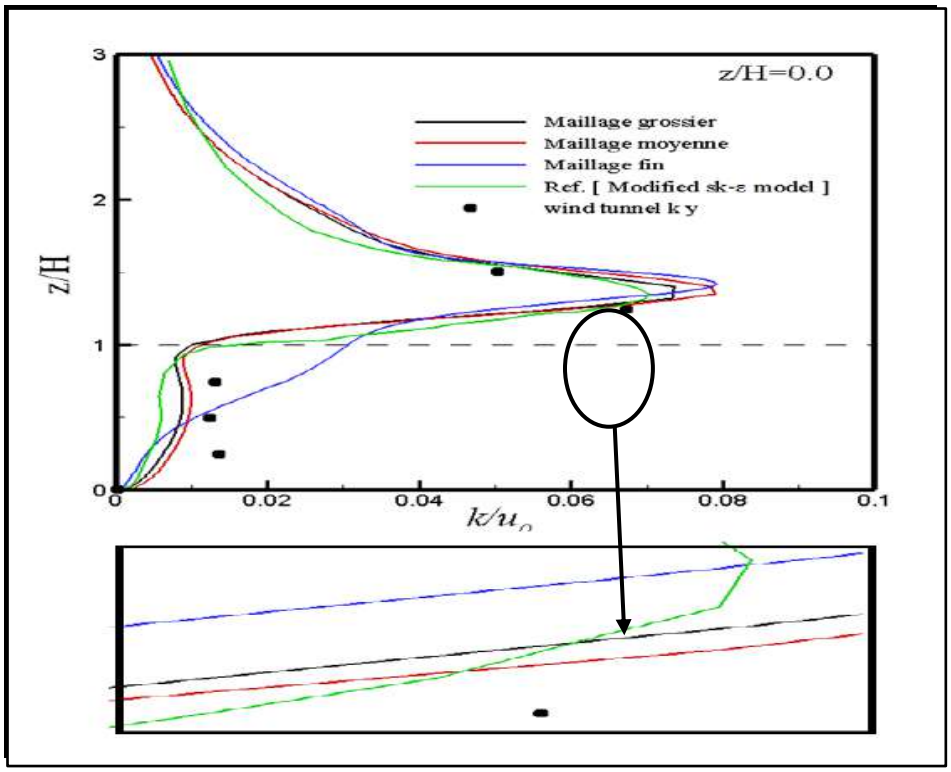


Figure IV. 7 : Evaluation du profil TKE par rapport aux données des résulte expérimentale la section y/H=0.0

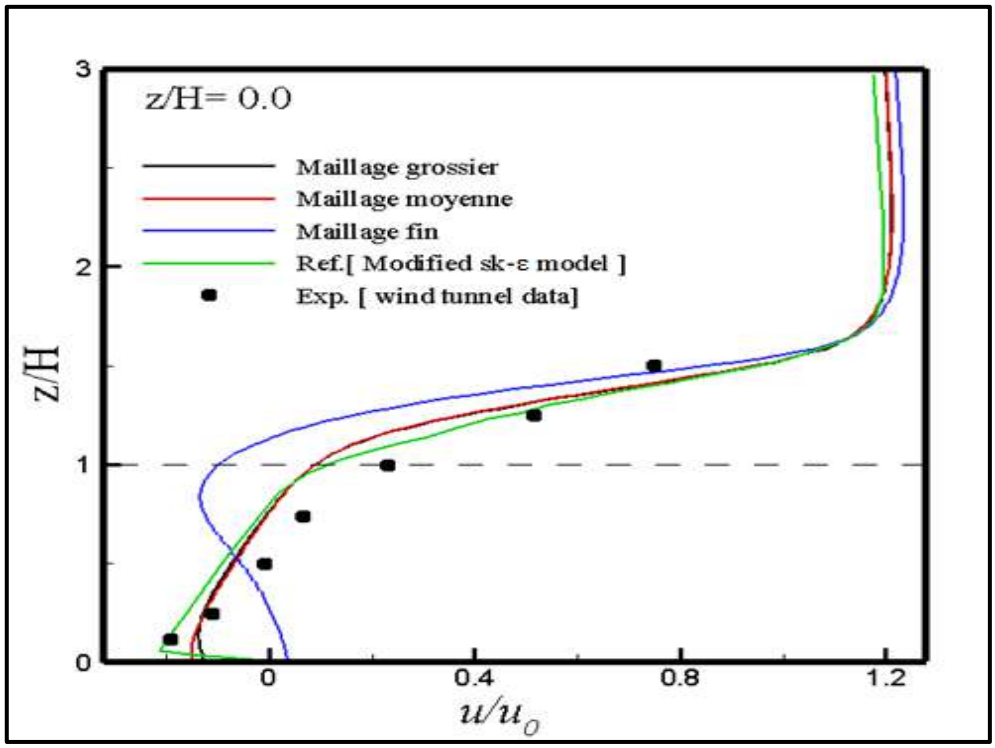


Figure IV. 8 **:** L'évaluation de composantes de vitesse horizontales par rapport

Aux données expérimentale la section y/H = 0.0.

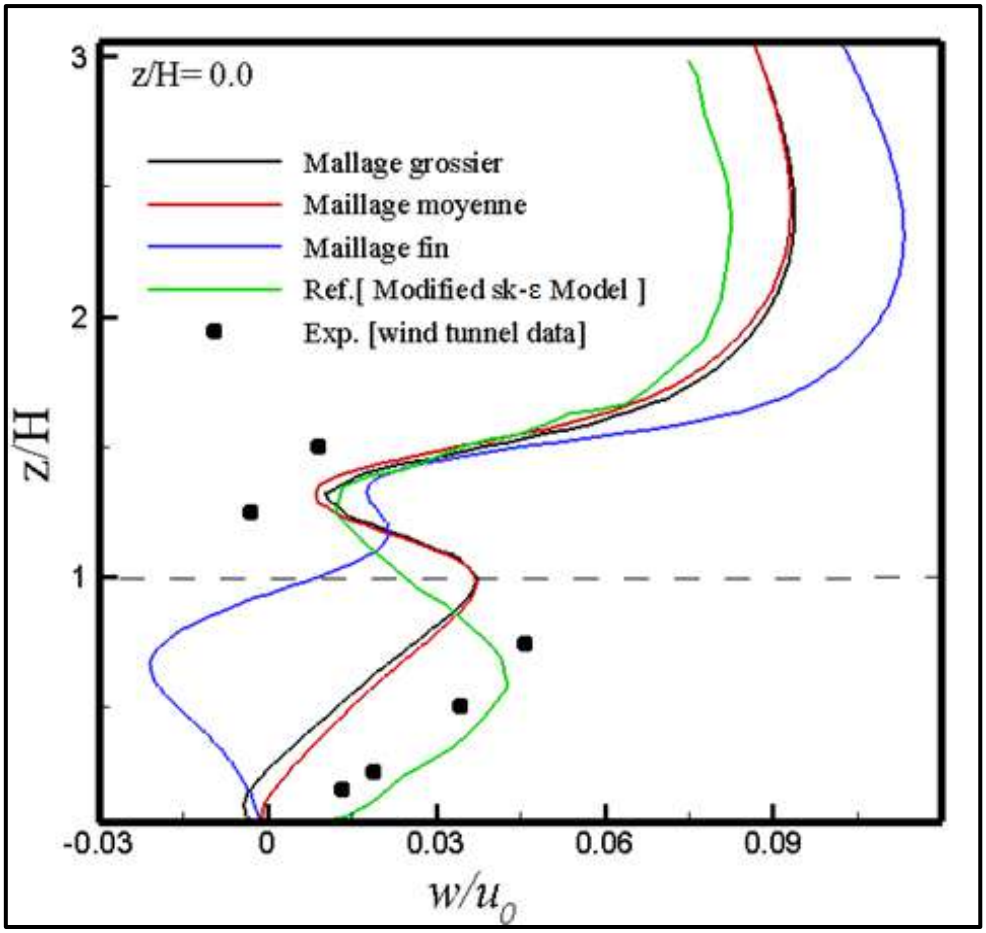


***Figure IV. 9* :** Evaluation des composants de la vitesse verticale aux Données expérimentale à la section y/H = 0.0

Les résultats obtenus ont été vérifiés et comparés à des résultats expérimentaux

En remarque que le maillage moyenne donnée le meilleur résultat car le résultat de maillage moyenne est très proche au résultat expérimental.

Finalement après la validation du maillage on applique le maillage moyenne sur les Cinque formes Ce qui va l'étudier

