République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Yahia Farès de Médéa



Faculté de technologie
Département de Génie Mécanique

THÈSE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat

En

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Mécanique Numérique

Effet de l'orientation des rues par rapport à l'axe principal sur la dispersion de polluant

Par

Lamia BEN RAMOUL

Devant le jury composé de :

Dr Mourad BACHENE	**MCA, U. Médéa**	**Président**
Pr Abdallah BEN AROUS	**Professeur, U. Blida**	**Examinateur**
Dr Zakaria TRIKI	**MCA, U. Médéa**	**Examinateur**
Pr A. KORICHI	**Professeur, U. Médéa**	**Directeur de thèse**

10 /10 /2020

Remerciement

Tout d'abord je remercie infiniment
ALLAH le tout puissant de la
bonne santé, la volonté et la
patience qu'il m'a accordé tout le
long de mes études.

Au terme de ce travail, j'exprime mes particuliers remerciements à Monsieur Korichi Abdelkader. Professeur à U.Y.F.M pour m'avoir guidé de mener à bien mes études, par sa confiance, son sérieux et son soutien, son esprit d'analyse, et ses encouragements et surtout sa patience qui m'a rendu sincèrement reconnaissante.

Je tiens à adresser mes vifs remerciements à tous les membres de jury qui m'ont honoré par leur précieuse présence.

A ces remerciements, j'ajoute ceux de mes parents et tous les membres de ma famille pour tous ce qu'ils ont faits pour moi, leur compréhension, et leur soutien total.

Sans oublier mes amis, collègues et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à réaliser ce travail

Dédicace

Je dédis cet humble travail :

À Mon Très Cher Père qui m'a toujours soutenu et cru en moi,

À Ma source de courage, chère Maman qui m'a toujours comblée par ses précieuses prières,

À mon époux

À Tous Mes Frères et leurs magnifiques femmes Et À la meilleure Sœur au monde

À Mes chers enfants, ma source d'inspiration et d'espoir...

À Tout Les Enseignants Que J'ai Eu Au Fil Des Ans

À Tous Mes Amis Et Mes Collègues.

Résumé

Le problème de la pollution de l'air dans les villes est devenu préoccupant quant à l'avenir et le développement des grandes cités urbaines. Dans le but d'étudier les processus physiques mis en jeux dans le transport, la diffusion et l'accumulation des polluants, des outils CFD ont été développés pour simuler la structure de l'écoulement et de la dispersion des différents polluants dans des configurations urbaines complexes.

Le travail de cette thèse s'inscrit dans cette optique et s'intéresse à l'étude numérique des caractéristiques d'écoulement et la dispersion des polluants autour des bâtiments. Trois modèles de fermeture de turbulence RANS, à savoir le modèle k-ε standard, le modèle k-ε réalisable et le modèle k-ε RNG ont été testés. Deux configurations ont été étudiés. La première est en 2D où deux géométries sont considérées : cas d'un seul obstacle isolé et cas de deux obstacles formant une rue canyon idéalisée.

Quant à la seconde configuration, en 3D, constituée de quatre obstacles placés perpendiculaires à l'axe principale puis orientés d'un angle de 45° par rapport à l'axe pour tester l'effet de l'orientation des rues sur les taux de concentration. La simulation numérique est effectuée au moyen du code OpenFOAM® qui utilise la méthode des volumes finis pour résoudre les équations de transport de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation turbulente. La comparaison avec des résultats expérimentaux a fait ressortir que le modèle RNG k-ε donne un meilleur accord. De plus, les coefficients standard du modèle RNG k-ε ont été adaptés pour mieux prédire les caractéristiques d'écoulement dans la couche limite urbaine. Les résultats obtenus montrent un bon accord avec les mesures expérimentales pour le profil d'écoulement de vitesse et l'intensité cinétique turbulente. Enfin la concentration du polluant dépend du nombre de Reynolds et de la disposition des sources pour une configuration géométrique donnée.

Mots clés: pollution urbaine, RNG k- ε, dynamique des fluides computationnelle (CFD), méthode des volumes finis, orientation des rues, OpenFOAM.

Abstract

The problem of air pollution in cities has become a concern for the future and the development of large urban cities. In order to study the physical processes involved in their transport, diffusion and accumulation, CFD tools have been developed. These tools are capable to simulate the flow structure and pollutants dispersion in complex urban configurations. In this work, the flow characteristics and pollutant dispersion around building are investigated numerically using three RANS turbulence closure models, i.e. Standard k-ε model, Realizable k-ε and RNG k-ε model. Two 2D physical configurations are considered in a first study: a single isolated obstacle and two obstacles forming an idealized canyon street. A 3D configuration consisting of four obstacles placed perpendicular to the main axis and oriented at incidence of 45° to the main axis to determine the effect of street orientation on concentration rates. Numerical simulations are performed with OpenFOAM®source code which uses the finite volume method to solve the transport equations of mass, momentum, turbulent kinetic energy and turbulent dissipation rate. When numerical results were compared to wind tunnel experiments, it was found that the RNG k-ε turbulence model yielded the best agreement with experimental data. Moreover, the coefficients of the RNG k-ε turbulence model were adapted to better predict the flow characteristics in the urban boundary layer. The results obtained using the appropriate model show good agreement with experimental measurements for velocity flow profile and turbulent kinetic intensity. The prediction of pollutant dispersion reveals that in addition to the Reynolds number, the emission location plays an important role in the pollutant concentration distribution.

Key words: Urban pollution, k-ε turbulence models, computational fluid dynamics (CFD), the finite volume method, OpenFOAM.

ملخص

اصبحت مشكلة تلوث الهواء في المدن مصدر قلق على صحة الإنسان و راحته المنزلية،من أجل هذا قام الباحثون في هذا المجال في الآونة الأخيرة بدراسات متعددة لتطوير المدن الحضرية الكبيرة في المستقبل و إيجاد حلول للمشاكل المطروحة.

دراسة العمليات الفيزيائية المتعلقة بنقل ونشر وتراكم الملوثات في الهواء عملية معقدة جدا لا نستطيع حلها إلا عن طريق المحاكاة الرقمية لديناميكا السوائل،هذه الأدوات قادرة على محاكاة هيكل التدفق وانتشار الملوثات المختلفة في التكوينات الحضرية المعقدة، في دراستنا،تم فحص خصائص التدفق وتشتت الملوثات حول المبنى رقميًا باستخدام ثلاثة نماذج RANS لحصر الاضطراب،النموذج القياسي و الأخرى هي نماذج معدلة.

في هذه الدراسة أنشأنا تكوينين فيزيائيين ثنائيي الأبعاد: عائق واحد معزول وعائقان يشكلان النموذج الافتراضي المثالي للشارع والتكوين الثاني عبارة عن إنشاء ثلاثي الأبعاد يتكون على التوالي من أربعة عوائق موضوعة بشكل متعامد مع المحور الرئيسي ثم موجه بزاوية 45 درجة لتحديد تأثير اتجاه محور الشارع على معدلات تركيز الملوث.يتم إجراء عمليات محاكاة عددية باستخدام برمجة حرة بمساعدة المبرمج OpenFOAM® الذي يستخدم طريقة الحجم المحدود لحل معادلات النقل للكتلة و حساب الطاقة الحركية المضطربة ومعدل التبدد المضطرب.

عند مقارنة النتائج العددية بتجارب نفق الرياح،وجدنا أن نموذج الاضطراب المعدل RNG k-ε أسفر عن أفضل النتائج مقارنة مع البيانات التجريبية حيث أظهرت هذه النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام النموذج المناسب توافقًا جيدً ا مع القياسات التجريبية لمنحنى تدفق السرعة و الكثافة الحركية المضطربة.

تكشف الدراسة أيضا أن رقم رينولدز له علاقة متناسبة مع تشتت الملوثات،و أن موقع الانبعاث يلعب دورًا مهمًا في توزيع تركيز الملوثات.

الكلمات المفتاحية : تراكم الملوثات ،المحاكاة الرقمية لديناميكا السوائل، هيكل التدفق, الطاقة الحركية المضطربة،معدل التبدد المضطرب،OpenFOAM.

Sommaire

Résumé i

Liste des matières iv

Liste des tableaux viii

Liste des figures ix

Nomenclature xiii

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralité et étude bibliographique

I.1 Généralité ……..5

I.1.1 la pollution atmosphérique ……..……..5

I.1.1.1 Les effets de la pollution atmosphérique ……...5

I.1.1.2 L'atmosphère……..…….6

I.1.1.3 Les polluants atmosphériques…….……8

I.1.1.4 Dispersion des polluants…….8

I.1.1.4.1 Les émissions …….……..8

I.1.1.4.2 Le processus de transport-dispersion…….…….…….....9

I.1.1.4.3 Les concentrations…….....9

I.1.1.4.4 La déposition atmosphérique…….…….....10

I.1.1.4.5 Le facteur du vent …….…….....……..11

I.1.1.4.6 La pression atmosphérique……....……...…12

I.1.1.4.7 Facteurs affectant directement la dispersion ……...…….....13

I.1.1.5 La couche limite atmosphérique(CLA)……....……...……...14

I.1.1.6 La turbulence dans la CLA …….……..……...……..15

I.1.1.7La couche limiteurbaine ……..……..……..16

I.1.1.8 Couche limite de surface ……...17

I.1.2 L'étude de l'écoulement et de la dispersion dans une rue canyon idéalisée……..…19

I.1.2.1 L'écoulement et la dispersion autour d'un obstacle…….……...….20

I.1.2.2 Effet de la rugosité aérodynamique……...…….22

I.1.2.3 Effet de la morphologie urbaine……..……..23
I.1.2.4 Méthodologie d'étude……...….26
I.1.2.5 Usage et limites……...……...27
I.2 Etude bibliographique ……..……..…….29
I.3 Conclusion……..……35

Chapitre II : Formulation mathématique

II.1 Introduction ……36
II.2 Notions fondamentales sur la dynamique atmosphérique……..36
II.2.1 Equations gouvernantes des écoulements……36
II.2.2 pris en compte de la turbulence…….…...38
II.2.3 Profil de vitesse dans la couchelimite ……....41
II.2.4 Les lois d'écoulement à laparoi……...42
II.2.5 Les modèles de turbulence ……..43
II.2.5.1 Modèles à zéro équation : Modèles algébriques……...…44
II.2.5.2 Modèles à une équation ……..……...….45
II.2.5.3 Modèles à deux équations ……...….46
II.2.5.3.1 Le modèle K-Ɛ……....……..…..……47
II.2.5.3.1.1 Les différentes versions du modèle K-Ɛ ……....47
II.2.6 Description mathématique de la dispersion atmosphérique ……..….50
II.2.6.1 Approche Eulérienne ……...50
II.3 Conclusion…….....52

Chapitre III : Simulation numérique et code de calcul

III.1 Introduction ….……53
III.2 Les modèles de dispersion atmosphérique…….....53
III.2.1 Les modèles Gaussiens…...…….……53
III.2.2 Les modèles Lagrangiens……..……..……...54
III.2.3 Les modèles CFD…….....55
III.3. Les outils de modélisation de la turbulence …….……....56
III.3.1. La Simulation Numérique Directe (DNS)…….…….56
III.3.2 La Simulation des Grandes Echelles (Large Eddy Simulation ou LES)…….....57
III.3.3 La modélisation statistique des équations de Navier-Stokes (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations ou équations RANS)……..……58

III.4 Choix de méthode numérique……58
III.4.1 la méthode des différences finies ……...59
III.4.2 la méthode des éléments finis…….....59
III.4.3 la méthode des volumesfinis ……..…59
III.4.3.1 les équations conservatrices…….60
III.4.3.2 Principegénéral……...…..61
III.4.3.3 Discrétisation des termes diffusifs etconvectif ……....62
III.4.3.4 schémas numériques …….....63
III.4.3.5 Discrétisation des autrestermes…….....64
III.5 Simulation et code de calcul……..65
III.5.1 Présentationd'OpenFOAM……....65
III.5.2 Avantages et limitesd'OpenFOAM ……..…67
III.5.3 Système des fichiers d'OpenFOAM……...68
III.5.4 Préparation des données (Pré-processing)……..69
III.5.4.1 Génération du maillage……...69
III.5.4.1.1 maillage 2D : (mailleurPointwise)……...70
III.5.4.1.2 maillage 3D (Mailleur Gambit) …….....74
III.5.4.2 Conditions initiales et aux limites……..77
III.5.5 Traitement (Processing) ……..……79
III.5.5.1 Solveur……....…79
III.5.5.2 Ajout d'un scalaire passif ……...……..81
III.5.5.3 Boucles de correction……...83
III.5.5.4 Choix de schéma d'interpolation……....……84
III.5.5.5 Tolérances de la solution……....……85
III.5.6 Visualisation et analyse des résultats (post-Processing) ……..…..86
III.6 Conclusion……..…86

Chapitre IV : Validation du modèle et discussion des résultats

IV.1. Introduction……..87
IV.2. Validation et adaptation du modèle……..88
IV.2.1. Domaine de calcul et conditions aux limites……88
IV.2.2. Topologie du maillage bidimensionnel……90
IV.2.3. Choix du modèle de turbulence……...……..94

IV.2.3.1. Adaptation du modèle de turbulence choisi……...97

IV.3. Étude de dispersion de polluant en 2D……...102

IV.3. 1 Cas d'un seul obstacle……..……103

IV.3. 2 Cas de deux obstacles……..106

IV.4. Modélisation de dispersion atmosphérique en 3D…….109

IV.4.1 Domaine de simulation et conditions aux limites……....109

IV.4.2 Maillage tridimensionnel…….111

IV.4.3 Structure de l'écoulement……112

IV.4.4 Dispersion de polluant et effet de l'orientation des rues…….....…..114

IV.4.4.1 Cas d'source…….…….....114

IV.4.4.2 Effet de nombre de Reynolds……...……..... ……...119

Conclusion générale……..122

Références bibliographiques……125

Annexes……..137

Liste des tableaux :

Chapitre I :

Tableau (I.1) : Evolution de la quantité de polluants en fonctionde la taille des villes…….……....13

Tableau(I.2) : Valeurs typiques de la rugosité……..……22

Tableau(I.3) :Les différentes formes urbaines et leurs effets sur le comportement de l'écoulement de l'air et la dispersion de polluant…….……25

Chapitre III :

Tableau (III.1) : Type et description des conditions aux limite utilisées par OpenFoam ……..……....78

Tableau (III.2) : Exemple de solveurs disponibles sur OpenFOAM……..…..80

Tableau (III.3) :Les différents schémas d'interpolation d'OpenFOAM….…….….84

Tableau (III.4) :Schémas de discrétisation……..…….85

Chapitre IV :

Tableau(IV.1) **:** Distribution de Maillage pour les différents blocs……..92

Tableau (IV.2) **:** Leslongueurs caractéristiques du champ d'écoulement pour les modèles de turbulence et CEDVAL A1-3……..…...101

Liste des figures :

Chapitre I :

Figure(I.1) : Structure verticale de l'atmosphère…….....7

Figure(I.2) : Processus intervenant dans la dispersion des polluants de l'atmosphère...10

Figure (I.3):Les processus de transport et de diffusion……..…....11

Figure (I.4) : Emissions, transformation et dépôts de polluants……..……...11

Figure (I.5) : Effet de la pression sur la dispersion…….……...13

Figure (I.6) : Représentation des différentes couches de la CLA…….....15

Figure (I.7) : La couche limite urbaine(CLU)……17

Figure (I.8) : Structure de la Couche Limite Urbaine : d'après (Roth, 2000)……...18

Figure(I.9) : Illustration d'une rue canyon……...…..…19

Figure(I.10) : Ecoulement turbulent en présence d'obstacle……..……....20

Figure(I.11) : Régimes d'écoulement à l'intérieur des canyons en fonction du rapport d'aspect (H/W), source (Oke, 1998)…….….21

Chapitre III :

Figure (III.1) : Exemple de modélisation par modèle Gaussien……..……...…...54

Figure (III.2) : Exemple de modélisation par modèle Lagrangien…….54

Figure (III.3) : Exemple de modélisation par modèle CFD…….…..56

Figure (III.4): Modélisation effectuée par Simulation Numérique Directe (DNS)…...57

Figure(III.5) : Modélisation effectuée par la Simulation des Grandes Echelles(LES)..57

Figure (III.6) : Modélisation effectuée par la Simulation RANS…….....68

Figure(III.7) : Volume de contrôle dans un maillage 3D non orthogonal……60

Figure (III.8) :Volume de contrôle 2D……...62

Figure (III.9) :Maillage 1D……....…62

Figure(III.10) : La boite à outil d'OpenFoam…….……...66

Figure (III.11) : Structure du code de calcul OpenFOAM…….....66

Figure (III.12) : Structure d'un répertoire de calcul pour un cas d'OpenFOAM.……68

Figure (III.13) : Exemple d'un terminal pour l'exécution d'un maillage via commande blockMesh……...…….....70

Figure (III.14) : Géométrie et maillage du modèle physique réalisé par Pointwise….71

Figure (III.15) : Direction et distribution du maillage par l'outil spacingconstraint sur Pointwise……....72

Figure (III.16) Conditions aux limite par Pointwise…….……73

Figure (III.17) : Lancement du Gambit…….....74
Figure (III.18) :Principe d'utilisation de Gambit…….....75
Figure (III.19) :Géométrie 3D sur Gambit du modèle des blocs orientés…….75
Figure (III.20) :Maillage 3D sur Gambit du modèle des blocs orientés……...76
Figure (III.21) :Les conditions aux limites……..….76

Chapitre VI :

Figure (IV.1) **:** Domaine de calcul, conditions aux limites et dimensions pour le cas (a) un obstacle et (b) deux obstacles……89

Figure (IV.2):Profil de vitesse d'entrée ajusté avec les données expérimentales…..…90

Figure(IV.3) **:** Topologie du maillage……....91

Figure (IV.4) : Profils de vitesse pour différents maillages en deux sections : a x/H=0, b x/H=1.5……..….92

Figure (IV.5) **:** L'évolution d'y^+ pour le modèle de turbulence k-Ɛ……..…93

Figure (IV.6) **:** Distribution de maillage……...…….....94

Figure (IV.7) **:** Comparaison des lignes de courant obtenues pour les différents modèles de turbulence et les données expérimentales **a** k-ε standard, **b** k-ε Réalisable et **c**RNG k-ε et **d** données de soufflerie……..…….....95

Figure (IV.8):Comparaison de la composante de vitesse**u** prédite avec celles des données expérimentales (CEDVAL) sur les différentes sections…….……97

Figure IV.9 (suite) : Évaluations des constantes modifiées du modèle RNG k- ε par rapport aux données expérimentales de soufflerie CEDVAL (CEDVAL 2013): **a** profil de vitesse u, **b** profil de k……..…99

Figure(IV.10)**:** Les longueurs Caractéristiques d'écoulement turbulent autour d'un obstacle……101

Figure (IV.11): Concentration non dimensionnelle pour le cas d'un obstacle avec une source ponctuelle située à: a) amont de l'obstacle b) amont de l'obstacle sans diffusion turbulente c) aval de l'obstacle, d) deux sources ponctuelles situées en amont et aval de l'obstacle……..104

Figure (IV.12): Effet de la vitesse d'entrée sur la distribution de concentration pour le cas d'un obstacle à deux sources ponctuelles: a) $u_0=u_{ref}/2$, b) $u_0=2.u_{ref}$.....105

Figure IV.13 : Lignes de courant pour le cas d'une rue canyon idéalisée avec deux obstacles……...106

Figure (IV.14) **:** Concentration non dimensionnelle pour le cas de deux obstacles avec une source ponctuelle située: a) en amont, b) en aval, c) deux sources ponctuelles situées en amont, d) une vue agrandie (zoomée) entre les deux obstacles……..…107

Figure (IV.15) : Effet de la vitesse du vent sur la concentration non dimensionnelle dans le cas de deux obstacles avec deux points de source a) $u_0=u_{ref}/2$, b) $u_0=2.u_{ref}$..108

Figure (IV.16):Domaine de calcul, conditions aux limites et dimensions pour le cas (a) quatre obstacles perpendiculaires à l'axe principal et (b) quatre obstacles orientés d'un angle de 45° par rapport à la direction du vent……111

Figure (IV.17):Topologie de maillage tridimensionnel……..…112

Figure(IV.18)**:** Les lignes de courant pour le cas des blocs alignés a) : une coupe longitudinale au milieu des obstacles au niveau du plan Y b) : une coupe transversale au milieu des obstacles au niveau du plan Z……..…….113

Figure (IV.19) **:** Les lignes de courant pour le cas des blocs orientés a) : une coupe longitudinale au milieu des obstacles au niveau du plan Y b) : une coupe transversale au milieu des obstacles au niveau du plan Z……...…114

Figure (IV.20) **:**Comparaison des valeurs de concentrations du polluant pour une source localisé en amont des obstacles avec une vitesse expérimentale pour le cas de 4 blocs alignés et orientés a) au niveau du sol b) au milieu des obstacles c) au niveau des toitures d) plan transversal au milieu de la rue…….115

Figure (IV.21) **:** Comparaison des valeurs de concentrations du polluant pour une source localisé au milieu des obstacles avec une vitesse expérimentale pour le cas de 4 blocs alignés et orientés a) au niveau du sol b) au milieu des obstacles c) au niveau des toitures d) plan transversal au milieu de la rue……117

Figure (IV.22)**:** Comparaison des valeurs de concentrations du polluant pour une source localisé en amont des obstacles avec une vitesse doublée pour le cas de 4 blocs alignés et orientés a) au niveau du sol b) au milieu des obstacles c) au niveau des toitures d) plan transversal au milieu de la rue……..……....120

Figure (IV.23) **:** Comparaison des valeurs de concentrations du polluant pour une source localisé au milieu des obstacles avec une vitesse doublée pour le cas de 4 blocs alignés et orientés a) au niveau du sol b)au milieu des obstacles c) au niveau des toitures d) plan transversal au milieu de la rue……121

Nomenclature :

ε	Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente	$m^2.s^{-1}$
K	constante de von Kàrmàn	–
μ	viscosité dynamique	$Kg.m^{-1}s^{-1}$
μ_t	viscosité dynamique turbulente	$Kg.m^{-1}s^{-1}$
ν	viscosité cinématique	$m^2.s^{-1}$
ν_s	viscosité sous-maille	$m^2.s^{-1}$
ν_t	viscosité cinématique turbulente	$m^2.s^{-1}$
ρ	masse volumique	$Kg.m^{-3}$
σ_ε	nombre de Prandtl pour ε	–
σ_k	nombre de Prandtl pour k	–
C	concentration moyenne	$g.m^{-3}$
$C_\mu, C_\varepsilon 1$	constantes du modèle k-ε	–
D_m	coefficient de diffusion moléculaire	$m^2.s^{-1}$
D_t	diffusivité turbulente	$m^2.s^{-1}$
f	paramètre de Coriolis	s^{-1}
g	accélération de la pesanteur	$m^2.s^{-1}$
H	hauteur moyenne des bâtiments	m
k	énergie cinétique turbulente	$m^2.s^{-1}$
k_t	diffusivité turbulente	$m^2.s^{-1}$
p	pression de l'air	Pa
t	temps	s
R_e	nombre de Reynolds de l'écoulement	-
Sc_t	nombre de Schmidt turbulent	-
U_{ref}	vitesse de référence	m/s
u^+	vitesse prés des parois	m/s
u_*	vitesse de frottement	m/s
u,v,w	composantes de la vitesse	m/s
W	largeur de la rue	m
Y^+	distance adimensionnelle normale à la paroi	–
z_*	hauteur de la sous-couche rugueuse	m
z_0	longueur de rugosité dynamique	m
z_h	hauteur de la canopée	m

Indices

X,y,z	Coordonnées cartésiennes	_
i	Numéro de position	_
i, j, k	Direction de projection	_
n	Nombre de point de mesure	_

Abréviations

CFD	Dynamique des fluides computationnels
CLA	Couche Limite Atmosphérique
CLS	Couche Limite de Surface
CLU	Couche Limite Urbaine
CSU	Couche de Surface Urbaine
DNS	Simulation Numérique Directe
LES	Simulation des grandes structures de la turbulence
RANS	Moyenne de Reynolds (Reynolds Average Navier-stokes)
TKE	Energie cinétique turbulente
MVF	Méthode des Volumes Finis
RNG	Re Groupe de Normalisation

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Le fait de respirer de l'air pur est considéré comme une condition essentielle de la santé et du bienêtre de l'homme. Cependant, la pollution de l'air continue de faire peser une menace importante sur le plan sanitaire partout dans le monde. Les émissions issues du secteur industriel ainsi que du trafic routier sont très diffuses (accroissement de la concentration en population et les activités en ville) où les conséquences sont donc très néfastes sur la santé publique et le confort humain. Selon l'OMS, la pollution atmosphérique est responsable, de la mort de 2.4 millions de personnes dans le monde chaque année (Communiqué de l'OMS publié à Genève, 2006) ce qui a mit le monde entier au défi d'améliorer la qualité de l'air de leurs villes afin de protéger la santé de leurs populations car des normes plus stricts en matière de pollution atmosphérique pourraient réduire de 15% le nombre des décès dans les villes polluées [1], la pollution contribue également au réchauffement climatique et son impact dévastateur sur notre planète. Devant une telle situation, une prise de conscience des pouvoirs publics et de la population commence à naitre dans les pays développés, des mesures réglementaires de plus en plus sévères ont alors été adoptées pour limiter les émissions de polluants.

A l'échelle de la rue, les canyons urbains sont définis comme des rues étroites bordées par des immeubles alignées continuellement des deux côtés [2]. Elles sont les plus touchées par la dégradation de la qualité de l'air et l'augmentation de la teneur en polluants. Ceci est due essentiellement au trafic des véhicules motorisés surtout quant le vent est faible et perpendiculaire à l'axe du canyon [3], l'accumulation des polluants est à l'origine des « points chauds » dues aux obstacles formés par le bâti environnant, favorisant le développement de zones de recirculation, appelées vortex [4] dans lesquelles les polluants sont piégés.

La modélisation de la pollution atmosphérique est très complexe et pluridisciplinaire. Elle fait appel à la météorologie, à la mécanique des fluides, à la chimie pour déterminer l'évolution de l'espèce polluante de son point de rejet jusqu'à la zone d'étude. Pour cela plusieurs études ont été menés à l'issue de comprendre le comportement de l'écoulement de l'air sous différentes configurations de rues canyons. Les travaux sont basés sur différentes approches : la simulation numérique,

les mesures sur site, les expériences en soufflerie ou sur maquette.
Une compréhension détaillée de la morphologie des bâtiments et des perturbations de la construction est nécessaire pour prévoir la dispersion des polluants en milieu urbains. La couche limite urbaine (UCL) est une zone importante de l'atmosphère urbaine où vivent de nombreuses personnes et où se trouve une grande partie des émissions de polluants. Il s'avère que le débit turbulent et la qualité de l'air dans l'UCL sont largement affectés par les perturbations induites par les bâtiments et les constructions. Les échanges vorticaux (vorticité) jouent un rôle crucial dans le transport des polluants entre l'UCL et la couche limite urbaine (UBL) au-dessus de la ville, où le développement et les niveaux de dispersion des polluants sont affectés par l'advection d'autres parties de la ville, ou même des zones rurales en dehors de la ville. De plus, la superposition et l'interaction des régimes d'écoulement dus aux bâtiments voisins affectent la distribution finale de la pression, par conséquent le mouvement des polluants dans les complexes urbains. La principale difficulté de la modélisation de la dispersion des polluants est la modélisation de l'écoulement turbulent lui-même.

Dans la modélisation de la dispersion atmosphérique il est extrêmement difficile de considérer l'ensemble du domaine entier réel, souvent un obstacle isolé simulant un bâtiment ou un canyon urbain idéalisé est considéré. La prédiction des caractéristiques d'écoulement turbulent autour d'obstacles est une tâche difficile en raison de la forte interaction entre les murs d'obstacles et l'écoulement de la couche limite externe. Ce processus implique de nombreuses interactions d'écoulement telles que la séparation, la recirculation et le rattachement. À l'approche des obstacles, l'écoulement se caractérise par des couches limites non développées et une forte intensité de turbulence. Les effets combinés d'un faible rapport d'aspect, de fortes turbulences en flux libre et de couches limites non développées donnent naissance à des structures d'écoulement complexes autour des obstacles.

Plusieurs modèles numériques ont contribué à l’évaluation de la qualité de l’air et la prévision des champs de dispersion des polluants dans les rues canyon comme pour le cas des modèles gaussiens ADMS-URBAN [5], OSPM [6] utilisés en opérationnel mais les modèles CFD sont les plus répandus et utilisés ces dernières années pour des études à des échelles fines en tenant compte de la complexité de la géométrie.

La dynamique des fluides computationnelle (CFD) est devenue un outil plus accessible grâce au progrès continu des études de modélisation et à l'augmentation rapide des ressources de calcul. Les écoulements séparés sont significativement affectés par la présence de murs où les régions affectées par la viscosité ont de grands gradients sur les variables de la solution et une présentation précise de la région proche de la paroi détermine une prédiction réussie des écoulements turbulents à rattachement séparé. De plus, il est connu que les résultats des simulations CFD sont très sensibles à un large éventail de paramètres de calcul, tels que les constantes du modèle de turbulence empirique, les profils d'écoulement de la vitesse et les quantités de turbulence imposées à l'entrée, etc. De plus, dans les simulations numériques, la précision des résultats dépend du modèle de turbulence, du traitement prés de la paroi (y +) appliqué, des critères de convergence et du schéma de discrétisation utilisé.

L'objectif de ce travail est de réaliser des simulations numériques détaillées de l'écoulement turbulent qui se produit autour des obstacles en utilisant différents modèles de turbulence afin de trouver le meilleur maillage, le traitement prés de la paroi et le modèle de turbulence adéquat pour prédire l'écoulement séparé. Ensuite, le champ d'écoulement turbulent le plus réaliste est utilisé afin de prédire la dispersion des polluants dans l'environnement d'obstacles provoqués par des sources placées dans différentes positions du domaine qui simule les émissions causées par la circulation. Deux configurations physiques bidimensionnelles sont considérées dans cette étude : un obstacle isolé et deux obstacles formant une rue canyon idéalisée. En plus deux configurations en 3D sont traitées, l’une constituée de quatre blocs de forme cubique placés perpendiculairement à l’axe principal ; pour la seconde les blocs sont orientés à un angle de 45° par rapport à l’axe principal pour prédire l’effet de l’orientation des rues par rapport à l’axe principal sur la dispersion de polluants.

Le calcul numérique a été effectué par le code open source **openFOAM,** boite à outils de simulation multi-physiques principalement axée sur la résolution des équations de la mécanique des fluides.

Le Chapitre I présente des généralités sur la pollution atmosphérique urbaine suivies d’une revue détaillée de l'écoulement et de la dispersion atmosphérique résumant les différents travaux réalisés dans ce domaine.

Le Chapitre II représente le modèle mathématique régissant le phénomène ainsi que les conditions aux limites associées.

Le Chapitre III détaille la modélisation numérique du modèle physique, l'approche CFD que nous avons appliquée pour la simulation de l'écoulement et la dispersion et termine par une description globale du code de calcul OpenFOAM,

Le Chapitre IV est consacré aux résultats des simulations de la structure de l'écoulement et de la dispersion dans la rue canyon. Les profils de turbulence et de concentration en polluants simulés sont comparés aux données expérimentales et numériques trouvés dans la littérature, ainsi que l'étude comparative 3D de l'effet de l'orientation des rues est détaillée.

Cette étude se termine par une conclusion, des recommandations et perspectives sont également proposées à l'issue de ce travail.

CHAPITRE I :

GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

GENERALITES ET ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Généralités :

I.1.1 la pollution atmosphérique :

La pollution atmosphérique recouvre une multitude de mécanismes et d'actions dont les conséquences sont une dégradation et sabotage de notre indispensable environnement, son impact physique, écologique, économique ne laisse pas la population indifférente et la cicatrise est profonde et gênante. Toutes les sources de polluants atmosphériques s'agissent des sources comme les activités industrielles, domestiques et agricoles, les systèmes de chauffage… ou des sources mobiles avec principalement les transports de marchandises et de personnes. La pollution atmosphérique s'applique en outre aussi bien à l'air extérieur qu'à l'air intérieur des bâtiments.

I.1.1.1 Les effets de la pollution atmosphérique :

- **Les risques sanitaires** : Les liens entre les pollutions atmosphériques et l'état de santé d'une population sont difficiles à établir, cela tient aux multiples expositions à faibles doses, aux latences plus ou moins longues entre celles-ci et la survenue des effets de nature aigue ou chronique, peu ou pas spécifiques, et à l'existence de risques individuels faibles [7, 8, 9, 10].

La compréhension des effets de la pollution atmosphérique sur la santé nécessite une prise en compte de données toxicologiques consacrées aux effets nuisibles à court terme et a long terme d'une substance sur la vie, le développement ou la reproduction de tout organisme vivant, et d'analyse épidémiologique décrivant et mesurant les effets sur la santé de l'homme pris dans son environnement naturel en fonction de différentes expositions.

Pendant longtemps la question des effets sanitaires de la pollution atmosphérique s'est résumée à celle de l'impact des pics de pollution [11].

Selon l'OMS une considérable relation existe entre les niveaux d'aéropolluants et le taux de mortalité dans le monde.

• **La dégradation du patrimoine bâti commun et historique :** La pollution atmosphérique participe à la salissure et dégradation du patrimoine bâti [12]. Ceci concerne des bâtiments directement exposés à la circulation routière mais aussi des façades dégradées par une pollution de fond. La détérioration des façades directement exposées se manifeste par la salissure provoquée par les dépôts de particules issues des véhicules diesels, de l'usure des pneumatiques, des freins et du revêtement de la route. Les autres impacts causés par la pollution sont l'effritement des pierres. Il est constaté que les façades proches de routes supportant un trafic important ont une durée de vie plus courte d'environ 20 à 30% par rapport à une zone rurale. Dans le cas d'une exposition indirecte, on constate un noircissement des surfaces accompagné d'un développement de croûtes noires sulfatées constituées d'un ciment gypseux contenant des particules issues du chauffage, des transports et d'industries.

• **Le réchauffement planétaire** : Les scientifiques ne peuvent pas prévoir avec certitude et précision les effets de l'augmentation de la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. L'augmentation probable de la température moyenne à la surface de la Terre serait de 2 °C à 5 °C en un siècle.

Un effet immédiat serait alors la fonte des calottes glaciaires aux pôles et, surtout, la dilatation de l'eau des océans qui entraînerait une élévation du niveau de la mer. Certaines villes côtières seraient alors inondées tout comme seraient submergées certaines régions du monde comme les îles Maldives ou les plaines agraires du Bangladesh. La majorité des écosystèmes fragiles seraient en danger. On pourrait également observer une modification de la répartition de nombreuses espèces animales et végétales. Les migrations de populations dues aux sécheresses et aux inondations prendraient une proportion alarmante [13].

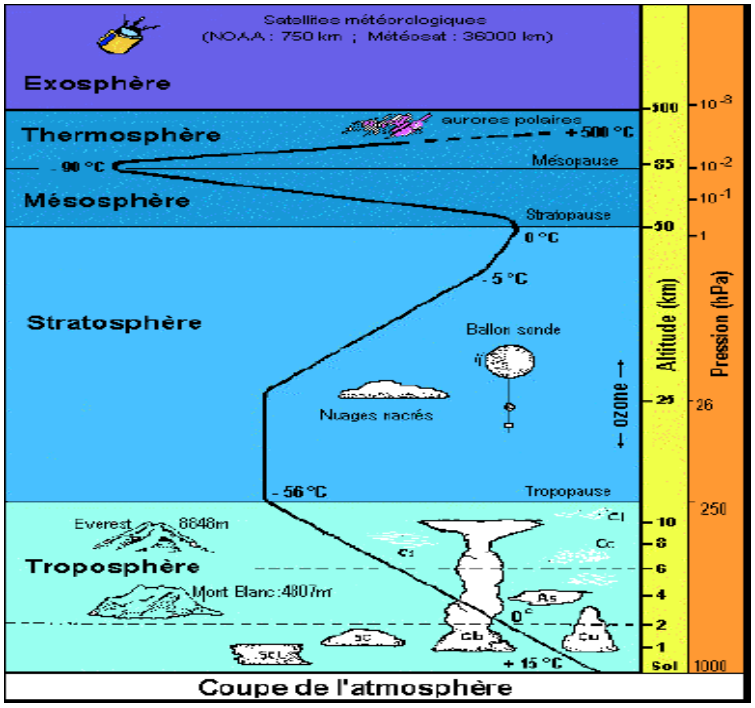
I.1.1.2 L'atmosphère :

L'atmosphère représente la couche gazeuse qui constitue l'enveloppe de corps céleste comme la Terre, l'atmosphère terrestre correspond à une couche d'air dont l'épaisseur est de l'ordre de 500km, alors que le rayon de la terre est de 6730 km.

Les propriétés de l'atmosphère vont jouer un rôle plus ou moins moteur dans la dispersion d'un produit. Du point de vue de la composition chimique on a l'habitude de considérer que l'air atmosphérique se compose d'un mélange d'air sec et de vapeur d'eau dont le rôle est très important en météorologie. On estime que 99% de la masse

d'air atmosphérique se situe entre le niveau du sol et l'altitude de 40 km. Les phénomènes météorologiques courants dans cette tranche sont qualifiés d'atmosphère météorologique.

La structure verticale de l'atmosphère peut être conventionnellement découpée en quatre zones selon l'altitude et le profil vertical de la température qui donnent le plus souvent les répartitions des différentes couches (figure I.1). La troposphère, La stratosphère, la mésosphère, la thermosphère, sont les couches principales qui composent l'atmosphère. De toutes ces couches, la troposphère est la couche ou les polluants sont généralement émie tout près de la surface terrestre. C'est la couche qui est située juste au-dessus de la surface terrestre et qui s'étend en altitude sur 9 km à 16 km verticalement dépendamment de la latitude et dans laquelle la température décroit avec la hauteur.



Figure(I.1) : Structure verticale de l'atmosphère (Source : Goger, 2006).

I.1.1.3 Les polluants atmosphériques :

Les scientifiques ont recensé plus d'une centaine d'espèces polluantes dans l'atmosphère. Selon la littérature la classification des espèces dépendent des objectifs des domaines d'étude de la pollution atmosphérique, globalement la classification se fait selon ces principaux critères :

- La nature de l'espèce rejetée : gaz, liquide, ou gaz liquéfié,
- Type d'émetteur : les sources fixes comme source ponctuelle, qui caractérise plutôt les grands sites industriels (points sources) : elles sont étudiées en conjonction avec des données concernant leur localisation, leur capacité, leur activité..., des sources mobiles liées aux transports.
- Les échelles spatio-temporelles,
- Réactivité avec l'atmosphère.

I.1.1.4 Dispersion des polluants:

I.1.1.4.1 Les émissions :

Les émissions de polluants atmosphériques sont ponctuelles et instantanées, c'est-à-dire qu'à chaque instant un système peut émettre de nouvelles molécules d'un même polluant, à un endroit donné. Etant donné que l'émission ponctuelle d'une molécule à un instant donné est forcément distincte d'une autre molécule émise au même instant et/ou au même endroit, ou à un instant différent et/ou à un endroit différent, les molécules émises peuvent être sommées sur un intervalle de temps donné ou pour une activité donnée, et sur un espace donné . Elles sont ainsi mesurées pour un polluant donné et une source donnée. Il existe principalement deux types d'émissions :

Les émissions biogéniques, provenant de sources naturelles telles que les volcans, les feux de forets, l'émission de sels de mer ou l'érosion du sable, ou encore les composes organiques volatiles (COV) émis en particulier par laphotosynthèse,

Les émissions anthropiques, dues à l'activité humaine, c'est-a-dire au transport (routier et aérien), aux émissions industrielles, au chauffage et à l'agriculture.

I.1.1.4.2 Le processus de transport-dispersion:

Lorsqu'un polluant primaire est émis dans l'atmosphère, il est soumis aux processus de transport et de dispersion dont le calcul repose sur le principe de la continuité- conservation. La dispersion et le transport des polluants dans l'air sont très variables dans le temps et dans l'espace, et dépendent de l'état de l'atmosphère, des conditions météorologiques, des facteurs topographiques, des facteurs anthropiques et des éléments propres aux polluants [14].

A titre d'exemple, le temps et la distance de transport des gaz à effet de serre sont négligeables car ces polluants ont une contribution quasiment immédiate sur le réchauffement de la planète et le processus s'effectue majoritairement dans la tranche d'atmosphère qui s'étend du sol jusqu'à un ou deux kilomètres d'altitude (couche de mélange atmosphérique). En revanche les polluants primaires qui interviennent dans le trou de la couche d'ozone sont transportés sur de longues distances (jusqu'à la stratosphère) et de fait sur une durée plus longue (quelques jours). Compte tenu de la grande complexité des processus de transport et de dispersion des polluants atmosphériques, la modélisation de ces phénomènes apparaît encore à l'heure actuelle entachée d'une importante incertitude. Les capteurs fixes de pollution de fond et les outils de mesure de la pollution atmosphérique de proximité témoignent par ailleurs de l'influence de la dispersion sur la concentration en polluants.

Dans le cas de certains polluants et sous des conditions atmosphériques particulières, il existe des processus de transformation physico-chimiques des polluants primaires émis, en polluants dits secondaires, car non émis directement par les sources [15]. Les transformations sont plus ou moins rapides et ont lieu dans la troposphère et la basse stratosphère.

I.1.1.4.3 Les concentrations :

La teneur ou la concentration désigne en règle générale la présence de polluants dans l'air extérieur. Plus précisément, la concentration d'un polluant représente la présence d'un certain nombre de molécules du polluant dans un volume d'air déterminé, sur une zone donnée (pouvant être réduite à un point), et à un instant donné. Elle est normalement exprimée en unité de masse par unité de volume, par exemple en mg/m^3.

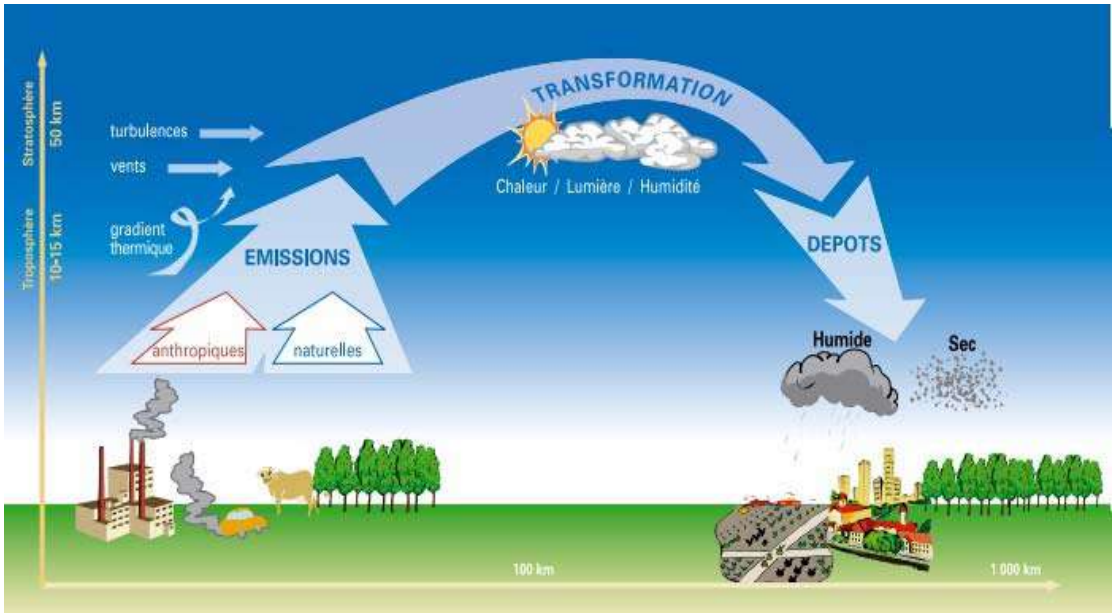
Dans la littérature, on trouve souvent le terme « immission » (d'origine allemande) pour caractériser la teneur ou la concentration.

Ce terme désigne la résultante des émissions après dispersion, c'est à dire après modification par la morphologie urbaine et par des paramètres météorologiques, comme le vent, eux aussi influencés par la présence d'un obstacle.

I.1.1.4.4La déposition atmosphérique :

La déposition atmosphérique se réfère à l'ensemble des processus de transfert d'interface qui concourent à diminuer la teneur d'une substance présente dans l'air [14]. La déposition sèche correspond au transfert d'un aérosol ou d'un gaz entre l'air et un réservoir tel que le sol, la végétation, l'eau ou un élément anthropique. La déposition humide est un transfert qui s'effectue par les précipitations et, dans certains cas, par les brouillards et la rosée. La déposition est habituellement mesurée dans une unité de masse rapportée à une unité de surface et une unité de temps (mg/m²/jour par exemple).

On résume donc le processus de la dispersion atmosphérique dans les étapes suivantes : Le Transport – la Diffusion – le Dépôt au sol,



Figure(I.2) : Les processus intervenant dans la dispersion des polluants de l'atmosphère (Source : Ademe, 2010)

- **Le transport :** Le transport horizontal par le champ de vent, qui explique le déplacement des polluants les plus stables sur de longues distances.
- **La diffusion :**le brassage vertical par la turbulence atmosphérique lié aux effets de couche limite. C'est ce mécanisme qui est responsable de la dilution des polluants et donc de la baisse des concentrations en aval des sources (figure I.3).