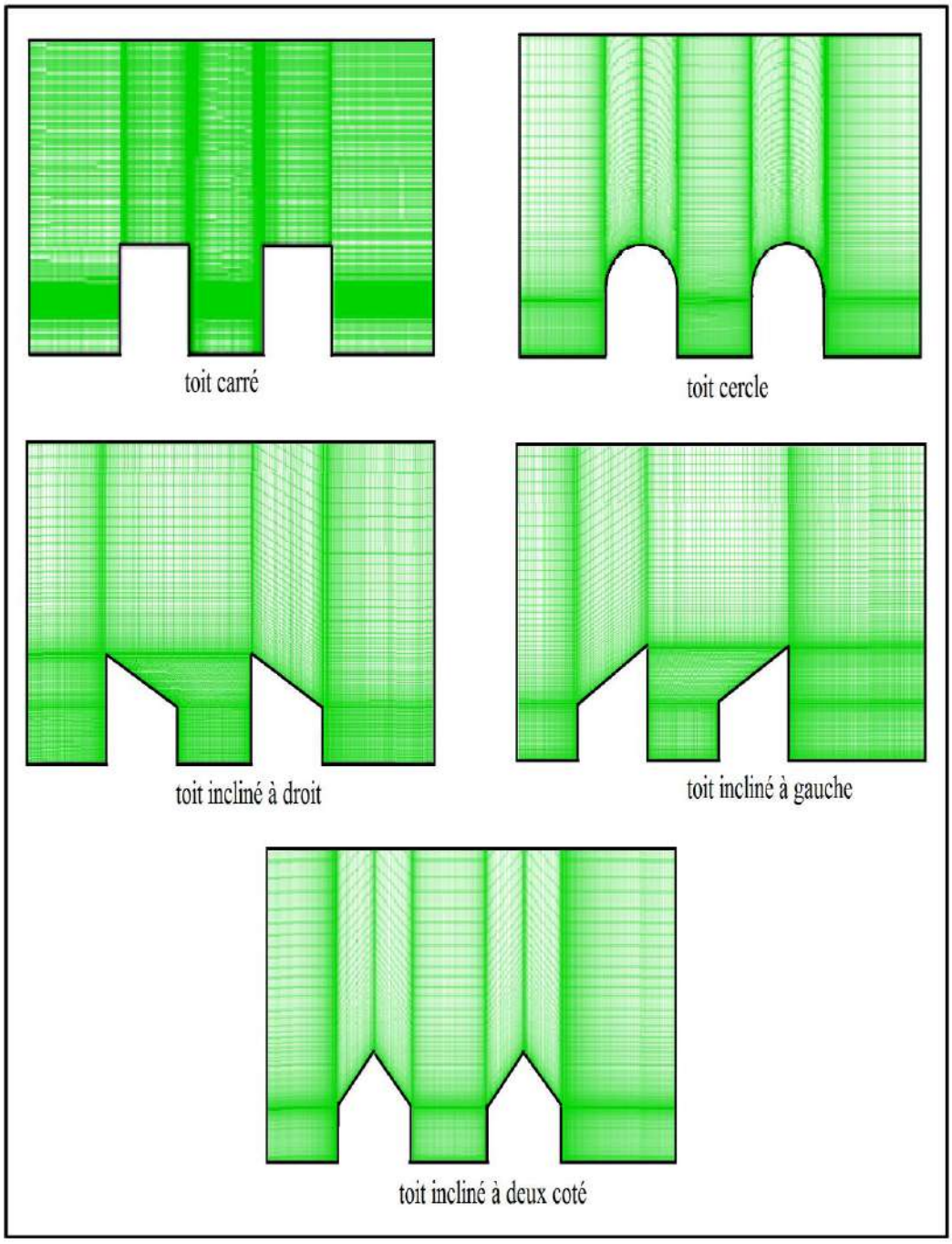


***Figure IV. 10* :** le maillage moyenne de déférent forme étudié

La figure (IV. 10) représenté la réalisation de la maillage moyenne sur tous les géométries étudiées après l'étude de la sensibilité de maillage et validation de Y plus Nous avons constaté qu'il donne les meilleurs résultats

CHAPITRE V

RESULTATS ET DISCUSSION

V.1 Introduction :

La modélisation de la turbulence atmosphérique est d'un grand intérêt pour la définition de la meilleure stratégie de ventilation dans les street-canyons. Une approche originale est celle de la modélisation, qui conduit à la réalisation d'un modèle de qualité de l'air. Un modèle de qualité de l'air peut être un outil d'aide à la décision pour les collectivités locales. La modification initialement prévue pourra, selon les résultats du modèle, être effectuée ou au contraire revue pour une amélioration. Les simulations numériques, ont été prolongées par une étude sur l'influence des toits des bâtiments supplémentaires ou près, sur la recirculation de l'air dans un milieu urbain. Différentes combinaisons de formes de toits des bâtiments à la fois lee-ward et wind-ward d'un stress-canyon rue 2D isolé, idéalisée ont été étudiés. L'approche numérique de modélisation dans les street-canyons est d'un grand intérêt pour étudier l'influence de l'architecteur de la rue sur l'écoulement de l'air, afin de réaliser des outils intéressants de prévisions numériques à ce niveau pour attirer l'attention des planificateurs urbaine, la ventilation dans les street-canyons et le confort de la structure. Afin de comprendre les constructions urbaines les plus répandues telle que les bâtiments, on a réalisé d'une part des simulations numériques bidimensionnelles des street-canyon avec des variations au niveau des toits des bâtiments. Ce travail est inspiré par les expériences de la soufflerie qui ont été rapportés par Solazzo et al. [59] dans le but de comparer avec nos résultats numériques.

ANSYS CFX-15.0 est un logiciel général de simulation numérique d'écoulements en mécanique des fluides, transfert thermique et massique. Ce logiciel permet de mettre en œuvre une simulation numérique complète de la modélisation, de la création géométrique, et la visualisation des résultats, en passant par la création du maillage et le calcul. Le logiciel CFX, est divisé en quatre modules : **ICEM**, **CFX-Pre**, **CFX-solve**et **CFX-post**.

Le module **ICEM** permet d'établir la géométrie du système étudié. Il est utilisé comme un logiciel de **CAO** traditionnel : la géométrie est construite à partir de points, de courbes, de surfaces et de volume. C'est également ce module qui permet de générer un maillage s'appuyant sur la géométrie. L'utilisateur fixe alors les paramètres de maille qu'il souhaite obtenir sur les courbes, les surfaces et dans les volumes. Le

module permet de générer des mailles tétraédriques, hexaédriques et prismatiques. Une fois le maillage effectué, **ICEM** créé un fichier portant l'extension «. geo », qui regroupe les informations relatives au maillage, exploitable par **CFX-pre**.

Le module **CFX-pre** permet quant à lui de définir les conditions aux limites et initiales du système, ainsi que les équations à résoudre, le type de résolution (régime permanent ou transitoire), les paramètres du solver, parmi lesquels: le pas de temps, le nombre d'itération, le critère de convergence ainsi que la nature des fluides (ou solides) en présence.

Les conditions aux limites sont de 5 types : Inlet, Outlet, Opening, Static pressure, Wall et Symmetry.

- Les conditions de type Inlet sont utilisées dans le cas d'un écoulement entrant à l'intérieur du domaine.
- Les conditions de type Outlet sont quant à elles utilisées dans le cas d'un écoulement sortant à l'extérieur du domaine.
- La condition Opening est utilisée dans le cas d'une méconnaissance de la nature entrante ou sortante de l'écoulement.
- La condition aux limites de type Wall est attribuée aux parois imperméables à l'écoulement.
- Enfin, si l'écoulement présente un plan de symétrie, il est possible d'attribuer la condition Symmetry à ce plan.

Une fois tous les paramètres définis, **CFX-pre** génère un fichier «.def » qui contient toutes les informations relatives au maillage, aux conditions aux limites et initiales, ainsi que tous les autres paramètres introduit dans **CFX-pre**. C'est ce fichier qui va être à la base de travail du solver.

Le module **CFX-solve** est le module qui effectue les calculs. Il est basé sur l'intégration des équations de Navier Stockes dans chaque maille et dispose de modèles additionnels pour prendre en compte la turbulence, le rayonnement thermique.

Dans le cas d'une résolution en régime permanent, le calcul se poursuit jusqu'à ce que, soit le nombre maximal d'itération demandé par l'utilisateur est atteint, soit la

solution satisfait au critère de convergence. Dans le cas d'une résolution en régime transitoire, le calcul prend fin lorsque la durée de résolution du phénomène étudiée est atteinte.

A la fin de son calcul, **CFX-solve** génère deux types de fichiers :

- Un fichier «.out » lisible par un éditeur de texte. Ce fichier résume le déroulement du calcul. Il contient, entre autres, les informations du «.def », ainsi que le bilan masse du système.
- Un fichier «.res » qui contient l'ensemble des résultats. Ce fichier est directement exploitable par **CFX-post**.
- Le module **CFX-post** est un outil graphique permettant le traitement et la visualisation des résultats. Il permet d'appliquer des textures sur la géométrie, de visualiser des contours, des iso-surfaces, des lignes de courant, des champs de vitesses. Il permet également l'exportation des résultats sous forme numérique, comme par exemple la valeur des différentes variables sur chaque nœud, sous forme photographique et même sous forme d'animation.

L'analyse des tests de convergence portant le maillage devait permettre d'identifier quelques situations peuvent nuire à la convergence des calculs d'écoulement autour d'un obstacle. Néanmoins, malgré les discrétisations désavantageuses, toutes les simulations on peut être amenées de façon très régulière à des résidus RMS de 1×10^{-8} pour toutes les différentes équations. Une courbe de convergence typique est montrée à la Fig.V.1 pour que le lecteur puisse juger lui-même de la régularité de la convergence. Tous calculs sont effectués dans les conditions de régime permanent (steady state).

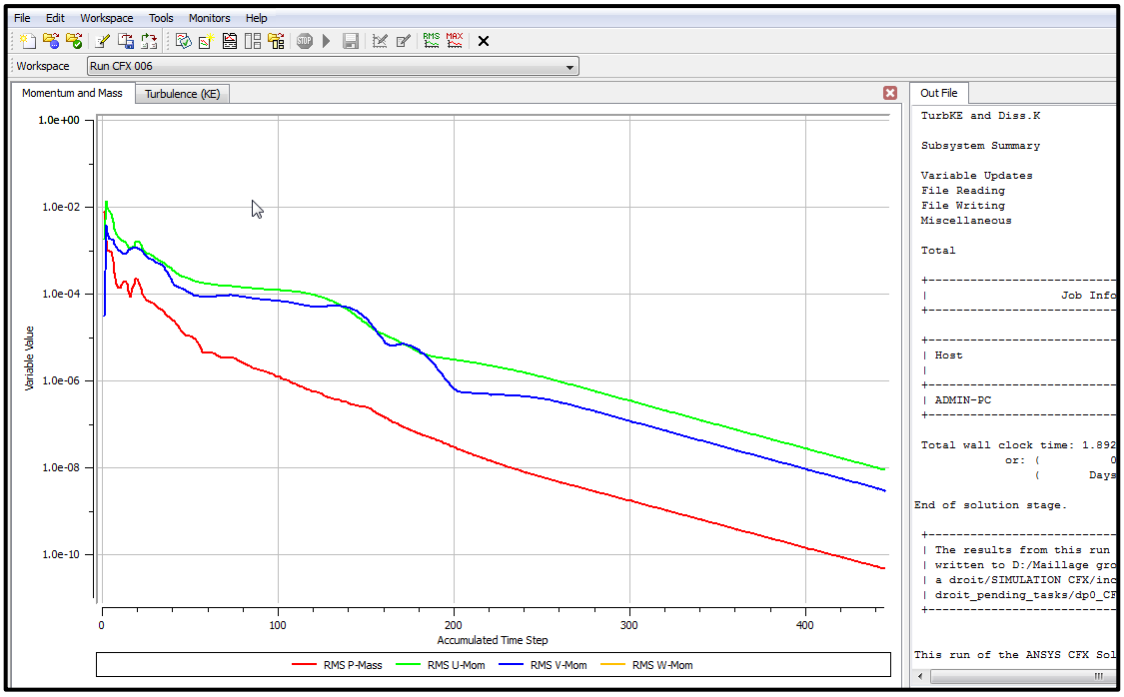


Figure V.1 : Courbe de convergence pour le maillage raffiné avec modèle de turbulence k-ε.

La simulation numérique a été validée en se référant aux différentes études numériques disponibles dans la littérature. La figure V.2 comparé nos résultats avec ceux de Solazzo et al. [59]. Cette étude a été réalisée sur la dispersion des polluants autour des bâtiments avec une source ponctuelle sont située entre des bâtiments centraux. La comparaison entre les résultats obtenus avec un maillage grossier, moyen et fine, en utilisant le modèle de turbulence k-ε, est indiquée aux Figs V.2 (a) et (*b*). On peut montrer que, en termes de profils moyens de vitesse et de l'énergie cinétique de l'écoulement, la convergence de la solution a été atteinte et les figures montrent la dépendance des profils de vitesse et de l'énergie cinétique sur la taille du maillage. On peut constater que le maillage moyen donne des résultats plus proche à l'expérimentale et plus rapide dans la simulation. Pour être plus préludent et plus précis, on a choisi le maillage moyen pour la simulation numérique des autres configurations géométriques comme illustré dans les Figs (IV. 10). En outre raffinement de maillage ont été testés et ne se présente pas par souci de conclusion.

V.2 interprétation des résultats :

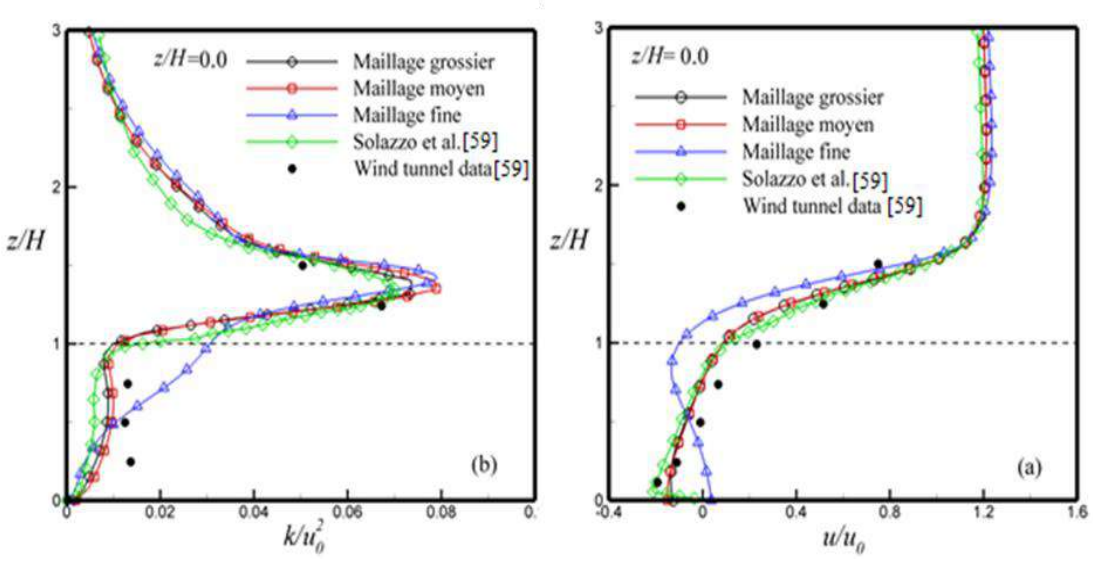


Figure V.2 : Effet du maillage sur les profils,(a) de vitesse u/u_0 et (b) de l'énergie cinétique k/u_0^2.

Les figures V.3-V.6 montrent les profils de vitesse *u*, *v*, de l'énergie cinétique *k*et de l'énergie de dissipation, *ε*, dans les différentes sections du bâtiment, comme illustré dans le tableau V.1, sont obtenus avec les cinq configurations géométriques (toit plat, toit en frome d'arc, toit incliné à droit, toit incliné à gauche et toit incliné sur les deux cotés). On peut montrer que, approcher du bâtiment, les profils de composant de la vitesse *u*,*v* de l'énergie cinétique, k, et de dissipation, *ε*, obtenus avec les différentes configurations géométriques montrent une grande variation à un niveau d'environ de la hauteur du bâtiment. On peut dire aussi que la distribution des vitesses est constante en quelque sorte au-dessus de l'épissure de la couche limite, δ. On peut montrer que, loin de deuxième bâtiment, les profiles de composant de la vitesse *u* obtenus avec les différentes configurations géométriques, montrent une légère déviation a été observée à environ de la hauteur de l'obstacle. Loin en l'aval de l'obstacle, pratiquement toutes les configurations géométriques prédisent la récupération de l'écoulement. Les différentes configurations géométriques où les régions commencent parvient pas à estimer la vitesse correcte correspondent à l'apparition de vortex de recirculation qui se forme à la base frontale du bâtiment, entre les deux bâtiments et après le deuxième bâtiment. L'emplacement du toit sur l'immeuble wind-ward a détourné la direction de la vitesse, et réagit comme un obstacle ce qui réduit la vitesse d'écoulement entrant dans la rue canyon. Pour les

deux cas des toits inclinés à gauche, incliné à droite et les toits inclinés sur les deux côtés, on remarque l'inversion des profils dans la rue canyon. Cette différence s'explique aussi par la position des toits sur l'immeuble incliné à droit et incliné à gauche. L'immeuble avec des toits inclinés détourne les vitesses vers la rue canyon par contre pour l'immeuble avec un toit plat et en frome d'arc les vitesses se déplace hors de la cavité comme illustré dans les contours de vitesse (Figs.V.8)

Tableaux V.1 : Positions des lignes.

	X	Y	Z
Ligne 1	0.72	0	0.3
	0.72	1.6	0.3
Ligne 2	0.88	0.16	0.3
	0.88	1.6	0.3
Ligne 3	1.04	0	0.3
	1.04	1.6	0.3
Ligne 4	1.2	0.16	0.3
	1.2	1.6	0.3
Ligne 5	1.36	0	0.3
	1.36	1.6	0.3
Ligne 6	3	0	0.3
	3	1.6	0.3

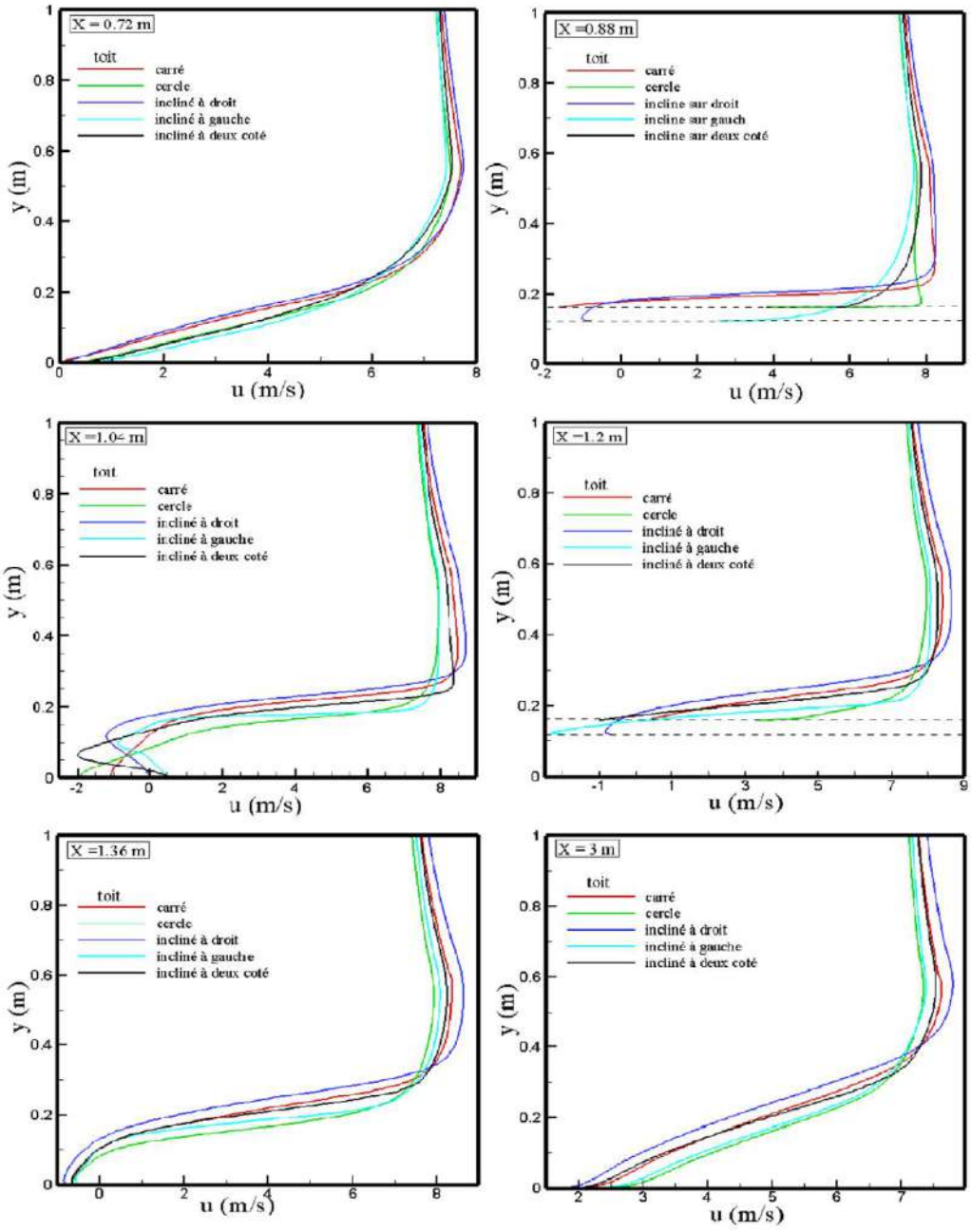


Figure V.3 : Profils de vitesse, *u*, obtenus pour les différentes configurations géométrique (toit plat, toit en forme d'arc, toit incliné à droit, toit incliné à gauche et toit incliné sur les deux cotés).