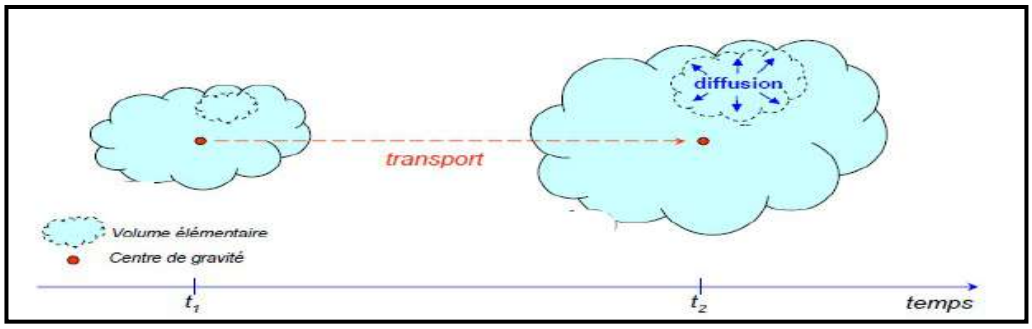


Figure (I.3): Les processus de transport et de diffusion (Source : Sourdain, 2006)

- **Le dépôt sec a la surface du sol** : (dû notamment à l'absorption par les végétaux), dépend du type de sol (bâtiments, végétaux) et de la présence de nuages. Dans les deux cas, l'échelle caractéristique de la variabilité spatiale peut être de quelques mètres seulement.

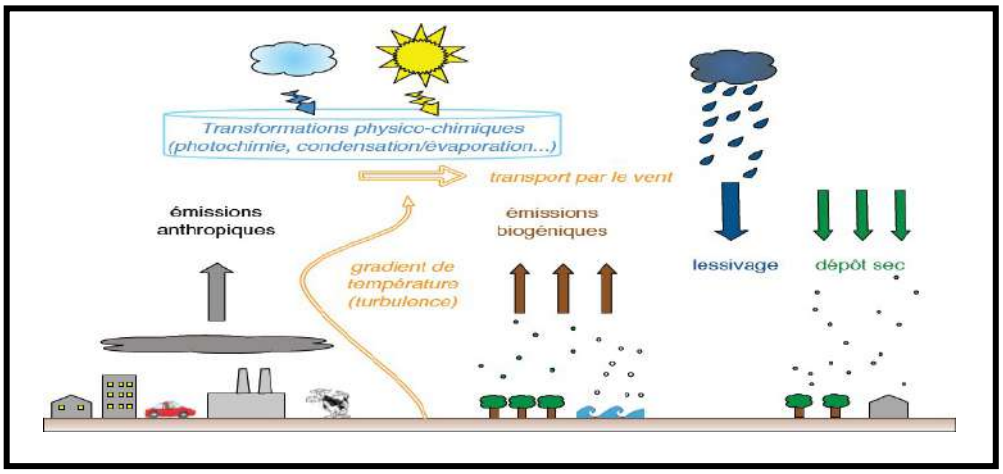


Figure (I.4) : Emissions, transformation et dépôts de polluants (Source : Ademe, 2010)

I.1.1.4.5 Le facteur du vent :

Le vent est défini par deux paramètres :

- **Sa vitesse moyenne**, compte tenu que prés du sol l'écoulement est turbulent, et que sa vitesse fluctue autour d'une moyenne.
- **Sa direction** et son sens

Ces caractéristiques sont les suivantes :

- **L'inertie** : Ce vent qui n'est rien d'autre qu'un flux d'énergie appliqué à un gaz va donc obéir aux principes de la mécanique des fluides. En pratique, il a tendance à suivre sa trajectoire aussi longtemps qu'aucun obstacle ou force ne

le perturbera.

- **Le frottement** : L'air en mouvement, comme tout fluide, rencontre une résistance lors du contact avec tout corps dans son chemin. Cela aura pour effet de diminuer son énergie interne (inertie) et de modifier son profil, sa vitesse, son altitude, sa température et sa trajectoire. Ce vent continuera d'exister aussi longtemps que les forces de frottement ne lui auront pas consommé toute son inertie.
- **La propagation** : Le vent étant une énergie appliquée à un gaz se propageant en lui même. La zone de surpression sera localisée à l'interface terre/atmosphère et sera donc fortement influencée par la rugosité du terrain et son relief. L'écoulement général du vent est donc fortement dépendant de l'état du sol qu'il « survole».
- **La turbulence :** La turbulence est définie comme étant la dispersion de la vitesse du vent autour de sa valeur moyenne ou encore, la manifestation du déplacement aléatoire d'un volume d'air. L'écoulement turbulent du vent peut être décrit par la superposition d'une vitesse moyenne *U* sur une période *t* assez longue (10 minutes généralement) et d'une vitesse fluctuante fonction du temps.

I.1.1.4.6 La pression atmosphérique :

En un point quelconque de l'atmosphère, la pression résulte du poids de la colonne d'air qui surmonte l'unité de surface. La pression décroit avec l'altitude puisqu'en s'élevant dans l'atmosphère on laisse en dessous de soi une colonne d'air de plus en plus importante. Par ailleurs plus l'air est froid, donc dense, plus la décroissance de la pression est rapide.

L'analyse attentive du champ de pression est particulièrement instructive en météorologie. En effet les mouvements de l'air, c'est à dire le vent, sont directement liés à la répartition des pressions et les fluctuations de la pression à un niveau donné intègrent toutes les modifications de la nature de l'air dans l'épaisseur de l'atmosphère située au dessus. Les situations dépressionnaires (basses pressions) correspondent généralement à une turbulence de l'air assez forte et donc de bonnes conditions de dispersion. En revanche, des situations anticycloniques (hautes pressions) où la stabilité de l'air ne permet pas la dispersion des polluants entraînent des épisodes de pollution, figure (I.5).

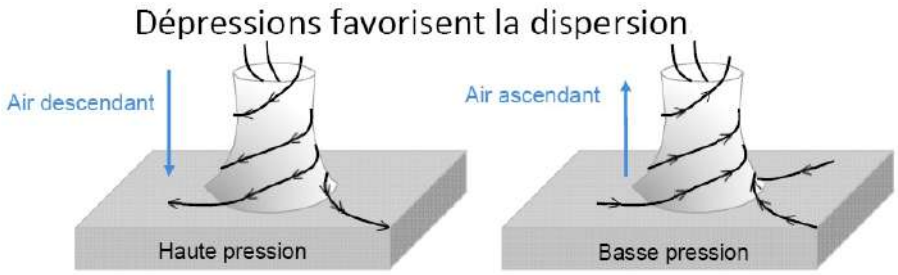


Figure (I.5) : Effet de la pression sur la dispersion

I.1.1.4.7Facteurs affectant directement la dispersion :

- **La morphologie propre à l'espace** : La morphologie d'un site peut influencer positivement ou négativement l'écoulement de l'air.
- **Les activités humaines** *:* L'industrialisation, les activités concentrées des habitants et l'élévation du trafic du moteur augmentent d'avantage la consommation d'énergie, la pollution atmosphérique et abaissent la qualité environnementale et climatique. Les secteurs urbains déjà sans qualité climatique élevée emploient beaucoup plus d'énergie pour la climatisation en été et le chauffage en hiver et beaucoup plus d'électricité pour l'éclairage.

- **Les matériaux** : Les propriétés thermiques de ces matériaux ainsi que leurs albédos ont un impact très important sur le bilan énergétique urbain, entraînant, par conséquent, une hausse rapide des températures qui demeurent élevées pendant une longue période.
- **La densité et taille de la ville :** Lorsque la densité de la population augmente, les activités urbaines vont s'intensifier, et par conséquent la pollution de l'air peut atteindre des valeurs dangereuses. Lors d'une recherche effectuée par T.J.Chandler en 1976 sur l'impact de la taille des villes sur la pollution de l'air [69], et en faisant ressortir les rapports entre les quantités de polluants solides mesurés dans des villes américaines à celles mesurées sur un site non pollué il a abouti aux résultats suivants (tableau I.1):

Taille de la ville	Polluants solides
25.000 habitants	**3,5**
100.000 habitants	**3,8**
400.000 habitants	**4,0**
1.000.000 habitants	**5,5**

Tableau (I.1) : Evolution de la quantité de polluants en fonction de la taille des villes
(Source : Bonavitacola M,2001)

- **L'absence de végétation et d'eau** : Les arbres et les espaces verts contribuent de manière significative à la diminution des températures urbaines pendant la période d'été grâce au processus d'évapotranspiration. Les arbres jouent également le rôle de filtre aux polluants et de masque. Leur effet d'ombre contribue aussi à la diminution des besoins d'énergie pour se refroidir en été.

- **La topographie (l'orographie)** : La topographie conditionne l'accumulation en quantités nuisibles des déchets libérés dans l'atmosphère. Les vallées où l'activité industrielle est intense sont réputées pour leur smog. Les reliefs accidentés (vallées, falaises, collines etc.) canalisent les écoulements atmosphériques modifiant de fait ses caractéristiques physiques (grandeurs moyennes et turbulentes). L'importance de ces modifications est liée à la taille et à la forme de l'obstacle.

I.1.1.5 La couche limite atmosphérique(CLA):

Par analogie avec la couche limite qui se développe dans une soufflerie, au voisinage de la paroi, on peut diviser l'atmosphère en deux régions. L'une, l'atmosphère libre, où les effets de frottement de l'air sur le sol sont négligeables; l'autre représentant une couche où l'influence des effets de frottement de l'air sur la surface terrestre sont considérables dénommée couche limite atmosphérique ou CLA. D'un point de vue dynamique, la couche limite atmosphérique (CLA) est la zone de l'atmosphère au voisinage du sol dans laquelle se répercute directement, par « viscosité », l'adhérence au sol de l'écoulement. Elle donne alors naissance à des couches cisaillées. D'un point de vue thermique, c'est la zone de l'atmosphère au voisinage de la surface terrestre dans laquelle la variation diurne du rayonnement solaire est directement perceptible. La hauteur de la couche limite atmosphérique, qui varie en permanence dans le temps et dans l'espace, est comprise en moyenne entre 100 et 3000 mètres. La totalité de la troposphère est en fait influencée par la surface mais le temps de réponse de la CLA à des modifications des conditions à la surface est rapide, de l'ordre de l'heure **[**16**]**. Enfin, dans la CLA, le transport des polluants est principalement influencé horizontalement par le vent et verticalement par la turbulence. La couche limite atmosphérique CLA se subdivise en deux couches (Figure I.6):

- **La couche limite de surface CLS** qui se développe au déçus du sol. C'est une région où en première approximation les flux verticaux de quantité de mouvement horizontaux, ou tout autre scalaire transférable sont constants. Dans notre étude, nous nous intéressons à cette partie la plus basse de la CLA au-déçus des villes, appelée couche de surface urbaine que nous allons décrire et présenter les principaux phénomènes physiques.

- **La couche d'Ekman** : cette couche se trouve entre la couche de surface et l'atmosphère libre. Dans cette couche, les effets du frottement au sol deviennent négligeables devant l'effet de la force de Coriolis, le vent y subit une déviation angulaire dépendant de l'altitude par rapport à son orientation au sol pour atteindre au sommet de la couche la direction du vent géostrophique qui règne dans l'atmosphère libre.

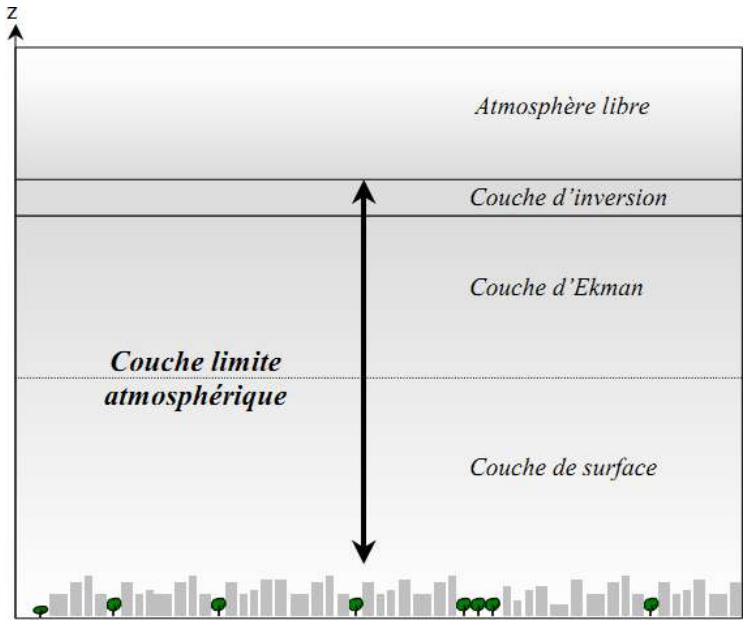


Figure (I.6) : Représentation des différentes couches de la CLA

I.1.1.6 La turbulence dans la CLA :

La couche limite atmosphérique est un milieu extrêmement turbulent. La turbulence est une discontinuité dans l'écoulement de l'air, pour qu'il y ait turbulence il faut un mouvement d'air horizontal et vertical. Les écoulements turbulents se caractérisent par une apparence très désordonnée, un comportement aléatoire difficilement prévisible, visualisés par des « tourbillons» qui participent à la dispersion des polluants dans l'atmosphère, les mouvements à l'intérieur de l'air

conduisent à augmenter les propriétés de brassage de l'écoulement en transférant de l'énergie cinétique des grandes échelles vers les petites échelles, où cette énergie est dissipée en chaleur. La turbulence de petite échelle est influencée par différents facteurs comme les conditions météorologiques, le gradient thermique vertical, la vitesse moyenne du vent, la rugosité des sols (végétation, bâtiments).

- **La turbulence dynamique :**

Lorsque le nuage est en contact avec le sol, les effets de rugosité dus à la nature de la surface créent une zone de turbulence à l'interface d'origine mécanique.
L'intensité de la turbulence va être proportionnelle à la force du vent, dépendre de la forme de l'obstacle. Plus celui-ci formera une barrière, plus elle sera forte.

- **Les turbulences du coté au vent :**

Il est capital de distinguer les zones au vent (du coté ou vient le vent) et les zones sous le vent, car les turbulences du coté au vent n'auront lieu qu'en cas de discontinuité du relief, et seulement dans la proximité de celui-ci. Par contre, sous le vent la turbulence sera beaucoup plus intense elle peut aller jusqu'à une distance de dix fois la hauteur de l'obstacle en aval d'un vent fort.

- **La turbulence de cisaillement :** elle est provoquée par la proximité de deux vents contraires.

I.1.1.7 La couche limite urbaine :

Elle se distingue de la couche limite de la planète par sa complexité due à des caractéristiques et processus particuliers. Les principaux éléments et causes de perturbation au sein de l'environnement urbain sont les bâtiments de formes et de hauteurs variables. Ceux-ci introduisent une grande quantité de surfaces verticales, des éléments à forte rugosité, des matériaux artificiels, et des surfaces imperméables. Lors de ses premières études Oke (1978) [17] distingue deux couches atmosphériques différentes au-dessus des villes : la couche de canopée urbaine, qui correspond à la couche atmosphérique située entre le sol, le niveau des toits, et la couche limite interne qui se superpose à la couche de canopée urbaine. Ses études l'amènent à distinguer trois autres sous-couches [18] : la sous-couche rugueuse, la sous couche inertielle et la couche de mélange (figure I.7).

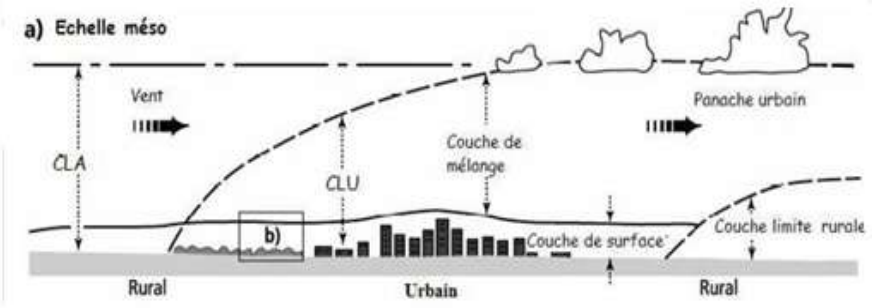


Figure (I.7) : La couche limite urbaine (CLU). Source (Colombert 2008)

I.1.1.8 Couche limite de surface :

La couche limite de surface abréviation CLS ou couche de Prandtl est une région de l'atmosphère où les flux verticaux de quantité de mouvement horizontal, ou de tout autre scalaire transférable (polluants, vapeur d'eau, humidité,…) sont constants. La structure du vent y est essentiellement déterminée par le frottement et la stratification thermique de la couche. La force de Coriolis qui traduit l'effet de la rotation terrestre sur le déplacement de l'air est négligeable devant le frottement qui traduit l'effet de la surface. Nous nous intéressons à la couche de surface au-dessus des villes appelées couche de surface urbaine (CSU) que nous allons décrire et présenter les principaux phénomènes physiques à prendre en compte.

La plupart des études atmosphériques se sont limitées à l'étude de la structure de la couche limite de surface CLS au-dessus de surfaces relativement homogènes et peu rugueuses. Depuis quelques dizaines d'années, des études sur les écoulements et les flux ont été menées sur des surfaces plus complexes comme les canopées végétales, en offrant une description assez complète des profils de vent moyens et de turbulence. Plus récemment, de manière similaire, la description de la couche de surface urbaine (CSU) a dû être adaptée pour tenir compte de la grande complexité et du fort impact des surfaces urbaines. Il est à noter que sa description est récente et qu'elle diffère encore quelque peu selon les auteurs et nous adapterons ici celle proposée par Roth, 2000 [19]. La couche de surface urbaine est divisée en plusieurs sous couches caractéristiques des propriétés moyennes et turbulentes de l'écoulement (Figure I.8) :

- **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 quantité de mouvement, chaleur et humidité sont considérés comme constants.

• **la sous-couche rugueuse** s'étend du sol à une hauteur $z*$ et est caractérisée par une grande inhomogénéité de l'écoulement et des échanges thermiques. 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 $z*$ de la sous-couche rugueuse dépasse celle de la sous-couche inertielle, cette dernière n'existant alors pas.

• **La canopée urbaine** est la partie la plus basse de l'atmosphère qui se situe entre le sol et le niveau des toits des bâtiments. Si pour certains auteurs, elle doit être considérée comme une sous-couche à part entière, nous la présentons ici comme une partie de la sous-couche rugueuse, selon Roth, 2000 [19] qui respecte ainsi le formalisme adopté pour les canopées végétales, proposées par Raupach et al, 1980 [20]**.** La canopée urbaine est caractérisée par une surface accrue d'une grande inhomogénéité et de structure tridimensionnelle. Les éléments de rugosité y sont de forte densité, de hauteurs et espacements variables, à l'origine des propriétés dynamiques inhomogènes et d'importantes forces de frottement, de nature différentes (bâtiments composés de divers matériaux, végétation) modifiant aussi les échanges thermiques, d'humidité et les polluants.

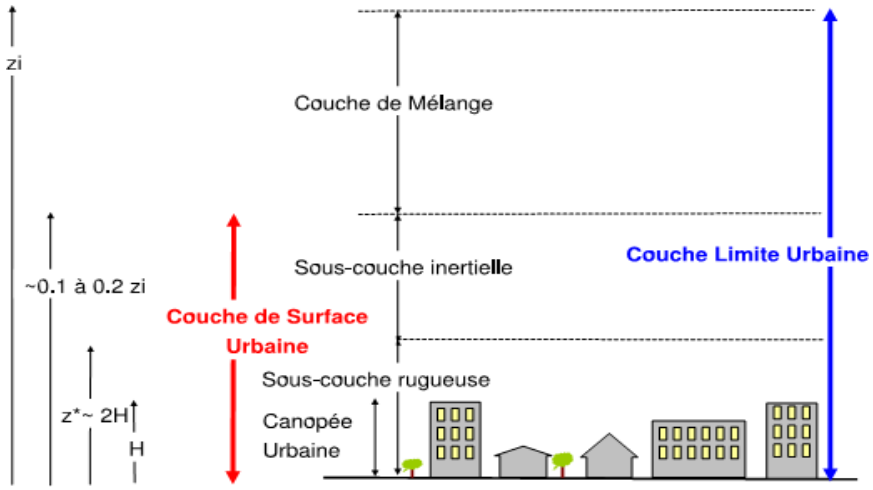


Figure (I.8) : Structure de la Couche Limite Urbaine. Source (Roth, 2000).

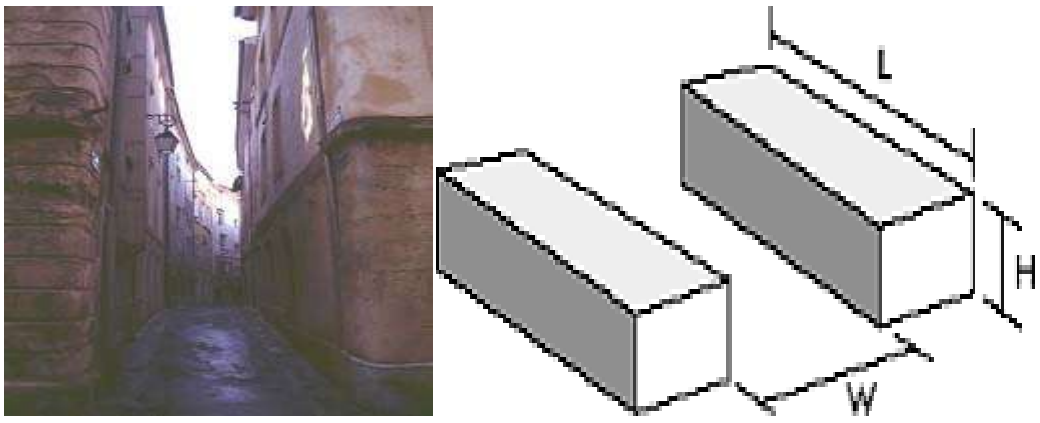
I.1.2 L'étude de l'écoulement et de la dispersion dans une rue canyon idéalisée :

Le comportement de l'écoulement est très complexe sous l'effet de son interaction avec la morphologie urbaine définit comme étant la répartition spatiale des bâtiments, leur élévation, la forme et l'orientation des rues qu'ils forment. Parmi cette structure urbaine citons le cas des rues canyons objet de notre travail et qui représentent un milieu favorable pour la dispersion et l'accumulation des polluants causées essentiellement par le trafic automobiles. On retiendra pour définition d'une rue canyon : un espace étroit bordé d'immeubles très proches les uns des autres, leurs hauteur moyenne est supérieur à la largeur de la rue (Figure I.9). Les rues canyons sont le lieu d'écoulements complexes où se crée des vortex, vecteur de dispersion des polluants.

Une rue canyon est caractérisée par les éléments suivants :

- La longueur L des bâtiments bordant la rue,
- La hauteur H des bâtiments,
- La largeur W de la rue.

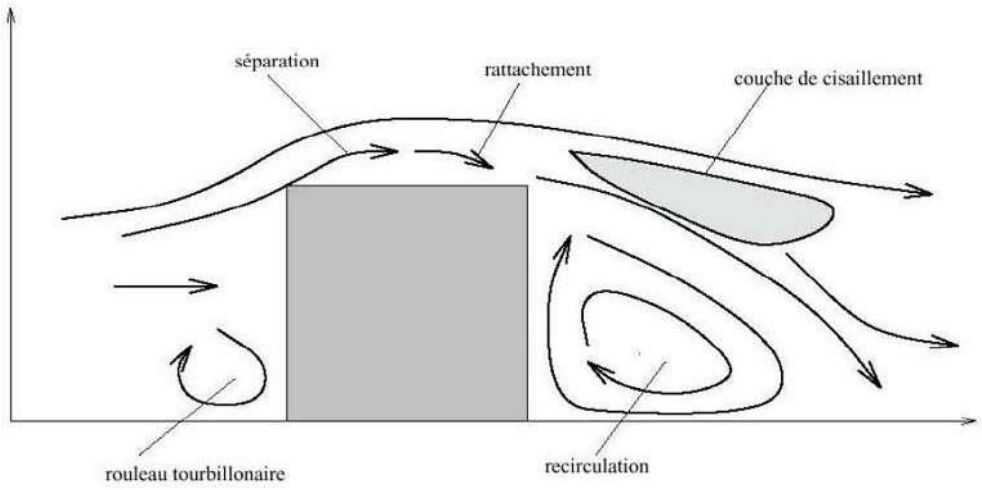
On définit un indice de construction dit de Landsberg H/W défini comme étant le quotient de la hauteur du bâti par la largeur de la rue permettant de classer les rues en deux grands ensembles : les rues larges et les rues étroites, dites de type canyon susceptibles d'engendrer des forts taux de pollution.



Figure(I.9) : Illustration d'une rue canyon. Source (Sébastien Wypych, 2003)

I.1.2.1 L'écoulement et la dispersion autour d'un obstacle :

Afin de connaître la répartition des polluants atmosphériques au niveau d'une rue canyon et les phénomènes physiques associés, il faut s'intéresser de plus près aux écoulements atmosphériques qui sont les vecteurs de la propagation des polluants. L'écoulement atmosphérique et la dispersion des polluants sont influencées par certains facteurs. Ces derniers ont été pris en compte lors des essais sur maquettes en soufflerie, des mesures sur terrain ou expérimentales, ainsi que les modèles numériques. Ces facteurs d'influence sont d'ordres géométriques et météorologiques.
Lorsque l'ensemble des éléments formant la canopée urbaine (bâtiments, arbres,) interagissent avec l'atmosphère sus-jacente, l'écoulement devient turbulent et complexe. Il se crée des forts gradients de vent, zones de décollement, zones de recirculation (figure I.10). Toutes ces caractéristiques dépendent de la géométrie et de la densité des obstacles formant la canopée urbaine. Cet aspect dynamique favorisant l'accumulation et la dispersion des polluants a été étudié par Oke [21] dans ces expériences en soufflerie pour classifier les types d'écoulements dans les rues canyons : dans le cas d'un écoulement incident transverse à l'axe de la rue, il met en évidence trois régimes d'écoulements fonction du rapport d'aspect H/W (indice de Landsberg) :

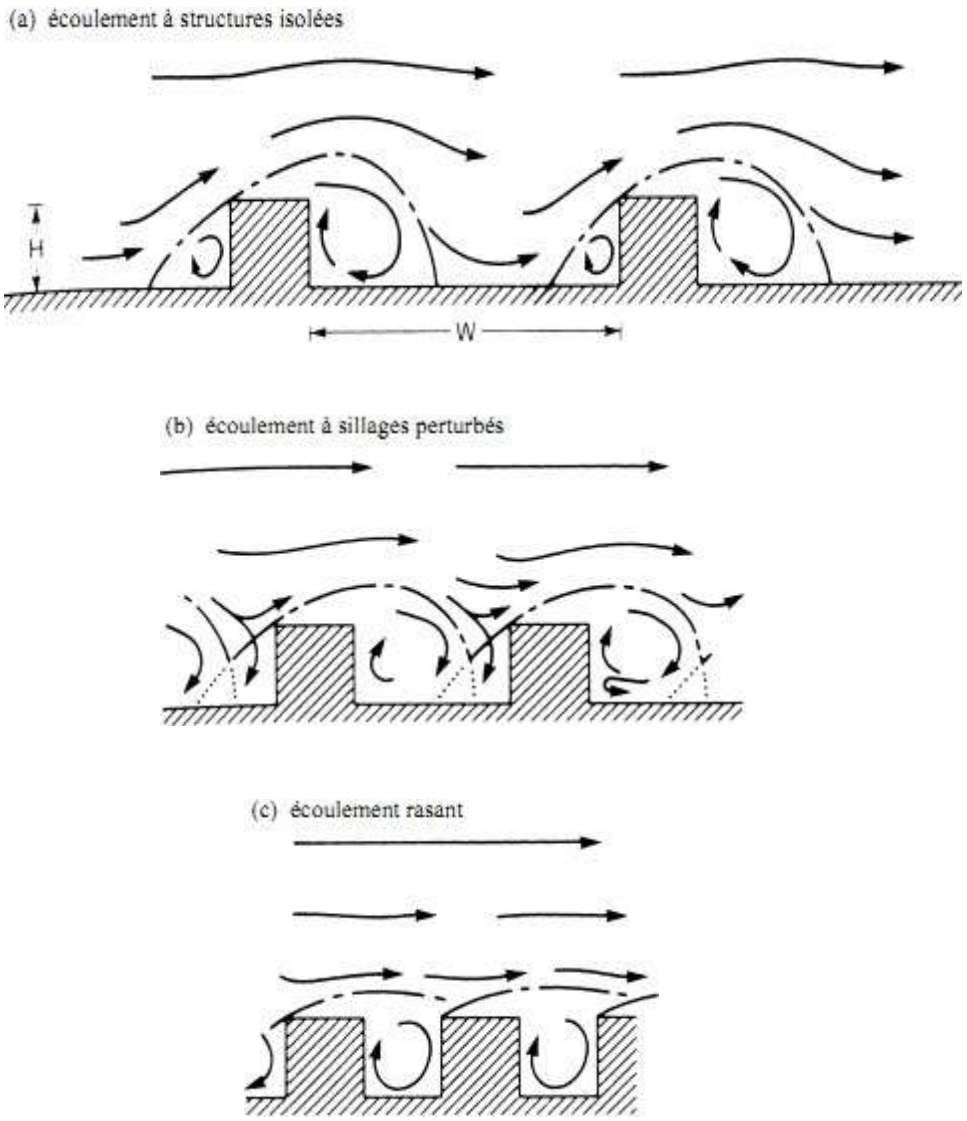


Figure(I.10) : Ecoulement turbulent en présence d'obstacle

- Un régime appelé « *écoulement à structure isolée* » (H/W < 0.3) pour lequel l'écoulement s'apparente à une succession de structures identiques autour de bâtiments isolés (figure I.11a).
- Un régime intermédiaire appelé « *écoulement à sillage perturbé* » pour lequel

L'écoulement en aval d'un bâtiment est renforcé par une déflexion au niveau de la face amont du bâtiment suivant (figure I.11b).

- Un régime appelé « *écoulement rasant* » (H/W > 0.3) qui se traduit par la formation d'un vortex dans la rue canyon, supposée très étroite. Dans ce cas, le tourbillon agit à l'intérieur de la rue et peu d'échanges à l'extérieur ont lieu (figure I.11c).



Figure(I.11) : Régimes d'écoulement à l'intérieur des canyons en fonction du rapport d'aspect (H/W). Source (Oke, 1998).

Certaines expériences menées sur site réel ou en soufflerie ou par simulation numérique pour l'étude de la dispersion en polluants dans les rues canyons [22,23] ont démontré que le transfert des polluants est étroitement dépendant de l'advection de l'écoulement à l'entrée et de la diffusion turbulente au-dessus du canyon. Le parcours et le temps réalisés par les particules de polluants au niveau de la rue dépendent de l'intensité et du nombre de cellules ou vortex formés à l'intérieur de la rue, En général pour un canyon de rapport d'aspect égal à 1, la pollution décroit avec la hauteur du côté sous le vent du bâtiment et croit avec la hauteur du côté au vent du bâtiment formant le canyon. Pour certaines conditions géométriques urbaines par exemple des canyons de petits rapports d'aspects, ces derniers sont favorablesàladilutiondespolluantsémetsauniveaudelarue.Lescanyonscourts impliquent une faible teneur en polluants que les canyons longs. Aussi les toitures en formes variables permettent une bonne ventilation des polluants que les toitures uniformes [24] ce qui influe sur la teneur en concentration à l'intérieur du canyon.

Une fois émis dans l'atmosphère, l'évolution des polluants à l'intérieur d'un canyon (dispersion, accumulation) est étroitement liée aux conditions météorologiques locales du site notamment le vent (vitesse et direction), stabilité atmosphérique et le rayonnement solaire. En effet l'interaction des facteurs météorologiques avec les éléments de surface impose un régime d'écoulement propre favorisant ou non la turbulence et la stabilité de l'atmosphère sus-jacente.

I.1.2.2 Effet de la rugosité aérodynamique :

La longueur de rugosité, exprimée en mètre, caractérise l'influence globale de la sous- couche rugueuse (couche de surface) sur le profil de vent. On parle également de taille caractéristique des tourbillons au niveau du sol. Cette rugosité est corrélée à la hauteur des obstacles au sol (tableau I.2).

Sites caractéristiques	Classes de rugosité	Z0 (m)
Grandes étendues d'eau (mer, océan, lac)	I	De 0.001 a 0.01
Rases compagnes, aéroports	II	De 0.01 a 0.1
Zones faiblement urbanisées, bocages	III	De 0.1 a 0.5
Zone urbanisées, industrielles forestiers	IV	De 0.5 a 1.5
Centres des villes	V	De 1.5 a 2.5

Tableau(I.2) : Valeurs typiques de la rugosité (Source : Turbelin G. 2000)

Il est intéressant d'analyser la perturbation induite par ces éléments sur le champ de vent au travers de trois cas généraux avec:

- un site présentant un changement de rugosité ;
- un site avec une topographie accentuée;
- un site avec un obstacle.

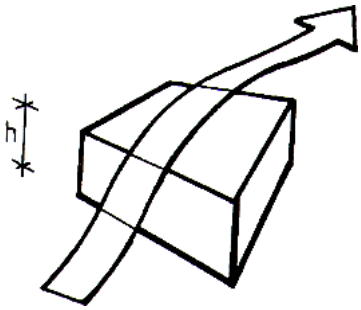
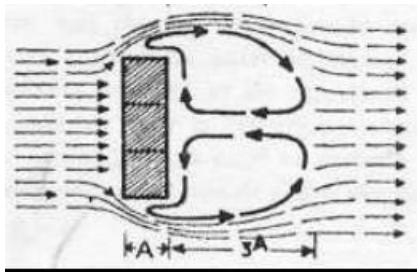
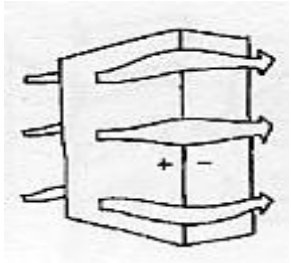
I.1.2.3Effet de la morphologie urbaine :

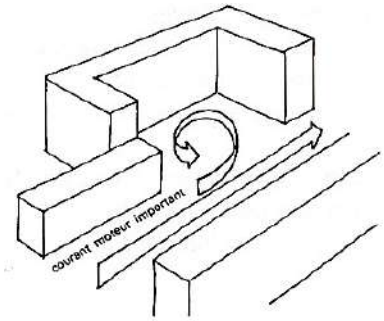
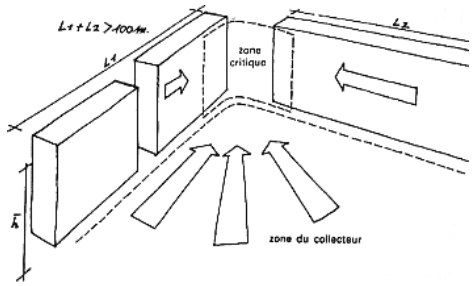
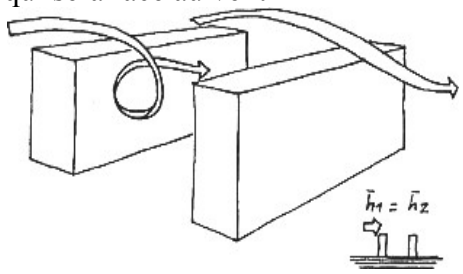
En plus de facteurs naturels locaux (localisation, topographie), la pollution urbaine subit des contraintes inhérentes à la morphologie du bâti et du réseau d'artères.
La morphologie urbaine est l'étude de la forme physique de la ville, de la constitution progressive de son tissu urbain et des rapports réciproques des éléments de ce tissu qui définissent des combinaisons particulières, des figures urbaines (rue, places et autres espaces publics).cette réalité complexe, analysable à différents niveaux d'échelle et de plusieurs points de vue, traverse les cloisonnements disciplinaires. La morphologie urbaine est définie donc comme étant la répartition spatiale des bâtiments, leur élévation, la forme et l'orientation du réseau des rues.

Le terme tissu urbain entraine une double acception. Il s'agit d'une organisation qui présente à la fois une forte solidarité entre les éléments et une capacité à s'adapter, à se modifier, à se transformer. Appliqué à la ville, le tissu urbain est constitué de la superposition de l'imbrication de trois ensembles :

- Les réseaux de voies (les rues) ;
- Le découpage foncier ;
- Les constructions.

En particulier, l'effet de l'orientation des rues par rapport à l'axe du vent joue un rôle non négligeable : une rue au vent ou sous le vent, ne subira pas la même pollution. Pour un trafic identique, les immissions de polluants au niveau des piétons peuvent varier très fortement en fonction de nombreux paramètres dont l'orientation de la rue, son exposition aux vents dominants, sa pente, sa largeur, le caractère continu ou discontinu, ou encore l'absence de constructions qui la bordent. Une rue bordée de grands immeubles absorbe davantage d'énergie. Voici le tableau (I.3) résumant les différentes formes urbaines et leurs effets sur le comportement de l'écoulement de l'air et la dispersion de polluant :

Ecoulement de l'air	Dispersion des polluants
Si le bâtiment est d'une hauteur inferieur à 14 m le vent passe par dessus  Source : Cf. Chatelet et Al 1998	Augmentation de la concentration des polluants au niveau de la toiture.
Plus le bâtiment est long, ou les blocs sont accolés de façon a formé un seul obstacle contre le vent plus il y aura se qu'on nome l'effet barre qui engendre une déviation en vrille de l'écoulement au passage de la barre pour une incidence voisine de 45°. décroissement de l'accélération en aval, et circulation de fluide tourbillonnaire.  Source: (Hug, 1975).	Les mécanismes de dispersion peuvent être considérés comme dégagés de l'influence de tout obstacle au sol à des distances supérieures à 10 fois la dimension caractéristique de cet obstacle dans la direction du vent, ou à 2,5 fois perpendiculairement à cette direction à la fois dans le plan horizontal et dans le plan vertical.
phénomène d'écoulement aux angles des constructions qui mettent en relation la zone de surpression amont et la zone de dépression latérale du bâtiment.  Source : Chatelet et al 1998 *Tableau(I.3)*	Augmentation de la concentration au niveau des coins des bâtiments ce qu'on l'appel l'effet de coin.

Le bâtiment en forme U est fermé au vent, provoque un écoulementtourbillonnaire  Source : Chatelet et al 1998	Si le bâtiment qui a la forme U, sa maille est orientée face au vent, il y'aura une grande incidence sur l'accumulation des polluants en amont et réduction de la concentration des polluants en aval des bâtiments, ce qu'on appel l'effet de maille.
Phénomène de collecteur formé par des constructions dessinant un angle ouvert au vent. La zone critique pour le confort se situe à l'étranglement.  Source : Cf. Chatelet et Al 1998	Forte concertation des polluants au niveau du collecteur, c'est l'effet venturi.
Quand deux bâtiments de la même hauteur sont parallèle l'effet barre se conserve sur le premier bâtiment et qui sera face au vent  Source : Cf. Chatelet et Al 1998	La concentration des polluants est maximale sur la façade face au vent du premier bâtiment et sera atténuer pour le second.

Tableau(I.3) suite : Les différentes formes urbaines et leurs effets sur le comportement de l'écoulement de l'air et la dispersion de polluant

I.1.2.4 Méthodologie d'étude :

Trois approches sont utilisées pour les études des rues canyons : les études à échelle réelle ; étude à échelle réduite et les études numériques.

- **Les études à échelle réelle**

Plusieurs expériences ont été conduites dans des canyons réels [21,25]. Ces campagnes de mesures sont très utiles du fait que les données collectées sont réelles et non ambigües malgré le manque de précision et parfois les difficultés à les interpréter. Dans des expériences menées par Géorgii, 1969 [26], la présence d'un vortex dans la rue canyon a été détectée quand le vent était perpendiculaire à l'axe de la rue. Aussi Xi et al, 2009 [27] a mené une expérience dans des canyons réels à Chenghai en Chine pour étudier la distribution spatio-temporelle de la concentration des polluants en fonction de la densité du trafic automobile. Cette approche est souvent couteuse ce qui fait que le nombre de points de mesures est limité et leurs emplacements sont souvent éparses. Dans la plus part des cas les expériences ne peuvent parvenir à des mesures de l'écoulement et la dispersion à haute résolution.

- **Les études en modèle réduit**

Les études en modèle réduit sont basées sur le concept de similarité par la réduction de l'échelle géométrique d'un canyon et l'ajustement des paramètres de référence tel que la vitesse de l'écoulement. Les conditions réelles peuvent être reproduites en modèle réduit par la conception de tunnels ou soufflerie. Les expériences en soufflerie ont été largement utilisées comme alternatives aux modèles réels du fait de leurs coûts bas et l'aptitude à contrôler les paramètres de l'écoulement. Dans ces expériences l'écoulement et la dispersion des polluants dans des rues canyons isolés ou des géométries urbaines simplifiées sont souvent étudiés. Mourney et al 1996 [23] ; Schatzmann et al, 1999 [28] ont développé une base de données à deux dimensions pour la dispersion des polluants dans des rues canyons basées sur un nombre d'expériences en soufflerie conduites à l'institut météorologique de l'université de Hamburg (Allemagne). La base de données consiste aux mesures des concentrations moyennes et les variances pour différentes configurations. Ces mesures sont bénéfiques à la compréhension des mécanismes de

dispersion des polluants et sert comme support de validation des données obtenues par simulations numériques.

- **Les outils numériques**

Il existe de nombreux modèles pour la description mathématique de la dispersion appliquée à la dispersion des polluants. On distingue les modèles empiriques, qui se basent essentiellement sur des observations expérimentales, des modèles physiques, qui intègrent de manière plus ou moins complexes des informations telles que le mouvement turbulent du vent, la diffusion turbulente, la structure du paysage, les méthodes numériques sont détaillées dans les chapitres III.

I.1.2.5 Usage et limites :

La modélisation de la dispersion atmosphérique a de nombreux usages :

- répondre à obligations réglementaires d'information et de protection de la population, et de suivi obligatoire de certains polluants à diverses échelles. Ces échelles peuvent être mondiale (ex : suivi des polluants dégradant la couche d'ozone), supranationale (par exemple pour le suivi transfrontalier du mercure, du plomb et du cadmium, trois polluants majeurs dont le suivi est obligatoire en Europe) [54], nationale ou locale.
- des architectes ou urbanistes ou des autorités administratives chargées de l'aménagement du territoire l'utilisent pour mieux prévoir et prévenir l'accumulation de polluants, et limiter les effets de bulles de chaleur urbaine, ou éviter "l'effet canyon"[55] liés à la morphologies de rues et bâtiments. Des organismes spécialisés chargés de la protection de l'air comme la *National Ambient Air Quality Standards* aux États-Unis ou *l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail* peuvent également utiliser ces outils de manière préventive, pour autoriser ou non l'implantation de site industriel. Ils permettent également de déterminer à l'avance des plans de sécurité efficace en optimisant la gestion des personnels d'urgence dans l'hypothèse où un accident industriel surviendrait ou pour trouver des moyens efficaces de lutter contre les polluants atmosphériques nocifs.
- Lors d'aménagements portuaires, routiers, d'aéroports, industriels ou susceptibles d'être source de pollution (incinérateur...) la modélisation permet d'éviter

d'exposer de futurs logements, écoles, hôpitaux ou animaux, cultures, etc. à un risque de contamination par un panache chronique ou accidentel de pollution.

- Les spécialistes du risque sanitaire ou écoépidémiologie lié à des biocontaminants aéroportés peuvent l'utiliser pour étudier ou anticiper certaines épidémies ;
- les autorités administratives utilisent parfois des modèles de dispersion atmosphérique pour réguler la circulation automobile afin de limiter ses effets dans l'air quand les conditions météorologiques sont propices à une stagnation de la pollution.
- Certains spécialistes de la sécurité civile l'utilisent dans le cadre de la gestion de crise de pollutions atmosphériques (ou de la préparation à une éventuelle crise), dont pour le suivi de pollutions transfrontalières ou la réalisation de rétrotrajectoires de panaches de pollution. Ces modélisations sont utilisées lors d'accident industriels ou d'incident sources de rejets accidentels d'aérocontaminants (biocontaminants, produits chimiques, radionucléides...). La modélisation de la dispersion de gaz et de fumées peut aussi aider la prévention de certains effets de phénomènes naturels comme celui dû à l'éruption volcanique. La dispersion du nuage de Tchernobyl a fait l'objet de nombreuses modélisations.
- la modélisation de la dispersion de pollen dans l'air est d'intérêt écologique, agronomique, sanitaire (cf. allergies aux pollens) et a aussi été utilisée pour prévenir si cela est possible les pollinisations croisées autour de cultures de plantes OGM [56].

Les progrès de ces simulations permettent de fournir par exemple une estimation de l'emplacement des zones les plus touchées par une pollution, les taux de polluants auxquels les habitants ou les secours auront à faire face. Les organismes de secours ou de gestion de crise peuvent ainsi mieux adapter leurs moyens en fonction de la situation (du moment et future) et procéder aux mesures de protections appropriée (par exemple pour éviter de rouvrir une zone évacuée où les vents pourraient de nouveau apporter la pollution).Les progrès de l'informatique et de la modélisation ont amélioré la précision des modèles, notamment en contexte de "canopée urbaine" complexe (c'est-à-dire en présence d'un très grand nombre de bâtiments complexes [57].

I.2 Etude bibliographique :

Plusieurs études et recherches menées ces dernières années pour améliorer les connaissances actuelles dans le domaine de la pollution atmosphérique en un milieu urbain surtout en géométrie complexe. Le cas des rues canyons est un modèle représentatif qui traduit la complexité de l'étude du transport et la dispersion des polluants émis essentiellement par les moyens de transport (véhicules, engins, tramway) qui par conditions défavorables altèrent la composition de l'air ambiant.

Dans les études expérimentales, des mesures directes des caractéristiques de turbulence et de la concentration dans des villes réelles à pleine échelle ont également été faites[29,30], ainsi que dans des modèles de ville en soufflerie simplifiés [31,32] Néanmoins, dans les enquêtes numériques, il est extrêmement difficile de considérer l'ensemble du domaine réel, y compris souvent un obstacle isolé simulant un bâtiment ou un canyon urbain idéalisé. La prédiction des caractéristiques d'écoulement turbulent autour d'obstacles est une tâche difficile en raison de la forte interaction entre les murs d'obstacles et l'écoulement de la couche limite externe. Ce processus implique de nombreuses interactions d'écoulement telles que la séparation, la recirculation et le rattachement. À l'approche des obstacles, l'écoulement se caractérise par des couches limites non développées et une forte intensité de turbulence. Les effets combinés d'un faible rapport d'aspect, de fortes turbulences en flux libre et de couches limites non développées donnent naissance à des structures d'écoulement complexes autour des obstacles.