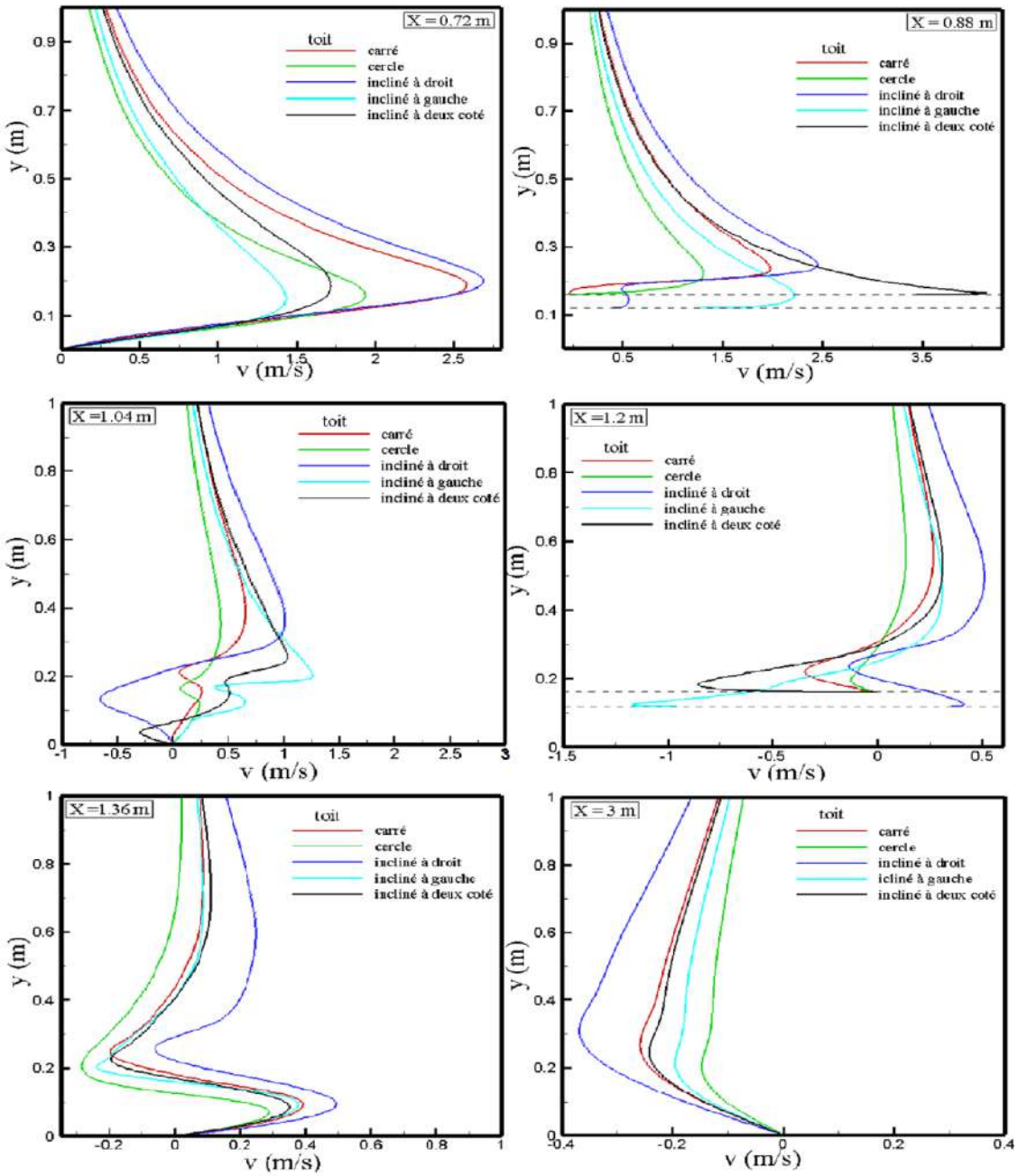


Figure V.4 : Profils de vitesse, *v*, obtenus pour les différentes configurations géométrique (toit plat, toit en forme d'arc, toit incliné à droit, toit incliné à gauche et toit incliné sur les deux cotés).

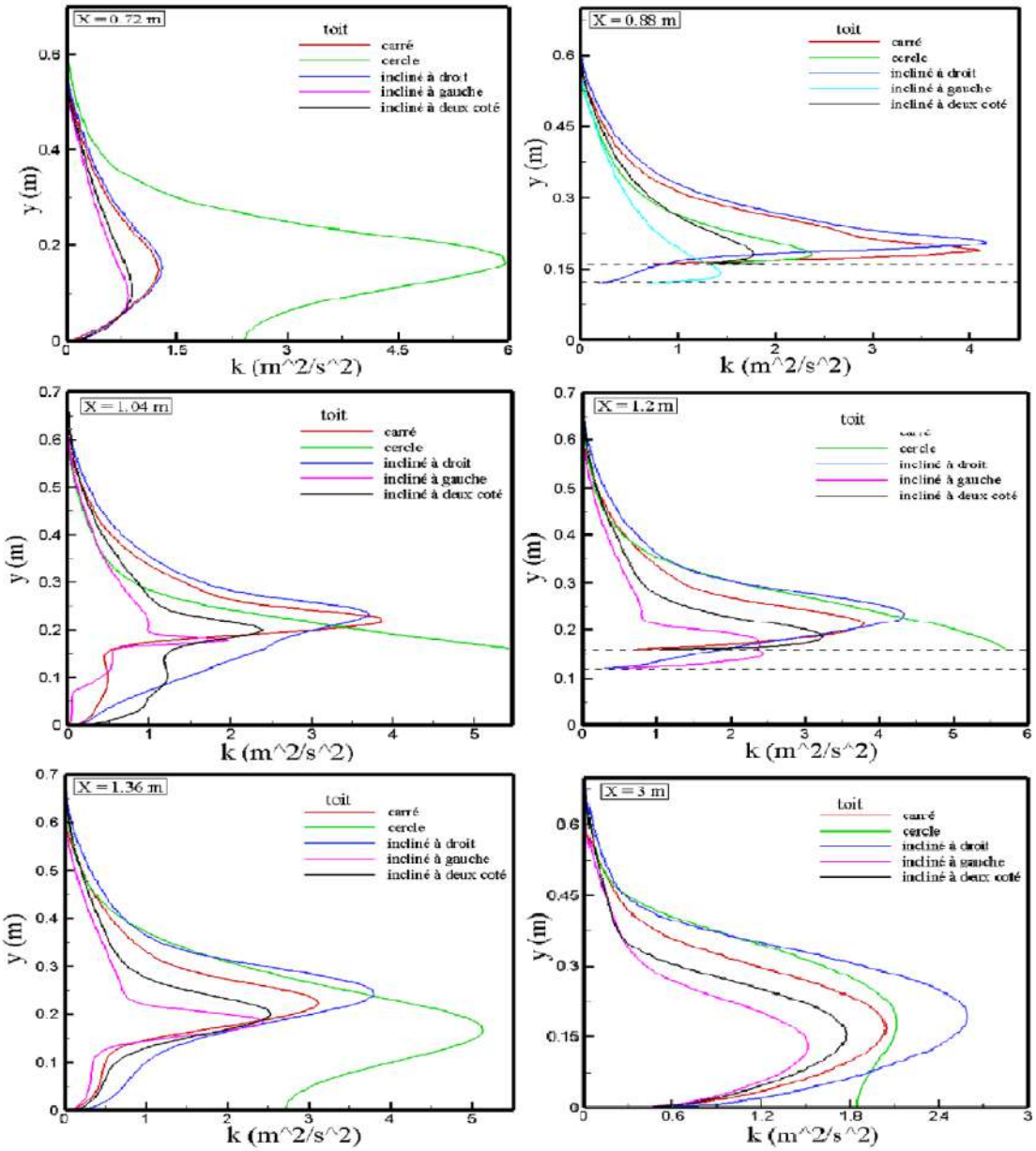


Figure V.5 : Profils de l'énergie cinétique, *k*, obtenus pour les différentes configurations géométrique (toit plat, toit en forme d'arc, toit incliné à droit, toit incliné à gauche et toit incliné sur les deux cotés).