Au cours des dernières décennies, de nombreuses études ont cherché à comprendre l'écoulement turbulent séparé et se rattachant sur des blocs avec différentes configurations. L'utilisation du modèle k-Ɛ [33] a montré qu'une taille de maille fine peut reproduire suffisamment le champ d'écoulement. Iaccarino et al. [34] ont constaté que le modèle RANS instationnaire prédit mieux les caractéristiques d'écoulement que le cas stationnaire. Murakami et al [35] ont comparé le modèle k-Ɛ et la simulation à grands tourbillons (LES) avec des mesures en soufflerie. D'autres études [36-37] ont révélé que le LES donne un meilleur accord quantitatif global avec les données expérimentales que les modèles RANS. Dans différentes études [38-39], les auteurs ont constaté que le modèle de turbulence RNG est généralement meilleur que les autres. Le modèle de stress de Reynolds (RSM) peut produire des résultats

plus réalistes que ceux obtenus en utilisant le modèle de turbulence RNG k-Ɛ par rapport aux données de laboratoire expérimentales [32]. Dans d'autres travaux, le même modèle s'est révélé plus précis que k-Ɛ standard Cependant, le modèle LES a permis une meilleure distribution des concentrations [37]. Chan et al. [40] ont constaté que le modèle RNG k-Ɛ donne des solutions plus précises que le modèle Standard et réalisable k-ε. Des résultats contradictoires ont été obtenus par [41], qui ont constaté que les résultats du modèle k-Ɛ standard concordaient mieux avec les données de soufflerie que le modèle RNG k-ε, le modèle k-Ɛ Réalisable et le modèle Reynolds Stress. Des résultats similaires ont été rapportés dans la littérature par [42]. Adair et Jaeger [43] ont démontré que le modèle de turbulence k-Ɛ réalisable était un modèle de fermeture plus approprié que le modèle RNG k-Ɛ. Récemment, Kim et Tamura [44] ont montré que le modèle RNG k-Ɛ donne des résultats plus raisonnables que le modèle k-Ɛ Standard.

Pour la dispersion des polluants dans une rue canyon, de nombreuses études peuvent être trouvées à la fois sur des enquêtes expérimentales et numériques [45-46] .Par une enquête expérimentale en soufflerie utilisant une source linéaire simulant l'échappement d'un véhicule, Meroney et al. [23] a constaté que le gaz du canyon était connecté à la bulle du toit avant d'être finalement emporté par le flux principal. Ils ont observé que la vitesse du vent a peu d'effet, contrairement à d'autres résultats [47]. D'autres études [48, 49] ont révélé que le transfert de masse de polluants depuis la rue canyon est principalement contrôlé par la dispersion turbulente. Sagrado et al. [50] ont montré que la fumée (polluant) a tendance à s'accumuler dans la bonne région de la rue au lieu de la région sous le vent contrairement à celle citée par les autres, mais ils ont constaté que la concentration était directement affectée par la vitesse du vent. Murena et al [51] ont constaté que la différence de concentration entre les deux côtés du canyon est négligeable, quelle que soit la direction du vent. Liu et al. [52] ont constaté que plus de 95% des polluants résident dans la rue canyon. Dans une véritable étude de suivi à Naples, Murena.F andFavale [53] ont constaté qu'il existe des différences significatives entre les niveaux de concentration de polluants au niveau des piétons et du toit.

D’autres travaux de recherche ont été consacrés à l’étude de la modélisation de la dispersion atmosphérique en 3D sont analysés comme suit :

Yucong Miao et al. [58]ont étudié numériquement la dispersion tridimensionnelle des flux et des gaz d'échappement dans les rues canyons urbains avec trois types de configurations différentes pour découvrir les stratégies d'urbanisme pour atténuer la pollution de l'air en utilisant le code OpenFoam avec trois modèles de turbulence k-ε validés en comparant avec les données d'expérimentation du tunnel de vent, le résultat a montré que la largeur et la hauteur du bâtiment peuvent affecter considérablement le niveau de pollution à l'intérieur du canyon et qu'il est recommandé de concevoir des rues canyon avec des configurations non uniformes. G. Seeta Ratnamet al. [59] ont traité des prédictions CFD du flux incompressible tridimensionnel au-dessus d'un obstacle cubique fixé au mur placé dans un flux turbulent pleinement développé où l'objectif principal est de trouver le modèle de turbulence à deux équations approprié pour la structure d'écoulement complexe qui implique la recirculation, la séparation et le rattachement, ils ont utilisé le modèle k-ε standard, le modèle k-ε non-linéaire et le modèle k-ω standard et amélioré pour résoudre le problème de fermeture. Les résultats ont montré que le modèle k-ω amélioré donne globalement de meilleures prévisions du champ d'écoulement, en particulier la zone de recirculation, la vitesse moyenne dans le sens du courant et les caractéristiques de turbulence par rapport à celles des modèles de viscosité turbulente standard. Le modèle k-ε non linéaire donne une meilleure prédiction par rapport aux modèles k- ε standard et k- ε à faible nombre de Reynolds. CHEN Bicheng et al. [60] ont simulé en 3D les champs de vent, les champs de turbulence et la dispersion des substances gazeuses dans les zones urbaines à l'échelle du bâtiment à l'îlot. Une approche de la dynamique des fluides computationnelle (CFD) utilisant les équations (RANS) à l'état stationnaire avec le modèle de turbulence k-ε standard dans des volumes de contrôle de formes cuboïdes non uniformes qui a été utilisée. Le champ de dispersion est calculé en résolvant une équation de transport instable de scalaire passif. Une autre approche basée sur le modèle de panache gaussien est utilisée pour corriger le nombre turbulent de Schmidt du traceur, afin d'améliorer la simulation de dispersion. Les données expérimentales d'une soufflerie dans des conditions neutres sont utilisées pour valider les résultats numériques des champs de vitesse, de turbulence et de dispersion. Les résultats numériques montrent un accord raisonnable avec les données de la soufflerie. L'écart de concentration entre la simulation avec le nombre de Schmidt turbulent corrigé et les expériences en soufflerie peut provenir, de sources ponctuelles imparfaites, d'une diffusivité turbulente

hétérogène, et de l'hypothèse de constante de Schmidt turbulente utilisée dans le modèle. Ai ZT et al. [61]Ont évalué l'influence des trois paramètres de calcul sur la prédiction CFD du champ d'écoulement isotherme à l'intérieur des rues canyons. Le champ d'écoulement à l'intérieur d'un canyon urbain ne peut pas être raisonnablement prédit en utilisant une rue canyon isolée inclus dans un domaine de calcul conventionnel, qui, cependant, peut être bien prédit en utilisant un domaine de calcul en forme de T où un canyon connecté à une couche d'écoulement libre au-dessus de ce dernier. Un domaine en forme de T dont la longueur en amont, la longueur en aval et la hauteur au-dessus d'un canyon urbain sont tous égaux à la hauteur du canyon est approprié si l'on considère à la fois le coût de calcul et la précision prédictive. Il est raisonnable d'utiliser des conditions aux limites d'afflux uniformes pour représenter la couche libre au-dessus des rues canyons. Zhi Shen et al. [62] ont étudiés le modèle d'écoulement et la dispersion des polluants dans les canopées urbaines par une grande simulation tourbillonnaire de l'écoulement sur un ensemble de cubes et la source ponctuelle est située en aval de l'obstacle, ils ont trouvé que le schéma d'écoulement sur un obstacle cubique isolé peut être caractérisé par un sillage externe de vortex autour de la partie inférieure de la face au vent et un sillage interne de la cavité de recirculation sous le vent. La largeur du sillage externe et la taille du sillage interne dans le flux de rugosité isolé sont utilisées comme paramètres clés pour déterminer les effets de sillage sur le flux et la dispersion. Ils ont conclu que le comportement de la configuration d'écoulement et de la dispersion des polluants est régi par la densité très faible, approximativement comme l'écoulement autour d'un élément de rugosité isolé, à un cas de densité élevée, ressemblant à l'écoulement du réseau. Frauke Pascheke et al. [63] ont étudié à partir de géométries 3D de type urbain à l'échelle du quartier en explorant deux géométries différentes dont une rugosité de hauteur uniforme et une rugosité de hauteur non uniforme, toutes deux avec un plan. Les concentrations de polluant contrôlées par les flux turbulents ont été détectées en utilisant une technique de détection par ionisation de flamme (FID) rapide. L'étude décrit la nouvelle utilisation d'une surface revêtue de polluant comme source de surface dans les études de dispersion. Un accent particulier a également été mis sur le fait de vérifier si les mesures de concentration étaient indépendantes du nombre de Reynolds. Un rejet de source ponctuelle de propane a été également testé. Les résultats ont montré que la variabilité de la hauteur d'une

canopée urbaine est un paramètre important lors de la généralisation de la dispersion atmosphérique. Des mesures de concentration à résolution fine dans la canopée ont montré l'effet de la variabilité de la hauteur sur la dispersion à l'échelle de la rue. Un transport vertical rapide à la suite d'obstacles de grande hauteur individuels s'est avéré générer des sources ponctuelles élevées. Bing-Chen Wang et al. [64] ont simulé la dispersion turbulente d'un scalaire passif libéré d'une source ponctuelle continue au niveau du sol dans deux réseaux d'obstacles à l'aide de la méthode de Navier-Stokes (RANS). Les principaux mécanismes physiques régissant le transport des statistiques de concentration du second ordre d'un scalaire passif sont modélisés selon Yee et al. (2009). Les résultats de la simulation pour les statistiques de débit et de concentration sont comparés à deux ensembles de données de mesure des canaux d'eau de haute qualité obtenues en utilisant la fluorescence induite par laser (pour la concentration) et l'anémométrie Doppler laser (pour la vitesse).S. Branford et al. [65] ont étudié le rejet de source ponctuelle d'un scalaire passif dans un tableau régulier d'obstacles cubiques de type urbain en utilisant la méthode de simulations numériques directes DNS. Les simulations sont conduites dans des conditions de stabilité neutre et d'écoulement turbulent totalement rugueux. Les équations de Navier-Stokes et scalaires sont intégrées en supposant un rejet à débit constant d'une source ponctuelle proche du sol dans la configuration. En concentrant sur la dispersion à courte distance, lorsque la plupart des matériaux se trouvent encore dans la canopée du bâtiment. Les concentrations moyennes et fluctuantes sont calculées pour trois directions de gradient de pression différentes (0◦, 30◦, 45◦). Les résultats concordent bien avec les données expérimentales disponibles mesurées dans un canal d'eau pour un angle d'écoulement de 0 °. Les profils de concentration moyenne et la structure 3D du motif de dispersion sont comparés pour les différents angles de forçage. Ils ont constaté que certain nombre de processus affectant la structure du panache, notamment : la canalisation des rues, l'inclinaison du panache dû au débit tournant avec la hauteur. L. Soulhac et al. [66] ont constaté que les intersections de rues jouent un rôle important dans la détermination des concentrations de polluants dans la canopée urbaine, les émissions des véhicules augmentent souvent à proximité des intersections routières, et les schémas complexes d'écoulement qui se produisent à l'intérieur de l'intersection déterminent les flux de polluants dans les rues adjacentes et dans l'atmosphère. Les modèles opérationnels de la qualité de l'air urbain doivent donc tenir compte des

caractéristiques particulières des intersections de rues. Ils ont effectué une étude expérimentale et numérique des mécanismes d'écoulement et de dispersion au sein d'une intersection urbaine, et sur la base de leurs observations et résultats, ils ont développé un nouveau modèle opérationnel d'échanges de polluants à l'intersection, qui tient compte de la non - uniformité des flux polluants entrant et sortant de l'intersection. Les concentrations ont été mesurées en libérant un gaz traceur à flottabilité neutre à partir d'une source de canalisation située dans l'une des rues. De manière générale, les simulations numériques concordent bien avec les mesures effectuées dans les expériences en soufflerie. Saša Kenjereš et al. [67] leur étude est portée sur la modélisation tridimensionnelle numérique et les simulations d'écoulement turbulent et de dispersion d'un polluant passif (non réactif) dans des configurations à l'échelle du laboratoire qui imitent des zones urbaines complexes. Deux configurations génériques sont sélectionnées: un tableau régulier d'obstacles de hauteur *'h'* avec une structure de tour centrale de hauteur '*3h*' et un tableau d'obstacles répartis aléatoirement (avec des hauteurs de *'1h', '2h'* ou *' 3h '*). Les deux tableaux imitent exactement les conditions expérimentales de Hilderman et Chong (2004) pour l'écoulement des canaux d'eau autour des zones urbaines simplifiées. La source est d'une surface rectangulaire est localisée en aval des obstacles. Les contributions résolues s'avèrent être le mécanisme dominant dans les régions de sillage, ce qui se traduit par une amélioration sensible des prédictions de l'énergie cinétique turbulente, et par conséquent, de la dispersion turbulente du scalaire passif. La version de l'approche hybride proposée basée sur une évolution dynamique de la zone d'interface (approche transparente), s'est avérée être une méthode numériquement efficace et robuste, qui est recommandée pour les études futures de l'écoulement turbulent et de la dispersion dans zones urbaines complexes. P. Gousseau et al [68] ils ont évalué la performance de deux approches de modélisation différentes (RANS et LES) appliquées à la dispersion des polluants dans un environnement urbain réel: le centre-ville de Montréal. L'étude se concentre sur la dispersion en champ proche, c'est-à-dire à la fois sur la prédiction des concentrations de polluants dans les rues avoisinantes (pour la qualité de l'air extérieur des piétons) et sur les surfaces des bâtiments (pour les entrées du système de ventilation et la qualité de l'air intérieur). Les simulations CFD haute résolution sont effectuées pour des conditions atmosphériques neutres et sont validées par des expériences détaillées

en soufflerie. Ils ont montré en revanche que les performances du modèle k-Ɛ standard dépendent fortement du nombre de Schmidt turbulent, dont la valeur optimale est dépendante du cas et a priori inconnue. En revanche, LES avec le modèle à l'échelle de sous-réseau dynamique montre de meilleures performances sans nécessiter aucune entrée de paramètre pour résoudre l'équation de dispersion.

I.3 Conclusion :

De la discussion précédente, on peut voir que la CFD est devenu un outil plus accessible en raison du progrès continu des études de modélisation et de l'augmentation rapide des ressources de calcul. Cependant, la littérature montre que les résultats varient et sont parfois contradictoires comme par exemple [40] avec [41,42]. Les écoulements séparés sont significativement affectés par la présence de murs où les régions affectées par la viscosité ont de grands gradients sur les variables de la solution et une présentation précise de la région proche de la paroi détermine une prédiction réussie des écoulements turbulents à rattachement séparée. De plus, il est connu que les résultats des simulations CFD sont très sensibles à un large éventail de paramètres de calcul, tels que les profils de vitesse d'écoulement et les quantités de turbulence imposées à l'entrée, etc. De plus, dans les simulations numériques, la précision des résultats dépend du modèle de turbulence, du traitement de la loi de la paroi (y +) appliqué, des critères de convergence et du schéma de discrétisation utilisé. Tandis que les concentrations en polluant dans l'atmosphère peuvent fluctuer dans le temps et dans l'espace selon les paramètres suivants :

- variation dans le temps de l'intensité des émissions des différentes activités : en hiver le chauffage est important, le trafic routier est quasiment nul la nuit
- la topographie locale peut favoriser ou non le déplacement des masses d'air
- les conditions météorologiques : une atmosphère stable limite la dispersion des polluants et favorise les pics de pollution.
- La présence de végétation en milieu urbain est donc d'une réelle utilité non seulement dans de la lutte contre le changement climatique, mais aussi pour la réduction de la pollution urbaine**.** Les arbres ou les jardins de toiture par exemple sont des outils urbains polyvalents par excellence, jouant le rôle de filtre, d'éponge, d'humidificateur, de puits de carbone et de protection contre le soleil et le vent.

CHAPITRE II :

FORMULATION MATHEMATIQUE

II.1 Introduction :

La pollution atmosphérique est un phénomène qui peut être modélisé et simulé, sur la base de la théorie de la mécanique des fluides.La modélisation devient plus difficile et doit être paramétrée quand l'environnement est exposé à des conditions plus complexes telles que la turbulence mécanique liée aux caractéristiques de surface. Une description approfondie des écoulements turbulents est nécessaire pour la compréhension de la dispersion des polluants dans l'atmosphèreurbaine.Dans ce chapitre on représente brièvement les équations mathématiques gouvernantes du problème étudié qui permettent d'effectuer le calcul numérique désiré pour le modèle physique traité dans le cadre de notre thèse.

II.2 Notions fondamentales sur la dynamique atmosphérique :

II.2.1 Equations gouvernantes des écoulements :

Les différents phénomènes qui se produisant dans l'atmosphère sont absolument liés aux flux d'énergie et de matière au sein de cette dernière, ces flux qui conditionnent et façonnent l'écoulement de l'air atmosphérique sont décrits par les équations de la mécanique des fluides (ou de Navier-Stokes) [84,85] qui traduisent la conservation des trois quantités physiques suivantes :

- la masse, exprimée à travers la masse volumique ρ;
- la quantité de mouvement ;
- l'énergie.

A la conservation de ces trois grandeurs physiques, s'ajoute la conservation de grandeurs scalaires.

- **Conservation de la masse**

Dans le formalisme eulérien, l'équation de conservation de la masse ou (équation de continuité) s'écrit :

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \qquad \text{(II.1)}$$

- **Conservation de la quantité demouvement**

La conservation de la quantité de mouvement est décrite par les équations de Navier-Stocks adaptées à la couche de surface urbaine, les forces de Coriolis étant donc négligées:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \qquad \text{(II.2)}$$

Avec : (a) (b) (c) (d) (e)

(a) est le termed'inertie
(b) est le termed'advection
(c) est le terme gradient de pression
(d) est le terme degravité
(e) est le terme de viscosité del'air

L'air atmosphérique est considéré comme fluide newtonien, le tenseur des contraintes est proportionnel au tenseur des taux de déformation. Le terme (E) s'écrit alors :

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial x_i}\left\{\mu\left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right] - \frac{2}{3}\mu\left[\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right]\delta_{ij}\right\} \qquad \text{(II.3)}$$

Où μest la viscosité dynamique (kg.m^{-1}.s^{-1}). En considérant la viscosité dynamique homogène spatialement, on fait apparaitre la viscosité cinématique

$$\upsilon = \frac{\mu}{\rho}(m^2.s^{-1})$$

- **Equation del'énergie**

L'équation de conservation de l'énergie s'écrit :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + u_j \frac{\partial \theta}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho C_p}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x_j}\right) + S_\theta \qquad \text{(II.4)}$$

- **Equation de transport d'unpolluant**

La dispersion d'un polluant dans l'atmosphère est décrite par l'équation d'advection – diffusion:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u_j \frac{\partial C}{\partial x_j} = D_m \frac{\partial^2 C}{\partial x_j \partial x_j} + R(T) + S \qquad \text{(II.5)}$$

Où C estla concentration d'un polluant, $D_m$estle coefficient de diffusionmoléculaire massique du polluant, R estun terme source ou puits, Sestun terme source additionnel .

II.2.2 pris en compte de la turbulence :

L'écoulement est considéré comme turbulent si l'ensemble des caractéristiques suivantes dont la présence simultanée l'indique :

- ❖ Les variables décrivant un écoulement turbulent présentent un caractère aléatoire en fonction du temps et de l'espace. Cette caractéristique laisse entrevoir l'utilisation naturelle des méthodes statistiques;
- ❖ Les écoulements turbulents présentent un caractère rotationnel : des tourbillons de toutes tailles -les plus gros sont de dimension comparable à celle de l'écoulement, les plus petits correspondent à des nombres de Reynolds proche de l'unité- peuvent être observés. Cette large gamme d'échelle fait que la turbulence reste un phénomène continu;
- ❖ La turbulence est un phénomène fondamentalement non linéaire, intrinsèquement liée aux termes d'inertie dans les équations de Navier qui sont responsables du mécanisme de cascade de l'énergie cinétique du mouvement turbulent qui est produite aux grandes échelles et dissipée en chaleur par viscosité aux petiteséchelles;
- ❖ La turbulence est un phénomène dissipatif, où les processus irréversibles, tels que la dissipation de l'énergie cinétique en chaleur, sont considérablementaccrus;
- ❖ Enfin, la propriété considérée comme la plus importante est l'aptitude d'un écoulement turbulent à diffuser toute grandeur associée au fluide, avec une

efficacité dépassant de plusieurs ordres la diffusionmoléculaire.

Dans la couche de surface urbaine, les écoulements sont fortement turbulents, les variables varient en temps et en espace de manière irrégulière autour d'une valeur moyenne. Il est préférable donc de décomposer le mouvement en une somme de deux composantes l'une moyenne et l'autre turbulente, suit le formalisme de Reynolds (1894). Les variables s'écrivent alors de la façon suivante :

$$u_i = \bar{u}_i + \acute{u}_i \quad \text{(II.6.a)}$$

$$\rho = \bar{\rho} + \acute{\rho} \quad \text{(II.6.b)}$$

$$p = \bar{p} + \acute{p} \quad \text{(II.6.c)}$$

$$\theta = \bar{\theta} + \acute{\theta} \quad \text{(II.6.d)}$$

$$C = \bar{C} + \acute{C} \quad \text{(II.6.e)}$$

Avec les propriétés suivantes pour toute variable υ, w et constante *a* :

$$\bar{\acute{\upsilon}} = 0 \quad \text{(II.7.a)}$$

$$\overline{\upsilon w} = \bar{\upsilon}\bar{w} + \overline{\acute{\upsilon}\acute{w}} \quad \text{(II.7.b)}$$

$$\overline{\upsilon + w} = \overline{\upsilon} + \bar{w} \quad \text{(II.7.c)}$$

$$\overline{a\upsilon} = a\bar{\upsilon} \quad \text{(II.7.d)}$$

$$\frac{\overline{\partial \upsilon}}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{\upsilon}}{\partial x_i} \quad \text{(II.7.e)}$$

En prenant en compte les fluctuations des différentes variables contenues dans les équations (II.6) et par application des propriétés (II.7) et l'approximation de Boussinesq dans la couche limite ($\rho \approx \bar{\rho}$), les équations de conservation s'écrivent comme suit:

- **Conservation de la masse**

$$\frac{\partial \overline{\rho u_i}}{\partial x_i} = 0 \quad \text{(II.8)}$$

- **Conservation de la quantité demouvement**

$$\frac{\partial \overline{u_\iota}}{\partial t} + \overline{u_J}\frac{\partial \overline{u_\iota}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i + \frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial \overline{\tau_{\iota J}}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{\acute{u}_J \acute{u}_\iota}}{\partial x_j} \qquad \text{(II.9)}$$

- **Conservation del'énergie**

L'équation de conservation de l'énergie s'écrit :

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \overline{u_J}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{1}{\bar{\rho} C_p}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} - \bar{\rho} C_p \overline{u_J \acute{\theta}}\right) + \overline{S_\theta} \qquad \text{(II.10)}$$

- **Equation de transport d'unpolluant**

En utilisant l'équation (II.6) et en moyennant l'équation (II.5) on obtient :

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \overline{u_J}\frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} = D_m \frac{\partial^2 \bar{C}}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\overline{\partial \acute{u}_J \acute{C}}}{\partial x_j} + \bar{S} \qquad \text{(II.11)}$$

Pour résoudre le problème de fermeture qui apparait dans les équations de Reynolds dans la couche de surface urbaine, on applique un schéma de premier ordre qui consiste à exprimer des flux turbulents selon le modèle de diffusivité proposé par Boussinesq en 1877. Ce modèle repose sur la notion de proportionnalité entre les flux turbulents et les gradients moyens qui s'écrivent comme suit :

$$\overline{\acute{u}_J \acute{u}_\iota} = -\upsilon_t \left[\frac{\partial \overline{u_\iota}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_J}}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right] \qquad \text{(II.12.a)}$$

$$\overline{\acute{u}_J \acute{\theta}} = -\frac{\lambda_t}{\bar{\rho} C_p}\frac{\partial \theta}{\partial x_j} \qquad \text{(II.12.b)}$$

$$\overline{\acute{u}_J \acute{C}} = -D_t \frac{\partial C}{\partial x_k} \qquad \text{(II.12.c)}$$

Avec υ_t la viscosité turbulente cinématique, D_t est la diffusivité turbulente, avec$D_t = \upsilon_t / Sc_t$, Sc_t étant le nombre de schmidt turbulent. Les équations de mouvement et de l'énergie s'écrivent alors :

- **Pour la quantité demouvement**

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} = -\frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + g_i - \frac{2}{3}\frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\upsilon + \upsilon_t)\frac{\partial \overline{u_k}}{\partial x_k}\right] + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\upsilon + \upsilon_t)\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)\right] \quad \text{(II.13)}$$

- **Pour l'énergie :**

$$\boldsymbol{\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j} = \frac{1}{\bar{\rho} C_p}\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\lambda + \lambda_t \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x_j}\right) + \overline{S_\theta}} \quad \text{(II.14)}$$

- **Pour l'équation de conservation d'un polluant :**

$$\boldsymbol{\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(D_m + \frac{\upsilon_t}{Sc_t}\right)\frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j}\right]} \quad \text{(II.15)}$$

II.2.3 Profil de vitesse dans la couchelimite :

On se place dans la couche de surface où les flux turbulents moyens sontconstants et égaux à leurs valeurs en surface. L'écoulement est homogène et stationnaires, les forces de pression sont négligeables. La vitesse est prise selon l'axe des X, dans ces conditions l'équation moyenne de conservation de quantité de mouvement (II.13) se réduit à:

$$\upsilon \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{\acute{w}\acute{u}} = u_*^2 \quad \text{(II.16)}$$

u_*: représente la vitesse de frottement exprimée en [m s^{-1}].

En utilisant l'équation (II.12.a) et en négligeant la viscosité moléculaire par rapport à la viscosité turbulente et en appliquant la théorie de la longueur de mélange de Prandtl donnée par la loi linéaire ($l = kz$) où k est la constante de Von Karman, l'équation (II.16) se réduit à:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = \frac{u_*}{kz} \quad \text{(II.17)}$$

Pour une atmosphère neutre, le profil de vitesse est logarithmique déduit de la relation (II.17) sous la forme :

$$\bar{u} = \frac{u_*}{k} ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{(II.18)}$$

Pour $z \gg z_0$; où $z_0$est la longueur de la rugositédynamique.

II.2.4Les lois d'écoulement à laparoi

La présence des parois solides mènent à des différences considérables dans le comportement de l'écoulement et la structure de la turbulence comparé aux écoulements turbulents libres (ceux qui ne sont pas affectés par une paroi solide). Les effets d'une paroi solide sont mieux expliqués par la définition d'un nombre de Reynolds, avec longueur d'échelle basée sur la distance y normale à la paroi.

$$R_e = \frac{U_y}{\nu} \quad \text{(II.19)}$$

Où U est la vitesse et ν est la viscosité cinématique du fluide.

Le nombre de Reynolds de l'écoulement fournit une mesure de la contribution relative des forces d'inertie aux forces visqueuses. Les forces d'inertie sont prépondérantes dans l'écoulement loin des parois, cependant, le nombre de Reynolds diminue également pendant que la distance diminue vers zéro. Juste avant que y devienne zéro, il y a une gamme des valeurs de y pour lesquelles le nombre de Reynolds est de l'ordre de 1. À cette distance de la paroi, et prés d'elle, les forces visqueuses sont égales dans l'ordre de grandeur ou plus grandes que les forcesd'inertie.

Il existe un certain nombre de couches individuelles avec des caractéristiques d'écoulement différentes au voisinage de la paroi qui peut être définie. Afin d'expliquer ces couches il est nécessaire d'introduire deux paramètres sans dimensions :

Une vitesse :

$$u^+ = \frac{(\rho u_\tau y_p)}{\mu} \quad \text{(II.20)}$$

Une distance : $$y^+ = \frac{\Delta y_p}{v}\sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad \text{(II.21)}$$

Où Δy_p est la distance de la paroi au point le plus prochey_p, où la vitesse doit être calculée, u_τ est la vitesse de cisaillement, μ est la viscosité dynamique du fluide et τ est la contrainte de cisaillement qui, selon la loi de la paroi, est liée à l'énergie cinétique turbulente par:

$$\tau = \rho C_\mu^{1/2} k \quad \text{(II.22)}$$

Il a été trouvé expérimentalement que la région proche de la paroi peut être subdivisée en trois couches :

La sous couche visqueuse : c'est une couche très mince ($y^+ < 5$), les forces de viscosité sont prépondérantes par rapports aux tensions de Reynolds. Le profil de vitesse de la paroi suit une loi linéaire:

$$u^+ = y^+ \quad \text{(II.23)}$$

La sous couche logarithmique : ($30 < y^+ < 500$) dans cette couche, les effets visqueux et turbulents sont tous deux importants. La contrainte de cisaillement change lentement avec la distance à la paroi et est supposé pour être constante et égale à la contrainte de cisaillement de la paroi. La relation entre u^+ et y^+dans cette couche est donnée comme suit:

$$u^+ = \frac{1}{k} ln\, y^+ + C \quad \text{(II.24)}$$

Où *C* sont des constantes, dont les valeurs sont trouvées à partir des mesures.

II.2.5 Les modèles de turbulence :

Ces modèles étudient les équations statistiques aux dérivées partielles obtenues par passage à la moyenne des équations de Navier-StokesOn obtient alors un système ouvert, mais ce passage engendre une perte d'informations, il convient alors de choisir judicieusement les schémas de fermeture pour qu'ils réintroduisent les informations perdues dans un nouveau système, fermé celui-ci, que l'on pourra résoudre numériquement.On peut classifier ces modèles suivant deux critères : on distingue les modèles par leur ordre (un ou deux en général) et par le nombre d'équations de fermeture supplémentaires (plutôt une ou deux selon la complexité du modèle de fermeture).

D'après les études limitées aux valeurs moyennes des fonctions de l'écoulement. On distingue les modèles à :

- zéro équation : Qui consiste à relier les flux turbulents (dont les corrélations doubles) et les grandeurs moyennes sans introduire de nouvelle équation. On peut, par exemple, relier linéairement, pour un écoulement cisaillé simple, les tensions de Reynolds et le gradient de vitesse, le coefficient de proportionnalité étant la viscosité turbulente (Boussinesq la supposait constante),
- une équation : Ces modèles ont pour avantages d'être assez simple et de prendre un peu en compte l'histoire de la turbulence mais le choix de l'échelle de longueur est empirique et l'extension au cas tridimensionnel est difficile,
- deux équations : Où l'on considère que la viscosité tourbillonnaire dépend de deux paramètres représentatifs du phénomène. Le modèle k-epsilon est de ce type : il a l'avantage d'être assez répandu et de prendre en compte les variations spatiales de l'agitation turbulente mais il est mal adapté aux écoulements complexes [117].

II.2.5.1 Modèles à zéro équation : Modèles algébriques

Ces modèles ne font appel à aucune équation de transport de la turbulence. Ce type demodèles est surtout destiné aux écoulements où il n'y a qu'un seul gradient de vitessesignificatif qui est normal à la direction de l'écoulement, comme c'est le cas par exemple del'écoulement de couche limite. Le modèle algébrique le plus connu est celui proposé parPrandtl (1925) dit de « longueur de mélange » qui consiste à représenter l'échelle de vitesse V**,** le produit du gradient de vitesse prépondérant, soit$\left|\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right|$, et de l'échelle de longueur qui est la longueur de mélange l_mCe qui conduit à une vitesse caractéristique de la forme :

$$V = l_m \left|\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right| \qquad \text{(II.25)}$$

D'où, l'expression de la viscosité turbulente :

$$\mu_t = (cons.)\rho l_m^2 \left|\frac{\partial \bar{u}}{\partial y}\right| \qquad \text{(II.26)}$$

La longueur de mélange l_m est introduite par analogie au libre parcours moyen rencontré dansla théorie cinétique des gaz. Ainsi, on peut dire que c'est le libre parcours moyen des petitstourbillons. Elle est déterminée par des relations empiriques allant d'une simple relationlinéaire à des expressions plus complexes selon le type d'écoulement étudié.

L'inconvénient pour ce type de modèle est qu'il est limité aux écoulements simples et ne peutêtre utilisé pour les écoulements avec recirculation, par exemple, et en plus la distribution del_m n'est pas universelle même pour des écoulements simples. Ainsi, les modèles deturbulence basés sur cette notion n'ont pas un degré de généralité élevé.

II.2.5.2 Modèles à une équation :

Afin de mieux prendre en compte l'effet de transport et l'historique de l'écoulement turbulent, onpréfère généralement se tourner vers les modèles qui consistent à résoudre les équations de transportdes quantités caractérisant la turbulence.

La viscosité turbulente υ_t qui apparait dans la relation de Boussinesq en est la première de ces quantités. On s'intéresse alors à la construction d'une équation de transport pour la viscosité turbulente, c'est le cas du modèle à une équation de Spalart-Allmaras. L'équation de transport est établie sous des hypothèses empiriques et des analyses dimensionnelles. Ce modèle requière une certaine finesse pour capturer un champ de gradient de vitesse avec unmodèle algébrique. Le modèle à une équation de Spalart-Allmaras est largement utilisé dans les applications de l'industrie aérospatiale.

L'énergie cinétique de la turbulence k est l'autre quantité turbulente, étant donné qu'ellereprésente la mesure de l'intensité des fluctuations, dont une équation de transport estintroduite dans ce type de modèles. Pour cela, on remplace dans l'expression de laviscosité turbulente l'échelle de vitesse par la racine carrée de k.

La viscosité turbulente est définie dans ce cas par :

$$\mu_t = (const.)\rho k^{\frac{1}{2}} l_m \qquad \text{(II.27)}$$

De la même manière que pour le modèle algébrique de Prandtl, l_m est déterminée par desexpressions algébriques. Pour fermer le système d'équations, on construit l'équation detransport de k à partir des équations de Navier-Stokes. On obtient ainsi le modèle à uneéquation *k-*l_m. La difficulté des modèles à une équation et du modèle de la longueur de mélange résidesurtout dans la description de l_m.

II.2.5.3 Modèles à deux équations :

La difficulté de trouver des expressions algébriques universelles pour l'échelle de longueur Ld'une part et, d'autre part, parce qu'une longueur caractéristique de l'écoulement est sujetteaux processus de transport et à l'historique de cet écoulement, ceci amène à introduire uneéquation de transport supplémentaire d'une grandeur turbulente qui sera liée à l'échelle delongueur L.

Le modèle k-ε conçu par B. E Launder et D. B Splanding[86] est devenu le plus populairedes modèles de turbulence pour sa simplicité et la possibilité de l'utiliser pour différents typesd'écoulement.La grandeur turbulente liée à *L* la plus largement adoptée et pour laquelle une équation detransport peut être construite, est le taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence ε.

On a dans ce cas :

- L'échelle de longueur définie par :

$$L = \frac{K^{3/2}}{\varepsilon} \tag{II.28}$$

- L'échelle de vitesse est définie par :

$$V = K^{1/2} \tag{II.29}$$

La viscosité turbulente est alors :

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{K^2}{\varepsilon} \tag{II. 30}$$

C'est la relation de Kolmogorov-Prandtl, c_μ est une constante empirique.

La grandeur ε, appelée taux de dissipation de l'énergie cinétique, est définie par l'expression :

$$\rho\varepsilon = \mu \overline{\frac{\partial \acute{u}_\iota}{\partial x_J} \frac{\partial \acute{u}_\iota}{\partial x_J}} \quad \text{(II.31)}$$

II.2.5.3.1. Le modèle K-Ɛ :

II.2.5.3.1.1 Les différentes versions du modèle K-ε :

Le modèle K-ε est largement utilisé dans les applications et études d'écoulement et de dispersion des polluants dans le milieu urbain notamment les rues canyons et est bien documenté dans la littérature scientifique. Cependant il présente en même temps quelques faiblesses [87] notammentune faible performance du modèle dans la reproduction de l'énergie cinétique turbulente à l'intérieur d'une rue canyon [88, 89], eten présence d'obstacle, il a été observé aussi ses faibles performances dans les zones de séparation [90].

D'autres études antérieures se sont principalement focalisées sur l'amélioration des performances de ce modèle pour simuler le champ d'écoulement moyen et le transport des polluants. Cependant les propriétés de la turbulence jouent un rôle crucial dans la dispersion, le transport advectif est faible en présence des immeubles, seul le mélange turbulent induit par le vent est le moteur de la dilution des polluants émis par les véhicules motorisés à l'intérieur de la rue canyon [91]. De ce fait il est nécessaire de mieux caractériser les propriétés de la turbulence pour améliorer les performances du modèle K-ε pour une bonne reproduction des champs d'écoulement et de dispersion dans les ruescanyons.

On détaille en revanche les versions créées à partir de ce modèle dans la partie suivante où les principales différences entre eux sont résumées comme suit:

• La méthode de calcul de la viscosité turbulente,

• Les nombres turbulents de Prandtl régissant la diffusion turbulente de k et ε,

• Les termes de génération et de destruction d'énergie dans l'équation,

Les équations de transport, les méthodes de calcul de la viscosité turbulente et les constantes du modèle sont présentées séparément pour chaque version.

- **k-εStandard:**

Dans la dérivation du modèle **k-ε standard**[77], l'écoulement est entièrement turbulent, de sorte que l'on peut négliger les effets de la viscosité moléculaire. Ce

modèle n'est donc valable que pour des écoulements totalement turbulents. L'énergie cinétique turbulente *k* est obtenue par l'équation de transport de l'écoulement:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k+G_b-\rho\varepsilon-Y_M+S_K \qquad \text{(II.32)}$$

Le taux de dissipation turbulente ε est obtenu comme suit:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}+S_\varepsilon \text{ (II.33)}$$

G_k représente la génération d'énergie cinétique turbulente due au gradient de vitesse moyenne.

G_b représente la génération d'énergie cinétique turbulente due à la flottabilité.

La viscosité turbulente (tourbillon) est liée à l'énergie cinétique turbulente et à son taux de dissipation par:

$$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad \text{(II.34)}$$

Les valeurs par défaut des constantes correspondant à ce modèle sont $\sigma_k=1.0, \sigma_\varepsilon=1.3, C_{1\varepsilon}=1.44, C_{2\varepsilon}=1.92, C_\mu=0.09$.

- **k-ε Réalisable:**

Le modèle **k-εréalisable** est une amélioration du modèle k-Standard standard. Il diffère du modèle Standard k-Standard par:

- Le modèle **k-εréalisable** contient une nouvelle formulation pour la viscosité turbulente,
- Une nouvelle équation de transport pour le taux de dissipation **ε** qui est dérivée d'une solution exacte pour le transport du carré moyen de la fluctuation du tourbillon.

Le modèle **k-ε réalisable** démontre une capacité supérieure à capturer le flux moyen des structures complexes [78]. L'équation de transport s'écrit:

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

(II.35)

Dans le modèle **k-εréalisable**, Cμ n'est plus constant et est fonction de la déformation moyenne et des vitesses de rotation.

Les valeurs standard des constantes sont les suivantes

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

- **RNG k-ε:**

Le modèle RNG **k-ε** est dérivé des équations instantanées de Navier-Stokes en utilisant une technique appelée théorie des groupes de renormalisation [79]. Les principales améliorations sont les suivantes:

- Le modèle RNG a un terme supplémentaire dans l'équation ε qui améliore considérablement la précision pour les écoulements à contrainte rapide,
- La théorie RNG fournit une formule analytique pour les nombres turbulents de Prandtl, tandis que le modèle standard utilise des valeurs constantes spécifiées par l'utilisateur.

Ces caractéristiques rendent le modèle RNG k-εplus précis et fiable pour une classe de flux plus large que le modèle k-ε standard.

L'équation de transport de ce modèle est la suivante:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\alpha_\varepsilon\mu_{eff}\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k+C_{3\varepsilon}G_b)-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}-R_\varepsilon+S_\varepsilon \quad \text{(II.36)}$$

De plus, la théorie RNG utilise une procédure d'élimination d'échelle qui définit la viscosité effective donnée dans l'équation suivante:

$$d\left(\frac{\rho^2 k}{\sqrt{\varepsilon\mu}}\right)=1.72\frac{\nu}{\sqrt{\hat{\nu}^3-1+C_\nu}}d\nu \quad \text{(II.37)}$$

Où $\hat{\nu}=\mu_{eff}/\mu$ et C_ν est une constante approximativement égale à 100.

La constante Cμ est dérivée en utilisant la théorie RNG et a été trouvée égale à 0,0845. Les autres constantes sont $\sigma_\varepsilon = 0.719, C_{1\varepsilon} = 1.42, C_{2\varepsilon} = 1.68$.

II.2.6 Description mathématique de la dispersion atmosphérique :

Il existe dans la littérature de nombreuses méthodes pour modéliser la dispersion de polluants dans l'atmosphère. On propose ici les approches les plus répandues dans ce domaine d'études.

II.2.6.1 Approche Eulérienne :

La représentation eulérienne consiste à suivre le mouvement des polluants par rapport à un repère fixe.

- **Equation d'advection-diffusion**

En appliquant le principe de conservation à la quantité scalaire on peut écrire l'équation d'advection-diffusion de la concentration :

Advection **diffusion turbulente**

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + V_X \frac{\partial C_i}{\partial x} + V_Y \frac{\partial C_i}{\partial y} + V_Z \frac{\partial C_i}{\partial z} = -\frac{\partial}{\partial x} < \acute{v}_x \acute{c}_1 > -\frac{\partial}{\partial y} < \acute{v}_y \acute{c}_1 > -\frac{\partial}{\partial z} < \acute{v}_z \acute{c}_1 >$$

$$+q\delta(x)\delta(y)\delta(z) \qquad \text{(II.38)}$$

émission

On considère un vent moyen constant et une turbulence homogène dans l'espace stationnaire dans le temps.

- **La diffusion moléculaire est fondamentale représentée par la loi de Fick :**

$$F(x,t) = -D_g grad\big(c(x,t)\big) \qquad \text{(II.39)}$$

Où ***F***est le flux de masse,$\boldsymbol{D_g}$ est le coefficient de diffusion moléculaire, ***c*** est la concentration de la substance qui diffuse et ***grad*** est le gradient spatial.

Par analogie, on représente le terme correspondant à la turbulence ainsi :

$$< \acute{v}_x \acute{c}_1 >= -K(x,t)grad\big(c(x,t)\big) \quad \text{(II.40)}$$

On fait l'hypothèse que le flux de masse dû à la diffusion turbulente (dispersion) est proportionnel au gradient de la concentration massique.

L'équation devient :

Advection **diffusion**

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + V_X \frac{\partial C_i}{\partial x} + V_Y \frac{\partial C_i}{\partial y} + V_Z \frac{\partial C_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}\left(K_{XX} \frac{\partial C_i}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_{YY} \frac{\partial C_i}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K_{ZZ} \frac{\partial C_i}{\partial z}\right)$$

$$+q\delta(x)\delta(y)\delta(z) \text{ (II.41)}$$

émission

- **A l'état stationnaire :**

$$\frac{\partial c(x)}{\partial x} = K_{YY} \frac{\partial^2 c(x)}{\partial y^2} + K_{ZZ} \frac{\partial^2 c(x)}{\partial z^2} + q\delta(x)\delta(y)\delta(z) \text{(II.42)}$$

$$c(x,y,z) = 0 \qquad y,z \longrightarrow \pm\infty$$

- **Solution :**

$$c(x) = \frac{q}{4\pi (K_{yy}K_{zz})^{\frac{1}{2}} x} exp\left(-\frac{V_x}{4x}\left(\frac{y^2}{K_{yy}} + \frac{z^2}{k_{zz}}\right)\right) \quad \text{(II.43)}$$

II.3 Conclusion :

Dans ce chapitre on a présenté les équations de mouvements régissant les écoulements turbulents dans l'atmosphère ainsi que la procédure de dispersion des polluants. Ce système d'équations fortement non linéaire ne présente pas de solutions analytiques, pour cela différentes méthodes numériques basées sur ces modèles mathématiques ont été développées dans ce domaine de recherche permettant en revanche de modéliser ces écoulements et traiter les différents problèmes liés au phénomène de la dispersion atmosphérique.

Les diverses méthodes de résolution numérique ainsi que le code de calcul pour le modèle physique traité dans notre cas sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III :

SIMULATION NUMERIQUE ET CODE DE CALCUL

III.1. Introduction :

La CFD (dynamique des fluides computationnelle) est un des outils numériques indispensable et très puissant qui permet de simuler les écoulements afin d'étudier les fluides (liquide ou gaz) et leurs interactions avec l'environnement, ceci passe par la résolution des systèmes d'équations de la dynamique des fluides appliqués à ce domaine ainsi que le phénomène de la pollutionatmosphérique qui se révèle être une tâche très complexe. La modélisation numérique a toujours un coût très faible par rapport à l'expérimentation et les résultats sont obtenus beaucoup plus rapidement avec une très grande précision et comporte ainsi beaucoup moins de risques pour l'homme.

Nous consacrerons cette partie d'étude au rappel des notions de base de la simulation numérique des écoulements turbulents ainsi que la dispersion des polluants dans l'atmosphère effectuée par le code libre OpenFOAM, un outil open source basé sur la méthode des volumes finis qui fonctionne sous le système d'exploitationLinux, le processus de modélisation et la discrétisation des équations gouvernantes ainsi que l'algorithme utilisé sont illustrés dans ce chapitre.