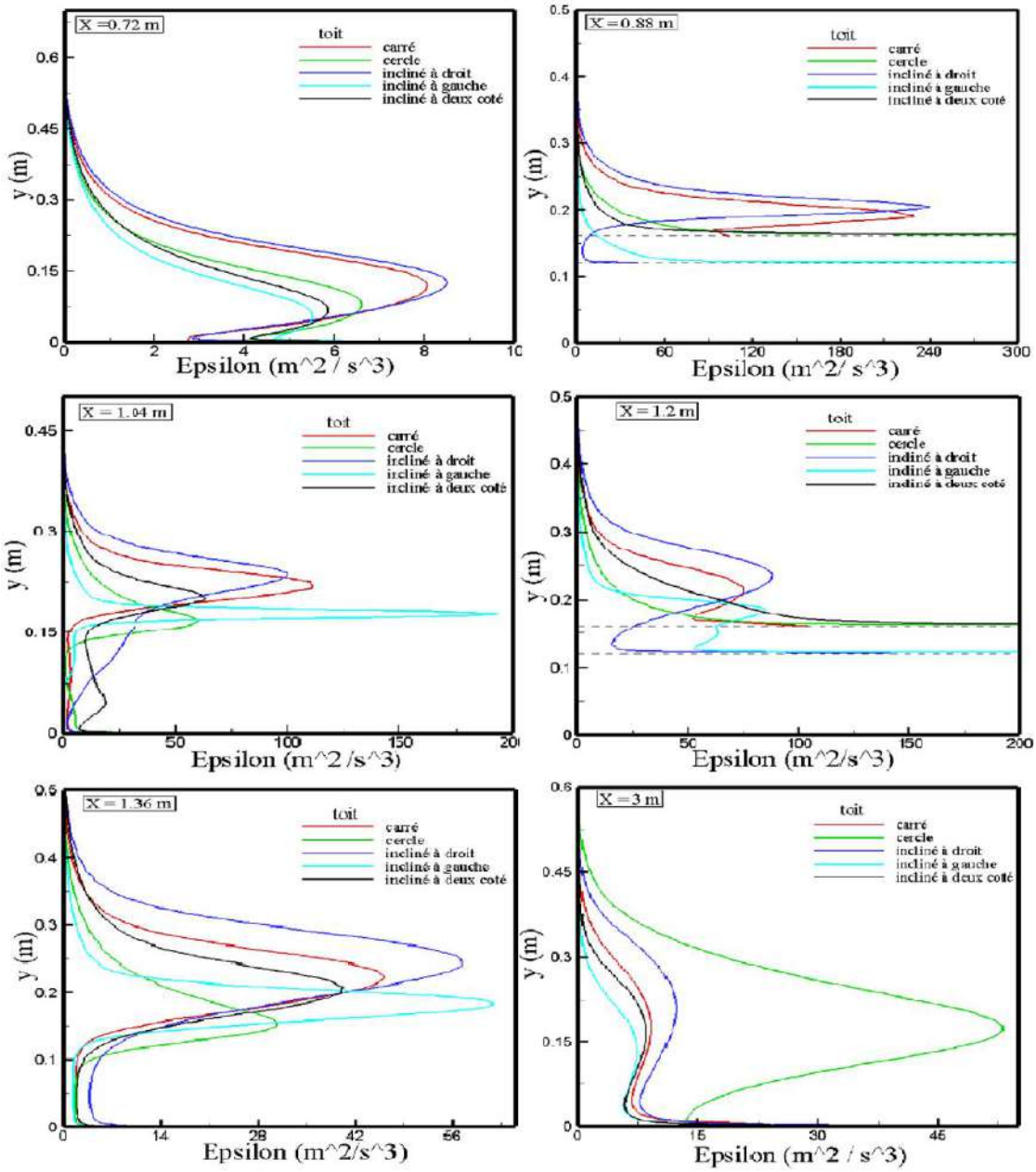


Figure V.6 : Profils de l'énergie de dissipation, ε, obtenus pour les différentes configurations géométrique (toit plat, toit en forme d'arc, toit incliné à droit, toit incliné à gauche et toit incliné sur les deux cotés).

Le changement rapide du gradient de pression, causée par le point de stagnation, empêche adéquatement pour capturer le champ d'écoulement dans cette région comme illustré dans les figures de l'effet de toit du bâtiment sur les profils de pression pour les différentes stations. Les Figs.V.7 montrent l'effet de la forme des toits des bâtiments sur la pression. On constate que, la variation de pression dépend fortement de la forme des toits du bâtiment. En particulier, une grande variation de pression est

observée dans le cas des toits inclinés à gauche et sur les toits incliné dans les deux côtes par apport les autres formes des toits.

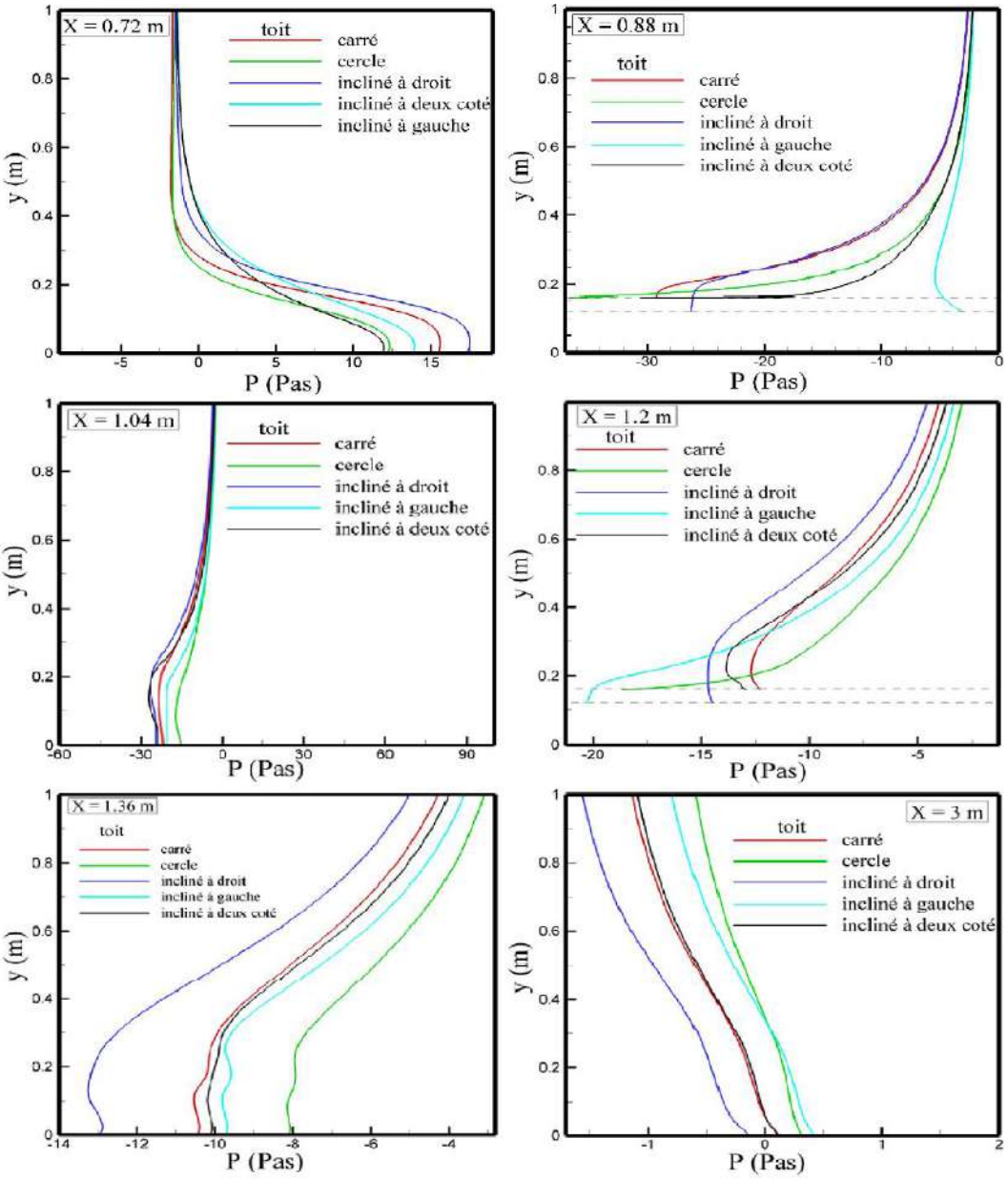


Figure V.7 : Profils de pression, *P*, obtenus pour les différentes configurations géométrique (toit plat, toit en forme d'arc, toit incliné à droit, toit incliné à gauche et toit incliné sur les deux cotés).

Les contours de la distribution de pression, de vitesse, de l'énergie cinétique, de dissipation et les lignes de courant pour les différents toits du bâtiment sont utilisés pour visualiser la structure de l'écoulement dans le domaine. Les lignes de courant obtenues par les cinq géométries sont représentées sur les Figs.V.11. Généralement, en

termes de forme qualitative globale toutes les configurations peuvent prédire la structure d'écoulement formé par la séparation, recirculation et rattachement. On peut montrer que, avec les cinq géométries utilisées, les caractéristiques générales de l'écoulement et la prédiction globale des modes avant, supérieur et arrière dubâtiment sont tout à fait semblables, bien que certaines différences soient visibles. La description de comportement commun est la suivant : l'approche du bâtiment, le flux stagne à la surface au vent du bâtiment. Certains écoulements circulent vers le bas et forme un petit vortex à la base frontale de premier bâtiment. L'écoulement s'écoulant vers le toit se sépare au niveau de bord du toit au vent formé une ou plusieurs vortex de recirculation au niveau de toit du bâtiment dans le sens des aiguilles d'une montre (comme illustré dans les trois cas : toit plat, toit incliné à droit, incliné à gauche et incliné sur les deux cotés), mais ces vortex ne sont pas obtenus pour le cas de toit en forme d'arc.L'autre vortex occupe la rue canyon avec un sens de rotation opposé au vortex supérieur. On note que le vortex supérieur possède des vitesses assez élevées que le vortex inférieur. Le vortex supérieur est restreint entre les deux extrémités des toits et qui tend à inciter un petit vortex inferieur dans la limite supérieure de la rue canyon. On remarque aussi, que les vitesses du vortex inferieur est plus faible par rapport au vortex supérieur. Par rapport au cas de référence (avec un toit plat du bâtiment), marqué par la présence d'un vortex unique principal et d'autre vortex secondaire faible, on remarque que la présence des toits inclinés sur l'immeuble en général, conduit à un déplacement de ce vortex principal à un haut niveau (entre les toits) et le développement d'un contre vortex occupant la cavité et avec des vitesses moins intenses. Une autre remarque, à propos des distributions de vitesses, il y'a un déplacement vertical induit par la forme des toits inclinés qui tend à dévier les vitesses. A bord du toit du premier bâtiment, la séparation de l'écoulement créé un sillage de flux très recirculation, derrière de deuxième bâtiment, qui est dominé par un vortex en forme d'arc dans la région de sillage. La prédiction des points de séparation, stagnation et de rattachement peut considérer comme un test fondamental de l'effet de la forme des toits des bâtiments dans les simulations d'écoulement séparé. Le tableau V.2, il peut montrer que le point de séparation de vortex en amont de l'obstacle est sous-prévu par les toits inclinés et toit en forme d'arc, la sous-estimation est plus prononcée dans la géométrie avec un toit plat, cependant. En effet, la zone de recirculation en aval du bâtiment formé un grand tourbillon avec un point de rattachement X_r. La zone de recirculation de l'écoulement derrière du bâtiment est