III.2 Les modèles de dispersion atmosphérique :

III.2.1 les modèles Gaussiens :

Les modèles gaussiens [95]: Ils sont basés sur des solutions analytiques de l'équation d'advection-diffusion (équation II.38). On distingue les modèles depanache gaussien et les modèles à bouffées gaussiennes. Dans ce type de modèles, la plupart des processus de dispersion sont pris en compte à l'aide de paramétrisations spécifiques, sans résolution des équations. Ces modèles sont bien adaptésà des études opérationnelles (calcul en temps réel, étude d'impact) car ils nécessitent destemps de calculs limités et permettent ainsi l'étude d'un grand nombre de cas. Les temps decalcul sont de l'ordre de quelques secondes par scénario pour des échelles kilométriquespermettant ainsi de modéliser la dispersion sur un site industriel et ses alentours. L'ensembledes géométries complexes ne sont pas prise en compte, ne permettant pas la représentation deseffets des bâtiments sur la dispersion. En effet, du fait de la prise en compte empirique del'écoulement, ces modèles sont difficilement

utilisables dans des situations d'écoulement très compliqué, lorsque l'on prend en considération par exemple le relief ou des obstaclesmultiples.

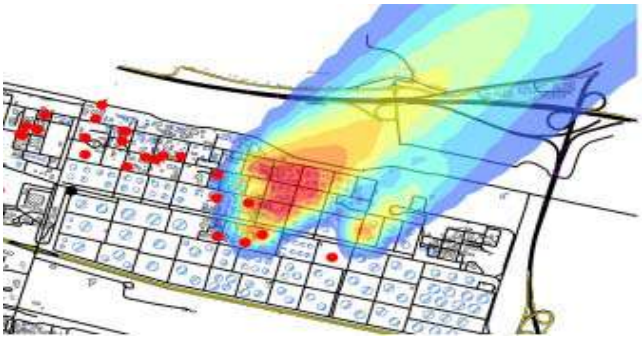


Figure (III.1) : Exemple de modélisation par modèle Gaussien

III.2.2 les modèles Lagrangiens :

Les modèles lagrangiens sont basés sur le calcul des trajectoires turbulentes d'un grand nombre de particulesreprésentant le polluant. Ils sont généralement couplés à un modèle eulérien qui calcule lechamp de vent et de turbulence dans lequel s'effectue la dispersion. Ce calcul de l'écoulementpeut être simplifié autour des bâtiments pour garder des temps de calculs acceptables. Ilspermettent essentiellement de prendre en compte la dispersion. Ils peuvent être utilisés pour des étudesd'impact mais les calculs d'écoulement par l'approche eulérienne ne leur permettent pas d'assurerdes simulations en temps réel. Les résultats obtenus avec cette approche sont généralementbien adaptés au champ proche des sources, mais la description simplifiée des bâtiments nepermet pas de prendre totalement en compte toute la complexité géométrique d'un siteindustriel. De plus, ils ne sont pas adaptés pour traiter un grand nombre de sources (temps decalcul très important).

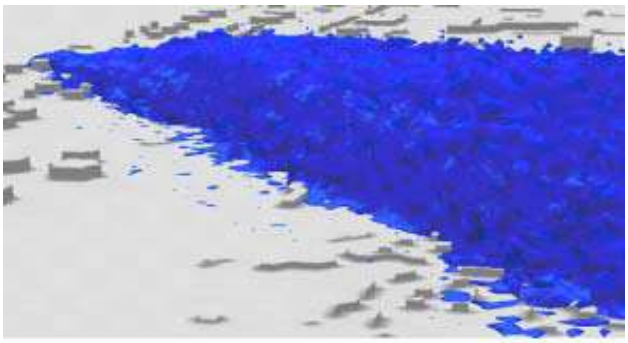


Figure (III.2) : Exemple de modélisation par modèle Lagrangien

III.2.3 Les modèles CFD :

Ils reposent sur une approximation tridimensionnelle des Equations de la mécanique des fluides (Equation de Navier-Stokes) pour la partie dynamique et de l'équation de Conservation de la masse pour la dispersion des polluants. Mais ces relations sont établies par rapport à un référentiel fixe, à partir duquel a été défini un maillage tridimensionnel. Celui-ci peut se composer de parallélépipèdes de même taille ou de tailles différentes (maillage structuré), ou d'autres éléments disposés de façon non régulière tels que des tétraèdres (maillage non structuré). Les équations sont intégrées numériquement sur ce maillage, de façon à calculer une valeur de chaque variable (vitesse, température, turbulence, concentration) en chaque sommet ou centre demaille.

Des techniques numériques souvent très élaborées permettent d'aboutir à la solution recherchée par des processus itératifs. Cette description très succincte de la démarche permet d'entrevoir des caractéristiques principales de ces modèles. La précision de la solution recherchée est très dépendante de la qualité du maillage choisi dans le domaine de calcul. En effet il est évident que plus le nombre de mailles est important, plus la solution approchée sera satisfaisante. En contrepartie, l'augmentation du nombre de points de calcul a un coût informatique non négligeable, que ce soit en temps de calcul ou en place mémoire. La solution réside dans le choix d'une stratégie judicieuse de maillage, avec une grille raffinée dans les zones où les phénomènes physiques sont déterminants (prés du sol, à proximité d'obstacle) et des mailles de taille plus importante dans les zones moins problématiques. Le processus itératif de résolution des équations induit également un coût en temps de calcul plus ou moins élevé afin de converger vers une solution satisfaisante. Le pas de temps utilisé est déterminé en fonction de conditions de stabilité issues de l'analyse numérique des équations. Un ajustement correct des paramètres numériques est indispensable pour utiliser convenablement ces méthodes, d'où la nécessité de disposer d'une expérience certaine en la matière. L'approche CFD offre une bonne alternative pour l'étude de l'écoulement dans les rues canyons par rapport aux expériences menées sur site ou en soufflerie qui sont souvent coûteuses et insuffisantes. L'avantage principal de l'approche CFD est sa capacité à reproduire d'une façon qualitative les caractéristiques de l'écoulement et la dispersion des polluants dans une rue canyons dans n'importe quelle configuration. De

nombreux modèles CFD (deux ou trois dimensions) utilisant les équations RANS couplés à des modèles de turbulence ont été appliquées à l'issue d'étudier la structure de l'écoulement et la dispersion des polluants dans les rues canyons et simuler les expériences menées en soufflerie ou utilisés dans des études comparatives.

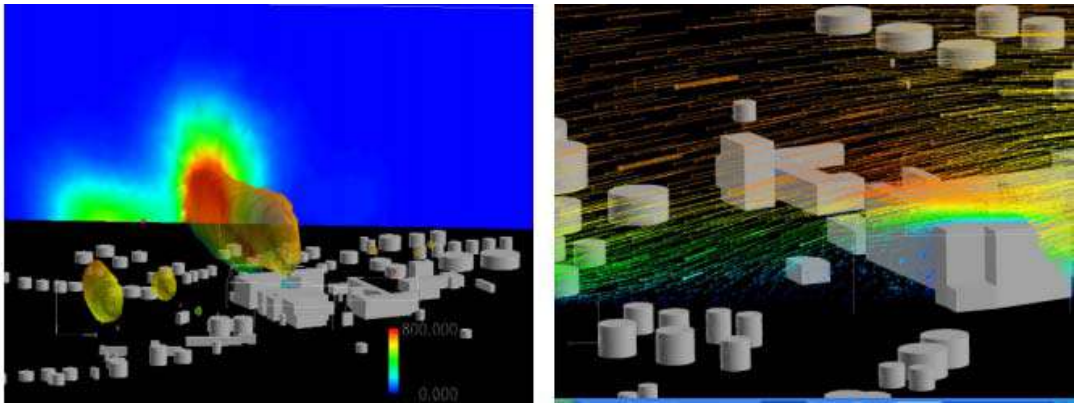


Figure (III.3) : Exemple de modélisation par modèle CFD

III.3. Les outils de modélisation de la turbulence :

Dans l'écoulement turbulent, des tourbillons instables apparaissent à toutes les échelles et interagissent entre eux. Pour pouvoir simuler un tel comportement, il existe 3 méthodes différentes :

III.3.1. La Simulation Numérique Directe (DNS) :

La simulation numérique directe (DNS) est une méthode de simulation servant à la mécanique des fluides numérique qui consiste à résoudre les équations de Navier-Stokes dans leur forme la plus générale, elle permet une approche de la turbulence où toutes les structures tourbillonnaires potentiellement présentes, sont explicitement calculées, elle est en revanche la plus proche d'une résolution exacte et consiste à utiliser un maillage plus fin que le plus petit tourbillon attendu, pour cela cette méthode est extrêmement coûteuse en ressources et en temps, et donc rarement utilisée dans un contexte industriel et plutôt réservée à la recherche et aux études fondamentales sur les mécanismes de la turbulence [96].

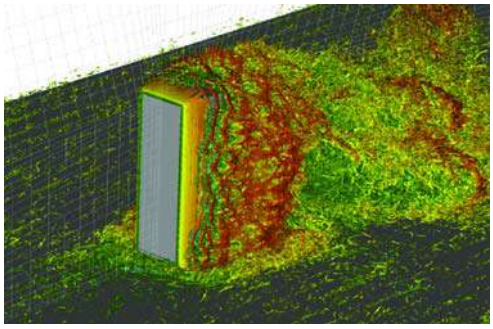


Figure (III.4) : Modélisation effectuée par Simulation Numérique Directe (DNS)

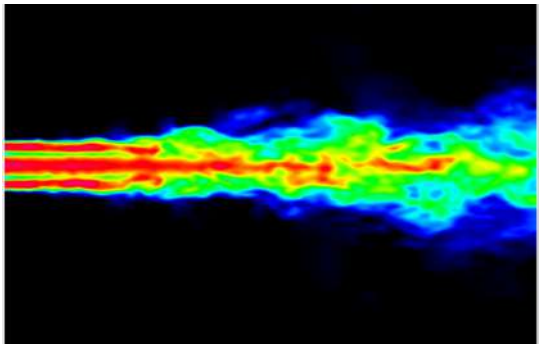
III.3.2 La Simulation des Grandes Echelles (Large Eddy Simulation ou LES) :

Le principe de la simulation des grandes échelles est de calculer par **résolution numérique directe** les structures turbulentes de grande taille et de modélisercelles de petite taille. En effet,les grandes tourbillons sont très différents selon les géométries, leurs structures varient fortementselon l'écoulement considéré, par contre les petits tourbillons ont un caractère beaucoupplus universel.La résolution spatiale du maillage constitue un filtre qui permet de ne modéliser que les tourbillons dont le diamètre est supérieur à la taille de la maille. La contribution des petites structures non résolues est prise en compte par un modèle de sous-maille[97]. Ces modèles ont été initialement développés pour l'étude de la turbulence atmosphérique [98,99], mais ils restent cependant encore difficiles à appliquer à des configurations réelles complexes et leur utilisation nécessite des temps de calculs encore trop importants pour des applications pratiques, les avantages de cette méthodesont les suivant :

• réduction de la puissance de calcul requise pour la simulation numérique direct,

• l'utilisation des modèles de fermeture donnent de bon résultat,

• utilisation d'écoulement plus complexe.



Figure(III.5) : Modélisation effectuée par la Simulation des Grandes Echelles(LES)

III.3.3 La modélisation statistique des équations de Navier-Stokes (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations ou équations RANS) :

Cette approche de modélisation de la turbulence est grandement utilisée pour simuler des écoulements turbulents dans des configurations complexes (notamment dans le contexte industriel) appelée aussi approche statistique de Reynolds. Elle repose sur la décomposition des variables en une valeur moyenne et une valeur fluctuante. Si cette opération de moyenne est appliquée aux équations du mouvement d'un fluide on obtient les équations de Navier-Stokes moyennées caractéristiques de l'approche RANS.

Cette méthode largement utilisée dans la modélisation des écoulements et la dispersion atmosphérique a été appliquée dans notre présent travail car elle présente l'avantage d'un bon compromis entre fiabilité et moyens de calcul à l'opposé des deux autres méthodes encore plus coûteuses. Pour modéliser les coefficients de diffusion turbulente, des modèles de fermetures sont appliqués : modèle de Prandtl, 1925 ; le modèle de Luis, 1979 etle modèle le plus répandu k-ε[86]qui a été détaillé dans le chapitre précédent.

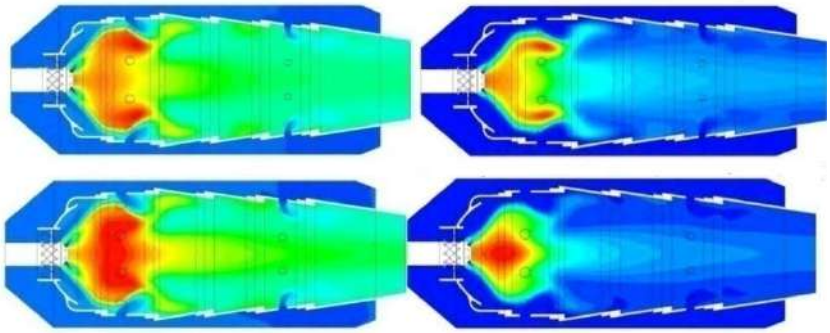


Figure (III.6) : Modélisation effectuée par la Simulation RANS

III.4 Choix de méthode numérique :

La Méthode des Volumes Finis (MVF) [100,101,102], La Méthode des Différences finies Finis (MDF) [103,104], La Méthode des Eléments Finis (MEF) [105,106]et les Méthodes Spectrales (MS)[107] sont les principaux outils numériques qui sont utilisés pour résoudre les équations de Navier-stokes en mécanique des fluides présentées dans le chapitre II. Voici donc une brève démonstration de ces différentes approches et choix de méthode convenable adaptée à notre cas d'étude.

III.4.1 la méthode des différences finies :

La méthode des différences finies est une technique courante de recherche de solutions approchées d'équations aux dérivées partielles qui consiste à résoudre un système de relations (schéma numérique) liant les valeurs des fonctions inconnues en certains points suffisamment proches les uns des autres.

Cette méthode apparaît comme étant la plus simple à mettre en œuvre car elle procède en deux étapes : d'une part la discrétisation par différences finies des opérateurs de dérivation/différentiation, d'autre part la convergence du schéma numérique ainsi obtenu lorsque la distance entre les points diminue, son inconvénient majeur c'est qu'elle est limitée à des géométries non complexes.

III.4.2 la méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles. Celles-ci peuvent par exemple représenter analytiquement le comportement dynamique de certains systèmes physiques (mécaniques, thermodynamiques, acoustiques, etc.).

Concrètement, cela permet par exemple de calculer numériquement le comportement d'objets même très complexes, à condition qu'ils soient continus et décrits par une équation aux dérivées partielles linéaire : mouvement d'une corde secouée par l'un de ses bouts, comportement d'un fluide arrivant à grande vitesse sur un obstacle, déformation d'une structure métallique, etc. en revanche elle a des inconvénients comme la complexité de mise en œuvre et un grand cout en temps de calcul et mémoire.

III.4.3 laméthode des volumesfinis :

La méthode de discrétisation utilisée dans le cadre de notreétude est celle des volumes finis (MVF) principalement appliquée dans la simulation des écoulements de fluide et la modélisation de la dispersion atmosphérique qui a l'avantage d'être facilement utilisable avec des maillages non structurés car, en matière de discrétisation des lois de conservation, sa formulation ne tient aucun compte de la complexité du maillage et aussi son faible coût en temps et en espace et ces performances de calcul et d'optimisation de résultat , cette méthode est donc intégrée dans beaucoup de logiciels CFD commerciaux ou Open-Source, comme Fluent[108],CFX[109], OpenFoam [110]..Etc.

Dans cette approche le domaine de calcul est divisé en une série de sous domaines appelés volumes de contrôle. Ces volumes de contrôle enveloppent tout le domaine de calcul sans chevauchement, de telle façon que la somme de leurs volumes soit égale exactement au volume du domaine de calcul. Un point est positionné aucentredechaquevolumeetestappelécentreduvolumedecontrôle,ilseranoté*P,*figure (III.7). Les nœuds des volumes voisins seront notés suivant leurs positions *N, S, W, E, T* et *B* (se rapportant aux directions *North, South, West, East*, *Top* et *Bottom* respectivement).

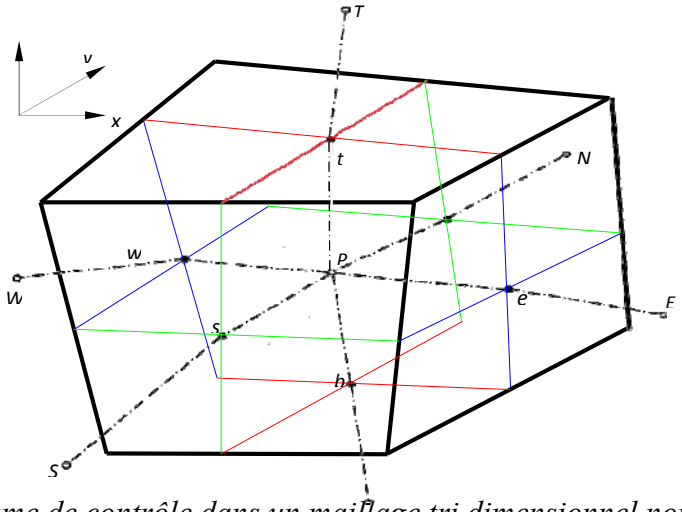


Figure (III.7) Volume de contrôle dans un maillage tri dimensionnel non orthogonal

Dans la méthode des volumes finis les lois de conservation (de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie) sont exprimées localement sous une forme intégrale qui repose sur le théorème de la divergence de Gauss (appelé aussi le théorème de la divergence ou théorème d'Ostrogradski), et qui permet de transformer une intégrale de volume en une intégrale de surface. Pour une variable φ on a :

$$\iiint_{\Omega} div\, \emptyset dV = \iint_{\partial\Omega} \emptyset_s dS \qquad \text{(III.1)}$$

III.4.3.1 les équations conservatrices :

Rappelons que la formulation mathématique des lois de conservation régissant les phénomènes physiques comme les écoulements des fluides ou les transferts de chaleur, est généralement écrite sous forme d'équations aux dérivées partielles du typeconservatif ;

$$\frac{\partial \rho \emptyset}{dt} = \nabla.(\rho u \emptyset) - \nabla.(\Gamma_{\emptyset} \nabla_{\emptyset}) = S_{\emptyset} \qquad \text{(III.2)}$$

Chacune de ces équations met en jeu une quantité physique et des variables associées.

L'équation aux dérivées partielles traduit un équilibre dans lequel plusieurs phénomènes interviennent. Nousdistinguons :

$\frac{\partial \rho \emptyset}{dt}$, le terme transitoire ou instationnaire ;

$\nabla.(\rho u \emptyset)$, le terme convectif ;

$-\nabla.(\Gamma_{\emptyset} \nabla_{\emptyset})$, le terme diffusif ;

$S_{\emptyset}$, le terme source.

Le problème différentiel ainsi posé est par nature continu. L'expression de la solution à partir d'une formule analytique est en général impossible à mettre en évidence. Il est alors nécessaire de passer par une approximation du problème, c'est-à-dire de le remplacer par plusieurs problèmes discrets représentant localement le problème continu de façon approchée. Cette procédure, appelée discrétisation ou approximation, permet notamment une résolution numérique discrète des équationscontinues. Le problème ainsi posé revient à trouver les solutions de *n* équations sur des éléments Ω_n du domaine. La solution générale $\emptyset$sur le domaine est liée à la résolution des $\emptyset_n$locaux. La résolution des équations de continuité, de Navier-Stokes et de l'énergie est faite au moyen de la méthode de conservation de volumes finis.

III.4.3.2 Principegénéral :

Considérons le domaine Ω qui forme le domaine de calcul, de sorte qu'il soit continu, et qui est composé des volumes élémentaires notés Ω_i de telle sorte que :

$$\Omega = \sum_{i=1}^{n} \Omega_i$$

La méthode consiste alors à intégrer l'équation de conservation, écrite sous sa forme conservative, sur chaque volume Ω_i:

$$\int_{\Omega_i} \left(\frac{\partial \rho \emptyset}{dt} + \nabla.(\rho u \emptyset) \right) dV = \int_{\Omega_i} (\nabla.(\Gamma_{\emptyset} \nabla_{\emptyset}) + S_{\emptyset})\, dV \qquad \text{(III.3)}$$

Dans le cadre des maillages cartésiens 2D, les volumes de contrôle Ω_i sont représentes par la figure (III.8). La méthode des volumes finis est équivalente a un bilan de flux sur le volume de contrôle Ω_i. On assure alors la conservation sur chaque volume élémentaire et donc sur le domaine tout entier.

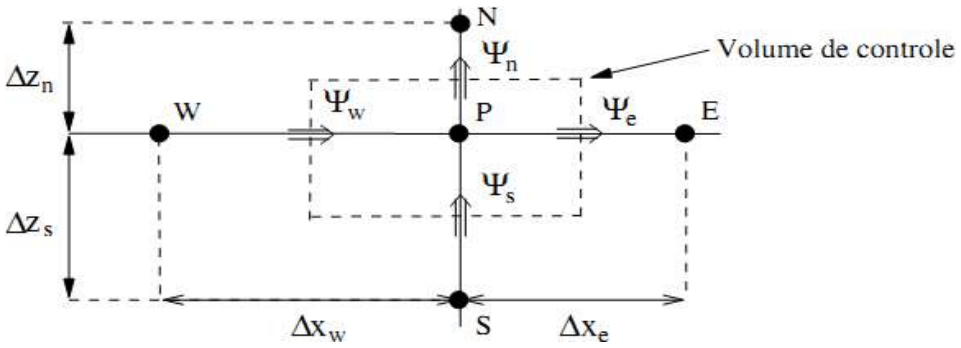


Figure (III.8) : Volume de contrôle 2D

III.4.3.3 Discrétisation des termes diffusifs etconvectif :

La discrétisation de l'équation de conservation exprimée de façon intégrée sur chaque volume de contrôle nécessite d'expliciter chaque terme d'intégration. On note $\mathbf{f^c}$ le flux convectif $\rho u\emptyset$et $\mathbf{f^d}$ le flux diffusif ($\Gamma\emptyset\nabla\emptyset$).

Le théorème de la divergence exprimé en (III.1) permet d'écrire :

$$\int_{\Omega_i}\left(\nabla.\mathrm{f}(\emptyset)\right)dv_i = \int_{\Gamma_i}(\mathrm{f}(\emptyset).\mathrm{n})ds = \Psi_e + \Psi_w + \Psi_s + \Psi_n \qquad \text{(III.4)}$$

Avec $f(\emptyset) = f^c$ ou $f(\emptyset) = f^d$.

Ou **n** est la normale sortante a l'interface du volume de contrôle.

La discrétisation spatiale nécessite de connaitre les flux f(ϕ) c'est-à-dire les valeurs de ϕ ou de son gradient sur chaque face du volume de contrôle. Chaque type de flux est approximé par un schéma basé sur une méthode de différences finis pour les flux différentiels, ou sur des interpolations polynomiales d'ordre 1 et 2 pour les flux scalaires. Pour illustrer les schémas de discrétisation, nous prenons l'exemple du maillage 1D de la figure (III.9).

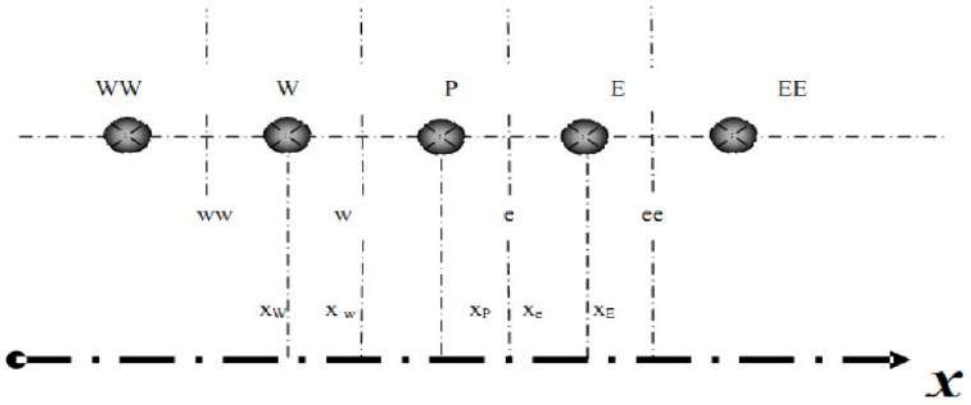


Figure (III.9) :Maillage 1D

III.4.3.4 schémas numériques :

- **Schéma centré :**

Dans le cas d'un flux scalaire, la variable ϕ_e à l'interface du volume de contrôle est évaluée linéairement par moyenne pondérée d'ordre 2 entre les nœuds amont etaval:

$$\emptyset_e = \alpha\emptyset_E + (1-\alpha)\emptyset_p \quad \text{(III.5)}$$

Avecαcoefficient d'interpolation linéaire :

$$\alpha = \frac{x_e - x_p}{\emptyset_E - \emptyset_P} \quad \text{(III.6)}$$

Si on applique la méthode des différences finies avec un schéma d'ordre 2 à l'évaluation du gradient deϕon obtient alors :

$$\frac{\partial\emptyset}{\partial x}_E \Big| = \frac{\emptyset_E - \emptyset_P}{x_e - x_p} \quad \text{(III.7)}$$

La discrétisation des gradients dans le code de calcul est toujours du type schéma centré.

- **Schéma upwind ou simple amont :**

Dans le cas d'un flux scalaire, la valeur de ϕ_e est remplacée par celle en amont de l'interface et dépend donc du sens de l'écoulement :

$$\begin{cases} \emptyset_e = & \emptyset_p \text{si} \mathbf{u}.\mathbf{n} > 0 \\ & \emptyset_E \text{si} \mathbf{u}.\mathbf{n} < 0 \end{cases} \quad \text{(III.8)}$$

- **Schéma hybride**

Son comportement est déterminé par l'intensité du nombre de Peclet. Celui-ci exprime le rapport entre les forces convectives et les forces diffusives :

$$P_E = \frac{F}{D} = \frac{\rho u \Delta x}{\Gamma_\emptyset} \quad \text{(III.9)}$$

Dans le cas où $P_E \leq 2$, le schéma centré est utilisé; Si $P_E > 2$, le schéma simple-amont estutilisé.

- **le schéma Quick**

La variable $\emptyset_e$est évaluée par une interpolation quadratique basée sur deux nœuds en amont (F et FF) et un nœud en aval (B) de l'interface :

$$\emptyset_e = \emptyset_F + \alpha_1(\emptyset_{FF} - \emptyset_F) + \alpha_2(\emptyset_F - \emptyset_B) \quad \text{(III.10)}$$

Les coefficients d'interpolation α_1 et α_2 dépendent du sens de ***u.n*** et sont donnés par :

$$\alpha_1 = \frac{(x_e - x_F)(x_e - x_{FF})}{(x_B - x_F)(x_B - x_{FF})}$$

$$\alpha_2 = \frac{(x_e - x_F)(x_B - x_e)}{(x_F - x_{FF})(x_B - x_{FF})} \quad \text{(III.11)}$$

Dans le cas où **u.n**> 0, on a :

$$\emptyset_E = \emptyset_P + \frac{(x_e - x_P)(x_e - x_E)}{(x_W - x_P)(x_W - x_E)}(\emptyset_W - \emptyset_P) + \frac{(x_e - x_P)(x_B - x_e)}{(x_P - x_E)(x_W - x_E)}(\emptyset_P - \emptyset_E) \quad \text{(III.12)}$$

III.4.3.5Discrétisation des autrestermes :

- **le terme source :**

Dans la plus part des temps, le terme source est assimilé à une valeur moyennée sur le volume de contrôle :

$$\int_{\Omega_p}(S_\emptyset)dv = S_{\emptyset p}\,\Delta x\Delta y\Delta z \quad \text{(III.13)}$$

- **Le termeinstationnaire :**

Pour l'intégration de ce terme particulier, on considère uniquement la variation en temps, en assimilant la variable ∅ à sa valeur au centre du volume de contrôle :

$$\int_{\Omega_p}\left(\frac{\partial\rho\emptyset}{\partial t}\right)dv = \Delta x\Delta y\Delta z\,\frac{\partial\rho_P}{\partial t} \quad \text{(III.14)}$$

L'équation de conservation une fois discrétisée implicitement en temps, est de la forme :

$$a_p^{n+1}\emptyset_p^{n+1} = a_W^{n+1}\emptyset_W^{n+1} + a_E^{n+1}\emptyset_E^{n+1} + a_S^{n+1}\emptyset_S^{n+1} + a_N^{n+1}\emptyset_N^{n+1} + a_B^{n+1}\emptyset_B^{n+1} + a_F^{n+1}\emptyset_F^{n+1} + a_P^{n+1}\emptyset_P^{n+1} + b \quad \text{(III.15)}$$

Les coefficients dépendent fortement des schémas utilisés pour la discrétisation des différents termes de l'équation de conservation. Le choix des schémas est un paramètre important: le schéma centré peut être instable, le schéma upwind diffuse et le schéma quick est oscillant. Quel que soit le schéma, l'erreur d'approximation sur la valeur de ∅ diminue avec l'augmentation du nombre denœuds.

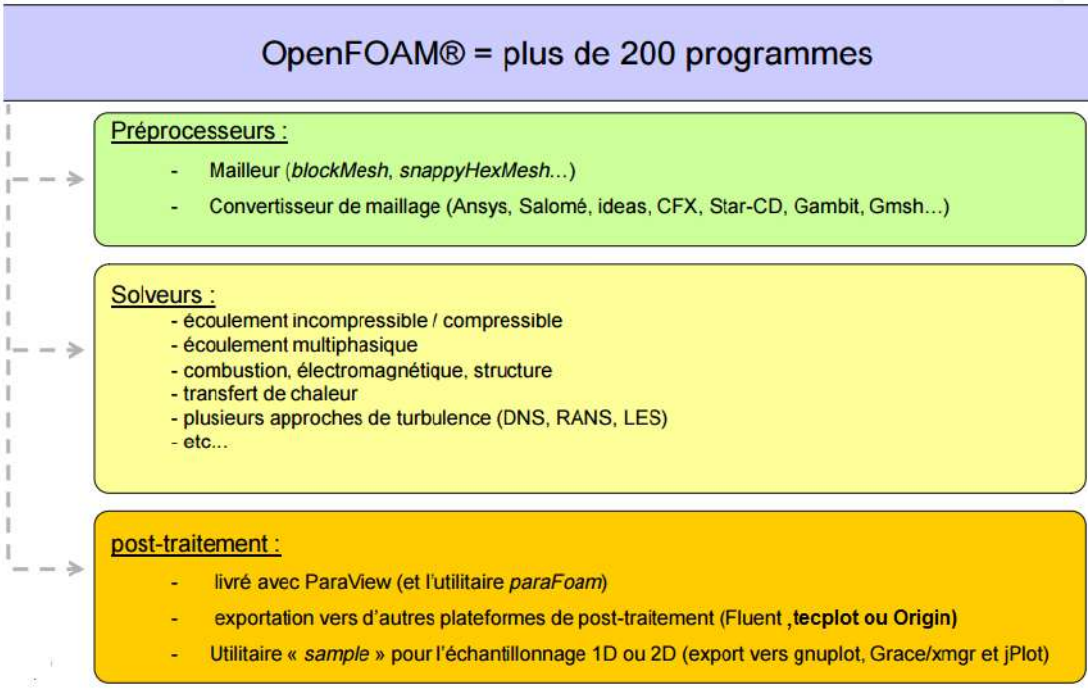
III.5 Simulation et code de calcul :

III.5.1 Présentation d'**OpenFOAM**:

OpenFOAM (**OpenF**ield **O**peration And Manipulation) [110] est un outil **open source**orienté **CFD**intéressant à plusieurs égards : fonctionne sous le système d'exploitation **Linux** il est constitué d'une suite de librairies écrite en langage C++ rapide à mettre en place, large et évolutive, qui ne peut que s'étoffer et se perfectionner au cours du temps à l'aide de la communauté d'utilisateurs et de programmeurs indépendants qui entourent ce projet ; c'est également un outil inédit qui permet, en plus de la CFD, de faire de véritables maillages comme d'importer des maillages faits avec d'autres logiciels. Quand au post-traitement des résultats de calcul d'OpenFOAM, il peut se faire sans conversion avec le logiciel Paraview qui est déjà standard dans le monde de la CFD.

Cependant, son apparente complexité peut rebuter certains utilisateurs à se tourner vers lui. En effet, ne disposant pas d'interface graphique mais fonctionnant avec un système de fichiers, il nécessite un véritable savoir-faire et une véritable motivation de la part des utilisateurs pour être utilisé sans problèmes.

Grâce à la puissance des langages de haut niveau, l'utilisateur peut donc tester différentes discrétisations sans passer des heures à les programmer. S'il désire une discrétisation qui n'est pas pris en compte dans le code, rien ne l'empêche de l'ajouter à la classe de l'opérateur correspondant, elle sera alors valable pour l'ensemble de ses codes OpenFOAM.



Figure(III.10) : La boite à outil d'OpenFoam

La structure du logiciel est illustrée dans la figure (III.11), le code est séparé en trois parties distinctes ; l'étape du pré-processing, processing et l'étape du post-processing consiste, entre outre, à définir la géométrie du problème, le maillage ainsi que les conditions aux frontières sur le domaine. La partie processing (solving) est la partie de la résolution du problème par le solveur défini et les résultats sont obtenus par l'étape d'analyse et visualisation des résultats (post-precessing).

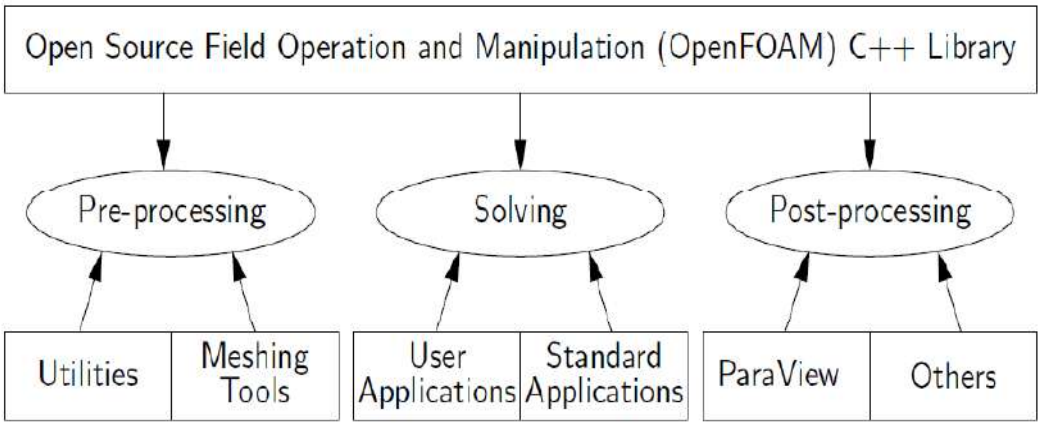


Figure (III.11) : Structure du code de calcul OpenFOAM

- **Historique de logiciel :**
  - 1989 : Début du développement à l'Imperial College London
  - 1996 : Première version de FOAM
  - 2004 : OpenFOAM distribué sous licence GPL par OpenCFD Ltd.
  - 2013 : version 2.2.0 ; rachat de OpenCFD par ESI Group

III.5.2 Avantages et limitesd'OpenFOAM :

Les principaux intérêts d'OpenFOAM sont comme suit :

- **La gratuité**, ce qui n'est pas négligeable devant le coût exorbitant des licences de logiciels de CFD comme Ansys, Fluent ou Star-CCM+,
- **La puissance**,c'est un outil puissant qui contient des algorithmes intelligents permettant de réduire les temps de calcul en fonctionnant sous forme de pas de temps dans lequel chaque grandeur a un nombre propre d'itérations. Ainsi, dans un même pas de temps, l'équation de continuité selon x peut être itérée 2 fois et celle selon y 10 fois.De plus, les outils de maillages comme snappyHexMesh sont inédits et rendent possible des expériences inaccessibles jusque là (mailleur et solveur à la fois),
- **Le supporttechnique**, vu que ce code est Open-source, OpenFOAM est entouré par une communauté d'utilisateurs qui peut donner gratuitement des cours et des précieux conseils d'utilisation de ce produit, notamment sur le forum du site CFDOnline [111].
- **Rapide** comparant à d'autres logiciels commerciaux pour une géométrie et maillage identique.
- **Modulable, pertinent.**

Pour les limites du code on peut citer les suivantes :

- **La complexité,** Par contre, le principal défaut d'OpenFOAM est sans aucun doute sa grande complexité qui peut repousser aux premiers abords les personnes inexpérimentées. Contrairement aux autres logiciels de CFD payants, OpenFOAM ne bénéficie pas d'une interface graphique intuitive, mais fonctionne avec un système de fichierdifficile à prendre en main et recelant de nombreuses subtilités qui ne peuvent être appréhendées que par le biais de l'expérience.

- **Le système d'exploitation**, Aussi, OpenFOAM étant sous Linux, il peut être long, pour un néophyte, de prendre en main ce système d'exploitation. En effet, bien qu'il existe une émulation d'OpenFOAM sous Windows mais l'utilisation sous Linux est, sur le long terme, bien plus simple et permet surtout de ne pas dépendre d'une compagnie privée pour avoir la dernière version du logiciel, il peut être aussi contraignant de jongler entre le système d'exploitation Linux et Windows dans le cas où l'utilisateur voudrait utiliser sur le même poste.

- **Le manque de documentation.**

III.5.3 Système des fichiers d'OpenFOAM :

Pour résoudre un système d'équations aux dérivées partielles sur OpenFOAM on a besoin d'un maillage, de conditions initiales, de conditions aux limites et de solveurs spécifique liés à la physique de ce que nous étudions.

Un cas typique d'utilisation d'OpenFOAM exige d'avoir 3 répertoires dont le fichier utilisé par OpenFOAM pour lire les conditions initiales, aux limites et les données pour la construction du maillage, voir figure (III.12) :

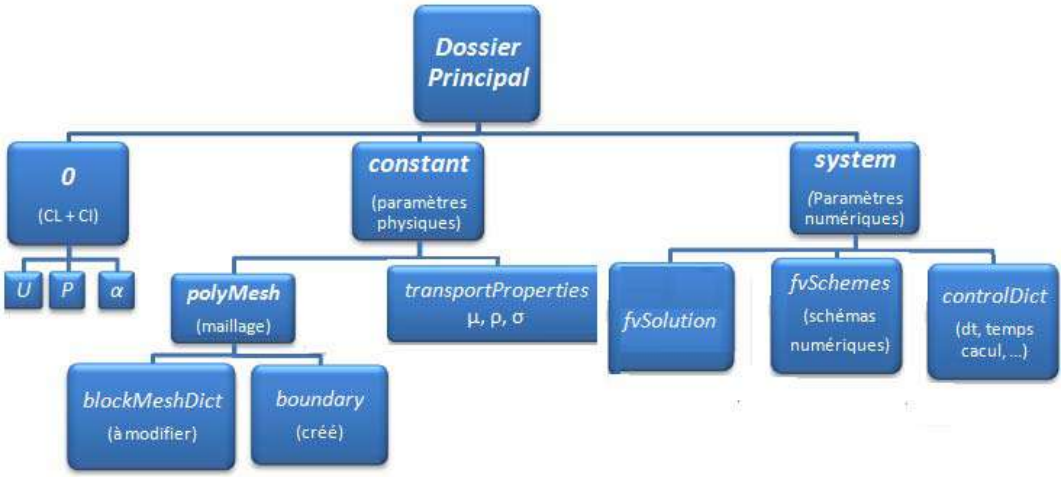


Figure (III.12) : Structure d'un répertoire de calcul pour un cas d'OpenFOAM

- ***0 :*** le répertoire qui comporteles conditions initiales et les conditions aux limites du cas d'étude (Annexe III.1), il est possible de changer le nom du répertoire.

- ***Constant :*** *transportProperties* (Annexe III.2) décrit les propriétés du fluide (Ex : Newtonien ou non-Newtonien) et *polyMesh* stocke les informations aux points du maillage (fichier *points, faces, boundary*etc) et *RASProperties*

(Annexe III.3) défini le modèle de turbulence choisi et permit de modifier les coefficients du modèle adapté.

- ***System :*** les fichiers de configurations pour l'utilisation d'un solveur sont dans *system* où il ya*controlDict* (Annexe III.4) (temps initial qui pointe vers le répertoire *0*, temps final, pas de temps *deltaT* etc…), *fvSchemes* (Annexe III.5) (le choix de schémas numérique en temps et en espace pour les différents termes de diffusion, de gradient etc…) et *fvsolution* (Annexe III.6) qui défini le solveur choisi pour le calcul numérique.

Une fois que nous avons préparé ce fichier texte et que nous lançons le solveur, le code va vérifier si ces configurations sont complètes pour lancer la simulation et il va également vérifier si les bibliothèques de liens dynamiques trouvés dans la librairie d'OpenFOAM correspondent aux configurations des conditions aux limites et des schémas numériques. Si tout est préparé correctement, le solveur lance le calcul de sort les informations relatives à l'état des premiers pas de temps et des pas de temps qui suivent, le code sort des informations d'erreurs.

III.5.4 Préparation des données (Pré-processing) :

III.5.4.1 Génération du maillage :

OpenFOAM fonctionne toujours dans un système de coordonnées cartésien tridimensionnel, donc toutes les géométries doivent être produites en trois dimensions. Si la résolution des cas en 3D est par défaut il peut en revanche être chargé de résoudre des cas bidimensionnels en spécifiant une condition aux limites vide dans la 3ème dimension dont laquelle aucune solution n'est exigée.

La production du maillage est assurée par le générateur de maillage *BlockMesh* à l'aide d'une description spécifique dans un dictionnaire d'entrée *BlockMeshDict* situé dans le répertoire constant/polyMesh pour le cas donné. Le fichier contient d'abord des informations d'en-tête, puis on trouve des informations du contenue du fichier dans le sous-dictionnaire *FoamFile.*

Le fichier spécifie d'abord des coordonnées des sommets des blocs ; il définit les blocs par des étiquettes des sommets, puis le nombre de mailles dans chaque direction axiale ; et à la fin, il définit les patches de frontière. Le maillage s'est produit en exécutant la commande *BlocMesh*dans la ligne de commande du terminal fig III.13:

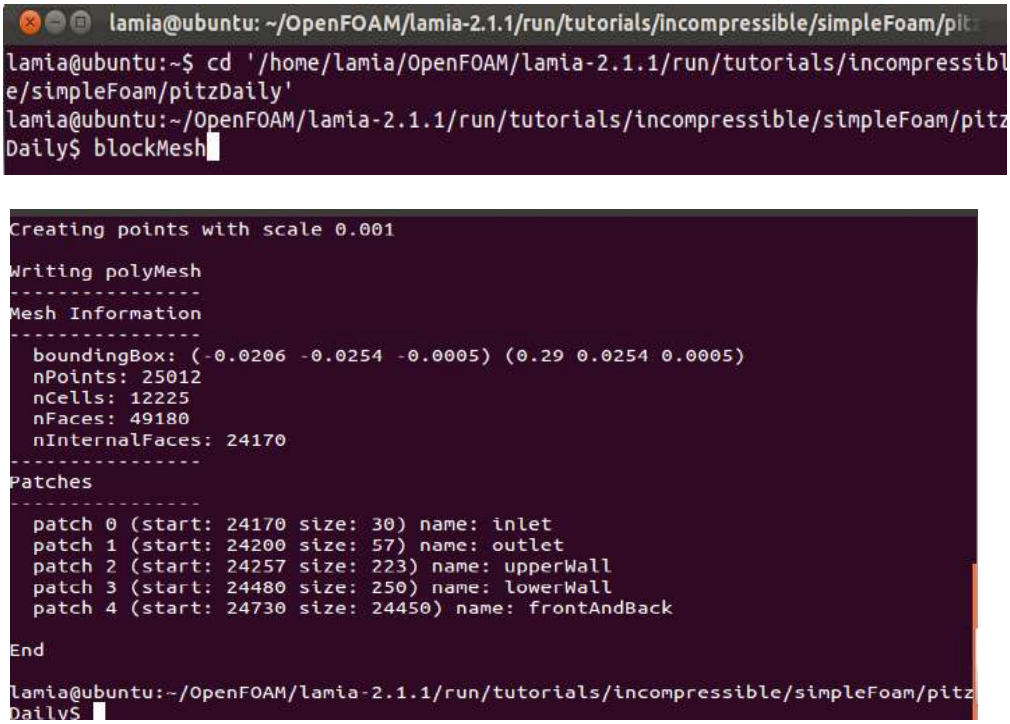


Figure (III.13) : Exemple d'un terminal pour l'exécution d'un maillage via la commande blockMesh

III.5.4.1.1 maillage 2D :

- **MailleurPointwise :**

Vu la complexité de générer un maillage point par point sur le générateur *blockMesh d'OpenFOAM*et le temps très important qu'il faut prendre pour maitriser la tâche ainsi que la difficulté de détecter les erreurs de programmation qui empêche la création du maillage désiré, on a préféré donc de créer notre géométrie à l'aide de l'outil CFD *Pointwise* [112] pour une génération de mailles flexible, fiable et de très haute qualité qui conduit à des solutions plus précises et à une convergence plus rapide. Ce générateur de maillage est le meilleur des outils pour tout type de maillage, grilles structurées ou maillages hybrides, et son point fort est sa compatibilité avec *OpenFOAM* Cela garantit une performance optimale de simulation car il suit exactement la même procédure décrite sur la structure *d'OpenFOAM* mais avec un vocabulaire différent, voici les étapes à suivre pour la configuration de notre maillage :

- **Database** : Pointwise peut importer une CAO comme database avec lesquelles les points de contrôles sont imposés ou créer point par point la géométrie illustrée dans la figure (III.14)comme dans notre cas.