surestimée résultant dans une plus grande longueur de rattachement qui sous-estime donc la récupération de flux par la géométrie avec un toit incliné à droit, mais les autres formes des toits (toit plat, toit incliné à gauche et toit incliné sur les deux côtes) estiment assez la récupération de flux, surtout le toit en forme d'arc comme le montre dans les Figs.V.11 et Tab V.2. Certaines instabilités de la couche cisaillée au niveau des toits sont responsables de la perturbation du mélange. La sensibilité de la couche cisaillée par la forme des toits a une influence significative sur la ventilation dans la rue canyon. Le cas des toits inclinés montre des valeurs de déformation pour la vitesse verticale près des toits. Cette déformation indique une perturbation du mouvement vertical causé par la structure turbulente cohérente, ont montré une dynamique d'écoulement différente pour le cas des toits plats et des toits inclinés avec une déformation au niveau des vitesses verticales. Ceci indique une diminution dans l'échange vertical causé par le déplacement d'une structure turbulente présente dans le cas des toits plats et maintient le transfert de masse avec l'air au-dessus du street-canyon.

Pour l'évolution de la pression et de l'énergie cinétique pour satisfaire à l'équation de la quantité de mouvement, la pression statique augmente sensiblement dans la partie avant de la zone de recirculation et diminue au-dessus du bâtiment. Pour les contours de l'énergie cinétique, les résultats sont qualitativement similaires à ceux obtenus dans les contours de pression. On constate que l'énergie cinétique augmente dans la partie en amont du bâtiment surtout au niveau des toits des bâtiments et diminue dans la partie en aval et au-dessus des toits des bâtiments. On constate aussi que, dans le cas de toit en forme d'arc, l'énergie cinétique est élevée sur tout le toit du bâtiment, tandis que les autres configurations, l'énergie cinétique est élevée seulement sur les bords des toits des bâtiments et une chute de l'énergie cinétique est prévue dans la rue canyon (comme illustré dans les Figs.V.10).

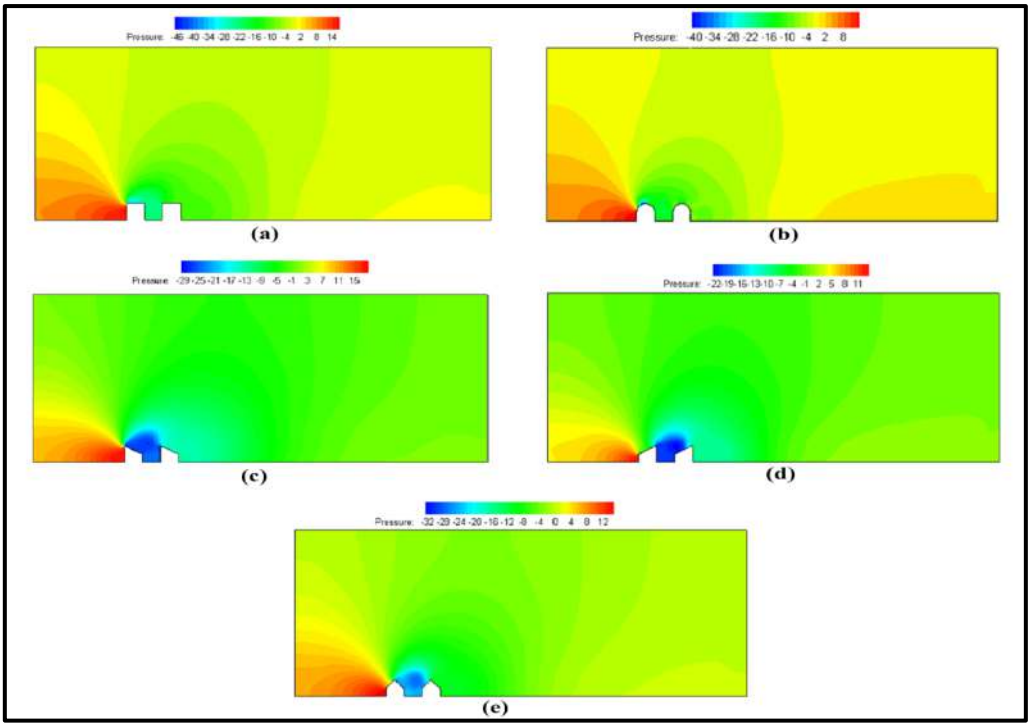


Figure V.8 : Comparaison des contours de pression dans le plan de symétrie *y*/*H*=0 pour les différents toits.

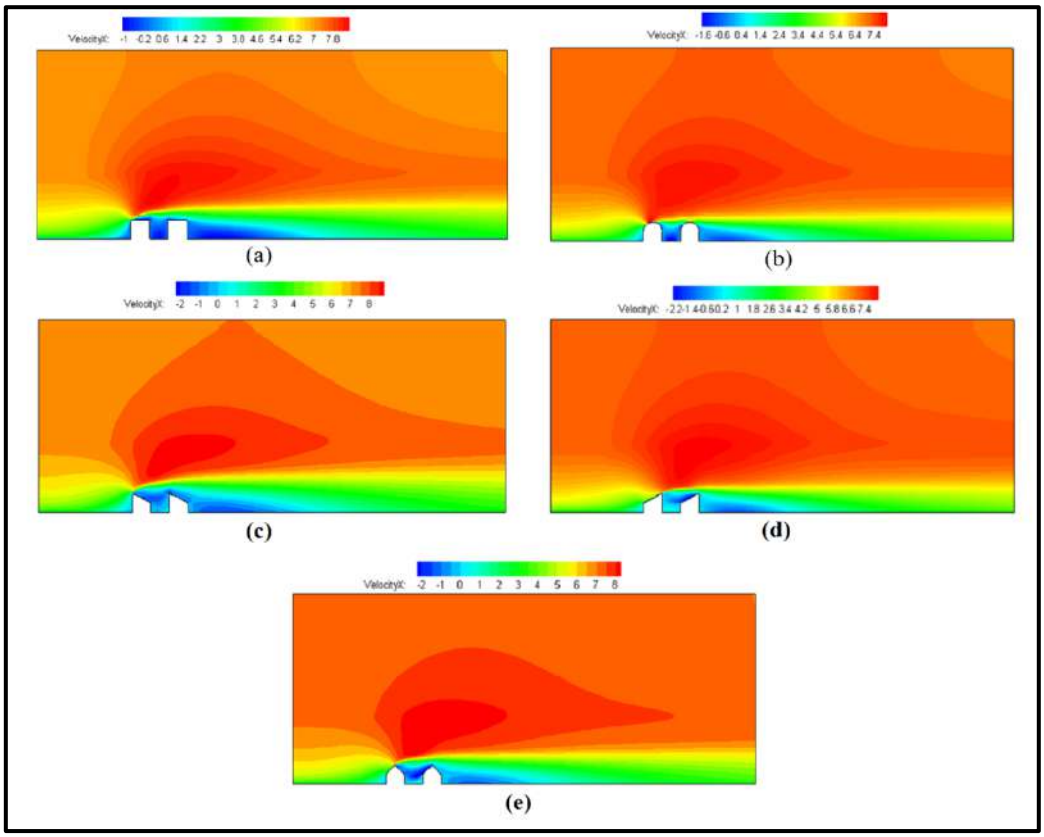


Figure V.9 :Comparaison des contours de vitesse dans le plan de symétrie *y*/*H*=0 pour les différents toits.

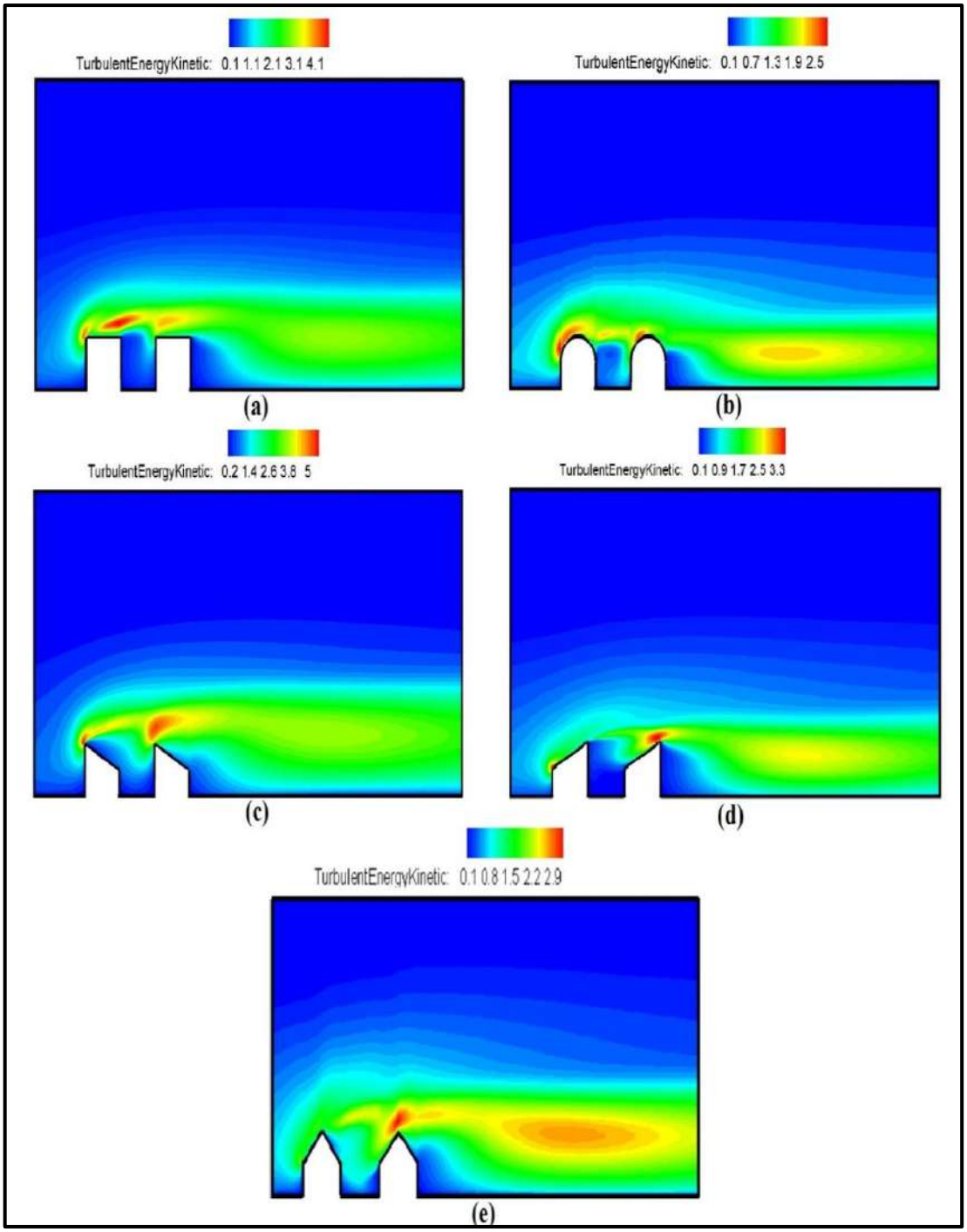


Figure V.10 : Comparaison des contours de l'énergie cinétique dans le plan de symétrie y/H=0 pour les différents toits.

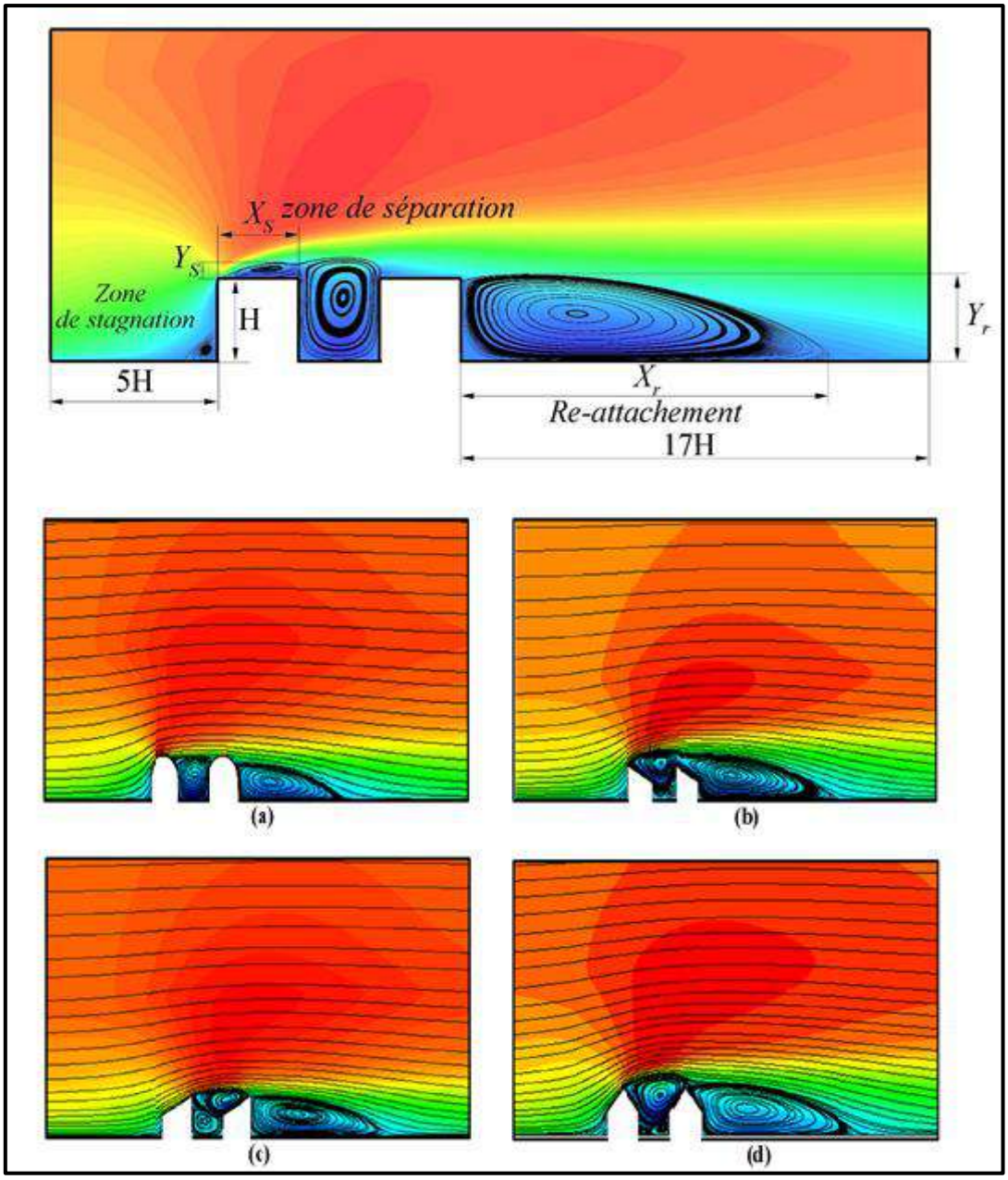


Figure V.11:Comparaison des lignes de courant dans le plan de symétrie *y*/*H*=0 pour les différents toits.

Tableau V.2 : les longueurs caractéristiques du champ d'écoulement.

	Toit carré	**Toit cercle**	**Toit incliné à droit**	**Toit incliné à gauche**	**Toit incliné à deux coté**
X_r(m)	0.71	0.58	0.90	0.74	0.74
Y_r(m)	0.16	0.13	0.2	0.16	0.16
X_s(m)	0.11	0	0	0	0
Y_s(m)	0.02	0	0	0	0

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Ce travail propose une réponse partielle sur l'écoulement autour d'un ou plusieurs obstacles, à savoir la circulation de l'air dans un milieu urbain. Le choix est porté sur une simulation numérique d'un écoulement de l'air dans un milieu urbain avec une modification des formes des toits pour évaluer l'influence de l'architecture de la rue sur l'écoulement de l'air. L'approche adaptée permet la détermination de la structure de l'écoulement.

Ce travail est inspiré par les expériences de la soufflerie qui ont été réalisé au sein du projet de Solazzo et al. [59] dans le but de comparer avec nos résultats numériques et établir une validation.

Pour les cinq formes des bâtiments, on remarque une relation entre la variation de la forme du bâtiment et la présence de vortex en nombre, volume et forme, c'est à dire La modification des formes des toits est marquée par la présence d'un vortex unique principal. On remarque aussi que la présence des toits inclinés sur l'immeuble conduit, en général, à un déplacement de ce vortex principal à un haut niveau (entre les toits) et le développement d'un contre vortexoccupant la cavité et avec des vitesses moins intenses.

La comparaison de nos résultats avec les résultats expérimentaux et numériques (Solazzo et al. [59]) montre une bonne concordance. Dans nos simulations, on remarque que la forme destoits a une grande influence sur la circulation de l'écoulement dans une rue-canyon. On peut dire que cette recirculation du vent permet le renouvellement de l'air et la ventilation de la rue-canyon. En particulier, pour des configurations des toits wind-ward incliné et lee-ward et wind-ward incliné. Les valeurs de rattachement$X_r$significativement plus élevés ont été observées.

Le présent travail apporte la preuve de la capacité du logiciel ANSYS CFX à résoudre des problèmes des différents formes des toits dans le milieu urbain. Il sert également, à réaliser des simulations d'écoulement plus complexes par exemple en 3D et en écoulement instationnaire. Le plus important est qu'il peut constituer et servir comme une base des donnés pour d'autre études dans le même axe et la même thématique.

Références bibliographiques

[1] Yeung. P. K and Kot.S. C. Computation of turbulent flows past arbitrary two-dimensional surface-mounted obstruction. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 18 (1985) 177-190.

[2] Murakami. S and Mochida. A. 3-D numerical simulation of airflow around a cubic model by means of the k-ε model. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 31. (1988) 283-303.

[3] Murakami. S., Mochida. A and Hayashi. Y. Examining the k-ε model by means of a wind tunnel test and large-eddy simulation of the turbulence structure around a cube. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 35 (1990) 87-100.

[4] Paterson. D. A. Simulation of flow past a cube in a turbulent boundary layer.Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 35. (1990). 149-176.

[5] Sini. J. F., Anquetin, S and Mestayer, P.G. Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. Atmospheric Environment. 30 (1996), 2659–2677.