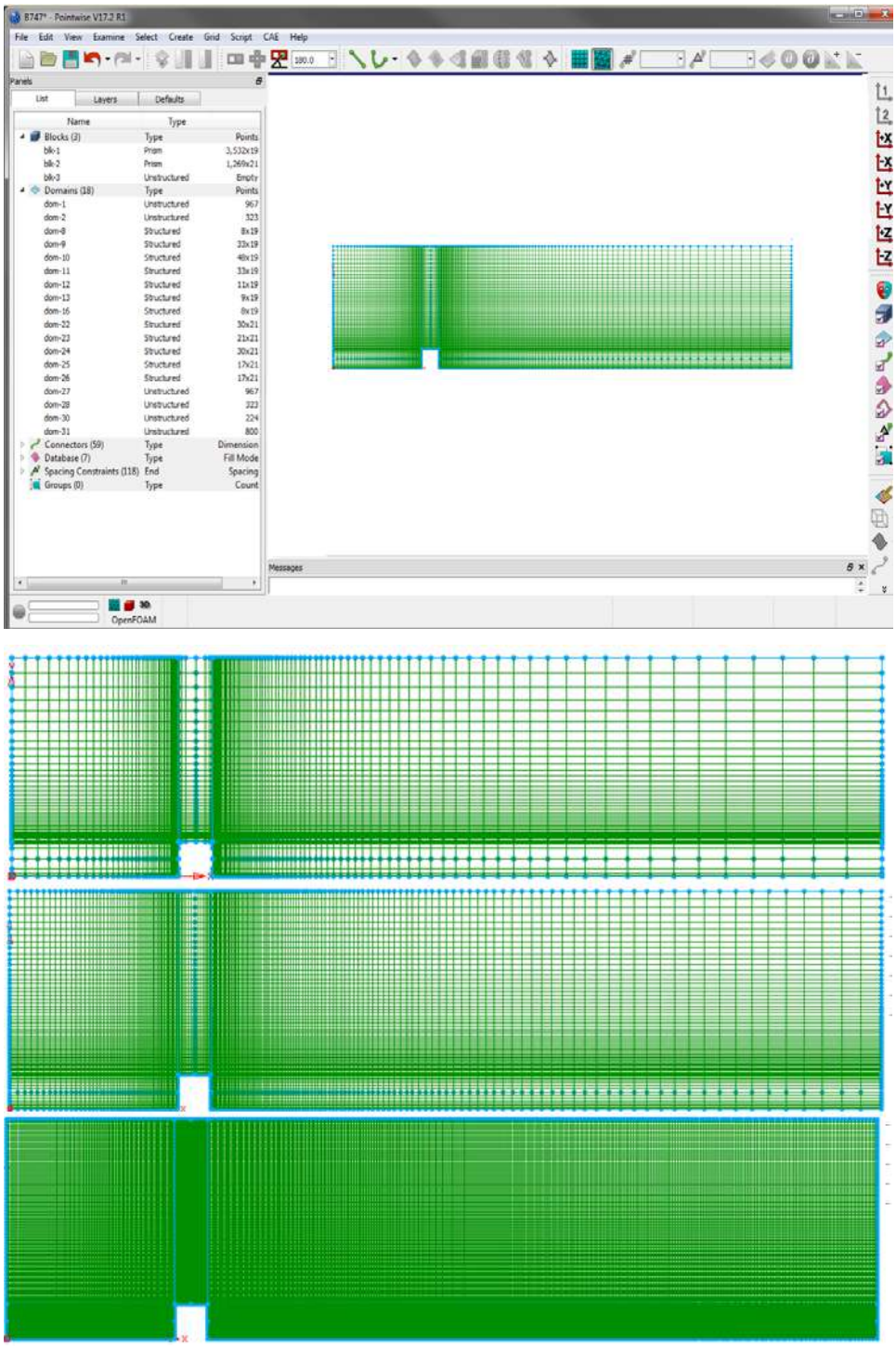


Figure (III.14) : Géométrie et maillage du modèle physique réalisé par Pointwise

- **Connectors** : les points de contrôle créés suivant les coordonnées x,y,z connectés forment la structure désiré,
- **Domains** : les *connectors* sur la même surface du domaine forment les maillages surfaciques.
- **Blocks** : les domaines surfaciques créés appelés *domains* forment un block ou plusieurs de maillage volumique.

- **Spacing constraint** :

Pour respecter la loi de la paroi l'espacement au sein du maillage est effectué à l'aide de cette commande qui contrôle la distribution des mailles de la grille dans desrégions précises comme le montre la figure (III.15) où la flèche noire montre la direction de la distribution, ce qui garantie un maillage très raffiné auprès de la paroi et qui s'élargie en éloignant vers les extrémités du domaine ce qui permet de réduire la taille du fichier pour gagner de l'espace et le temps de calcul en conservant la qualité de maillage. On calcul donc la taille de la 1^{ere} maille à l'aide d'un outil d'estimation d'y+ valable sur *Pointwis e*où $y^{+}\geq 30$, la vérification et la présentation du graphe est faite par taper sur *OpenFoam* la commande ***yPlusRAS*** présentéé dans le chapitre suivant (figure IV.5).

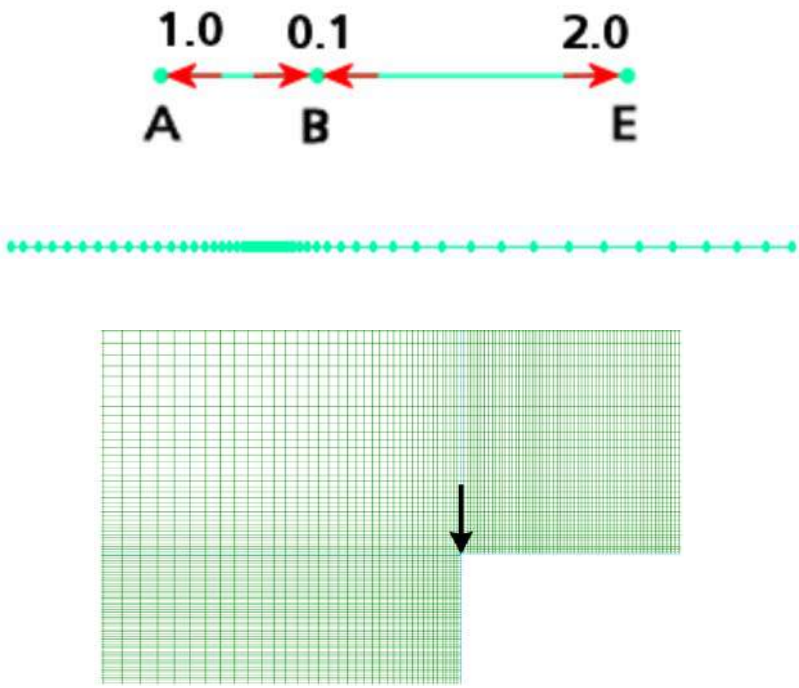


Figure (III.15) : Direction et distribution du maillage par l'outil spacing constraint sur *Pointwise*

- **CAE (Set Boundary Conditions)** : Après avoir assemblé tous les blocks, on spécifie les conditions aux limites sur toutes les surfaces du domaine, figure (III.16).
- **Select Solver *: Format d'OpenFOAM*** : Exportant et sauvegardant le maillage sous *OpenFOAM* (Annexe III.8) qui est fournit parmi une très large liste de logiciels CFD ou code de calcul Open Source compatible avec *Pointwise,* mais il est toujours préférable de sélectionner d'abord le solveur avant de démarrer un projet de maillage, cela permet d'éviter toute situation dans laquelle créer un type de maillage non pris en charge par le solveur désiré.

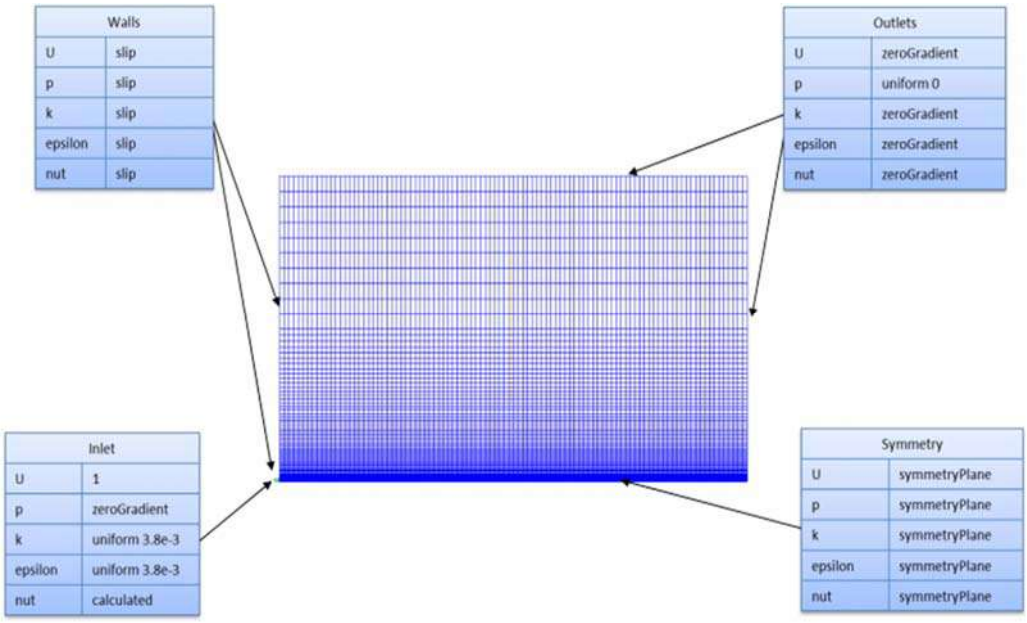


Figure (III.16) : Conditions aux limites par Pointwise

III.5.4.1.2 maillage 3D :

- **Mailleur Gambit :**

Pour réaliser la géométrie et le maillage tridimensionnel on a choisi **Gambit**[113]car ce mailleur permet à l'utilisateur de construire la géométrie du domaine de calcul et de subdiviser ce dernier en petits volumes de contrôle ou cellules de calcul. L'ensemble de ces volumes élémentaires constitue le maillage. La définition des conditions aux limites appropriées aux frontières du domaine de calcul, se fait également à ce niveau. Les étapes principales de la procédure sont :

- **Construction de la géométrie :**Gambit possède une interface facile à manipuler et qui est constituée de plusieurs fenêtres d'outils d'opération destinées à construire le modèle, générer le maillage et incorporer les conditions aux limites.

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

- Création des points
- Création des faces
- Création des volumes
- Maillage : le menu de Gambit permet de mailler en particulier une ligne de la géométrie, à savoir disposer les nœuds avec des conditions particulières (utilisation d'un ratio pour modifier la pondération du maillage, application de formes différentes de maillage).

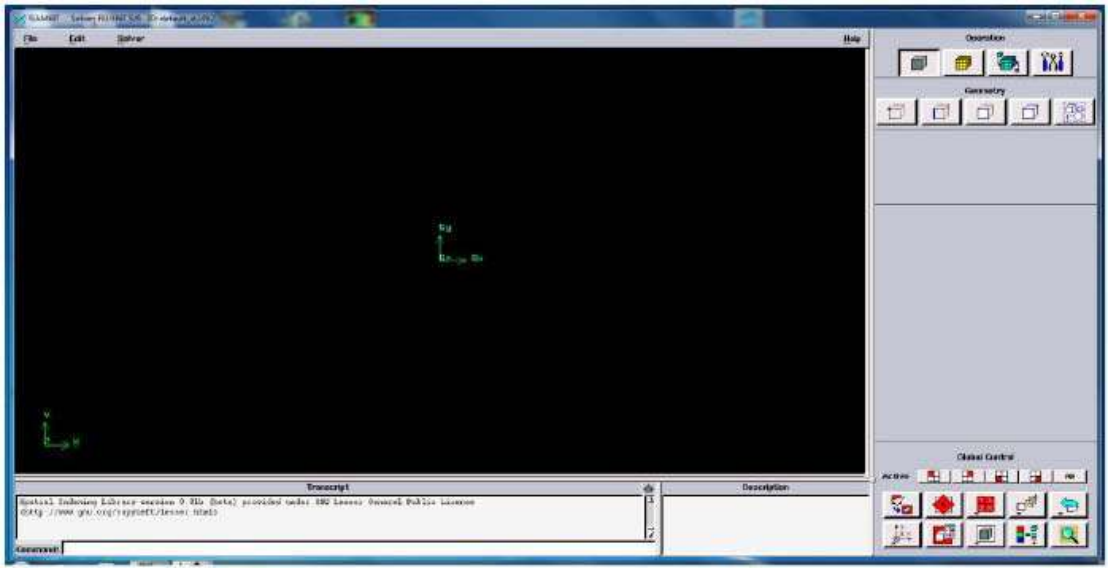


Figure (III.17) : Lancement du Gambit

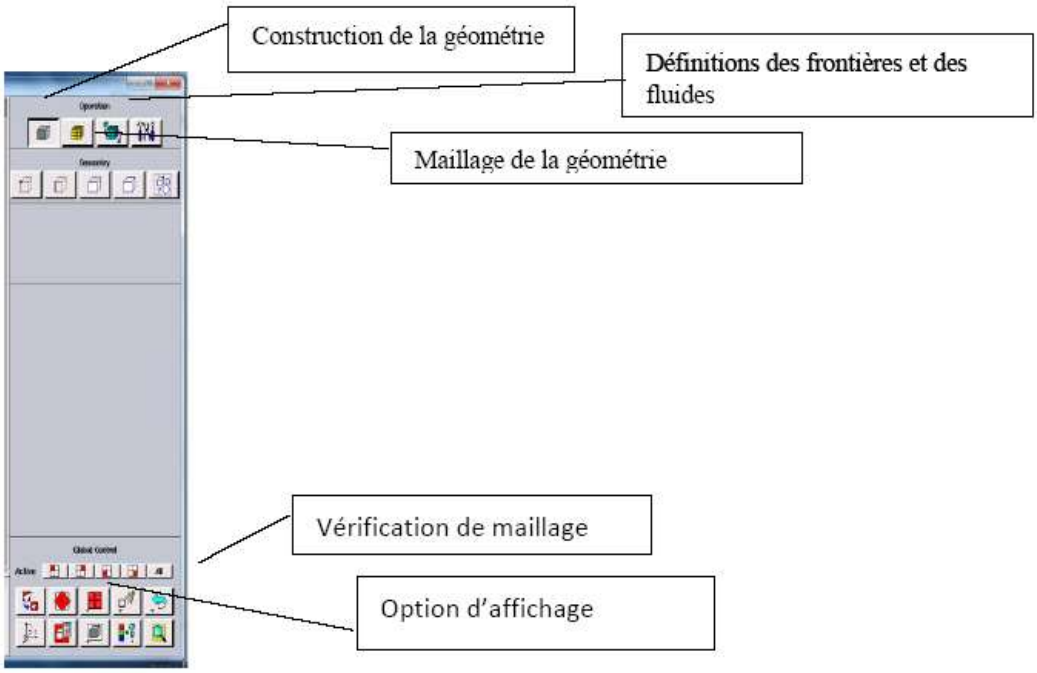


Figure (III.18) :Principe d'utilisation de Gambit

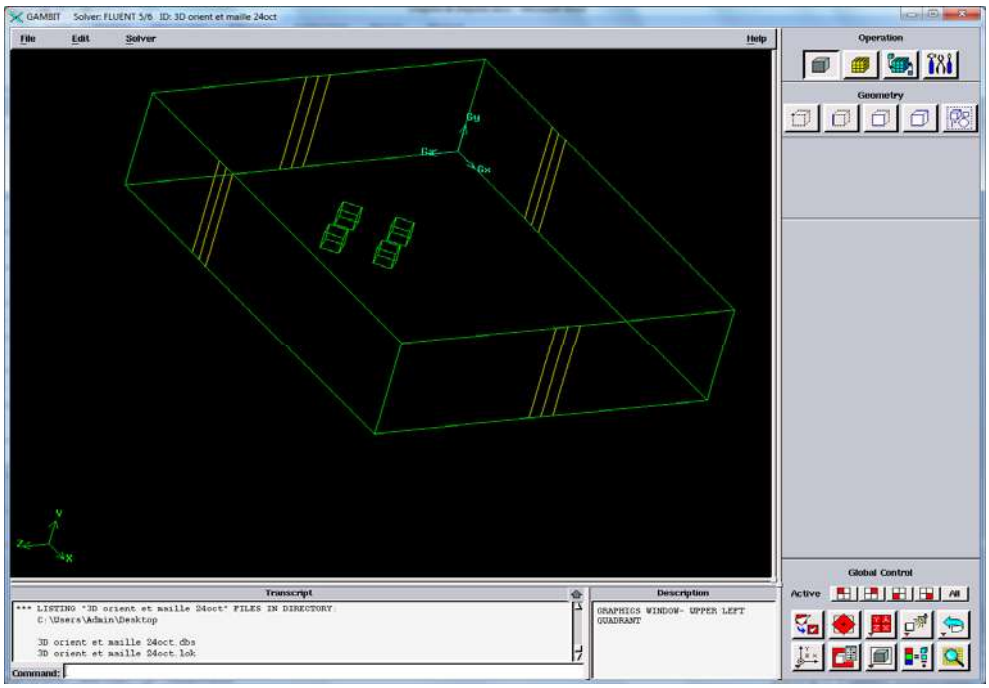


Figure (III.19) :Géométrie 3D sur Gambit du modèle des blocs orientés

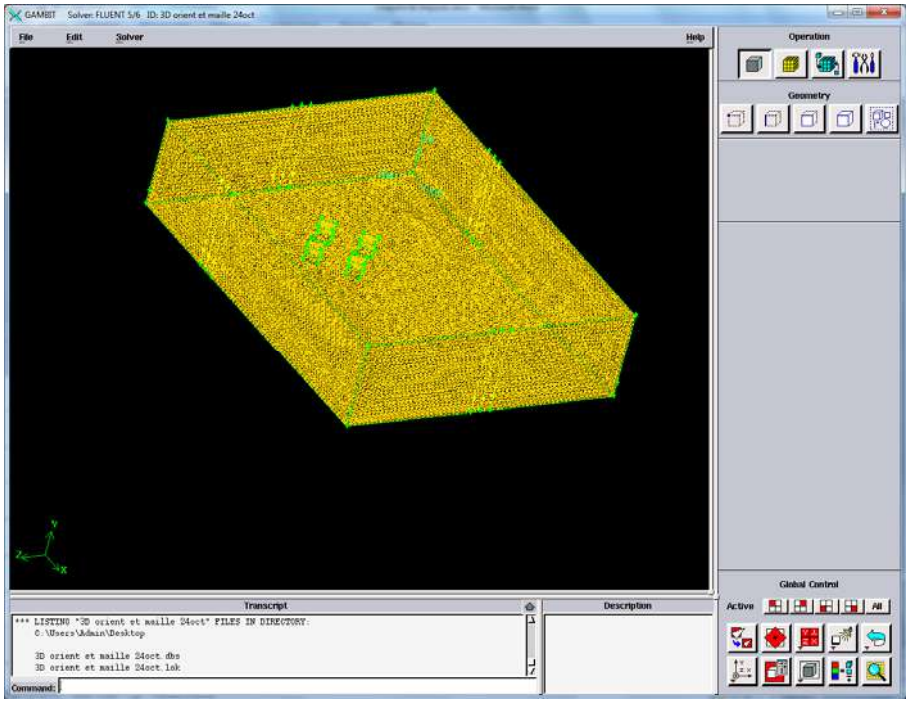


Figure (III.20) :Maillage 3D sur Gambit du modèle des blocs orientés

- **Les conditions aux limites** : la spécification des conditions aux limites est effectuée selon le problème traité sachant que l'espace maillé est pris par défaut comme fluide, il suffit de sélectionner la frontière puis choisir le type de la condition.

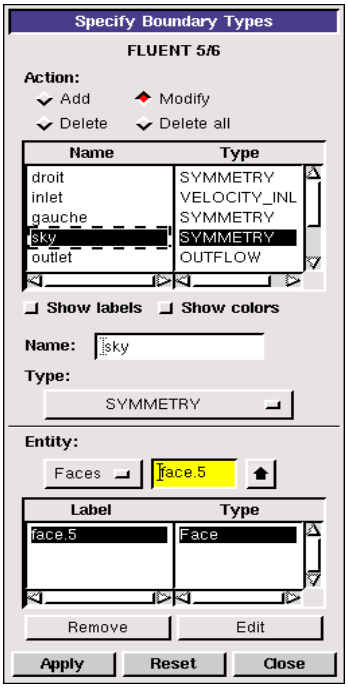


Figure (III.21) : Les conditions aux limites(Gambit)

- **L'exploitation du fichier .Msh** : une fois que la géométrie est créée, que les conditions aux limites sont définies, il faut alors exporter le maillage, depuis le préprocesseur Gambit vers le solveur *OpenFOAM* en format. Msh, la conversion sera rétablie par la suite sur *OpenFoam*, Le convertisseur OpenFOAM tentera de capturer le maillage et les conditions aux limites sans la moindre imperfection, et la procédure est faite par la simple commande :*fluentMeshToFoam<meshFile>,* fluent et pas Gambit car on a déjà exporté le maillage en format .Msh, où <meshFile> est le nom du fichier .msh, y compris le chemin d'accès complet ou relatif. Tous les détails de la procédure de conversion sont fournis sur (Annexe III.9)

III.5.4.2 Conditions initiales et aux limites :

Les données initiales de chaque cas d'étude sont stockées dans le sous-répertoire *0* ce dernier contient tout les fichiers nécessaires pour le processus de simulation comme par exemple dans notre cas le sous-répertoire *0*est composé de plusieurs fichiers, « **Epsilon »**(Annexe III.1)pour le taux de dissipation et « **K »** pour l'énergie cinétique turbulente, « **nut »**, « **P »** pour la pression, « **U »** pour la vitesse, « **nuTilda** « et « **R** », relatifs au modèlek-epsilonchoisi dans notre simulation des écoulements et **S** pour la source d'émission implémentée pour le calcul de dispersion atmosphérique dont les valeurs initiales et les conditions aux limites doivent être spécifiés .Chaque fichier se forme de deux parties :

- **internalField**, les données du champ initial interne.
- **boundaryField**, les données du champ aux limites qui incluent aussi les conditions initiales et les conditions pour tous les patches aux frontière se compose de *inlet* et *outlet* pour l'entrée et la sortie du canal, *left* et *right* pour les cotés latérales du domaine *sky* et *ground* pour le ciel et le sol du domaine virtuel, *wall-block* et *roof-block* pour les murs et le toit de l'obstacle.

Les types *symmetryPlane* signifie la présence d'un plan de symétrie qui confine l'écoulement à l'intérieur du domaine de simulation, *zeroGradient* signifiant que le gradient normal est égal à zéro ; la partie *frontAndBack* représente les plans avant et arrières pour les géométries en 3D, la spécification *empty* signifie que notre cas est en 2D. Voici un tableau représentant conditions aux limites les plus utilisées dans notre cas :

Type	**Description**
« fixedValue »	valeur fixée par l'utilisateur
« zeroGradient »	valeur calculée avec un gradient perpendiculaire à la zone nulle en son point
« inletOutlet »	« fixedValue » lorsque la zone est une inlet et « zeroGradient » dans le cas contraire
« outletInlet »	« fixedValue » lorsque la zone est une outlet et « zeroGradient » dans le cas contraire

Type	**PARAMETRES**
« fixedValue », « epsilonWallFunction », « kqRWallFunction »	« value **VALEUR** ; »
« zeroGradient »	aucun paramètre
« inletOutlet »	« inletValue**VALEUR** ; »
« outletInlet »	« outletValue**VALEUR** ; »
« empty », « symmetryPlane », « cyclic », wedge »	aucun paramètre

Tableau (III.1) : Type et description des conditions aux limites utilisées par OpenFOAM

- **personnaliser des conditions aux limites :**

OpenFOAM, gère les différentes conditions aux limites quisont situées dans le répertoire suivant « **cd $FOAM_SRC/finiteVolume/fields/fvPatchFields »,** Toutes ces conditions sont dérivées des conditions de base fixedValue et fixedGradient et pour définir une condition à la limite qui dépend du temps ou des autres champs, il existe plusieurs possibilités :

• Programmation en dure dans le code
• Programmation de nouvelle condition aux limites
• Utilisation de l'utilitaire swak4Foam

Pour notre cas d'étude on a utilisé *swak4Foam*[114] pour créer le profil de vitesse à l'entrée du domaine (Annexe III.7) cette bibliothèque qui combine les fonctionnalités de groovyBC et funkySetFieldsoffre à l'utilisateur la possibilité de spécifier des expressions impliquant les champs et de les évaluer, la bibliothèque propose un certain nombre d'utilitaires (par exemple funkySetFields pour définir des champs à l'aide d'une expression),conditions aux limites (groovyBC pour spécifier des conditions aux limites arbitraires basées sur des expressions) et objets fonctionnels qui permettent de faire beaucoup de choses qui autrement nécessiteraient une programmation très complexe.

III.5.5 Traitement (Processing) :

III.5.5.1 Solveur :

La notion de solveur est fondamentale en ce qui concerne *OpenFOAM.* En effet, la première chose à se demander, lors de l'étude d'un cas avec *OpenFOAM*, et celle du solveur à utiliser. *OpenFOAM* a, du point de vue de l'utilisateur, presque autant de solveurs différents que de type de cas d'étude possible. Par exemple, il a un solveur nommé « icoFoam » dédié uniquement aux écoulements incompressibles laminaires instationnaires. Un autre solveur nommé « simpleFoam » est dédié aux écoulements incompressibles turbulents stationnaires. Ainsi, il n'y a pas besoin de choisir les équations à résoudre, comme pour autres logiciel commerciaux, mais uniquement celui de choisir le bon solveur. Le tableau suivant de présente les solveurs qui peuvent être utiles dans le cadre de la CFD.

Nom du solveur		**Type d'écoulement lié**
Basique	« laplacianFoam »	Diffusion thermique dans un solide.
	« potentialFoam »	Pour initialiser un écoulement potientiel simple avant la résolution des équations de Navier-Stockes.
Incompressible	« boundaryFoam »	Écoulement permanent 1D avec turbulences.
	« channelFoam »	Pour un écoulement dans un tube avec de grandes turbulences.
	« icoFoam »	Transitoire, Laminaire et isotherme pour fluide Newtonien.
	« nonNewtonianIcoFoam »	Transitoire, laminaire, isotherme, non-Newtonien.
	« pimpleDyMFoam »	Transitoire, fluide Newtonien sur parois en translation.
	« pimpleFoam »	Transitoire, grand pas de temps.
	« pisoFoam »	Transitoire.
	« shallowWaterFoam »	Transitoire, fluide non visqueux et peu profond, rotation.
	« simpleFoam »	Permanent, turbulent.
Compressible	« rhoCentralFoam »	Solveurs basé sur l'algorithme de Kurganov&Tadmor.
	« rhoPimpleFoam »	Laminaire ou turbulent pour chauffage, climatisation et ventilation.
	« rhoPisoFoam »	Non permanent, laminaire ou turbulent.

	« rhoPorousMRFPimpleFoam »	Géométrie poreuse et MRF, chauffage, climatisation, ventilation, laminaire ou turbulent.
	« rhoPorousSimpleFoam »	Fluide permanent avec turbulence RANS et traitement poreux géométrie.
	« rhoSimpleFoam »	Permanent, SIMPLE pour laminaire ou turbulent RANS.
	« sonicDyMFoam »	Maillage en mouvement, transitoire, gaz transsonique/supersonique, laminaire ou turbulent.
	« sonicFoam »	Transitoire, gaz transsonique/ supersonique, laminaire ou turbulent.
	« sonicLiquidFoam »	Transitoire, transonqiue/supersonique, laminaire, fluide liquide
Multiphase	« bubbleFoam »	2 fluides incompressibles non miscibles (ex : eau gazeuse)
	« cavitatingFoam »	Transitoire, cavitation.
	« compressibleInterFoam »	2 fluides compressibles, isothermes.
	« interFoam »	2 fluides incompressibles, isothermes.
	« interMixingFoam »	3 fluides incompressibles dont 2 miscibles.
	« interPhaseChangeFoam »	2 fluides incompressibles isothermes avec échange de phase.
	« multiphaseInterFoam »	n fluides incompressibles.
	« twoLiquidMixingFoam »	2 fluides incompressibles.
	« twoPhaseEulerFoam »	2 fluides incompressibles dont une sous forme de gaz ou de bulles dispersés.

Tableau (III.2) : Exemple de solveurs disponibles sur OpenFOAM

Pour les écoulements incompressibles permanents ou turbulents on choisit le solveur simpleFoam pour le cas de notre étude et pour simuler la dispersion de polluants on développe le solveur par l'ajout d'un scalaire passif ce qui sera détaillé par la suite :

- **le solveur simpleFoam** (**S**emi-**I**mplicit **M**ethod for **P**ressure **L**inked **E**quations**) :**

SimpleFoam est un solveur en régime permanent pour un écoulement turbulent incompressible, utilisant l'algorithme *SIMPLE* (méthode semi-implicite pour les équations liées à la pression). Dans les versions les plus récentes, il inclut également une option pour utiliser l'algorithme *SIMPLEC* (méthode semi-implicite pour les équations liées à la pression cohérentes).

La procédure de l'algorithme *SIMPLE* est basée sur une série d'opérations itératives de prédiction-correction pour résoudre les équations régissant. Grâce à un champ de pression prédit, les composantes de la vitesse sont d'abord calculées à partir de l'équation de quantité de mouvement. Le terme de pression est ensuite lié entre l'équation de continuité et l'équation dynamique, en transformant l'équation de continuité dans une équation de Poisson pour la pression. L'équation de Poisson applique une correction de pression pour le champ de vitesse trouvé, et les nouvelles valeurs sont ensuite utilisées pour résoudre les équations discrétisées de quantité de mouvement pour le calcul du champ de vitesse ainsi que l'équation d'énergie pour le champ de température, (la résolution de l'équation d'énergie est effectuée pour chaque étape à cause de l'influence de la variation de température sur le champ d'écoulement à travers les propriétés du fluide). Le champ de pression trouvé est ensuite pris pour un champ prédit, et le processus se répète jusqu'à l'obtention d'une solution convergée.La séquence d'opérations dans l'algorithme *SIMPLE* peut être récapitulée comme suit:

1.L'initialisation de l'algorithme nécessite une prédiction de la pressionP^n.

2.La résolution de l'équation de quantité de mouvement avec la valeur de la pression prédite permet de calculer le champ de vitesse. Des facteurs de corrections sont appliqués sur la pression et la vitesse pour forcer la solution à respecter l'équation de continuité.

3.Les facteurs de corrections (relaxations) trouvés permettent la correction des champs de vitesse et de pression.

- ***Facteurs de relaxation :*** Afin d'éviter la divergence due aux fortes corrections entre deux itérations, les facteurs de relaxation peuvent être ajoutés. La nouvelle pression est calculée selon la relation suivante :

$$P^{new} = P^* + \alpha P^n$$

Avec α le facteur de relaxation. Le facteur de relaxation doit être assez élevé pour que le processus se poursuive, mais assez faible pour éviter la divergence.

III.5.5.2 Ajout d'un scalaire passif :

On détaille ici la procédure pour l'implémentation de l'équation de transport d'un polluant dans le solveur *simpleFoam* ainsi que la localisation des sources d'émission qui nous permet de calculer les taux de concentration désirés, cette équation est un

traceur passif qui n'a pas d'influence sur la pression ou la vitesse du fluide, il permet donc de suivre les trajectoires des particules de polluant dans le domaine de simulation, pour réaliser cela il faut passer par les étapes suivantes :

- **Copie du solveur de base**: on commence d'abord par copier le solveur *simpleFoam* pour avoir la main pour la modification car ce n'est pas possible sur la version originale du solveur.
- **Changement des noms** : il faut en suite renommer les fichiers et les anciennes mentions de *simpleFoam* afin de ne pas supprimer le solveur mais d'en créer un nouveau.
- **Compilation :** afin de pouvoir compiler il faut aussi modifier le fichier **files** qui se trouve dans le répertoire **Make.** On crée le nouveau fichier exécutable puis on recompile, si tout est bon, le nouveau solveur réapparait.
- **Ajout d'une nouvelle grandeur physique ou de propriété de transport:**Les grandeurs physiques sont stockées dans**creatFields.H,** pour ajouter une nouvelle on l'ouvre avec un éditeur de texte et en dessous des autres déclarations on l'ajoute comme pour le cas de la nouvelle propriété de transport le nombre de schmidt*sct* ou la source d'émission *s* :

```
// createFields.H file

         Info<< "Reading turbulent Schmidt number\n" <<endl;

dimensionedScalarSct // pour le nombre de schmidt
(
transportProperties.lookup("Sct")
          );

       Info<< "Reading field s\n" <<endl;    //s pour source
volScalarField s
            (
         IOobject
                 ("s",
         runTime.timeName(),
         mesh,
         IOobject::MUST_READ,
         IOobject::AUTO_WRITE
                 ),
```

Une fois ajouté, on retourne au dossier constant et on édite le fichier transportProperties en ajoutant la valeur de Sct.

- **Ajout de l'équation de transport :**les équations résolues par le solveur sont codées dans le nouveau fichier copié du solveur d'origine *simpleFoam* sous l'extension ***.C,*** l'ajout d'équation sera comme suit :

```
          //simpleFoamAvecDispersion.C
          {
#include "UEqn.H" // l'equation de vitesse U
#include "pEqn.H" // l'équation de pression p
           #include "TpEqn.H"//l'équation de transport qu'on a ajouté pour
          Tp (transport de polluant)
                    }
solve // Tpequation file
                  (
fvm::div(Ddt, s)
                   + fvm::div(phi, s)
- fvm::laplacian(D,s)
                  );
```

- Localisation, type et valeur de la source d'émission : dans notre cas il fallait définir le type de la source et sa localisation,

```
       nameSource;
               type    cellSet;
       action  new;
       source  boxToCell;// type de la source
        sourceInfo box (0.8 0 1.25)(0.82 0.04 1.26);localisation de
                     la source par coordonnées géométriques
```

Désormais, il suffit de compiler par la commende***wmake.*** L'implémentation du nouveau solveur est réussit et on a qu'a exécuter la commande portant le nouveau nom du solveur par exemple *simpleFoamAvecDispersion* au lieu de taper *simpleFoam*pour commencer le calcul numérique.

III.5.5.3 Boucles de correction:

L'exécution d'un algorithme sur *OpenFOAM* nécessite plusieurs boucles à réaliser afin d'atteindre une solution convergée. Lecode propose donc les boucles de correction suivantes:

nCorrectors:définit le nombre de correction des champs de pression et de vitesse, l'algorithme *SIMPLE*a besoin d'une seule correction tandis que d'autres algorithmes exige plus d'une correction, mais typiquement pas plus de quatre.

*nOuterCorrectors:*qui contrôle le nombre d'itérations réalisées pour la résolution del'équation de Navier-Stokes

nNonOrthogonalCorrectors:correspond à la type du maillage pour le cas résolu, par exemple 0 pour un maillage orthogonal et augmente avec le degré de non-orthogonalité jusqu'à par exemple 20 pour les maillages non plus orthogonales. Autrement dit, il définit le nombre de résolution de l'équation de pressiondans le cas d'un mauvais maillage,OpenFOAM (2014).

III.5.5.4 choix de schéma d'interpolation :

Le fichier ***fvschemes*** permet de choisir les schémas numériques pour la résolution discrétisée des équations aux dérivées partielles. Dans ce fichier l'utilisateur détermine la méthode de résolution des opérateurs mathématiques (divergence, laplacien, gradient), ainsi que le type d'interpolation des valeurs.

OpenFOAM offre un large choix que ce soit pour le type d'interpolation, ou pour le type de discrétisation. Les tableaux suivants montrent les différents types de schéma utilisés par ce code de calcul.

Les schémas centrés	
linear	Interpolation linéaire (différence central)
cubicCorrection	Schéma cubique
midPoint	Interpolation linéaire avec la pondération symétrique
Les schémas de convection Upwinded	
upwind	Schéma de différence upwind
linearUpwind	Schéma de différence upwind linéaire
skewLinear	Linéaire avec la correction d'obliquité
QUICK	Schéma de différence upwind quadratique
Les schémas TVD	
limitedLinear	différence linéaire limitée
vanLeer	limiteur de van Leer
MUSCL	Limiteur de MUSCL
limitedCubic	Limiteur cubique
Les schémas NVD	
SFCD	différence central Self-filtered
Gamma ψ	Différence gamma

Tableau (III.3) : Les différents schémas d'interpolation d'OpenFOAM

Schéma de discrétisation	**Description**
Gauss <interpolationScheme>	Deuxième ordre, intégration gaussienne
leastSquares	Deuxième ordre, des moindres carrés
fourth	Quatrième ordre, des moindres carrés
limited<gradScheme>	Version limitée de l'un des schémas ci-dessus

Tableau (III.4) : Schémas de discrétisation

Notre choix adapté pour le calcul numérique est détaillé sur (AnnexeIII.5).

III.5.5.5 Tolérances de la solution :

Les solveurs de la matrice sont itératifs, c'est.-à-dire ils sont basés sur réduire le résiduel d'équation à cause d'une succession des solutions. Le résidu est en apparence une mesure de l'erreur dans la solution de sorte que plus il est petit, plus la solution est plus précise. Plus précisément, le résidu est évalué en substituant la solution courante dans l'équation et en prenant l'importance de la différence entre les côtés gauches et droits; il est également normalisé pour le rendre indépendant de la balance du problème analysé. Avant de résoudre une équation pour un champ particulier, le résidu initial est évalué à base des valeurs courantes de ce champ. Après chaque itération du solveur le résiduel est réévalué.Le solveur s'arrête si l'une ou l'autre des conditions suivantes sont atteintes:

- le résiduel atteint une valeur inférieure à la tolérance du solveur, *tolérance*.
- le rapport du résiduel courant au résiduel initial atteint une valeur inferieure à la tolérance relative du solveur, *relTol*;

La tolérance du solveur doit représenter le niveau auquel le résiduel est assez petit que la solution peut être considérée suffisamment précise. Les limites de la tolérance relative du solveur améliorent le progrès relatif de la solution initiale à la solution finale. Dans des simulations instationnaires, il est habituel de placer la tolérance relative du solveur à 0 pour forcer la solution de se converger à la tolérance du solveur en chaque pas de temps (notre cas d'étude). Les tolérances, *tolérance* et *relTol* doivent être indiqués dans les dictionnaires pour tous les solveurs.

III.5.6 Visualisation et analyse des résultats (post-Processing) :

L'outil de post-traitement et de visualisation des résultats fourni par*OpenFOAM* est *ParaFOAM*. L'outil a une grande utilité et puissance, permet de visualiser facilement les grandeurs essentielles calculées lors de l'étape de traitement (*processing*). Grâce à cet outil l'utilisateur peut extraire les données des variables désirées. Il est facile d'extraire les données des variables désirées et les exporter pour les traiter par un autre outil de visualisation (dans notre cas nous avons utilisé *Tecplot360*, pour convertir les données en utilise la commande *faomToTecplot*). Les résultats obtenus pour notre cas d'étude seront analysés et interprétés dans la partie résultats et discussions dans le chapitre suivant.

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre technique de résolution numérique du système d'équations obtenu au chapitre II a été représenté, aussi les différents modèles de la turbulence utilisés pour la modélisation des écoulements et de la dispersion atmosphérique ont été détaillé, le choix de la méthode numérique traitant le problème est très crucial, pour cela une connaissance des avantages et de points fort de chaque méthode de résolution est essentiel pour choisir l'approche la plus adaptée et à notre cas la méthode des volumes finis a été choisi pour sa flexibilité en maillage complexe et bonne prédiction des résultats dans le domaine de la dynamique des fluide, et finalement, l'interprétation du code de calcul utilisé *OpenFOAM* a été faite avec toutes les étapes nécessaires à suivre pour l'exécution et l'obtention des résultats désirés.

CHAPITRE IV :

VALIDATION DU MODELE ET DISCUSSION DES RESULTATS

IV.1. Introduction :

La distribution spatiale de la pollution urbaine est très complexe où les concentrations en polluants atmosphériques sont extrêmement variables dans l'espace et dans le temps. Elle est fonction de plusieurs paramètres, des conditions météorologiques, topographiques, de la répartition des sources d'émission, etc.… Une prédiction de la pollution atmosphérique avec une précision raisonnable, exige une modélisation fiable de l'écoulement turbulent de l'air responsable de cette dispersion. Le caractère aléatoire des écoulements turbulents rend la solution exacte des équations de mouvement impossible, cependant sous certaines hypothèses des modèles peuvent prédire avec une précision acceptable les caractéristiques globales de l'écoulement. La simulation numérique est l'outil puissant qui peut fournir des informations utiles pour la compréhension des écoulements atmosphériques et aide à prédire avec une certaine précision la qualité de l'air dans les milieux urbains. A condition que l'approche utilisée est correcte et respecte normes de la simulation des écoulements turbulents. Une simulation numérique fiable permet d'économiser en temps de calcul et d'éviter de placer une population, en particulier vulnérable, dans les zones à hautes concentrations en polluants et de concevoir des cités et des villes avec une des concertations admissibles. A cet effet, une étude approfondie de l'écoulement turbulent a été entreprise afin choisir et de l'adapter le modèle adéquat permettant de reproduire le phénomène se rapprochant au mieux de la réalité du phénomène.

Ce chapitre présente la simulation numérique effectuée par le code de calcul numérique OpenFoam pour la prédiction des champs d'écoulement du vent autour d'un obstacle carré (2D) placé dans une canopée urbaine. L'étude consiste en l'évaluation des performances des différents modèles de turbulence quant à la prédiction des caractéristiques des écoulements turbulents de façon globale. Ensuite et en choisissant le modèle qui donne les résultats les plus proches à ceux obtenus expérimentalement, une série de modification des coefficients du modèle dans le but de l'adapter pour choisir la formule appropriée pour la simulation adoptée. L'évaluation est basée sur la comparaison des résultats numériques obtenus avec ceux donnés expérimentales qui ont été produits dans un tunnel de vent CEDVAL A1-3[80] fournit par l'institut métrologique de l'université de Hambourg.

Selon les dimensions, deux configurations ont été étudiées ; une première en 2D où deux cas ont été étudiés, la dispersion de polluant autour d'un seul bloc isolé et le cas de deux blocs alignés. Pour les deux cas, différentes combinaisons des sources (une ou deux sources) sont considérées. Pour le cas d'un seul bloc, trois positions de la source sont traitées : une source ponctuelle en amont du bloc, en aval du bloc et deux sources en amont et en aval du bloc. Pour le cas de deux blocs, les combinaisons étudiées sont une source en amont du premier bloc, une source entre les blocs et deux sources en amont et en aval du premier bloc.

L'objectif est en premier lieu de développer un modèle numérique capable de prédire l'écoulement atmosphérique urbaine et la dispersion de polluant qui l'accompagne. En second lieu pour le cas tridimensionnel est d'apporter un nouveau regard sur l'impact des formes urbaines comme l'orientation des réseaux de rues sur la répartition spatiale de polluants afin d'ouvrir une réflexion sur les formes urbaines optimales.

IV.2. Validation et adaptation du modèle :

IV.2.1. Domaine de calcul et conditions aux limites :

Pour la validation et adapter le modèle numérique, le choix est porté sur la modélisation de l'écoulement autour d'un obstacle carré (en 2D) placé sur un plan et immergé dans une couche limite d'un écoulement turbulent Figure (IV.1a). Ce cas test constitue un prototype de validation pour les écoulements turbulents séparés largement discuté dans la littérature. Cette géométrie a été étudiée expérimentalement en tunnel à vent par le laboratoire de météorologie de l'université de Hambourg en Allemagne et les données numériques de l'expérience sont disponibles [80]. Afin de permettre une comparaison logique, nous avons pris les mêmes conditions de l'expérience, telles que les dimensions, la vitesse à l'enterrée, …etc. En plus de la première géométrie utilisée pour la validation, une deuxième a été considérée qui est constituée de deux blocs espacés d'une distance H. Figure (IV.1b).

La hauteur d'obstacle est prise égale à 0,125 m [80]. La distance en amont (L_{in}) est prise suffisamment grande afin de prévenir l'effet des conditions d'entrée sur le champ d'écoulement. La section de sortie est assez éloignée pour assurer des gradients nuls pour toutes les variables physiques.

Le domaine de calcul est bordé par le sol de la soufflerie où une paroi rugueuse est considérée de rugosité ks = 0,001 [80]. Au haut du domaine, la symétrie est choisie pour satisfaire la condition aux limites de contrainte-nulle.