[6] Lakehal. D. Application of the model to flow over a building placed in different roughness sublayers. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 73 (1998)59-77.

[7] Meroney et al. Evaluation of Reynolds stress, k-ε and RNG k-ε turbulence models in street canyon flows using various experimental datasets (1999) .

[8] Maurizi. A. Numerical simulation of turbulent flows over 2D valleys using three versions of the k-ε closure model. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 85 (2000) 59-73.

[9] Iaccarino G and Durbin P. Unsteady 3D RANS simulations using the v^2-f , model, Center for Turbulence Research, Annual Research Briefs, (2000) 263-269.

[10] Kim. J. J., Baik. J. J and Chun. H. Y. Two-dimensional numerical modeling of flow and dispersion in the presence of hill and buildings. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 89 (2001) 947-966.

[11] Kim. J. J and Baik. J. J. Urban street-canyon flows with bottom heating. Atmospheric Environment. 35 (2001) 3395-3404.

[12] Jeong. S. J and Andrews. M. J. Application of the k–ɛturbulence model to the high Reynolds number skimming flow field of an urban street canyon. Atmospheric Environment. 36 (2002) 1137-1145.

[13] Schmidt. S and Thiele. F. Comparison of numerical methods applied to the flow overwall-mounted cubes. Int. J. Heat and Fluid Flow. 23 (2002) 330-339.

[14] Garcia Sagrado. A. P. G., Beeck. J., Rambaud. P and Olivari. D. Numerical and experimental modeling of pollutant dispersion in a street canyon. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 90 (2002) 321-339.

[15] Iaccarino. G., Ooi. A., Durbin. B. A and Behnia. M. Reynolds averaged simulation of unsteady separated flow. Int. J. Heat and Fluid Flow 24 (2003) 147-156.

[16] Bouterra, M., Elcafsi, A and Belghith, A. Étude de l'effet de la stratification thermique sur la dispersion d'un polluant autour d'un obstacle. Rev. Energ. Ren. Vol. 6 (2003) 53-68.

[17] Kim, J. J. and Baik, J. J. A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNGk–ε turbulence model. Atmospheric Environment. 38 (2004) 3039-3048.

[18] Xiang Li. X., Liu. C. H and Leung. D. Y. C. Development of a k-ε model for the determination of air exchange rates for street canyons. Atmospheric Environment. 39 (2005) 7285-7296.

[19] Yakhot. A., Liu. H and Nikitin. N. Turbulent flow around a wall-mounted cube: a direct numerical simulation. International Journal of Heat and Fluid Flow. 27 (2006) 994-1009.

[20] Olivera. H. A and Choudhuri. R. A. Numerical simulation of hydrogen dispersion in the vicinity of a cubical building in stable stratified atmospheres. International Journal of Hydrogen Energy. 31 (2006) 2356-2369.

[21] Evola. G and Popov. V. Computational analysis of wind driven natural ventilation in buildings. Energy and Buildings. 38 (2006) 491-501.

[22] Sedighi. K and Farhadi. M. Three dimensional study of vortical structure around a cubic bluff body in a channel. Mechanical Engineering. Vol. 4, No 1, (2006), pp. 1-16.

[23] Sohankar. A. Flow over a bluff body from moderate to high Reynolds numbers using large eddy simulation. Computers & Fluids. 35 (2006) 1154-1168.

[24] Aliane. K., Sebbane. O and et Houmat. A. Étude expérimentale de l'écoulement bidimensionnel autour d'un obstacle rectangulaire et un obstacle rectangulaire arrondi.Afrique SCIENCE. 02(3) (2006) 285-29.

[25] Huang, Y. D., Ming, J. X and Sun, Y. Numerical studies on airflow and pollutant dispersion in urban street canyon formed by slanted roof Building. Journal of Hydrodynamics. Ser.B, (2007),19(1):100-106.

[26] Jia-Song. W and Zhen. H. A TVD scheme for incompressible flow coupled with different turbulence models on a ground-mounted square rib-flow. Journal of Hydrodynamics. Ser.B, (2007),19(6):743-750.

[27] Loureiro. J. B. R., Alho. A. T. P and Freire. A. P. S. The numerical computation of near-wall turbulent flow over a steep hill. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 96 (2008) 540-561.

[28] Cai. X. M, Barlow. J. F and Belcher. S. E. Dispersion and transfer of passive scalars in and above street Canyons-Large-eddy simulations. Atmospheric Environment.42 (2008) 5885-5895.

[29] Ratnam. S.G and Vengadesan. S. Performance of two equation turbulence models for prediction of flow and heat transfer over a wall mounted cube. International Journal of Heat and Mass Transfer. 51 (2008) 2834-2846.

[30] Tominaga. Y and Stathopoulos. D. Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: comparison of various types of k–ε models. Atmospheric Environment. 43 (2009) 3200-3210.

[31] Santos. J. M., Reis Jr. N. C., Goulart. E. V and Mavroidis. L. Numerical simulation of flow and dispersion around an isolated cubical building: the effect of the atmospheric stratification. (2009).

[32] Solazzo. E., Cai. X and Vardoulakis. S. Improved parameterisation for the numerical modelling of air pollution with in an urban street canyon. Environmental Modelling. Software 24 (2009) 381-388.

[33] Köse. D. A and Dick. E. Prediction of the pressure distribution on a cubical building with implicit LES. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 98 (2010) 628-649.

[34] Yassin. M. F. Impact of height and shape of building roof on air quality in urban street canyons. Atmospheric Environment. 45 (2011) 5220-5229.

[35] Vardoulakis. S., Reneta. D., Richards. K., Hamlyn. D., Camilleri. G., Weeks. M., Sini. J. F., Britter. R., Borrego. C., Schatzmann. M and Moussiopoulos. N. Numerical model Inter-comparison for wind flow and turbulence around single-block buildings.Environmental odeling& Assessment. 16 (2) (2011) 169-181.

[36] Salim. S. M., Ong. K. C and Cheah. S. C. Comparaison of RANS, URANS, LES in the prediction of airflow and pollutant dispersion. Proceedings of the World Congress on engineering and Computer Science (2011) Vol II.

[37] Tominaga, Y. and Stathopoulos, T. CFD modeling of pollution dispersion in building array: evaluation of turbulent scalar flux modeling in RANS model using LES results. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 104-106 (2012) 484-491.

[38] Gousseau .P., Blocken. B and Van Heijst. G. J. F. Large-Eddy simulation of pollutant dispersion around a cubical building: analysis of the turbulent mass transport mechanism by unsteady concentration and velocity statistics. Environmental Pollution. 167 (2012) 47-57.

[39] Lateb. M., Massona. C., Stathopoulos. T and Bédard. C. Comparison of various types of k–ε models for pollutant emissions around a two-building configuration. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 115 (2013) 9-21.

[40] Tian. X., Ong. M. C., Yang. J and Myrhaug. D. Unsteady RANS simulations of flowaround rectangular cylinders with different aspect ratios. Ocean Engineering. 58 (2013) 208-216.

[41] Stull, R. B. An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, (1988).

[42] Garratt, J. R. The atmospheric boundary layer, Cambridge at Atmospheric and Space Science Series-Cambridge University Press, (1992).

[43] Richardson, L. F. Weather prediction by numerical process,Cambridge, Cambridge University Press, (1922).

[44] Kolmogorov, A. N. Local structure of turbulence in an incompressible fluid at very high Reynolds numbers. Proceedings of the USSR Academy of Sciences, (1941).

[45] Speziale, C. G. On nonlinear K-l and K-epsilon models of turbulence. J. Fluid Mech., 178 :459-475, (1987).

[46] Wallin, S and Johansson, A. V. An explicit algebraic Reynolds stress model forimcompressible and compressible turbulent flows. J. FluidMech., 403 :89-132, (2000).

[47] Favre, A., Kovasznay, L. S. G., Dumas, R., Gaviglio, J et Coantic, M .La turbulence en mécanique des fluides. Ed Gauthier-Villars (1976).

[48] Allmaras, S. R. Spalart, P. R. A one equation turbulence model for aerodynamics flows. AIAA paper, 92-0439, (1992).

[49] Harlow, F and Nakayama, P. Transport of turbulence energy decay rate. Rapport technique LA-3854, Los Almas Science Lab., Univ. California (1968).

[50] Jones, W and Launder, B. The predictions of laminarization with a two equation model of turbulence. Journal of Heat and Mass transfert, 15, 301-314, (1972).

[51] Launder, B., Morse, A., Rodi, W and Spalding, D. The prediction of free shear flows a cornparison of the performance of six turbulent flow. Comp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 3, 269-289, (1972).

[52] Launder, B and Spalding, D. The numerical computation of turbulent flow. Cornp. Meth. in Appl. Mech. and Eng., 3, 269-289, (1974).

[53] Shih, T. H., Liou, W. W. Shabbir, A., Yang, Z and Zhu, J. A new k-ε eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows-model development and validation. Computers Fluids. 24 (3), 227-238, (1995).

[54] Yakhot, A., Liu, H. & Nikitin, N. Turbulent flow around a wall-mounted cube: A direct numerical simulation. International Journal of Heat and Fluid Flow, 27**,** 994-1009. (2006)

[55] Wilcox, D. C. Turbulence modeling for CFD, DCW industries, La Cañada, États-Unis, 460 pages, (1993).

[56] Menter, F. R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications, AIAA Journal, vol 32, No 8 : 1598-160, (1994).

[57] Menter, F. R., Kuntz, M and Langtry, R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model: K. Hanjalic, Y. Nagano and M. Tummers, turbulence, Heat and Mass Transfer 4, Begell House, New-York, 625-632, (2003).

[58] Ferziger, J. H. Simulation of complex turbulent flows: Recent advances and prospectsin wind engineering. Computational Wind Engineering, 1. (1993)

[59] E. Solazzo et al. XiaomingCaia, Sotiris Vardoulakis.Environmental Modelling & Software 24 (2009) 381–388