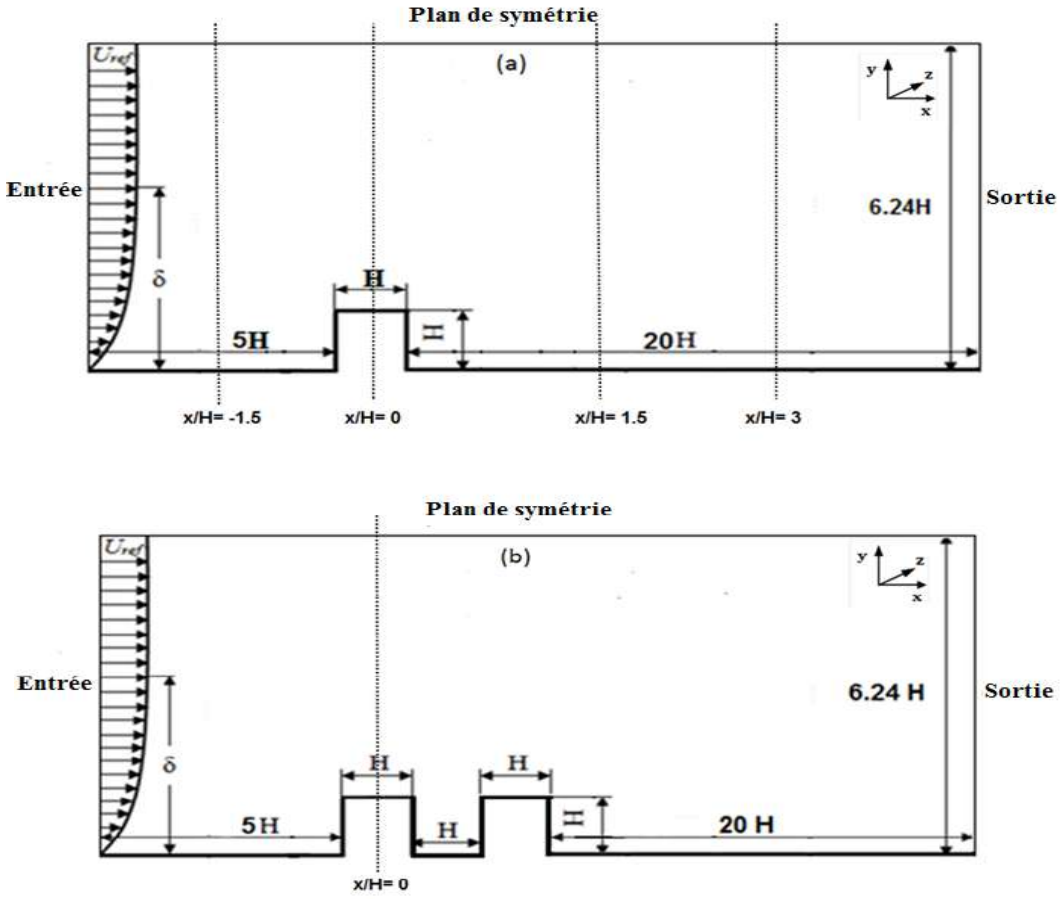


Figure (IV.1) **:** *Domaine de calcul, conditions aux limites et dimensions pour le cas (a) un obstacle et (b) deux obstacles*

A l'entrée, un profil de vitesse de loi de puissance de la forme donnée à l'équation (IV.1) est imposé. Les valeurs de «a» sont ajustées pour corréler le profil expérimental de CEDVAL A1-3 [80].

Le profil ajusté avec les données expérimentales est présenté sur la figure (IV.2).

$$u = u_{ref}\,\frac{y^a}{y_{ref}} \qquad \text{(IV.1)}$$

Où y la hauteur du domaine est égale à $y = 0.78\,m$,$u_{ref} = 4.1558\,m/s$, y_{ref}=0.375 m et a=0.33.

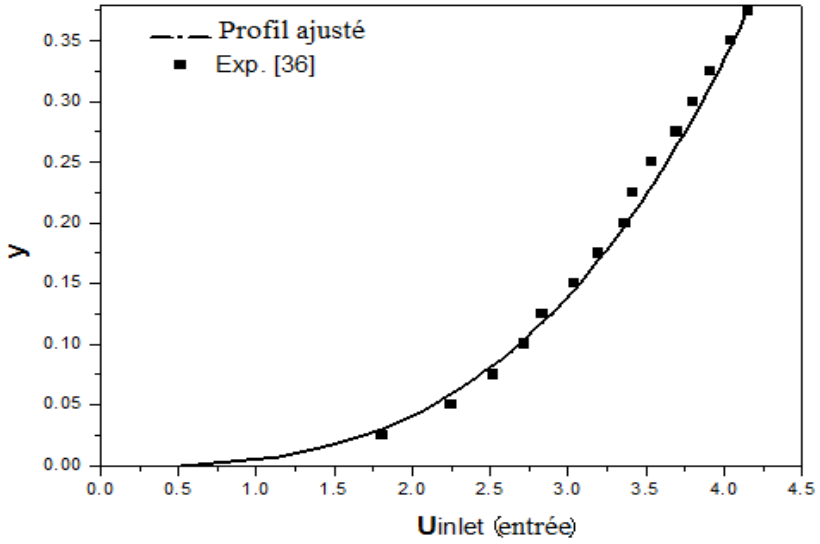


Figure (IV.2):Profil de vitesse d'entrée ajusté avec les données expérimentales

L'énergie cinétique turbulente *k* a été calculée en utilisant l'équation (IV.2)à partir des valeurs de vitesse fluctuantes mesurées dans la soufflerie :

$$k = \frac{1}{2}\left(\overline{u'^2} + \overline{w'^2}\right) \tag{IV.2}$$

Le taux de dissipation turbulente ε (m^2/s) est défini par la relation suivante.

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4}\frac{k^{3/2}}{\kappa z} \tag{IV.3}$$

Où k=0.4 est la constante de Von Karman.

La géométrie étudiée, les dimension et conditions aux limites sont illustrées sur la figure (VI.1).

IV.2.2. Topologie du maillage bidimensionnel :

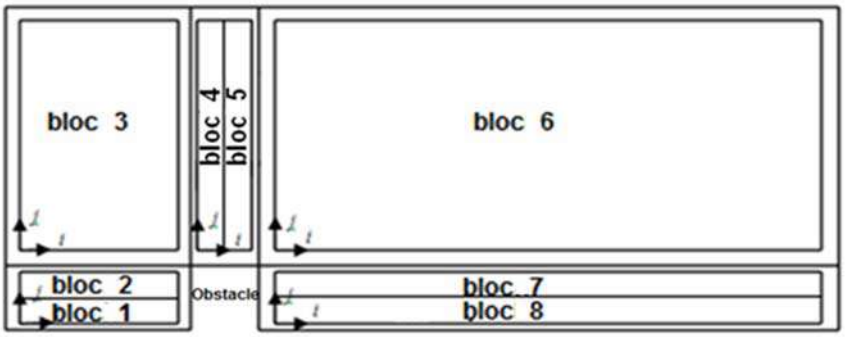
La distribution des mailles est dense près des parois et devient clairsemée en s'éloignant avec un taux d'expansion adéquata fin de capter les gradients élevés des quantités physiques recherchées. Une attention particulière est donnée au choix de la position du premier nœud. En respectant le modèle de turbulence utilisé, la première maille doit être placée dans la sous-couche entièrement turbulente parce que les modèles de turbulence RANS ne résolvent pas l'écoulement dans la sous-couche laminaire visqueuse et utilise des fonctions ou lois de la paroi qui sont des profils empiriques basés sur des observations expérimentales. Ainsi, un mauvais choix de la

distance entre la première cellule et la paroi conduit à des caractéristiques physiques irréalistes. Une valeur faible impose un écoulement turbulent dans une couche qui doit être laminaire tandis qu'une valeur élevée peut augmenter l'épaisseur de la sous-couche laminaire et conduit à résultats erronés. L'épaisseur de la sous-couche laminaire est déterminée par la valeur d'y^+ (éq. IV.4), qui représente la distance non dimensionnelle à partir de la paroi.

$$y^+ = \frac{u^* y}{\nu} \tag{IV.4}$$

Où y est la hauteur à partir de la paroi au milieu des cellules de la paroi adjacente, u^* est la vitesse de frottement etestνla viscosité cinématique.

Pour un meilleur contrôle de génération de maillage, le domaine de calcul est divisé en huit blocs avec un maillage de structure rectangulaire, comme représenté sur la figure (IV.3)**.**



Figure(IV.3) **:** *Topologie du maillage*

Une étude d'indépendance de la grille de maillage a été réalisée pour trouver le maillage favorable qui permet un compromis entre la précision de calcul souhaitée et le coût de la solution en temps et en mémoire. Pour ce but trois maillages d'une résolution de grille significativement différente ont été testés pour les différents modèles de turbulence étudiés : maillage grossier, moyen raffiné et dense pour chaque bloc, comme indiqué dans le tableau IV.1.

Models: k-ε RNG k-ε, Realizable k-ε			
Nombre de bloc	Grossier	Moyen raffiné	Dense
Bloc 01	15×04	60×12	120×24
Bloc 02	15×04	60×12	120×24
Bloc 03	15×15	60×60	120×120
Bloc 04	04×15	12×60	24×120
Bloc 05	04×15	12×60	24×120
Bloc 06	40×15	160×60	320×120
Bloc 07	40×04	160×12	320×24
Bloc 08	40×04	160×12	320×24

Tableau(IV.1) **:** Distribution *de Maillage pour les différents blocs*

Le profil de vitesse le long de deux sections en x/H=0 et x/H=1,5obtenu avec les trois configurations de maillage est représenté sur la figure (IV.4).Les différentes sections utilisées pour la présentation des résultats sont indiquées sur la figure (IV.4.1).

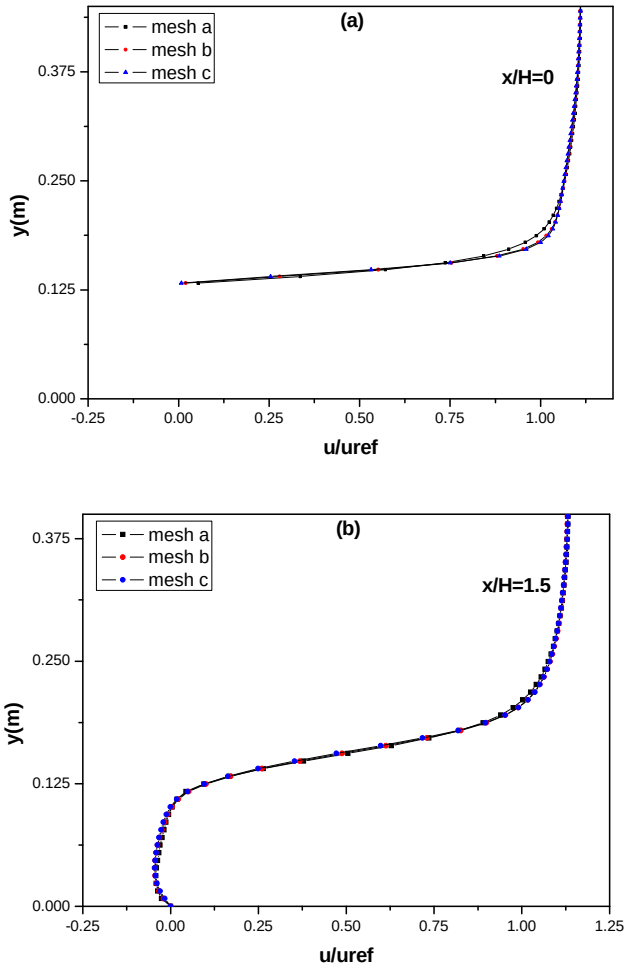


Figure (IV.4) : Profils de vitesse pour différents maillages en deux sections : a x/H=0 et b x/H=1.5

On remarque que la différence maximale dans le profil de vitesse entre les résultats obtenus avec un maillage à raffinement dense et un maillage à raffinement moyen ne dépasse pas 3%.Il a été démontré qu'un raffinement supplémentaire de la grille de maillage augmenterait considérablement le temps de calcul avec seulement une augmentation négligeable de la précision des résultats.

Par conséquent dans ce qui suit, toutes simulations ont été effectuées avec un maillage à raffinement moyen. Afin de satisfaire la condition de la loi de la paroi, la grille a été ajustée plusieurs fois en se basant sur les valeurs d'y^+ des cellules proches de la paroi jusqu'à ce que ces valeurs y^+soient dans l'intervalle recommandé [115]. La figure (IV.5) représente l'évolution y^+en fonction de la distance de domaine obtenue avec le maillage utilisé. La valeur maximale est inférieure à 36.

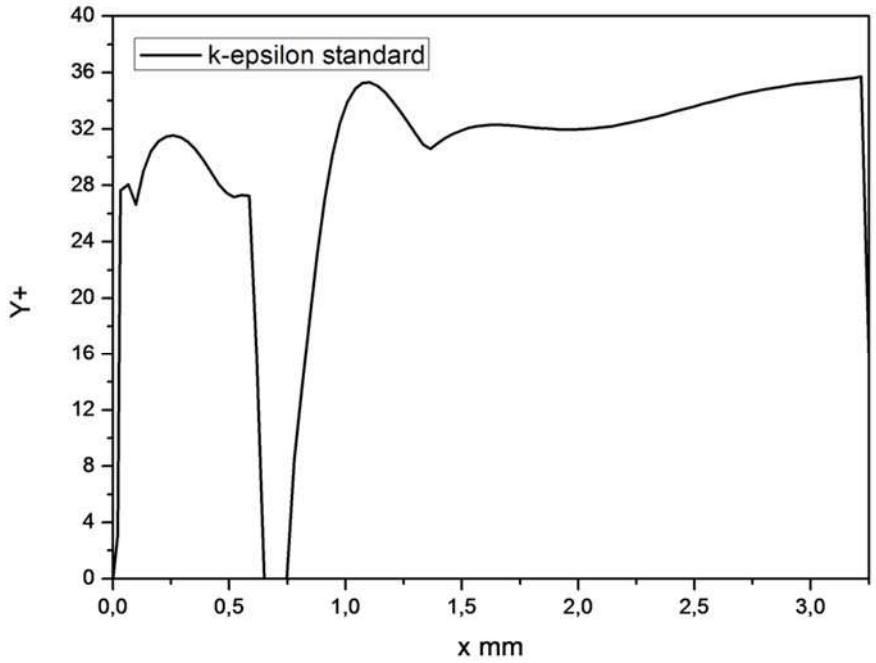


Figure (IV.5) **:** L'évolution *d'y^+ pour le modèle de turbulence k-ℰ*

De faibles valeurs d'y^+ont été observées au voisinage de l'obstacle, ce qui est le résultat d'une faible vitesse dans ces régions. À titre d'exemple, le maillage utilisé pour les simulations numériques est affiché sur la figure (IV.6)**.**

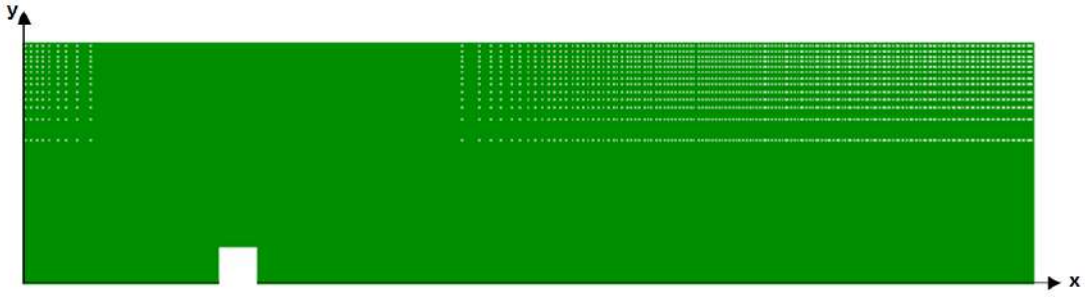


Figure (IV.6) **:** Distribution *de maillage*

IV.2.3. choix de modèle de turbulence :

- **Choix et adaptation du modèle de turbulence :**

Comme déjà mentionné plus haut, le choix du modèle de turbulence approprié au phénomène, constitue un élément clé de l'étude. Notre études ne s'est pas limité aux choix et adoption des coefficients de turbulence par défaut pour tous les problèmes, mais elle s'est étendue à l'ajustement des ces coefficient afin de prévoir au mieux le phénomène. La stratégie adoptée pour choisir un modèle de turbulence approprié qui est capable de prédire la structure d'écoulement et les quantités de turbulence avec un niveau de tolérance acceptable est la suivante.

Premièrement, effectuer des calculs avec différents modèles de turbulence, par ex. Modèles k-ε standard, k-ε Réalisable et RNG k-ε avec les constantes empiriques par défaut. Ensuite, choisir le modèle qui donne les meilleurs résultats par rapport aux mesures expérimentales puis adaptez les coefficients empiriques par rapport aux données expérimentales dans les limites recommandées dans la littérature. Ainsi, dans ce contexte, la structure globale qualitative marquée les lignes de courant obtenues avec les trois modèles de turbulence testés sont représentées sur les figures (IV.7 a, b, c)et comparées avec celles issue de mesures expérimentales en soufflerie [80] (d).

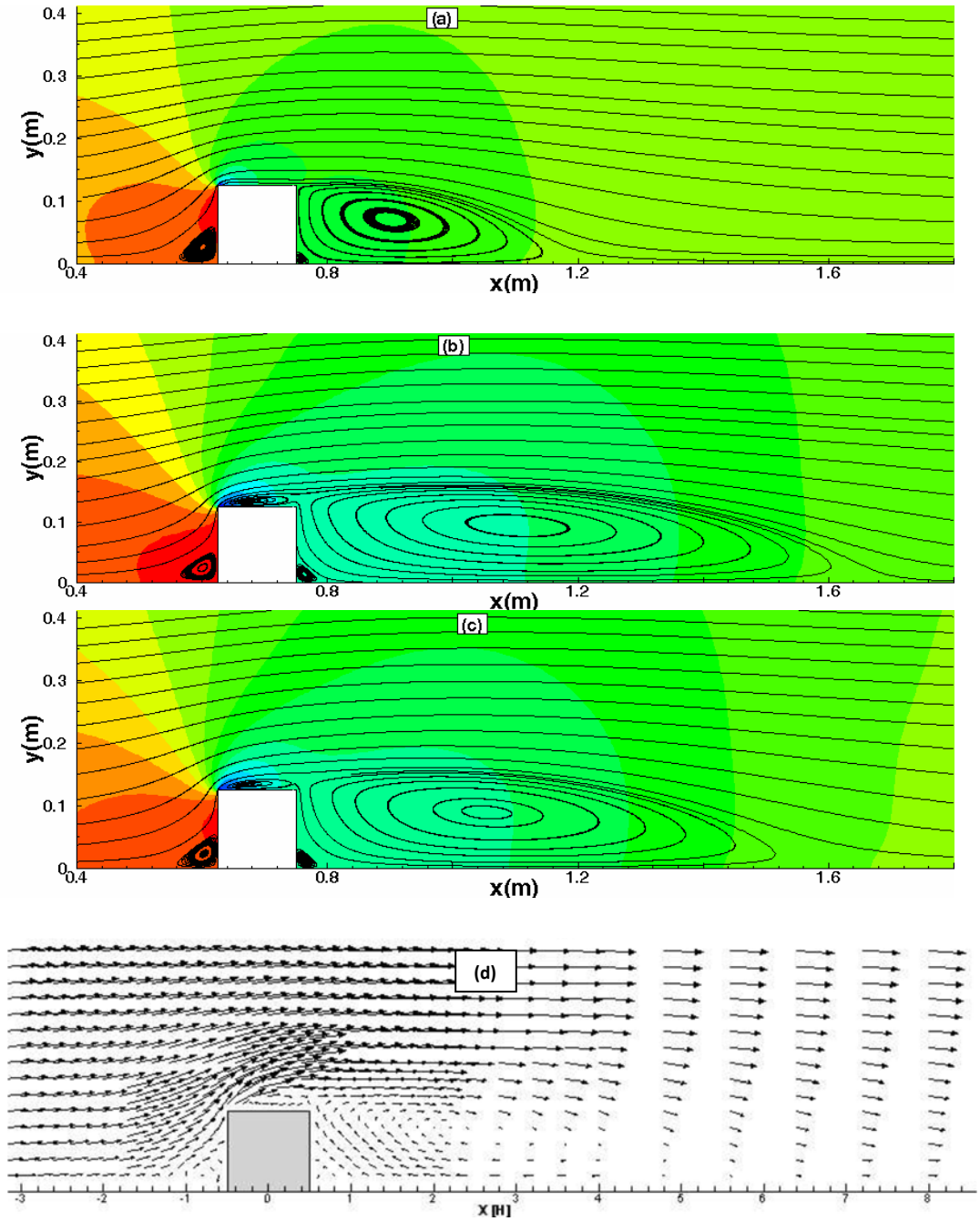


Figure (IV.7) ***:*** *Comparaison des lignes de courant obtenues avec les différents modèles de turbulence et les données expérimentales* ***a*** *k-ε standard,* ***b*** *k-ε Réalisable et* ***c*** *RNG k-ε et* ***d*** *données de soufflerie*

À titre de comparaison qualitative à partir de ces illustrations, tous les modèles fournissent l'allure générale formée par une succession de séparations, vortex et réattachement. Cependant, une analyse approfondie de la structure de l'écoulement a montré des disparités (contraste) importantes entre les résultats obtenus par les différents modèles de turbulence. La longueur de réattachement de l'écoulement après

la zone de recirculation formée en aval de l'obstacle, obtenue par le modèle k-ε standard, est nettement inférieure à celui obtenu par les deux autres modèles.

La longueur de la zone de recirculation est comparable pour les modèles k-ε réalisables et RNG k-ε, mais la force du vortex, marquée par un fort gradient de courbure des lignes de courant vers la fin de la zone de recirculation, est plus sévère dans les résultats donnés par le modèle k-ε Réalisable. De plus, le modèle k-ε standard ne parvient pas à prédire la séparation sur le toit de l'obstacle. Le modèle k-ε standard donne une pression élevée dans la face avant du bloc, ce qui peut empêcher la séparation de l'écoulement sur la face supérieure. Ça devrait être noté que la pression n'a pas d'équation propre à elle comme les autres quantités (u, v, k et ε) et qu'elle est ajustée par l'algorithme SIMPLE pour satisfaire l'équation de continuité. C'est parce que le modèle k-ε standard est connu pour être trop dissipatif, il donne une viscosité turbulente et la recirculation a tendance à être trop élevée, contribuant ainsi à limiter l'amplitude des fluctuations et l'amortissement des tourbillons. Les résultats obtenus par le modèle k-ε standard implanté et obtenu au moyen d'OpenFOAM® diffèrent de ceux obtenus à l'aide d'autres codes CFD par la détection du petit vortex formé juste après la base de l'obstacle.

Tous les modèles prédisent raisonnablement la zone de stagnation observée à l'avant de l'obstacle, avec de petites différences dans la taille de la zone. La séparation de l'écoulement sur la face supérieure du bloc est correctement prédite par le modèle RNG k-ε comparée aux mesures expérimentales, comme le montre la figure (IV.7.c).Toutes les autres tailles des zones sont sous-prédites par le modèle k-ε standard. Globalement, le modèle RNG k-ε donne les valeurs les plus raisonnables et les plus proches aux résultats expérimentaux.

Le modèle RNG k-ε est une version modifiée du modèle k-ε standard en ajoutant un terme supplémentaire dans l'équation de ε, qui change dynamiquement avec le taux de déformation de turbulence. Ce terme comprend l'interaction entre la dissipation de la turbulence et le cisaillement moyen. Pour une comparaison quantitative, les composantes u correspondantes dans différentes sections sont tracées avec des données expérimentales sur la figure (IV.8).

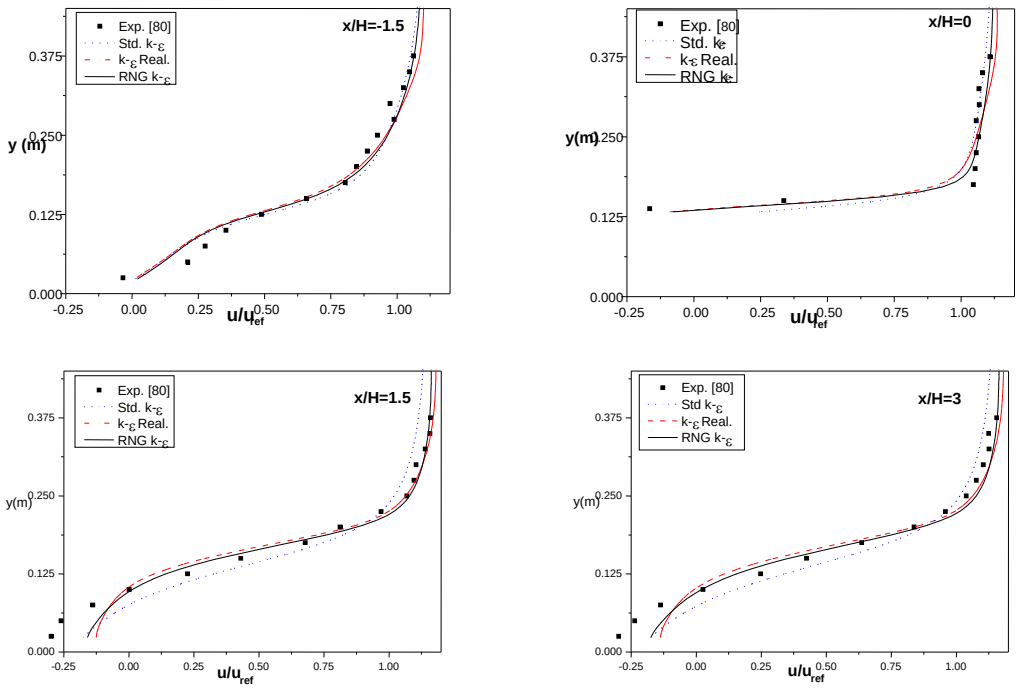


Figure (IV.8):Comparaison de la composante de vitesse ***u*** *prédite avec celles des données expérimentales (CEDVAL) sur les différentes sections*

En amont de l'obstacle, les trois profils sont très similaires, qui à leur tour, sont proches des mesures expérimentales, à l'exception d'une légère différence observée à environ la moitié de la hauteur de l'obstacle. Sur la face supérieure de l'obstacle, les valeurs de vitesse négatives sont détectées par les modèles k-ε Réalisable et RNG k-ε Cependant, dans le profil prédit par le modèle k-ε Standard, la vitesse est toujours positive au-dessus de 0,24 m / s. En aval du bloc, bien que les sections aient été sélectionnées dans la zone de recirculation et détectées par les trois modèles de turbulence, le modèle k-ε sous-estime le profil de vitesse dans la zone de recirculation et le surestime ailleurs (x / H = 1,5 et x / H = 3).Le modèle RNG k-ε donne de meilleurs résultats dans la zone de recirculation (y <0,125) par rapport aux mesures expérimentales car il est plus sensible à l'effet d'un changement soudain de la courbure des lignes de courant et le taux de déformation.

IV.2.3.1. Adaptation du modèle de turbulence choisi :

Selon ces résultats, le RNG k-ε est le modèle le plus précis pour prédire la séparation des flux et il a été choisi pour effectuer les simulations numériques dans notre étude. L'étape suivante consiste à adapter le modèle RNG k- ε en modifiant les constantes (coefficients) par défaut pour obtenir une meilleure précision en se référant

aux données expérimentales. Une série de simulations numériques a été réalisée pour tester la sensibilité des résultats concernant les coefficients de turbulence empiriques. Il a été révélé que la taille de la zone de recirculation est très sensible aux changements des coefficients Cμ et $C\varepsilon_1$. Cependant, $C\varepsilon_2$, ainsi que d'autres coefficients, n'ont pas d'effet significatif. Une légère diminution de Cμà une valeur de 0,3, entraîne une augmentation importante de la longueur de recirculation où le flux bifurque vers le régime instable. Un effet similaire est observé lors de la variation de $C\varepsilon_1$. Pour l'effet de $C\varepsilon_1$,la réduction de sa valeur de la valeur par défaut (1,42) à la valeur de (1,3) entraîne une augmentation importante de l'énergie cinétique turbulente et une légère augmentation de la composante de vitesse **x** dans la zone de recirculation pour y <0,125 m (hauteur d'obstacle).Les résultats de cette simulation sont résumés sur la figure (IV.9) où la composante mise à l'échelle de vitesse *u* et l'énergie cinétique de turbulence *k* obtenue en modifiant les coefficients RNG k-ε sont tracés avec les mesures expérimentales dans différentes sections de la zone de recirculation.

(a)

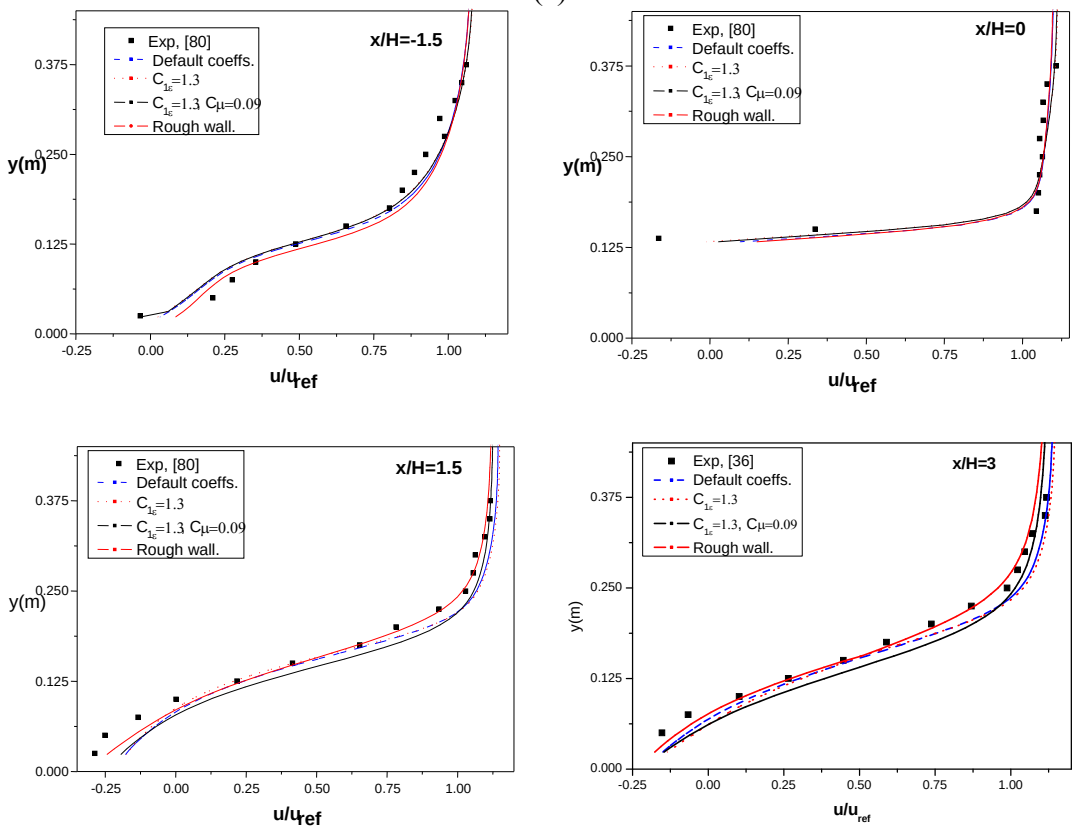


Figure (IV.9)

(b)

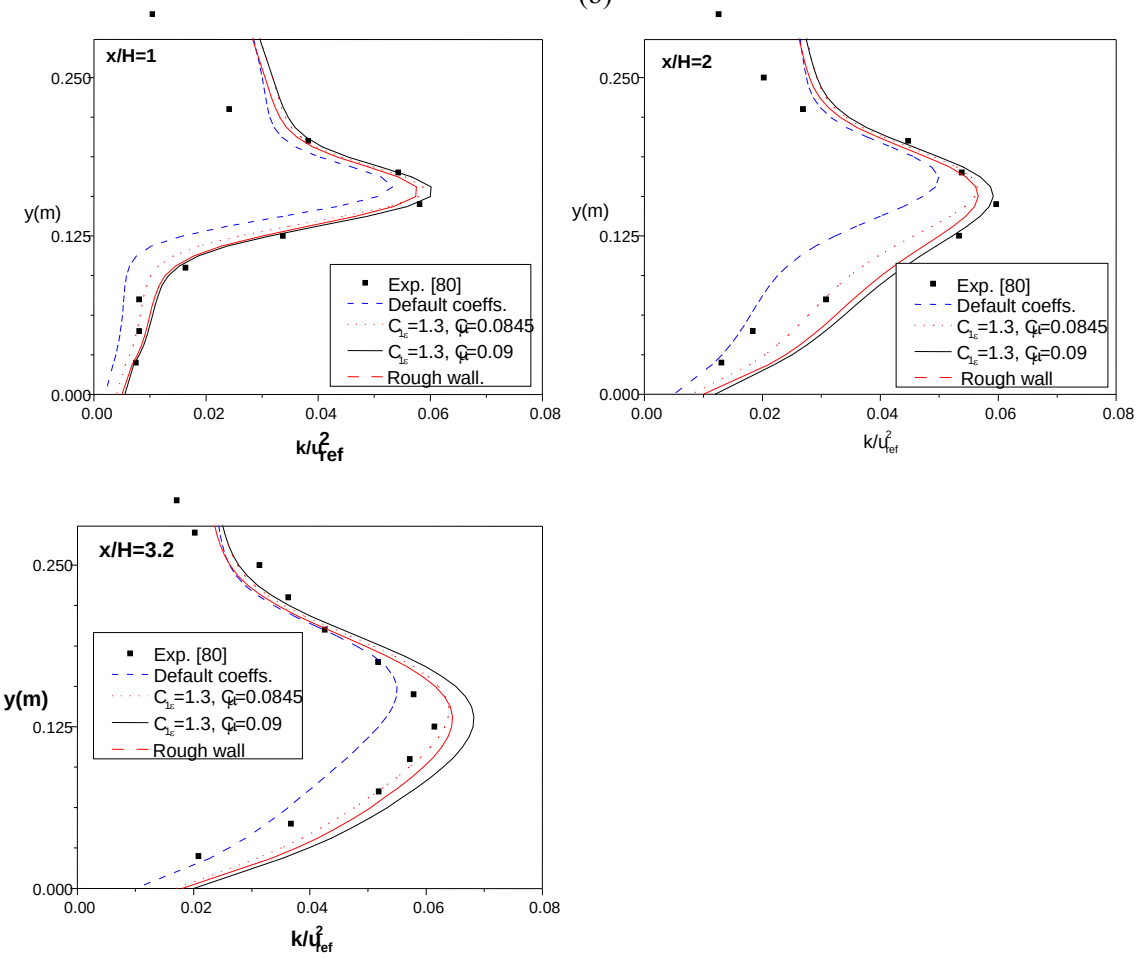


Figure IV.9 (suite) : *Évaluations des constantes modifiées du modèle RNG k- ε par rapport aux données expérimentales de soufflerie CEDVAL (CEDVAL 2013):* ***a*** *profil de vitesse u,* ***b*** *profil de k*

L'énergie cinétique turbulence (TKE) n'est représentée que sur les sections sensibles où les caractéristiques turbulentes sont plus prononcées. On peut observer que devant et au-dessus de l'obstacle, toutes les combinaisons donnent des résultats identiques et sont en corrélation avec les données expérimentales avec une tolérance acceptable. Une légère divergence est repérée à mi-hauteur de la zone de stagnation.

En aval de l'obstacle, le profil obtenu à l'aide des constantes par défaut est légèrement supérieur à ceux obtenus en utilisant d'autres combinaisons de valeurs constantes à l'approche de la hauteur de l'obstacle. La différence entre les différents profils est relativement faible. Cependant, la disparité est plus prononcée pour la prédiction des cas montrés sur la figure(IV.9.b).Sur la base des données expérimentales, la réduction de $C\varepsilon_1$ de la valeur par défaut de 1,42 à 1,3 améliore

considérablement le profil k. Une augmentation significative est enregistrée en dessous de la hauteur de l'obstacle (dans la zone de recirculation), et légèrement dans le courant libre au-dessus de celui-ci. Une réduction supplémentaire de cette constante entraîne une modification considérable de la longueur de réattachement et des profils de vitesse. Cela peut s'expliquer par le fait que la diminution du coefficient $C\varepsilon_1$ réduit le taux de destruction de l'énergie cinétique produite dans l'équation de ε. Comme on peut le voir sur la figure (IV.9), d'autres améliorations peuvent être obtenues en augmentant Cμ. Augmenter la constante Cμà 0,09 contribue à une augmentation de la viscosité turbulente dans la zone de recirculation sans aucune modification de la structure d'écoulement en moyenne, ce qui à son tour contribue à une augmentation du taux de dissipation turbulente. D'autres combinaisons de coefficients ont été testées, n'ont pas donné de résultats promoteurs, pour raison de concision ces combinaisons n'ont pas été présentées.

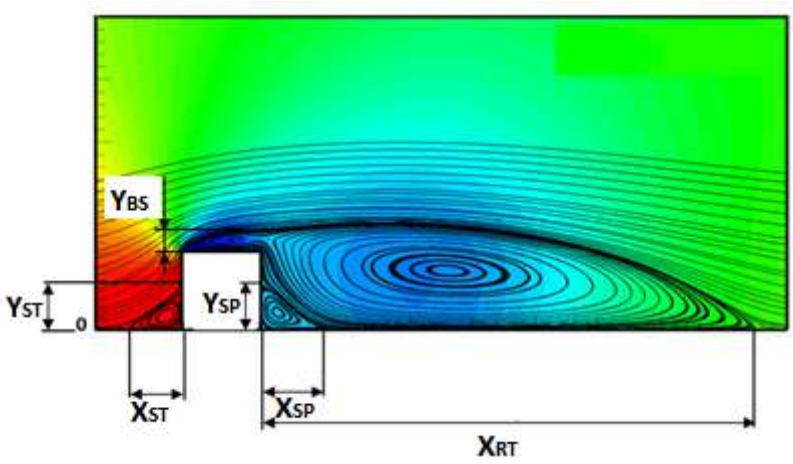
La rugosité a été prise en considération dans cette étude ; cette caractéristique de l'état de surface est un paramètre important dans la modélisation des écoulements turbulents. La rugosité relative d'une surface est définie comme le quotient de la rugosité absolue sur la longueur de l'écoulement. La rugosité absolue est prise comme la hauteur moyenne de ses aspérités. On observe que l'effet de la rugosité de la paroi est évident et que le profil de vitesse corrèle beaucoup mieux le profil expérimental en le comparant avec les autres profils calculés sans effet de la rugosité. En effet ce facteur influe sur l'intensité de turbulence ; celle-ci étant plus importante lorsque l'état de surface devient rugueux.

La rugosité est introduite au moyen de fichier relatif aux conditions aux limites en spécifiant le type de condition à imposer au niveau de la paroi. Dans notre cas la condition *Rough Wall Function* a été spécifiée qui nous fournit une contrainte de paroi sur la viscosité cinématique turbulente. C'est-à-dire lors de l'utilisation de fonctions de la paroi pour des parois rugueuses, basées sur l'énergie cinétique turbulente *k* La condition manipule le paramètre E pour tenir compte les effets de rugosité.

Les longueurs caractéristiques de la structure d'écoulement, schématisées sur la figure (IV.10)**,** obtenues avec les différents modèles de turbulence utilisés ainsi que par les coefficients RNG k-ε modifiés, sont résumées dans le tableau (IV.2) :

Model	The characteristic lengths						
	X_{RT}/H	X_{ST}/H	Y_{ST}/H	X_{SP}/H	Y_{SP}/H	X_{BS}/H	Y_{BS}/H
Exp	**5.60**	**0.35**	**0.33**	**0.67**	**0.44**	**0.79**	**0.19**
Standard k-ε	*4.04*	*0.20*	*0.16*	*0.68*	*0.50*	*0.56*	*0.08*
Realizable k-ε	7.86	0.42	0.32	0.84	0.48	0.92	0.19
RNG k-ε par défaut	*7.30*	*0.40*	*0.31*	*0.80*	*0.48*	*0.92*	*0.18*
RNG k-ε $C\varepsilon_1$ =1.3	6.26	0.32	0.30	0.72	0.16	0.90	0.16
RNG k-ε $C\varepsilon_1$ =1.3 $C\mu$=0.09	*5.70*	*0.30*	*0.29*	*0.68*	*0.40*	*0.80*	*0.16*
paroi rugueuse	5.63	0.33	0.30	0.66	0.42	0.78	0.16

Tableau (IV.2) ***:****Les longueurs caractéristiques du champ d'écoulement pour les modèles de turbulence et CEDVAL A1-3[80].*



*Figure(IV.10)****:****Les longueurs Caractéristiques d'écoulement turbulent autour d'un obstacle.*

Comme on peut le conclure des prédictions des tests, le modèle RNG k-ε avec $C\varepsilon_1$=1.3 et $C\mu$=0.09offre le meilleur compromis entre les résultats qualitatifs et quantitatifs comparé aux mesures expérimentales. Une légère différence est observée par rapport aux données expérimentales. L'écart majeur est obtenu pour le profil k près de la paroi et une surestimation de la taille de la zone de recirculation d'environ 2%. Cette déviation peut être attribuée à la nature instable du phénomène alors que le modèle RNG k-ε est un type (RANS) de Reynolds Averaged Navier-Stokes. Comme

il est bien connu, une simulation en régime instable présente l'inconvénient d'un temps de calcul et d'un coût de mémoire plus élevés.

IV.3.Étude de dispersion de polluant en 2D :

L'équation de transport d'un scalaire pour la concentration moyenne C d'un polluant passif l'équation (IV.4) est implémentée et compilée dans le solveur adopté avec les équations de flux de manière ségréguée. À chaque étape, le champ d'écoulement obtenu est injecté dans l'équation du scalaire, qui est passif et sans effet sur l'écoulement. Comme déjà mentionné plus haut, l'emplacement de la source d'émission de polluant, différentes combinaisons des positions ont été étudiées, les cas suivants sont pris : pour le cas d'un seul bloc, une source ponctuelle est située en amont ou en aval de l'obstacle et le cas de deux points de source en amont et en aval de l'obstacle. Pour le cas de deux blocs, une source ponctuelle est située en amont du premier obstacle, dans la rue canyon entre les deux blocs, et le dernier cas est la combinaison des deux cas. L'équation de transport de polluant passif dans un écoulement turbulent est la suivante :

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\overline{U}_K \bar{C}) = \frac{\partial}{\partial x_k}\left[(K+\eta)\frac{\partial \bar{C}}{\partial x_k}\right] + \overline{S} \qquad \text{(IV. 4)}$$

Où :

$\overline{\boldsymbol{C}}$ Est la concentration moyenne,

$\overline{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{K}}$Est la composante de vitesse moyenne dans la direction$\boldsymbol{x_k}$,

$\overline{\boldsymbol{S}}$ Est le terme source (émission),

$\boldsymbol{\eta}$Est la diffusivité moléculaire de masse,

K est le coefficient de diffusivité de la turbulence pris comme $K = \nu_t / Sc_t$où$\nu_t$est la viscosité turbulente et Sc_test le nombre de Schmidt turbulent considéré comme constante.

Selon les précédents travaux dans le sujet [32, 74, 81 et 23], la concentration est adimensionnée par la relation :

$$C^* = \frac{\bar{C}.U_{ref}.H}{Q_e/L} \qquad \text{(IV. 5)}$$

Q_eEst le flux de masse (kg/s), H la hauteur de l'obstacle (m) et Q_e/Lest le taux d'émission de la source par unité de longueur.

IV.3.1 Cas d'un seul obstacle :

La distribution spatiale de la concentration du polluant obtenu pour le cas d'un seul obstacle avec une source en amont sous un écoulement pleinement turbulent (U_0= 4,1558 m/s) [80] est présenté sur la figure (IV.11.a). On remarque qu'une concentration élevée est enregistrée dans la région devant la face frontale de l'obstacle où règne une zone de stagnation. La diffusion moléculaire est le mode de transport dominé dans cette région en raison de la forte interaction entre le vent et la construction, ce qui induit des vitesses de vent très faibles. Le contour de concentration transféré uniquement par la diffusion est tracé sur la figure (IV.11.b) pour montrer l'effet de la diffusion turbulente. Les contours de concentration sont formés par des lignes semi-circulaires bondées (encombrées) légèrement allongées vers le bloc. On peut observer que la concentration de polluants diminue avec l'augmentation de la hauteur de l'obstacle. De plus, un panache traverse le bâtiment ce qui contribue à l'évacuation du polluant loin de l'obstacle. À ces altitudes, compte tenu du fait que dans cette zone, le vent n'est pas affecté par la structure, la diffusion turbulente et moléculaire, en plus du mode de transport par convection, contribue à la dispersion des polluants. Dans la région de la proximité aval du bloc localisée dans la rue canyon, une faible concentration est observée. Avec la réduction d'altitude une légère augmentation du polluant est également observée dans la région du sillage en raison de la zone de recirculation. L'effet de la zone de séparation sur le toit de l'obstacle est marqué par une déflexion des contours polluants. Lorsque la source d'émission est placée dans la région face au vent de l'obstacle (figure IV.11.b)**,** une concentration très élevée de polluants est enregistrée à côté de la source ponctuelle. Lorsque la source d'émission est placée en aval de l'obstacle (figure IV.11.c)**,** une concentration très élevée de polluants est enregistrée à côté de la source ponctuelle. De plus, en amont de la source, la concentration augmente en allant vers le bloc à cause du vortex contrarotatif. Dans cette région, la concentration double lorsque l'on passe du bas au niveau supérieur de l'obstacle. On peut voir que la contamination par le polluant atteint la dernière partie du toit de l'obstacle en raison de la zone de recirculation discutée ci-dessus. Lorsque le fluide se déplace vers l'emplacement de la source, le polluant est évacué par convection, ce qui entraîne une réduction de la

concentration en s'éloignant de la source. Pour le cas de deux sources ponctuelles placées en amont et en aval de l'obstacle, le résultat est plutôt la superposition des deux champs qui viennent d'être présentés. Comme le montre la figure (IV.11.d**)**, la distribution de la concentration dans la région en haut jusqu'à la face supérieure finale est identique à celle lorsque la source ponctuelle est placée dans l'obstacle amont. Du coin supérieur droit, la concentration est presque la somme des deux champs obtenus précédemment. Dans tous les cas, il est clair que la concentration est très élevée au voisinage de la source où le transfert de masse est faible. En effet, à proximité de la paroi, la vitesse d'écoulement est très faible et la diffusivité turbulente est négligeable comparé à la diffusivité moléculaire, le phénomène de transfert de masse est assuré principalement par diffusion moléculaire dans cette région.

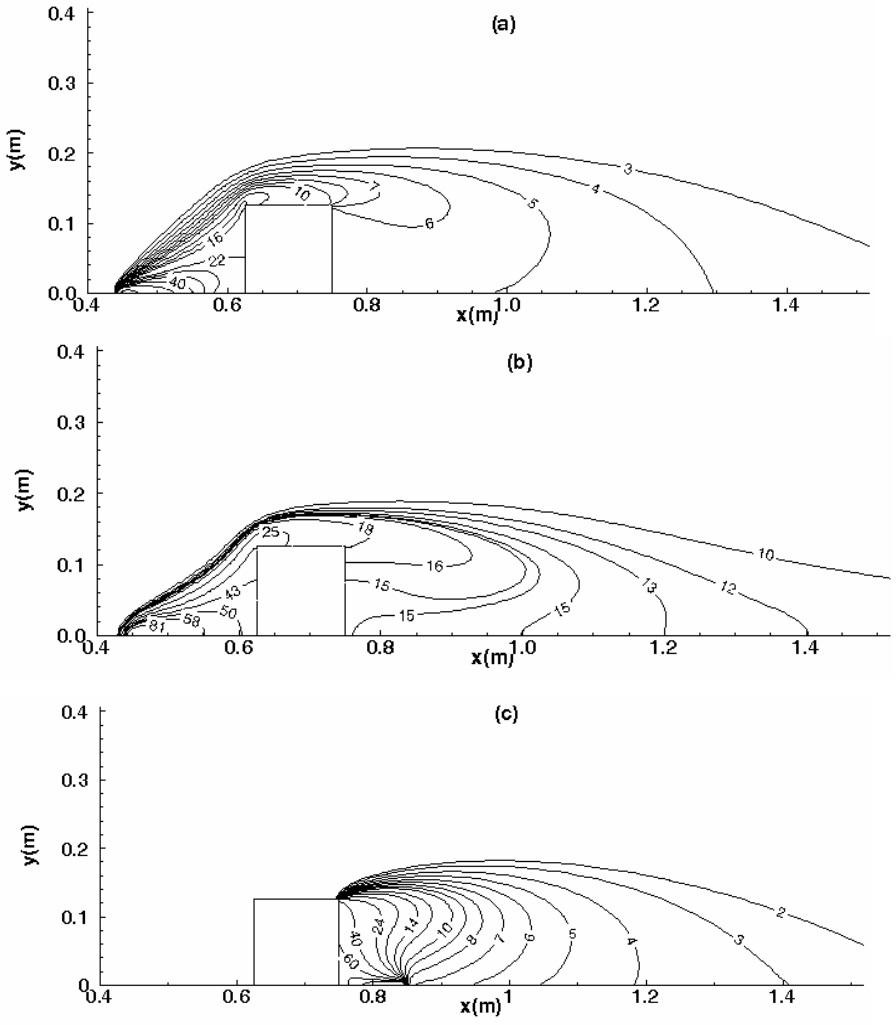


Figure (IV.11)

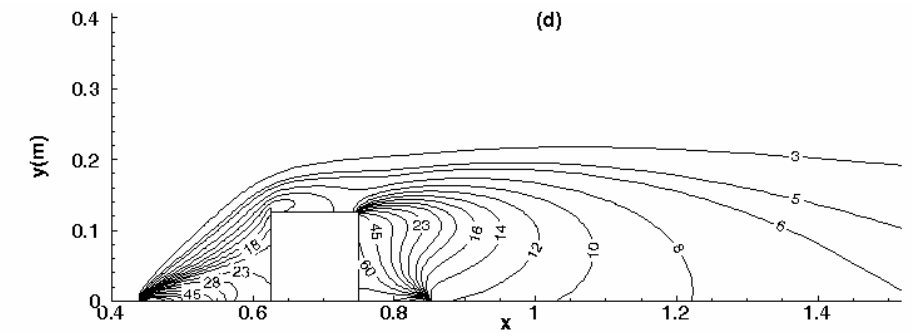


Figure (IV.11) suite : Concentration non dimensionnelle pour le cas d'un obstacle avec une source ponctuelle située à: a) amont de l'obstacle b)amont de l'obstacle sans diffusion turbulente c) aval de l'obstacle, d) deux sources ponctuelles situées en amont et aval de l'obstacle.

L'effet de la vitesse du vent sur la distribution du polluant est analysé à l'aide de deux autres valeurs de vitesse : la moitié et le double de la valeur initiale, comme illustré sur la figure (IV.12).On remarque que la distribution des concentrations est fortement affectée par le nombre de Reynolds. Lorsque la vitesse est divisée par deux ou doublée, la distribution de concentration, à son tour, est presque doublée ou divisée par deux, respectivement. En amont de l'obstacle, la variation est quasi-linéaire. Cependant, en aval de l'obstacle, la variation est un peu plus de la moitié / double comparée à la concentration obtenue pour la première valeur de la vitesse du vent à l'entrée.

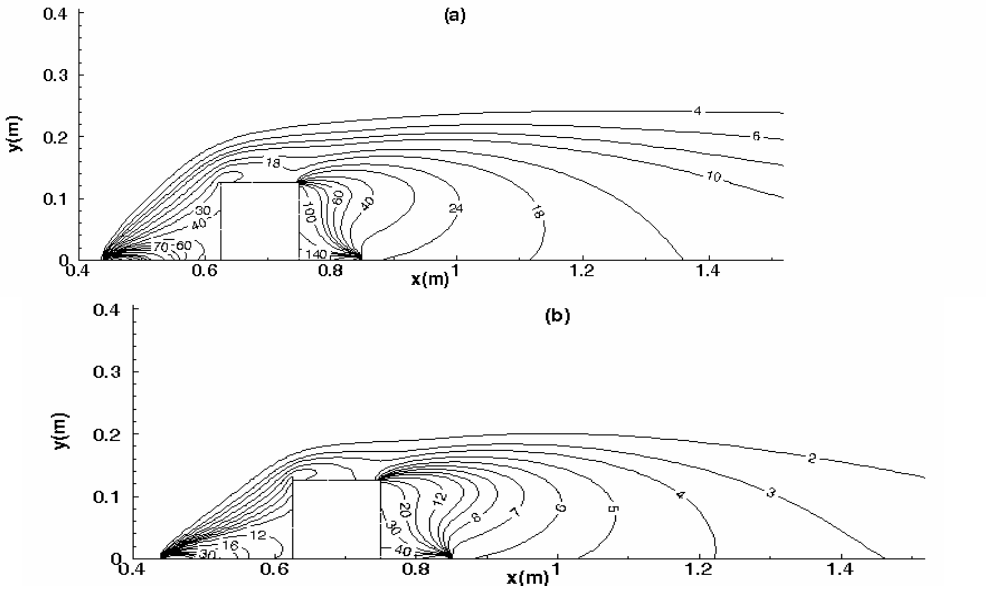
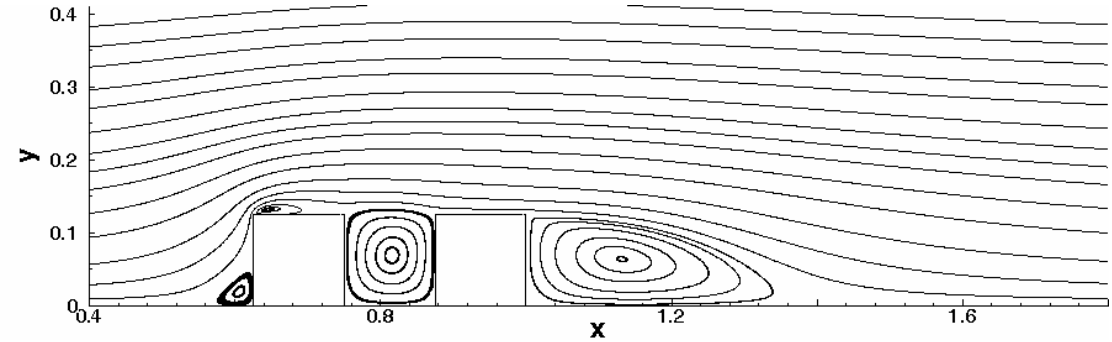


Figure (IV.12): Effet de la vitesse d'entrée sur la distribution de concentration pour le cas d'un obstacle à deux sources ponctuelles: a) $u_0=u_{ref}/2$, b) $u_0=2.u_{ref.}$

IV.3. 2 Cas de deux obstacles:

Les lignes de courant pour le cas d'écoulement autour de deux obstacles (une rue canyon idéalisée) obtenues dans les mêmes conditions sont présentées sur la figure (IV.13). Comme illustré, en plus des caractéristiques d'écoulement déjà obtenues ci-dessus, un grand vortex occupe presque toute la rue et une petite zone de recirculation contrarotative secondaire est observée au bas en aval du premier obstacle à environ 0,16 de la hauteur du bloc. De plus, aucune séparation du flux n'est observée sur la face supérieure du deuxième bloc. La vitesse à l'intérieur de la cavité tombe du noyau de l'écoulement où elle est maximale à zéro au centre du vortex, situé à environ la moitié de la hauteur de l'obstacle, puis tend vers des valeurs négatives du même ordre. De plus, la taille de la zone de recirculation en aval du deuxième bloc est réduite par rapport au cas d'un seul bloc isolé.



Figure(IV.13) : Lignes de courant pour le cas d'une rue canyon idéalisée avec deux obstacles

La distribution des concentrations pour les trois localisations de source est donnée sur la figure (IV.14).Si la source est située en amont du bloc, la concentration dans la rue entre les deux blocs est légèrement supérieure à celle repérée en aval de l'obstacle pour le cas précédent et pour la même position de source. Cependant, lorsque la source est située entre les deux blocs, ou pour le cas de deux sources ponctuelles, la concentration est plus élevée, notamment au niveau de la partie aval du bloc face au vent de la rue canyon. La concentration de polluants du côté face aval est élevée près du sol et diminue rapidement en montant vers le bloc. Des résultats similaires ont été rapportés dans la littérature [32, 47-48, 82-116].

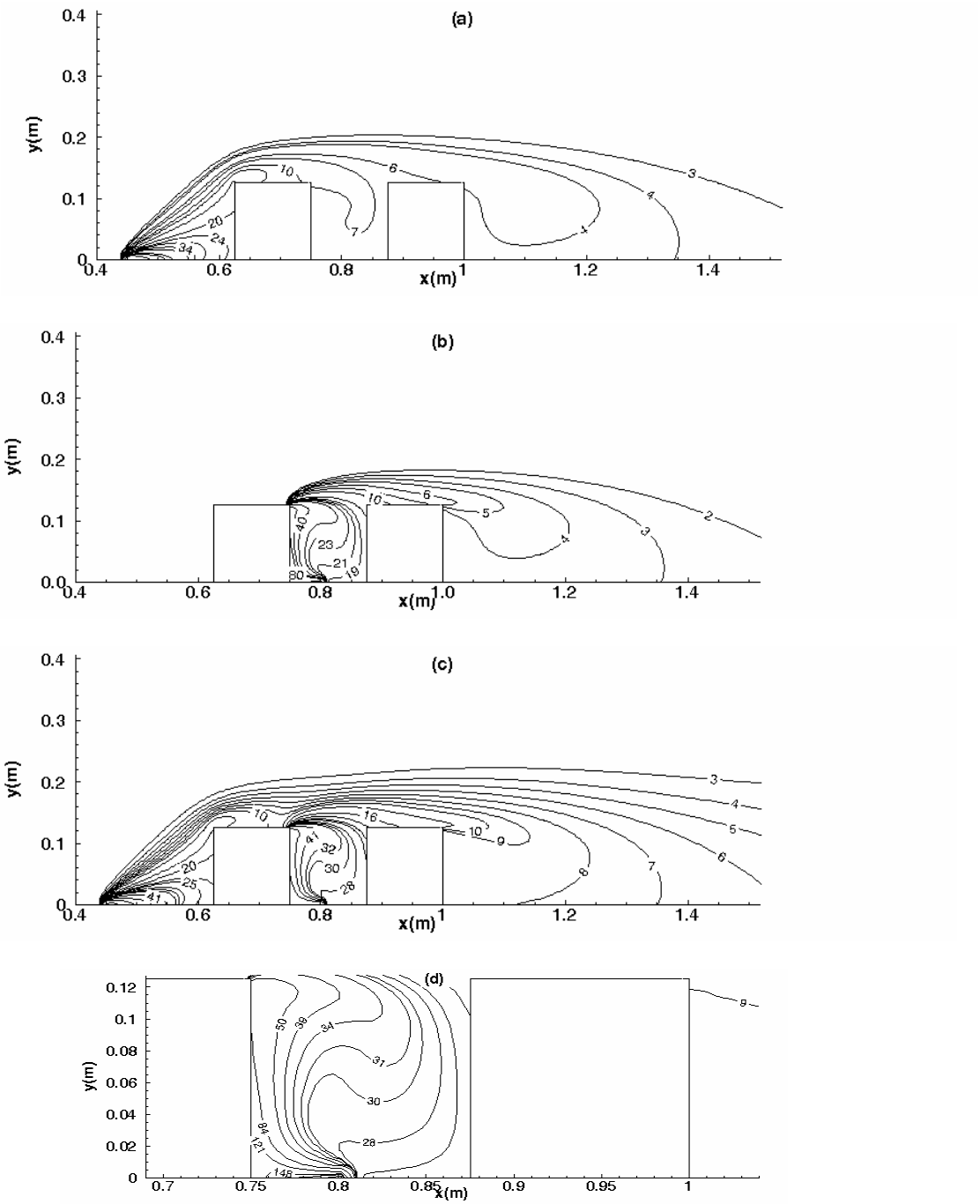


Figure (IV.14) ***:*** *Concentration non dimensionnelle pour le cas de deux obstacles avec une source ponctuelle située: a) en amont, b) en aval, c) deux sources ponctuelles situées en amont, d) une vue agrandie (zoomée) entre les deux obstacles.*

Le vortex réduit considérablement la régénération du fluide. Cela retient davantage le polluant et augmente même le temps de résidence des particules polluantes dans la rue. Entre les blocs, le polluant est piégé et transporté verticalement, balayant la face avale verticale du premier bloc. Comme on peut le voir, la concentration en polluant atteint des valeurs élevées sur toute la face arrière jusqu'au toit du bloc. Cette situation

peut causer de graves problèmes aux piétons et aux habitants de l'étage du sol et des étages suivants du coté de la face arrière de la rue. De plus, en raison de la petite zone de recirculation observée ci-dessus (à environ 0,6 de la hauteur du bloc), les contours de concentration sont déviés vers le coin inférieur, ce qui conduit à une concentration très élevée dans cette zone (figure IV.14.d). Dans le sens horizontal, le gradient de concentration augmente en allant de la droite vers la gauche de la rue. L'écart devient plus prononcé à l'approche du niveau du sol. L'effet de la vitesse du vent sur la concentration en polluant dans le cas de rue canyon idéalisée est illustré à la figure (IV.15).Comme on peut le constater, la structure globale est presque inchangée. Cependant, une grande différence est observée dans les niveaux de concentration. La réduction de la vitesse de moitié entraîne une augmentation de la concentration à plus du double. La vitesse élevée du vent améliore l'échange entre la rue canyon et l'écoulement libre au-dessus des blocs.

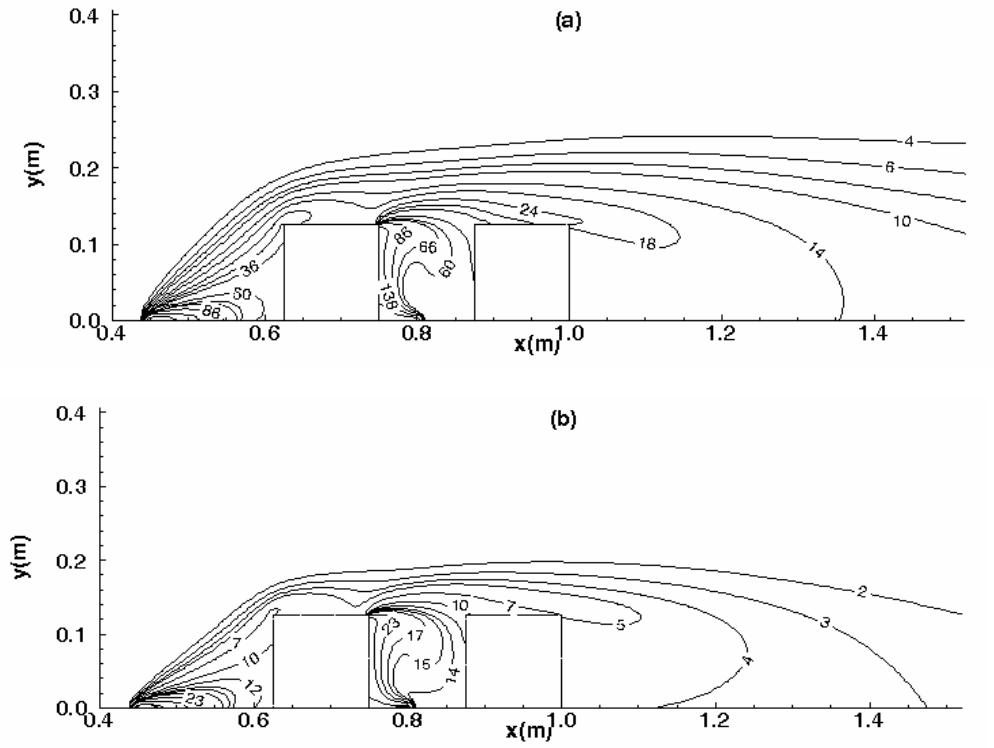


Figure (IV.15) : Effet de la vitesse du vent sur la concentration non dimensionnelle dans le cas de deux obstacles avec deux points de source a) $u_0=u_{ref}/2$, b) $u_0=2.u_{ref.}$

IV.4. Modélisation de dispersion atmosphérique en 3D :

Le modèle tridimensionnel est une étape incontournable de compréhension des phénomènes de diffusion en milieu urbain. Le processus de modélisation peut nous approcher les idées sur le phénomène de pollution atmosphérique qui est très complexe et nous permettre à mieux le comprendre et par la suite adopter des solutions à des problèmes réels qui peuvent nuire au confort de la population.

Cependant cette tâche est très délicate et difficile à réaliser. Commençons d'abord par la création de la géométrie et son maillage, qui est une étape très importante quant à la qualité des résultats attendus, sa réalisation demande beaucoup d'attention et un savoir faire, aussi bien en dessin assisté par ordinateur (DAO) que la génération du maillage. En effet, créer une géométrie ne se résume pas en un dessin, mais la jonction des cotés (edges), leurs divisions en nœuds en fonction du maillage désiré, créer les surfaces avec une topologie de grilles adéquate, ….etc, est très couteuse en temps. Encore plus, les équations algébriques issues d'un maillage tridimensionnel génèrent une quantité de données très importante et exige un matériel informatique conséquent, en particulier en mémoire vive (RAM). Il s'ajoute à cela le temps de calcul important pour assurer la convergence de la solution du système d'équations, de l'écoulement et des caractéristiques turbulentes, très importants.

Dans cette partie d'étude on s'intéresse à la structure d'écoulement de l'air ainsi que la dispersion de polluant atmosphérique dans une canopée urbaine où l'impact de la direction du vent sur ces phénomènes est dominant.

L'objective principale de cette partie d'étude est l'influence de la morphologie urbaine et l'effet de l'orientation des rues par rapport à l'axe principal sur la dispersion des polluants.

IV.4.1 Domaine de simulation et conditions aux limites :

Le domaine de calcul adopté est un parallélépipède de dimensions (26Hx20Hx6.24H) ou H est la hauteur des obstacles (H=0,125m) qui contient un arrangement de quatre obstacles placés au niveau du sol à une distance (5,4H) de l'entrée et une distance (8,5H) des deux cotés latéraux. Selon l'orientation de la rue principale par rapport à la direction du vent, deux configurations ont été retenues. Une première configuration où l'axe de la rue se coïncide avec la direction du vent, quant à

la seconde ; l'axe de la rue principale est orienté avec incidence α= 45°. Les rues secondaires sont perpendiculaires à la rue principale dans les deux cas. Le domaine de calcul, la disposition des blocs, les dimensions et les conditions aux limites sont illustrés sur la figure (IV.16).

Comme dans le cas bidimensionnel, l'écoulement de l'air dans une couche limite atmosphérique à stratification neutre est simulé avec une vitesse d'entrée INLET à profil logarithmique où *u* égale à 4m/s dans des conditions standard où la température et la pression sont supposées constante et sont respectivement égalent à T=25°C et P_{atm}=1atm. Le fluide est supposé continu permanent et incompressible, les profils d'entrée de l'énergie cinétique turbulente *k* et le taux de dissipation de l'énergie εsont données comme démontrer dans la partie 2D précédemment, l'approche RANS est de même appliquée avec le modèle RNG k-epsilon modifié et adapté dans l'étude en 2D.

A la sortie du domaine OUTLET, les flux gradient sont supposés nuls, la frontière supérieur SKY et les cotés latéraux LEFT/RIGHT SIDES (3^{eme} dimension) sont définis comme plan de symétrie une condition imposée afin d'empêcher l'écoulement de sortir hors du domaine simulé, toutes les parois des obstacles ainsi que le sol GROUND sont définis comme WALLS avec la condition rugosité.

Pour la condition aux limites relative au transfert de la matière du polluant, des sources linéiques sont localisées pour les deux configurations en amont des blocs et au milieu des intersections des rues qui libèrent en continu une quantité fixe du polluant x. de même que dans le cas de (2D) la concentration, est adimensionnée et calculée comme décrite précédemment, implémenté dans le solveur démontré dans le chapitre III(Simulation numérique et code de calcul paragraphe III.5.5.2).

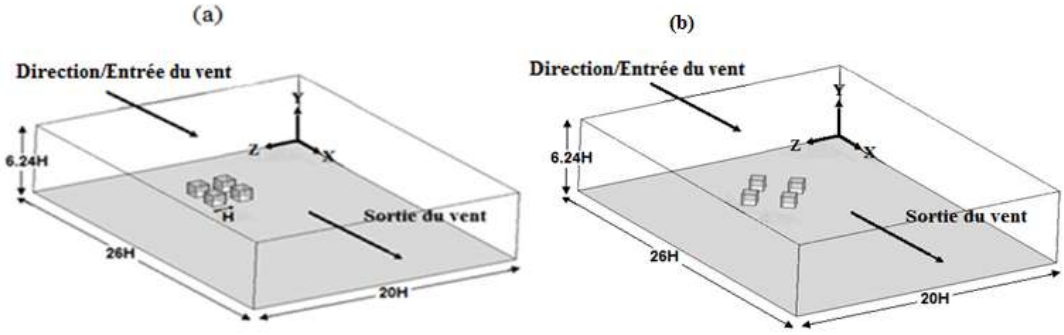


Figure (IV.16): *Domaine de calcul, conditions aux limites et dimensions pour le cas (a) quatre obstacles perpendiculaires à l'axe principal et (b) quatre obstacles orientés d'un angle de 45° par rapport à la direction du vent.*

IV.4.2 Maillage tridimensionnel :

Le maillage tridimensionnel à un coût informatique très important que ce soit au niveau du temps de calcul ou en capacité de mémoire ce qui rend parfois le calcul numérique impossible à réalisé avec des outils de calcul peu puissants. Donc le choix de maillage doit être judicieux afin d'assurer la convergence de la solution avec des précisions satisfaisantes et un coût en en données acceptables pour les moyens informatique dont nous disposons.

Le maillage adopté dans notre étude est le maillage tridimensionnel non structuré composé d'éléments tétraédriques d'environ 1,2 million de mailles obtenu après une série de test de convergence jusqu'à la stabilité des résultats. La grille est raffinée dans les zones les plus problématiques où les phénomènes physiques sont déterminants. Ce maillage repose sur une approximation des équations de la mécanique des fluides (Equation de Navier-Stokes) pour la partie dynamique et de l'équation de conservation de la masse dans la partie de la dispersion des polluants, le calcul des valeurs de chaque variable telle que la vitesse, la turbulence ou la concentration est établies en chaque sommet ou centre de maille, la figure (IV.17) illustre la topologie de maillage tridimensionnel de notre modèle physique pour le cas des blocs orientés par rapport à la direction du vent.

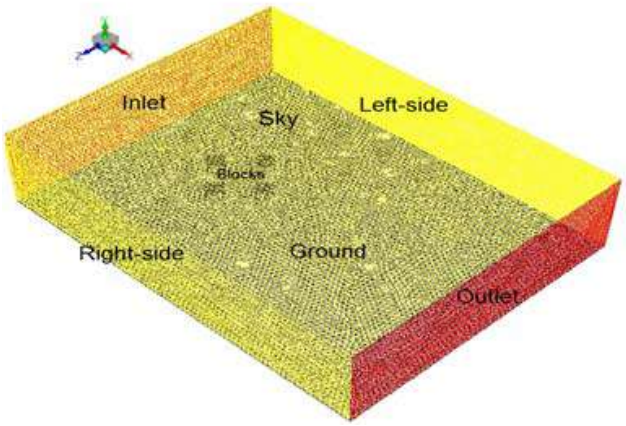


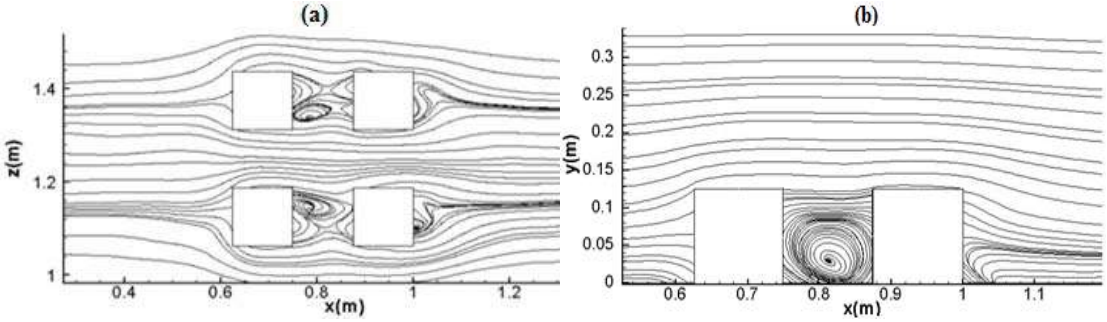
Figure (IV.17): Topologie de maillage tridimensionnel

IV.4.3 Structure de l'écoulement :

La maitrise du comportement de l'écoulement de l'air autour d'un ou de plusieurs obstacles est nécessaire pour la compréhension du processus de dispersion. Le paramètre clé dans cette partie est l'orientation de la rue par rapport à l'incidence du vent. Ce paramètre peut jouer un rôle très important dans la qualité de l'air dans une rue-canyon.

Dans un 1er cas, le vent souffle dans la direction que l'axe principale et perpendiculaire aux rues secondaires. D'après la figure (IV.18)on remarque qu'après la séparation produite par le contact avec le bloc, l'écoulement longe les surfaces latérales puis de larges cellules naissent en aval des blocs du premier rang. Vue le caractère instable et la multiplicité des solutions des équations de transport, les cellules formées derrière les deux premiers blocs ne sont pas identiques. Pour rappel, les modèle de type RANS fourni une moyenne temporelle de l'écoulement, c.à.d. l'écoulement est supposé permanent en moyenne. Ces cellules sont d'une hauteur qui est à environ de deux tiers de la hauteur du bloc figure(IV.18.b). Les blocs causent principalement le ralentissement de l'écoulement de l'air ce qui provoque une augmentation de la turbulence dont ces tourbillons de différentes tailles contribuent au phénomène d'accumulation et mixage des polluant avec l'air ambiant.

Les plans transversal et longitudinal montrent clairement comment l'écoulement est ralenti par la résistance exercée par les obstacles alignés sur le vent et retenir une quantité à l'intérieur de la rue canyon précisément en aval des bâtiments face au vent comme le montre la figure (IV.18).



*Figure(IV.18)**:** Lignes de courant pour le cas des blocs alignés a) : une coupe longitudinale au milieu des obstacles au niveau du plan Y b) : une coupe transversale au milieu des obstacles au niveau du plan Z*

Le phénomène derrière les blocs du second plan diffère de celui observé pour le premier bloc. On constate que la longueur ré-attachement est plus courte et le vortex est de faible hauteur.

L'effet de l'incidence du vent à l'entrée du domaine (de la direction du vent) est analysé par l'orientation de l'ensemble de la géométrie (les quatre blocs) d'un angle de 45° par rapport à la direction du vent. On remarque d'un premier regard que l'orientation des bâtiments joue un rôle important sur la structure de l'écoulement et par la suite la dispersion des polluants. Ce facteur a modifié notoirement la qualité d'écoulement de l'air où les tourbillons crées dans le cas précédent disparaissent complètement figure (IV.19). Cela due à l'effet du coin où le décrochement du vent au niveau de l'angle de l'obstacle. L'angle induit des pertes de charge supplémentaires et atténue la vitesse de l'air. La collision avec le bloc orienté avec incidence conduit en une accélération du vent au coté du coin de l'obstacle en supprimant la zone de stagnation en amont du bloc. La coupe illustrée par la figure (IV.19b) montre perceptiblement que la trajectoire des lignes de courant qui ne forme aucun rouleau tourbillonnaire en aval des obstacles.

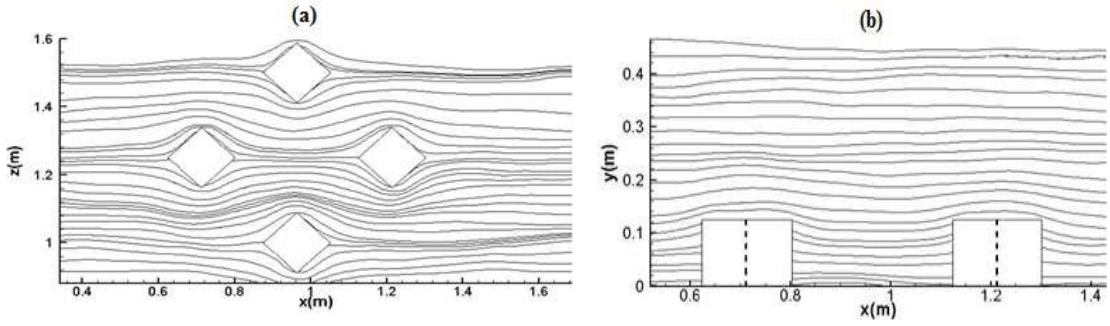


Figure (IV.19) ***:*** *Lignes de courant pour le cas des blocs orientés a) : une coupe longitudinale au milieu des obstacles au niveau du plan Y b) : une coupe transversale au milieu des obstacles au niveau du plan Z*

IV.4.4 Dispersion de polluant et effet de l'orientation des rues:

IV.4.4.1 Cas d'source :

Les polluants émis dans l'atmosphère sont soumis à des phénomènes de transport par convection et par diffusion moléculaire. Le transport horizontal est assuré par le champ du vent déplace les polluants les plus stables tandis que le brassage vertical par la turbulence atmosphérique lié aux effets de la couche limite et le mécanisme de diffusion. La distance crée par le déplacement des polluants marque la zone la plus touchée et affectée par la pollution et évidement la zone critique nocive pour la santé des habitants et qui doit être évitée dans l'emplacement de la population. L'étendue de cette zone varie avec la modification de la morphologie urbaine et la vitesse du vent.

La dispersion du polluant autour des quatre blocs en différents plan et pour les deux orientations est présentée sur la figure (IV.20). Les figures (IV.20a, b et c)sont des coupes horizontales aux niveaux z=0, z=h/2 et z=h respectivement, tandis que la figure (IV.20d) est une coupe transversale qui passe par le milieu du domaine. Cette présentation est choisie pour permettre une visualisation de la concentration de polluant dans les différents niveaux d'une rue.

En plaçant la source d'émission en amont des blocs alignés ou orientés on observe deux comportements complètement différents de la dispersion des polluants pour chacun des cas comme le présente la figure(IV.20

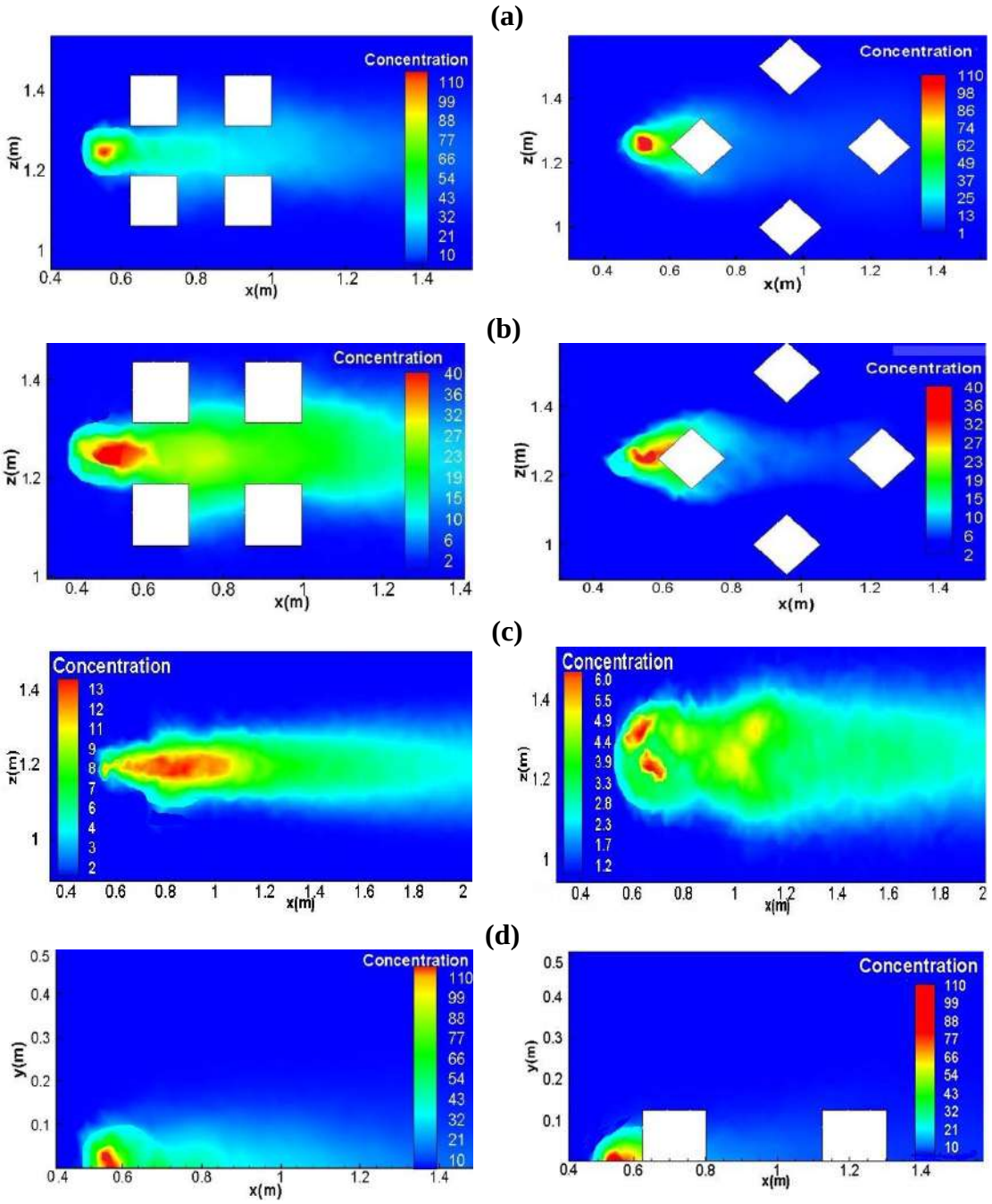


Figure (IV.20) **:***Comparaison des valeurs de concentrations du polluant pour une source localisé en amont des obstacles avec une vitesse expérimentale pour le cas de 4 blocs alignés et orientés a) au niveau du sol b) au milieu des obstacles c) au niveau des toitures d) plan transversal au milieu de la rue.*

Pour des obstacles alignés, la zone affectée est plus répandue et prolongée le long de la rue, une forte concentration est détectée au niveau des parois face au vent et qui diminue avec l'augmentation de la distance à partir du bloc. L'alignement des obstacles provoque ce qu'on appel l'effet barre ; un phénomène qui réduit et perturbe l'écoulement et qui cause par conséquent l'accumulation des polluants en aval et dans la rue canyon.

Par contre dans le cas des blocs orientés d'un angle de 45°, les valeurs de concentration des polluants dans l'air sont beaucoup moins importantes due à la nature de l'écoulement aux angles des constructions. En effet, l'orientation des rues par rapport à l'axe principal est un des facteurs déterminant de la profondeur et de l'ampleur de la zone de dispersion de polluant.

On remarque que le 1erbloc localisé face à la source est extrêmement exposé à la pollution et joue le rôle d'un écran capteur qui capte les concentrations les plus élevées. Le passage des polluants par-dessus des obstacles est montré sur la figure (IV.20.c) où ces polluants peuvent se déposer sur les toitures des blocs mais avec une très faible concentration car la vitesse du vent augmente avec l'altitude et plus les polluants s'élèvent plus leur dispersion est facilitée et peuvent circuler plus vite et plus loin.

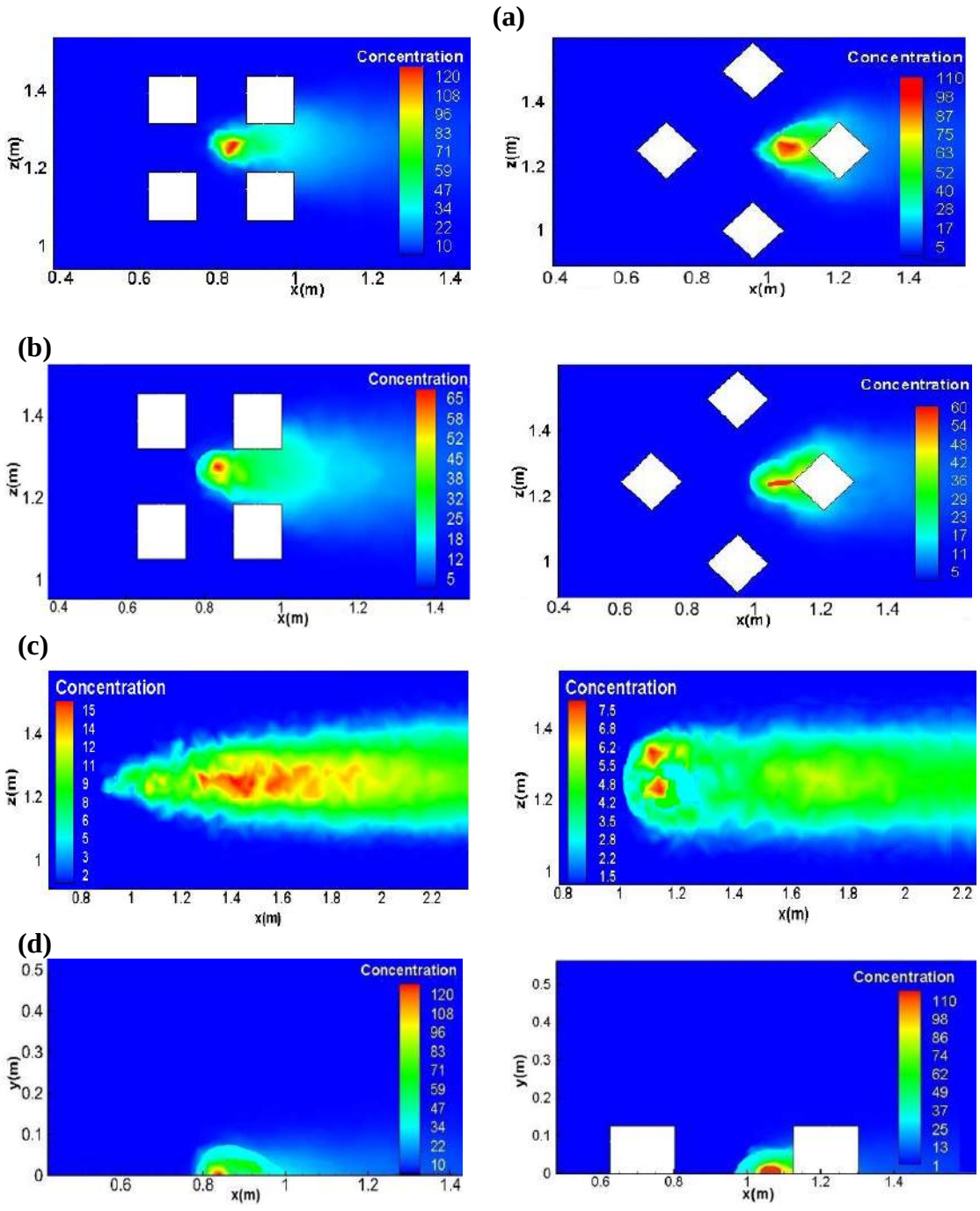


Figure (IV.21) **:** *Comparaison des valeurs de concentrations du polluant pour une source localisé au milieu des obstacles avec une vitesse expérimentale pour le cas de 4 blocs alignés et orientés a) au niveau du sol b) au milieu des obstacles c) au niveau des toitures d) plan transversal au milieu de la rue.*

Dans le cas d'une source placée au milieu des obstacles, précisément au point des intersections des rues canyons comme montré sur la figure(IV.21) , le comportement d'écoulement et de dispersion des polluants est presque le même que celui d'une source placée en amont avec des valeurs de concentration en polluant qui sont un peu plus élevées. Cela est dû principalement aux tourbillons situés en aval des blocs. Les blocs alignés placés au 1er plan ne sont pas touchés par la pollution car il n'ya pas de retour possible de polluants ; en revanche dans les couloirs crées par ces blocs, la concentration est toujours plus forte au niveau des surfaces face au vent que celle pour le cas des blocs orientés. Dans le cas de ce dernier, les canalisations alignées s'estompent provoquant une réduction de la vitesse de l'air et l'espacement entre les blocs alignés est plus étroit et ça gène et bloque le processus de dispersion des substances polluées au niveau des réseaux de rues qui risque de créer au fil du temps des nuisances dramatiques pour les habitants. Dans le cas des blocs orientés, on remarque que la structure des réseaux de rue facilite la diffusion comme on a vu dans la structure de l'écoulement à l'exception du bloc en face de la source d'émission qui absorbe tout le choc possible et accumule la plus forte concentration ce qui le rend la zone la plus critique. Ainsi, on peut dire que la profondeur et l'allure de la zone de dispersion au niveau d'un canal dépend de l'orientation de ces couloirs par rapport au vent.

D'après les coupes, on remarque des valeurs de taux de concentration au niveau du sol où les polluants qui sont émis en surface sont rapidement mélangés par la turbulence dans la couche limite atmosphérique ce qui explique leurs valeurs supérieures par rapport aux valeurs données en un niveau plus élevé (y=h/2) qui est à son tour plus élevée qui celle au niveau des toits (y=h) (Fig. IV.21c).

On peut conclure que la morphologie urbaine aune influence notable sur la structure de l'écoulement et les modifications dues aux formes des constructions urbaines modifient fortement les conditions de circulation de l'air ; car ces constructions par leurs actions sur le vent peuvent se protéger mutuellement et qu'on appel l'effet de masque urbain.

IV.4.4.2 Effet de nombre de Reynolds:

Comme nous l'avons déjà abordé dans le cas bidimensionnel, le vent est l'un des paramètres météorologiques les plus importants pour le transport et la dispersion des polluants. En effet en instant donné, le flux de polluants va subir, dès son entrée dans l'atmosphère, un transport dont la direction et la vitesse seront fonction de celles du vent. Le polluant sera emportée, en même temps que la masse d'air où elle pénètre, d'autant plus vite que la force du vent sera importante, la vitesse du vent est la manifestation du mouvement général de la masse d'air. Mais au sein de celle-ci règne la turbulence qui est la manifestation du déplacement aléatoire de volume d'air et agit sur le panache de polluant en le dispersant dans toutes les directions. Le polluant est dispersé d'autant plus vite que la turbulence est élevée et on dit donc qu'il existe une relation évidente entre la vitesse du vent et les niveaux de concentrations de polluants.

L'effet de la vitesse du vent sur la dispersion du polluant est illustré par des simulations de la dispersion pour une vitesse du vent à l'entrée du domaine égale au double de la vitesse de référence soit 8 m/s. Les figures (IV.22) et (IV.23) montrent l'effet de la vitesse du vent sur la dispersion des polluants dans l'atmosphère pour les différentes zones (a, b, c et d) des deux configurations dont les blocs sont alignés et orientés et pour la source en amont des blocs ou aux intersections. On observe par conséquent que la dispersion du polluant augmente avec la vitesse et la turbulence du vent et les valeurs de concentration sont presque réduites par la moitié par rapport au cas précédent. Il est évident de dire que le vent est favorable à la dispersion des polluants et que le vent est un facteur essentiel dans la dispersion. Lors de vent faible, les polluants stagnent ce qui engendre une stabilisation, voire une dégradation de la qualité de l'air par cumul. Dans les grande agglomérations urbaine avec des sources de polluants interne (émissions par les voitures ou par les habitassions) ou externe (usines, décharge, …) un temps stable peut provoquer de grave crises à cause de la mauvaise qualité de l'air pour une zone urbaine dont la conception ne tient pas compte ce paramètre. Le seul moyen sera de réduire les émissions en limitant par des lois le nombre de voitures en circulation pendant les périodes à très faible vitesse de vent, où même fermer les écoles.

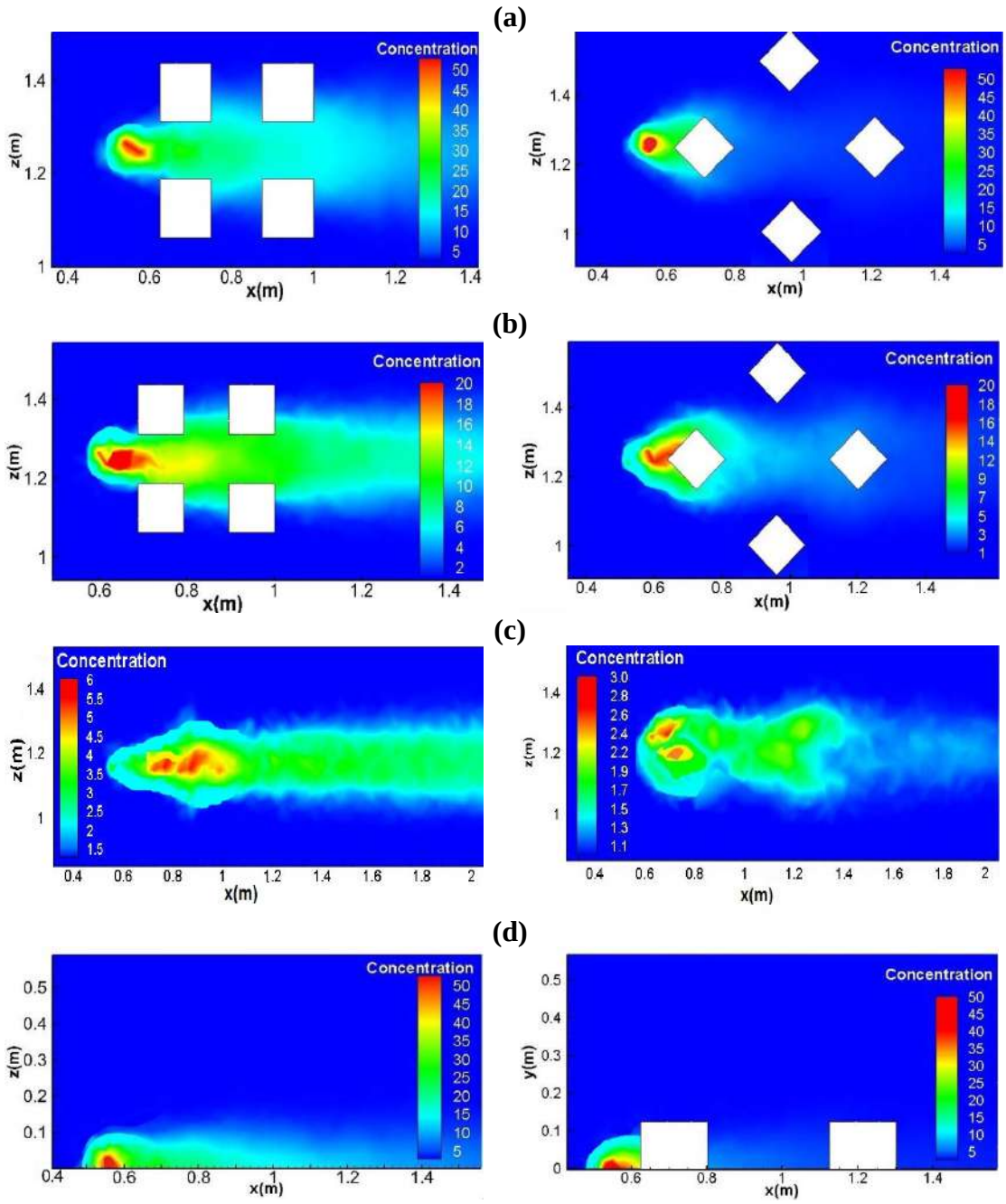


*Figure (IV.22)***:** *Comparaison des valeurs de concentrations du polluant pour une source localisé en amont des obstacles avec une vitesse doublée pour le cas de 4 blocs alignés et orientés a) au niveau du sol b) au milieu des obstacles c) au niveau des toitures d) plan transversal au milieu de la rue.*

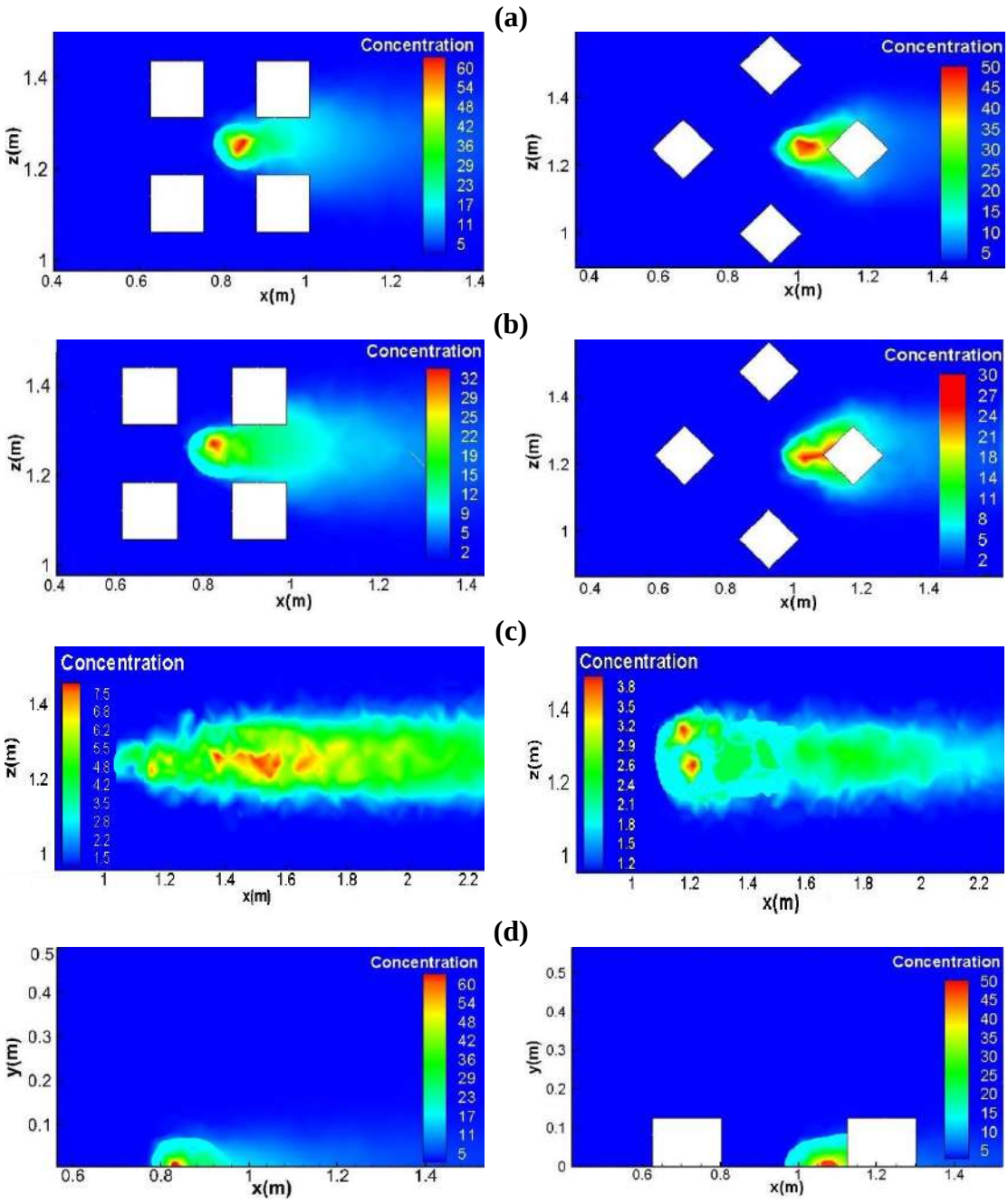


Figure (IV.23) **:** *Comparaison des valeurs de concentrations du polluant pour une source localisé au milieu des obstacles avec une vitesse doublée pour le cas de 4 blocs alignés et orientés a) au niveau du sol b) au milieu des obstacles c) au niveau des toitures d) plan transversal au milieu de la rue.*

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les caractéristiques d'écoulement et la dispersion des polluants autour du bâtiment qui ont été étudiées numériquement à l'aide de trois modèles de fermeture de turbulence RANS, à savoir le modèle k-ε standard, le modèle k-ε réalisable et le modèle k-ε RNG ont été simulé. Deux configurations physiques ont été considérées dans l'étude 2D: un seul obstacle isolé et deux obstacles formant une rue canyon idéalisée et l'étude comparative 3D pour quatre blocs posés dans un 1er test alignés où le vent souffle perpendiculaire à l'axe, et orientés dans la 2eme configuration qui a pour but la détermination de l'effet de l'orientation des rues par rapport à l'axe principal sur la dispersion des polluants dans l'air. Les simulations numériques ont été effectuées avec le code OpenFOAM® source qui utilise la méthode des volumes finis pour résoudre les équations de transport de la masse, de la quantité de mouvement, de l'énergie cinétique turbulente et du taux de dissipation turbulente. Cette étude est une étape intermédiaire qui servira d'étude de base pour de futures simulations d'utilisation de l'approche RANS avec les modèles de turbulence k-ε (standard, RNG et réalisable), k-omega et SST. La méthode RANS n'a pas été beaucoup utilisée dans les recherches précédentes pour reproduire une distribution précise du champ de vitesse derrière un bâtiment et prédire la dispersion atmosphérique des polluants.

Un indicateur statistique traduisant le taux de succès du modèle notamment :

- L'apparition d'une cellule principale sous forme tourbillonnaire au milieu de la rue dont l'axe coïncide avec celui de la ruecanyon.
- Une zone de séparation de l'écoulement au niveau du toit du bloc sous levent.
- Unezonedecisaillementdevitesseduventaudéçusdutoitdublocamont.
- Une zone de recirculation de l'air en aval du bâtiment au vent avec entrainement de l'air à l'intérieur de larue.
- L'accumulation des polluants émis à partir des sources linéiques au sol au niveau de la face sous le vent dubâtiment.

D'après cet indicateur nos testsde simulation s'avèrent avec succès et ont révélé que le modèle RNG k-ε donne les meilleurs résultats par rapport aux autres modèles de type RANS.

Pour le cas 2D les simulations numériques ont été validées avec des données expérimentales en soufflerie en adaptant le modèle empirique de turbulence constante à l'aide du code open source OpenFOAM®. Il a été constaté que le RNG k-ε avec les coefficients modifiés $C\varepsilon_1 = 1,3$ et $C\mu = 0,09$ offre le meilleur compromis entre les résultats qualitatifs et quantitatifs par rapport aux mesures expérimentales.

La dispersion des polluants atmosphériques est dominée par les interactions vent - obstacle mais aussi par la localisation de la source ponctuelle. Pour la dispersion des polluants sur un obstacle isolé, il a été constaté qu'une accumulation de polluants provoque une concentration élevée immédiatement à côté de l'émission si la source était située à l'obstacle en aval. Cela s'explique par le fait que dans cette zone, une zone de recirculation à faible turbulence est installée. Dans le cas de rue canyon idéalisé, où la source ponctuelle est située dans le canyon, le polluant est piégé et transporté verticalement en balayant la face verticale du premier bloc. De plus, une petite zone de recirculation supplémentaire est observée près du sol (à environ 0,6 hauteur de bloc), ce qui entraîne une très forte concentration de polluants dans cette zone. Il a été démontré que la concentration diminue presque linéairement avec l'augmentation de la vitesse du vent.

Pour le cas 3D, l'étude comparative a montrée l'impact non négligeable de l'orientation de réseau de rues d'un angle de 45° par rapport à l'axe principale sur la dissipation où les valeurs de concentration des polluants dans l'air sont beaucoup moins importantes due à la nature de l'écoulement aux angles des constructions et montre que l'orientation des rues est un des facteurs déterminant de la profondeur et de l'ampleur de la zone de dispersion de polluant.

Soit disant que la morphologie urbaine joue un rôle extrêmement important affectant le phénomène de la pollution et comme il est difficile de modifierradicalement la morphologie d'une ville existante, il faut quand même prendre en considération ce facteur majeur dans les futures constructions pour réduire le risque d'entraîner des impacts environnementaux irréversibles.

Les conséquences de la prise en compte du facteur d'amélioration de la qualité de l'air qu'on respire à l'heure actuelle et de s'assurer que des générations futures doivent évoluer dans un environnement sain, et la question qui doit se poser ; Comment

protéger l'environnement ?Nous mènent à envisager plusieurs futurs travaux basés sur celui-ci comme recommandations pour compléter cette étude, on peut suggérer donc :

- La simulation avec d'autres méthodes de modélisation de la turbulence comme l'approche DNS qui est un outil très précis en qualité de maillage et de résultat,
- La réalisation des modèles physiquesavec hauteur et largeur étudiées précisément traitant l'impact de la géométrie architectural et l'organisationspatial des bâtiments sur la dispersion de la pollution atmosphérique,
- Introduire l'effet de température sur le comportement des polluants et les taux de concentration.

Et on finit par dire que si l'homme prend bien soin de son environnement et de la nature qui lui entour, elle prendra en revanche soin de lui et son indispensable exploitation sera durable.

Ce présent travail a fait l'objet d'une publication internationale dans

Environmental Fluid Mechanics (2019) Vol 19, p: 379–400

L'intitulé de l'article est :

Numerical study of flow characteristics and pollutant dispersion using three RANS turbulence closure models

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUE

Bibliographies

[1] Public health, environmental and social determinants of health (PHE), Air quality guidelines - global update 2005, Summary of risk assessment, © World Health Organization 2006, World Health Organization, 20 Avenue Appia, 1211 Geneva 27, Switzerland ; e-mail: bookorders@who.int).

[2] Nicholson, S.E., 1975. A pollution model for street-level air. *Atmospheric Environment* 9, 19–31.

[3] Vardoulakis, S., Fisher, B.E.A ., Pericleous, K., Gonzalez-Flesca, N., 20 03. Modelling air quality in street canyons: a review. Atmospheric Environment 37,155–182.

[4] Baik, J.-J.et Kim, J.-J. : 1999 A Numerical Study of Flow and Pollutant Dispersion Characteristics in Urban Street Canyon, J. Appl. Meteorol., 38,1576-1589. --

[5] Owen, B., Edmunds, D. J. et Carruthers, D. W. : 1999, Use of a new generation urban scale dispersion model to estimate the concentration of oxides of nitrogen and sulphur dioxide in a large urban area., Sci. Total Environ. , 235,277-291.

[6] Hertel,O.,Berkowicz,R.,1989c. Operational Street Pollution Model (OSPM): Evaluation of the Model on Data from St.Olavs Street in Oslo. NERI, Roskilde,Denmark.

[7] CASSADOU S., NICOULET I., NOPPE J., CHIRON M., ROUHAN A. B., A., BASSI C. C., L., VINOT J. P., DESQUEYROUX H. & NEDELLEC V. Sélection des agents dangereux à prendre en compte dans l'évaluation des risques liés aux infrastructures routières. Ministère de la santé et des solidarités 2++004a. 78 p.

[8] CASSADOU S., NICOULET I., NOPPE J., CHIRON M., ROUHAN A. B., A., BASSI C. C., L., VINOT J. P., DESQUEYROUX H. & NEDELLEC V. Sélection des agents dangereux à prendre en compte dans l'évaluation des risques liés aux infrastructures routières: Annexes. Ministère de la santé et des solidarités 2004b. 166 p.

[9] CASSADOU S., QUENEL P., ZEGHNOUN A., SAVIUC P., PROUVOST H., PASCAL L., NUNES C., MEDINA S., LE TERTRE A., FILLEUL L., EILSTEIN D. & DECLERCQ C. Impact sanitaire de la pollution atmosphérique : des questions et des réponses. : 2003. Vol 4, n°1.

[10] CHIRON M. La pollution de l'air par les transports : Effets sur la santé. Communication personnelle. Communication orale personnelle. : 2004b.

[11] DELORAINE A. & SEGALA C. Quels sont les impacts de la pollution atmosphérique sur la santé ? Paris (France) La Documentation Française, 2001. 87 p.

[12] Garry Thomson, The Museum Environment, International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, Butterworth-Heinemann, 1986, ISBN 0750620412, 9780750620413.

[13] Hervé Le Treut, Jean-Marc Jancovici, L'effet de serre, allons-nous changer le climat ?, Flammarion, 2004 (ISBN 2-08-080081-7).

[14] MARTIN J. & MAYSTRE L. Y. Santé et pollution de l'air. Lausanne (Suisse) Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 1988. 250 p.

[15] ATMO. Les polluants en question. Dépliant de synthèse. FEDERATION ATMO. Disponiblesur :http://www.atmo-france.org/.

[16] Stull, R. B. : 1988, An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic publishers, Dordrecht, The Netherlands,670pp.

[17] Oke, T.R. (1978) : Boundary Layer Climates, Londres, Methuen, Éditeur(s). Les Presses de l'Université de Montréal, ISSN 0705-7199 (imprimé), 1492-143X (numérique), Volume 32, numéro 3, 1978.

[18] Oke, T. R. (2006). Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. Instruments and Observing Methods, Report No. 81, WMO/TD No. 1250.

[19] Roth, M. : 2000, Review of atmospheric turbulence over cities, Q. J. R. Meteorol.Soc., 126,941-990.

[20] Raupach, M. R., Thorn A. S. et Edwards, I. : 1980, A wind tunnel study of turbulent flow close to regularly arrayed rough surfaces, Boundary-Layer Meteorol. , 18,373-397.

[21] Oke T.R. (1988). Street design and urban canopy layer climate. Energy and Buildings, vol. 11,p103-113.

[22] Sini, J.-F., Anquetin, S., Mestayer, P.G., 1996. Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons. Atmospheric Environment 30 (15),2659–2677.

[23] Meroney, R.N., Pavageau, M., Rafailidis, S., Schatzmann, M., 1996. Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 62,37–56.

[24] Chan, A. T., So, E. S. P. et Samad, S. C. : 2001, Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality, Atmos. Environ. , 35,5681-5691.

[25] DePaulFT., SheihCM.(1985)A tracer study of dispersion in an urban street canyon.*Atmospheric Environment*, 19:555-559.

[26] Géorgii,H.W, The Effect of Air Pollution on Urban Climates. Bull. Of the World Health Org.,40,4,PP.624-635(1969).

[27] Xie Xiao-min, WANG Jia-song, HUANG Zhen., 2009. Traffic Emission Transportation in Street Canyon. Journal of Hydrodynamics,21(1):108-117.

[28] Schatzmann, M., Liedtke, J., Leitl, B., Kovar, A., 1999. Modelling and validation in an urban environment. In: Borrel, P.M., Borrel, P. (Eds.), Proceedings of the EUROTRAC Symposium 1998. WIT Press, Southampton, pp.673–678.

[29] BerkowiczR., KetzelM., VachonG., LoukaP., RosantJM., Mestayer PG., Sini JF. (2002) Examination of traffic pollution distribution in a street canyon using the Nantes 99 experimental data and comparison with model results. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2: 311-324.

[30]EliassonI.,OfferleB.,GrimmondCSB., LindqvistS.(2006)Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon**.** *Atmospheric Environment*, 40: 1–16.

[31] PavageauM., SchatzmannM.(1999) Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon. *Atmospheric Environment*, 33: 3961-3971.

[32] MeroneyRN., LeitlBM.,RafailidisS., SchatzmannM.(1999)Wind tunnel and numerical modelling of flow and dispersion about several building shapes.*Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81: 333-345.

[33] MurakamiS., MochidaA.(1988) 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: 283-303.

[34] Iaccarino G., OoiA., Durbin PA., BehniaM. (2003)Reynolds averaged simulation of unsteady separated flow. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 24: 147-156.

[35] MurakamiS., MochidaA.,HayashiY. (1990)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*, 35:87-100.

[36] ChengY., LienFS., YeeE., SinclairR.(2003) A comparison of large Eddy simulations with a standard k–ε Reynolds-averaged Navier-Stokes model for the prediction of a fully developed turbulent flow over a matrix of cubes. *Journal of Wind Engineering and IndustrialAerodynamics*, 91:1301-1328.

[37] KöseDA., DickE.(2010) Prediction of the pressure distribution on a cubical building with implicit LES. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 98:628-649.

[38] MauriziA.(2000) Numerical simulation of turbulent flows over 2D valleys using three versions of the k-ε closure model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 85:59-73.

[39] LatebM., MassonC.,StathopoulosT., BédardC. (2013)Comparison of various types of k-ε models for pollutant emissions around a two-building configuration. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 115:9-21.

[40]ChanTL.,DongG.,LeungCW., CheungCS., HungWT.(2002) Validation of a two dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon. *AtmosphericEnvironment*, 36:861–872.

[41]HangJ.,LuoZ.,SandbergM., GongJ.(2013) Natural ventilation assessment in typical open and semi-open urban environments under various wind directions. *Building and Environment*, 70:318–333.

[42]MiaoY.,LiuS.,ZhengY., Wang S., LiY.(2014) Numerical study of traffic pollutant dispersion within different street canyon configurations. *Advances in Meteorology*, 458671

[43]AdairD.,JaegerM.(2014) Evaluation of Model for Air Pollution in the Vicinity of Roadside Solid Barriers. *Energy and Environmental Engineering*, 2:145 - 152

[44]KimYC., Tamura Y.(2015)Simulation of wind pressures on a target low-rise building in large group by RANS turbulence model. *Journal of Aerospace Engineering*, 28:04014082-1-1.

[45]HoydyshWG.,DabberdtWF.(1988) Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons. *Atmospheric Environment*, 22: 2677-2689.

[46]BerkowiczR.(1997) Modelling street canyon pollution: model requirements and expectations. *International Journal of Environment Pollution*, 8:609-619.

[47]HuangH.,AkutsuY.,AraiM., Tamura M. (2000)A two-dimensional air quality model in an urban street canyon: evaluation and sensitivity analysis. *Atmospheric Environment*, 34:689-698.

[48]BaikJJ., KimJ. (2002) On the escape of pollutants from urban street canyons. *Atmospheric Environment*, 36:527–536.

[49] CaiX-M., BarlowJF., Belcher SE. (2008)Dispersion and transfer of passive scalars in and above street canyons—Large-eddy simulations. *Atmospheric Environment*, 42:5885– 5895.

[50]SagradoAPG., van BeeckJ., RambaudP.,OlivariD.(2002) Numerical and experimental modelling of pollutant dispersion in a street canyon. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90:321–339.

[51]MurenaF.,GarofaloN.,FavaleG. (2008)Monitoring CO concentration at leeward and windward sides in a deep street canyon. *AtmosphericEnvironment*, 42:8204–8210.

[52]LiuC-H., LeungD YC, BarthMC.(2005) On the prediction of air and pollutant exchange rates in street canyons of different aspect ratios using large-eddy simulation. *AtmosphericEnvironment*, 39:1567–1574.

[53]MurenaF.,FavaleG.(2007) Continuous monitoring of carbon monoxide in a deep street canyon. *Atmospheric Environment*, 41:2620–2629.

[54] Roustan Y (2005) Modélisation de la dispersion atmosphérique du mercure, du plomb et du cadmium à l'échelle européenne, (Thèse de doctorat de l'École des Ponts/ParisTech.

[55]Sotiris Vardoulakis, Bernard E.A. Fisher, KoulisPericleous, Norbert Gonzalez-Flescac ; Modelling air qualityin street canyons: a review Atmospheric Environment ; Atmospheric Environment 37 (2003) 155–182 37 (2003) 155–182.

[56]Jarosz N (2003) Étude de la dispersion atmosphérique du pollen de maïs: contribution à la maîtrise des risques de pollinisation croisée (Thèse de Doctorat, INAPG AgroParisTech).

[57] Soulhac L (2000) Modélisation de la dispersion atmosphérique à l'intérieur de la canopée urbaine, (Doctoral dissertation, École Centrale de Lyon), 349 pages.

[58]Yucong Miao, Shuhua Liu, YijiaZheng, Shu Wang, and Yuan Li; Numerical Study of Traffic Pollutant Dispersion Within Different Street Canyon Configurations,Hindawi Publishing Corporation, Advances in Meteorology, Volume2014,ArticleID458671,14pages.

[59] G. SeetaRatnam, S. Vengadesan, Performance of two equation turbulence models for prediction offlowandheattransferoverawallmountedcube; International Journal of Heat and Mass Transfer 51(2008) 2834-2846.

[60] CHEN Bicheng , LIU Shuhua, MIAO Yucong, WANG Shu and LI Yuan, Construction and Validation of an Urban Area Flow and Dispersion Model on Building ScalesDepartment of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871; ActaMeteor. Sinica, (2013) 27(6), 923–941, 10.1007/s13351-013-0504-1.

[61] Ai ZT, Mak CM, CFD simulation of flow in a long street canyon under a perpendicular wind direction: Evaluation of three computational settings, *Building and Environment* (2017), doi: 10.1016/j.buildenv.2016.12.032.

[62] ZhiShen, Bobin Wang, Guixiang Cui*, ZhaoshunZhang ; Flow pattern and pollutant dispersion over three dimensional building arrays ; Science Direct, ELSIVIER, Atmospheric Environment 116(2015) 202-215.

[63]FraukePascheke · Janet F. Barlow · Alan Robins, Wind-tunnel Modelling of Dispersion from a Scalar Area Source in Urban-Like Roughness; Boundary-Layer Meteorol (2008) 126 :103-124 DOI 10.1007/s10546-007-9222-5.

[64] Wang,B-C.,Yee,E.andLien,F-S. (2010)'Predictionofsecond-orderconcentrationstatisticsfordispersingplumesinobstacle arrays',*ProgressinComputationalFluidDynamics*,Vol.10,No.4,pp.252–262.

[65] S. Branford · O. Coceal · T. G. Thomas · S. E. Belcher, Dispersion of a Point-Source Release of a Passive Scalar Through an Urban-Like Array for Different Wind Directions, Boundary-Layer Meteorol (2011) 139:367–394, DOI 10.1007/s10546-011-9589-1.

[66] L. Soulhac, V. Garber, P. Salizzoni, P. Mejean, R.J. Perkins ; Flow and dispersion in street intersections, ScienceDirect, Atmospheric Environment 43 (2009) 2981-2996.

[67] SašaKenjereš, Sinta de Wildt, Tom Busking, Capturing transient effects in turbulent flows over complex urban areas with passive pollutants ; International Journal of Heat and Fluid Flow 51 (2015) 120-137.

[68] P. Gousseau, B. Blocken, T. Stathopoulos, G.J.F. van Heijst, CFD simulation of near-field pollutant dispersion on a high-resolution grid: A case study by LES and RANS for a building group in downtown Montreal,Atmospheric Environment 45 (2011) 428-438.

[69] T.J. CHANDLER, (1976), Urban climatology and its relevance to urban design, OMM Tech Note 149, Genève, p. 61.

[70]EliassonI.,OfferleB.,GrimmondCSB., LindqvistS.(2006)Wind fields and turbulence statistics in an urban street canyon**.** *Atmospheric Environment*, 40: 1–16.

[71]BogoH.,GómezD.,ReichS., NegriR., San RománE.(2001) Traffic pollution in downtown of Buenos Aires City. *Atmospheric Environment*, 35: 1717-1727.

[72]SalimMS.,CheahSC., Chan A.(2011)Numerical simulation of dispersion in urban street canyons with avenue-like tree plantings: Comparison between RANS and LES. *Building and Environment*, 46:1735-1746.

[73]WangJ-S., HuangZ. (2007) A TVD scheme for incompressible flow coupled with different turbulence models on a ground-mounted square rib-flow. *Journal of Hydrodynamics Serie B*, 19:743-750.

[74]TominagaY.,StathopoulosD.(2009) Numerical simulation of dispersion around an isolated cubic building: comparison of various types of k-ε models. *Atmospheric environment*, 43:3200-3210.

[75]HoydyshWG.,DabberdtWF.(1988) Kinematics and dispersion characteristics of flows in asymmetric street canyons. *Atmospheric Environment*, 22: 2677-2689.

[76]AddisonPS.,CurrieJI.,LowDJ., McCannJM.(2000) An integrated approach to street canyon pollution modeling. *Environment Monitoring and Assessment*, 65:333-342.

[77]LaunderBE., Spalding DB.(1972) Lectures in mathematical models of turbulence, Academic Press.

[78] Shih, T.-H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z., and Zhu, J. (1995) A New - Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation. *Computers Fluids*, 24:227-238.

[79]YakhotV.,OrszagSA.(1986) Renormalization group analysis of turbulence: Basic theory. *Journal of Scientific Computation* 1:1-51.

[80]CEDVAL (2013) Compilation of experimental data for validation of micro scale dispersion models. Available at http://www.mi.uni-hamburg.de/cedval/. Accessed sept. 2013.

[81]ChanaTL.,DongaG.,LeungCW.,CheungCS., HungWT.(2002) Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon. *Atmospheric Environment* 36:861–872.

[82]Stabile L., ArpinoF.,BuonannoG., RussiA., FrattolilloA. (2015). A simplified benchmark of ultrafine particle dispersion in idealized urban street canyons: A wind tunnel study. *Building and Environment*, 93:186-198.

[83] MeiS-J., LiuC-W., LiuD.,ZhaoF-Y., WangH-Q., LixH. (2016)Fluid mechanical dispersion of airborne pollutants inside urban street canyons subjecting to multi-component ventilation and unstable thermal stratifications. *Science of Total Environment*, 565:2016-2115. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.05.150.

[84] Stull, R. B. : 1988, An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic publishers, Dordrecht, The Netherlands, 670pp.

[85] Garratt, J. R. : 1992, The Atmospheric Boundary Layer , Cambridge Atmospheric andSpace Science Series - Cambridge University Press, 316pp.

[86]Launder, B. E. et Spalding, D. B. : 1974, The numerical computation of turbulent ow,Comp. Meth. Appl. Mech. Eng., 3,269-28.

[87] Byrne CEI, Holdo AE (1998) Effects of increased geometric complexity on the comparison between computational and experimental simulations. J Wind Eng IndustAerodyna73:159–179.

[88] Lien, F.-S., Yee, E., 2004. Numerical modelling of the turbulent flow developing within and over a 3-D building array, part I: a high resolution Reynolds-averaged Navier-Stokes approach. Boundary-Layer Meteorology 112,427–466.

[89] Hargreaves, D., Wright, N., 2006 . On the use of k-ε model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 95,355–369.

[90] Castro, I.P., Apsley, D.D., 1997. Flow and dispersion over topography: acomparison between numerical and laboratory data for two-dimensional flows. Atmo-spheric Environment 31,839–850.

[91] Solazzo, E., Vardoulakis, S., Cai, X., 2007. Evaluation of traffic producing turbulence schemes withinoperational dispersion model using road side measurements. Atmospheric Environment 41,5357–5370.

[92] Paul Langevin ; Sur la théorie du mouvement brownien, Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences 146 (1908), 530-532.

[93] THOMSON, D. J. 1987 Criteria for the selection of stochastic models of particle trajectories in turbulent flows. J. FluidMech. 180, 529-556.

[94] Wilson, J.D., Sawford, B.L. Review of Lagrangian stochastic models for trajectories in the turbulent atmosphere. Boundary-Layer Meteorol 78, 191–210 (1996). https://doi.org/10.1007/BF00122492.

[95] Carruthers, D. J., Holroyd, R.J., Hunt, J. C. R., Weng, W. S., Robins, A. G., Thomson, D. J., Smith, F. B., 1994. UK-ADMS, a new approach to modelling dispersion in the earth'satmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **52**, 139-153.

[96] Moser, R. D., Kim, J. et Mansour, N. N., 1999. Direct numerical simulation of turbulent chanel flow up to Re = 590, *Physics of Fluid*, **11**, 4, 943-945.

[97] Smagorinsky, J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations, part I: The basic experiments. *Mon. Wea. Rev*., **91**, 99.

[98] Deardorff, J. W. 1970. A numerical study of the three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds Numbers. *J. FluidMech*., **41-2**, 453-480.

[99] Redelsperger, J. L., et Sommeria, G., 1981. Méthode de représentation de la turbulence d'échelle inférieure à la maille pour un modèle tridimensionnel de convection nuageuse. *Boundary-Layer Meteorol.*, **21-4**, 509-530.

[100] S. Patankar. Numerical heat transfer and fluid flow, 1980. ISBN 9780891165224. PublishedJune 20, 2006 by CRC Press. 214 Pages.

[101] H. K. Versteeg and W. Malalasekera. An introduction to computational fluid dynamics : the finite volume method. Pearson education, 2007. ISBN: 978-0-13-127498-3.

[102] J. H. Ferziger and M. Peric. Computational methods for fluid dynamics. Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 978-3-642-56026-2.

[103] B. Taylor. Method us increment orumdirecta& inversa. Inny, 1717.

[104] R. Peyret and T. D. Taylor. Computational methods for fluid flow. Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 978-3-642-85952-6.

[105] T. J. Chung. Finite element analysis in fluid dynamics. NASA STI/ReconTechnical Report A, 78, 1978.

[106] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor, and J. Z. Zhu. The finite element method :its basis and fundamentals. Elsevier, 2005. eBookISBN: 9780080472775. Paperback ISBN: 9781493302888, 752 pages.

[107] C. Canuto, M. Y. Hussaini, A. Quarteroni, and A. Thomas Jr. Spectral methods influid dynamics. Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 978-3-642-84108-8.

[108] ANSYS Fluent. https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent. visité en 2014.

[109] ANSYS CFX. https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-cfx. visité en 2015.

[110] OpenFOAM. https://www.openfoam.com/. visité en 2013.

[111] CFD ONLINE. https://www.cfd-online.com/. visité en 2013.

[112] Pointwise Tutorial Workbook, Inc. 213 S. Jennings Ave. Fort Worth, Texas 76104-1107, USA, Email: support@pointwise.com URL: http://www.pointwise.com. Visité en 2016.

[113] GAMBIT. http://www.stanford.edu/class/me469b/handouts/geoandgrid.pdf visité en 2016.

[114] Swak4Foam. https://openfoamwiki.net/index.php/Contrib/swak4Foam. visité en 2014.

[115] Salim .M. Salim, and S.C. Cheah, Wall y^+ Strategy for Dealing with Wall-bounded Turbulent Flows, **Conference Paper**· January 2009, Source: DOAJ.

[116] Tominaga Y (2015) Flow around a high‐rise building using steady and unsteady RANS CFD: effect oflarge‐scale fluctuations on the velocity statistics. J Wind Eng IndAerodyn 142:93–103.

[117] Cours de modélisation des écoulements turbulents par Dr Faiçal NAIT BOUDA.

ANNEXES

Annexe 1 :

```
/*---------------------------------*- C++ -*-------------------
---------------*\
| =========                 |
|
| \\      /  Field         | OpenFOAM: The Open Source CFD
Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.1.1
|
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org
|
|    \\/     M anipulation  |
|
\*-------------------------------------------------------------
---------------*/
FoamFile
{
version     2.0;
format      ascii;
classvolScalarField;
location    "0";
object      epsilon;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * * * * * * //

dimensions      [0 2 -3 0 0 0 0];

internalField   uniform 1;

boundaryField
{
inlet
    {
typeturbulentMixingLengthDissipationRateInlet;
mixingLength      0.35;       // 35cm - half channel height

value           $internalField;
    }
outlet
    {
typezeroGradient;
    }
upperWall
    {
typesymmetryPlane;
    }
obstacle
    {
typeepsilonWallFunction;
value           $internalField;
    }
ground
    {
```

```
typeepsilonWallFunction;
value           $internalField;
    }

frontAndBack
    {
typeempty;
    }
}
```

Annexe 2 :

```
/*---------------------------------*- C++ -*-------------------
---------------*\
| =========                |
|
| \\      /  Field         | OpenFOAM: The Open Source CFD
Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.1.1
|
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org
|
|    \\/     M anipulation  |
|
\*-------------------------------------------------------------
---------------*/
FoamFile
{
version     2.0;
formatascii;
class       dictionary;
location    "constant";
objecttransportProperties;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * * * * * * //

transportModel  Newtonian;

nunu [ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1.5e-05;//m^2.s^-1
//D              D[ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 0.01;
SctSct[ 0 0 0 0 0 0 0 ] 0.7;// schmidt number
CrossPowerLawCoeffs
{
    nu0             nu0[ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-06;
nuInfnuInf[ 0 2 -1 0 0 0 0 ] 1e-06;
    m               m[ 0 0 1 0 0 0 0 ] 1;
    n               n[ 0 0 0 0 0 0 0 ] 1;
}
```

Annexe 3 :

```
/*--------------------------------*- C++ -*-------------------
---------------*\
| =========                 |
|
| \\      /  Field         | OpenFOAM: The Open Source CFD
Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.1.1
|
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org
|
|    \\/     M anipulation  |
|
\*-------------------------------------------------------------
---------------*/
FoamFile
{
version     2.0;
formatascii;
class       dictionary;
location    "constant";
objectRASProperties;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * * * * * * //

RASModelRNGkEpsilon;

turbulence      on;

printCoeffs     on;

laminarCoeffs
{
}

kEpsilonCoeffs
{
Cmu         0.09;
    C1          1.44;
    C2          1.92;
alphaEps    0.76923
sigmak      1;//Original value:1
sigmaEps    1.3; //Original value:1.
}

RNGkEpsilonCoeffs
{
Cmu         0.09;
    C1          1.3;
    C2          1.68;
alphak      1.39;
alphaEps    1.39;
    eta0        4.38;
```

```
beta        0.012;
sigmak      0.7179;
sigmaEps    0.7179;
}
realizableKECoeffs
{
Cmu         0.09;
    A0          4.0;
    C2          1.9;
alphak      1;
alphaEps    0.833333;

}
```

Annexe4 :

```
/*---------------------------------*- C++ -*------------------
---------------*\
| =========                 |
|
| \\      /  Field         | OpenFOAM: The Open Source CFD
Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.1.1
|
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org
|
|    \\/     M anipulation  |
|
\*---------------------------------------------------------------
---------------*/
FoamFile
{
version     2.0;
format      ascii;
class       dictionary;
location    "system";
objectcontrolDict;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * * * * * * //

applicationsimpleFoam;

startFromlatestTime;

startTime       0;

stopAtendTime;

endTime         10000;

deltaT          0.1;

writeControltimeStep;

writeInterval   100;
```

```
purgeWrite      0;

writeFormatascii;

writePrecision  6;

writeCompression off;

timeFormat      general;

timePrecision   6;

runTimeModifiable true;

libs (
         "libOpenFOAM.so"
         "libsimpleSwakFunctionObjects.so"
         "libswakFunctionObjects.so"
         "libgroovyBC.so"
     );

functions
{
streamLines
    {
typestreamLine;

        // Where to load it from (if not already in solver)
functionObjectLibs ("libfieldFunctionObjects.so");

        // Output every
outputControloutputTime;
        // outputInterval 10;

setFormatvtk; //gnuplot; //xmgr; //raw; //jplot;

        // Velocity field to use for tracking.
UName U;

        // Tracked forwards (+U) or backwards (-U)
trackForward    true;

        // Names of fields to sample. Should contain above
velocity field!
fields (p k U);

        // Steps particles can travel before being removed
lifeTime        10000;

        // Number of steps per cell (estimate). Set to 1 to
disable subcycling.
nSubCycle 5;

        // Cloud name to use
cloudNameparticleTracks;
```

```
        // Seeding method. See the sampleSets in sampleDict.
seedSampleSet   uniform;  //cloud;//triSurfaceMeshPointSet;

uniformCoeffs
        {
type        uniform;
axis        x;  //distance;

start       (-0.0205 0.001  0.00001);
end         (-0.0205 0.0251 0.00001);
nPoints     10;
        }
    }
}

//
************************************************************
********** //
```

Annexe 5:

```
/*--------------------------------*- C++ -*------------------
---------------*\
| =========                 |
|
| \\      /  Field         | OpenFOAM: The Open Source CFD
Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.1.1
|
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org
|
|    \\/     M anipulation  |
|
\*------------------------------------------------------------
---------------*/
FoamFile
{
version     2.0;
format      ascii;
class       dictionary;
location    "system";
objectfvSchemes;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * * * * * * //

ddtSchemes
{
defaultsteadyState;
}

gradSchemes
{
default         Gauss linear;
```

```
grad(p)         Gauss linear;
grad(U)         Gauss linear;
grad(s)         Gauss linear;
}

divSchemes
{
default         none;
div(phi,U)     bounded Gauss QUICK;
div(phi,k)     bounded Gauss QUICK;
div(phi,epsilon) bounded Gauss QUICK;
div(phi,R)      bounded Gauss QUICK;
div(R)          bounded Gauss QUICK;
div(phi,nuTilda) bounded Gauss QUICK;
div((nuEff*dev(T(grad(U))))) Gauss linear;
div(phi,s)      Gauss Gamma 1.0;
}

laplacianSchemes
{
default         none;
laplacian(nuEff,U) Gauss linear corrected;
laplacian((1|A(U)),p) Gauss linear corrected;
laplacian(DkEff,k) Gauss linear corrected;
laplacian(DepsilonEff,epsilon) Gauss linear corrected;
laplacian(DREff,R) Gauss linear corrected;
laplacian(DnuTildaEff,nuTilda) Gauss linear corrected;
laplacian(s) Gauss linear limited 1.0;

}

interpolationSchemes
{
default         linear;
interpolate(U)  linear;
}

snGradSchemes
{
default         corrected;
}

fluxRequired
{
default         no;
p               ;
}


//
************************************************************
*********** //
```

Annexe 6:

```
/*-------------------------------*- C++ -*-------------------
---------------*\
| =========                 |
|
| \\      /  Field         | OpenFOAM: The Open Source CFD
Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.1.1
|
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org
|
|    \\/     M anipulation  |
|
\*-------------------------------------------------------------
---------------*/
FoamFile
{
version     2.0;
format      ascii;
class       dictionary;
location    "system";
objectfvSolution;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * * * * * * //

solvers
{

s
    {
solverPBiCG;
preconditioner  DILU;
tolerance       1e-06;
relTol          0.1;
    }

p
    {
solver          PCG;
preconditioner  DIC;
tolerance       1e-06;
relTol          0.01;
    }

    U
    {
solverPBiCG;
preconditioner  DILU;
tolerance       1e-05;
relTol          0.1;
    }

k
```

```
    {
solverPBiCG;
preconditioner  DILU;
tolerance       1e-05;
relTol          0.1;
    }

epsilon
    {
solverPBiCG;
preconditioner  DILU;
tolerance       1e-05;
relTol          0.1;
    }

    R
    {
solverPBiCG;
preconditioner  DILU;
tolerance       1e-05;
relTol          0.1;
    }

nuTilda
    {
solverPBiCG;
preconditioner  DILU;
tolerance       1e-05;
relTol          0.1;
    }
}

SIMPLE
{
nNonOrthogonalCorrectors 0;

residualControl
    {
p               1e-2;
       // s               1e-2;//
        U               1e-6;
        "(k|epsilon|omega)" 1e-3;
    }
}

relaxationFactors
{
fields
    {
p               0.3;
        //s               0.3;//

    }
equations
    {
        U               0.7;
```

```
k               0.7;
epsilon         0.7;
        R               0.7;
nuTilda         0.7;
    }
}



//
*********************************************************************
********** //
```

Annexe 7:

```
/*--------------------------------*- C++ -*----------------------------
---------------*\
| =========                 |
|
| \\      /  Field         | OpenFOAM: The Open Source CFD
Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.1.1
|
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org
|
|    \\/     M anipulation  |
|
\*---------------------------------------------------------------------
---------------*/
FoamFile
{
version     2.0;
format      ascii;
classvolVectorField;
object      U;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * * * * * * //

dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];
internalField   uniform (0 0 0);

boundaryField
{
inlet
    {
typegroovyBC;

variables
"Uref=4.1558;Yref=0.375;alpha=0.33;vel=min(Uref*pow(pos().y/Yr
ef,alpha))";
valueExpression "vel";

    }
```

```
outlet
    {
typezeroGradient;
    }

sky
    {
typesymmetryPlane;
    }
sol
    {
typefixedValue;
valueuniform (0 0 0);
    }
droit
    {
typesymmetryPlane;
    }
gauche
{
typesymmetryPlane;
    }
murbloc
    {
typefixedValue;
value           uniform (0 0 0);
    }

toitblock
    {
typefixedValue;
value           uniform (0 0 0);
    }


}

//
**********************************************************************
*********** //
```

Annexe 8:

```
/*--------------------------------*- C++ -*-------------------
---------------*\
| =========                 |
|
| \\      /  Field         | OpenFOAM: The Open Source CFD
Toolbox           |
|  \\    /   O peration     | Version:  2.2.0
|
|   \\  /    A nd           | Web:      www.OpenFOAM.org
|
|    \\/     M anipulation  |
|
\*-------------------------------------------------------------
---------------*/
FoamFile
{
version     2.0;
format      ascii;
classpolyBoundaryMesh;
location    "constant/polyMesh";
object      boundary;
}
// * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * * *
* * * * * * * //

8
(
outlet
    {
type            patch;
nFaces          2792;
startFace       1125688;
    }
    Roof
    {
type            wall;
nFaces          112;
startFace       1128480;
    }
bloc
    {
type            wall;
nFaces          448;
startFace       1128592;
    }
    Ground
    {
type            wall;
nFaces          11266;
startFace       1129040;
    }
leftSide
    {
```

```
typesymmetryPlane;
inGroups        1(symmetryPlane);
nFaces          3616;
startFace       1140306;
    }
sky
    {
typesymmetryPlane;
inGroups        1(symmetryPlane);
nFaces          11524;
startFace       1143922;
    }
rightSide
    {
typesymmetryPlane;
inGroups        1(symmetryPlane);
nFaces          3606;
startFace       1155446;
    }
inlet
    {
type            patch;
nFaces          2792;
startFace       1159052;
    }
)

//
**********************************************************************
*********** //
```

Annexe 9:

Importer un maillage

Bien qu'OpenFOAM permette de mailler des géométries, il est également capable d'importer des maillages faits avec d'autres logiciels comme Pointwise et Gambit. Le tableau suivant donne les commandes à entrer dans une console suivies du chemin vers le maillage à convertir en fonction du format de ce maillage.

Logiciel source	**Commande**
Adventure system (fichiers .msh)	« mshToFoam »
CFX-Mesh 4	« cfx4ToFoam »
Fluent (fichiers .msh)	« fluentMeshToFoam » ou « fluent3DMeshToFoam »
Gambit (fichiers .neu)	« gambitToFoam »
Gmsh (fichiers .msh)	« gmshToFoam »
I-DEAS (fichiers .unv)	« ideasUnvToFoam »
I-DEAS (fichiers ANSYS)	« ansysToFoam »
KIVA3v	« kivaToFoam »
Netgen4.4 (fichiers Neutral)	« netgenNeutralToFoam »
Plot3d (fichiersascii)	« plot3dToFoam »
STAR-CD PROSTAR	« starToFoam »
STAR-CD SAMM	« sammToFoam »
Tetgen (fichiers .ele, .node et .face)	« tetgenToFoam »