

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Architecture
Réf :...../201..



جامعة محمد خيضر – بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المعمارية
المرجع:/201..

Thèse présentée en vue de l'obtention

Du diplôme de

Doctorat en sciences

**IMPACT DE LA MORPHOLOGIE SUR LE MICROCLIMAT URBAIN- CAS
DE L'ILOT TRADITIONNEL COMPLEXE DE GHARDAIA.**

Présentée par MOUFFOK Mostefa

Devant le jury :

Dr BELAKEHAL Azeddine	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr MAZOUZ Said	Professeur	Examinateur	Université de Oum El Bouaghi
Dr OUTTAS-ABDOU Saliha	Professeur	Examinatrice	Université de Constantine
Dr BOUTABBA Hinda	MCA	Examinatrice	Université de Msila
Dr SRITI Leila	MCA	Examinatrice	Université Biskra
Dr ZEMMOURI Noureddine	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra

Soutenu publiquement le : 13-05-2018

REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements

- Au directeur de thèse Pr. **ZEMMOURI Noureddine** pour sa disponibilité, ses précieuses orientations et ses conseils bien réfléchis et bienvenus au moment opportun.
- Au Pr. **BELAKEHAL Azeddine**, d'avoir bien voulu accepté de présider mon jury de thèse.
- Aux membres du Jury : Pr **.MAZOUZ Said** de l'Université de Oum El Bouagui, Pr. **OUTTAS-ABDOU Saliha** de l'Université de Constantine, Dr **BOUTABBA Hinda** de l'Université de Msila, Dr **SRITI Leila** de l'Université de Biskra qui ont bien voulu accepter d'évaluer mon travail et de me faire des recommandations judicieuses.
- Aux Dr **AIDAOUI Lakhdar** et au Dr **LASBET Yahia** de l'Université de Djelfa pour m'avoir soutenu, conseillé et assisté dans les moments difficiles.
- Au Pr. **André DE HERDE** et à tous les membres du laboratoire architecture et climat de Louvain La Neuve (Belgique) pour leur disponibilité, leurs critiques constructives et leur précieux éclairage scientifique.
- Mes remerciements et ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cette thèse en particulier Pr **Andé CHAN**, Dr **KITOUS Samia**, Dr **BENCHEIKH Hmaida**, Mr **CHAHTA Abdelbaki**, Mr **CHERRAK Rabah**, Dr **BOUHADDA Youcef**, A Mr **AMIEUR Rachid**, les membres de L'ONM (agence de Ghardaïa), Mr **TALEB Imad**, Mr **ZEGGAR Abdelhamid**, Mr **BOUKHALKHAL Lamine** et Mr **DAKHIA Azeddine**.
- A mes chers parents, qui sans leur sacrifice, leur compréhension, ce travail n'aurait pu aboutir dans les délais requis.
- A ma famille, mes collègues et mes amis pour leur encouragement à aller de l'avant.

Qu'ils veuillent tous trouver ici l'expression de ma sincère gratitude.

DEDICACES

A mes parents, source de tendresse, d'inspiration et de constance.

A ma femme qui m'a énormément aidé et soutenu.

A mes adorables enfants Hichem, Ilyes, Zakaria & Housseem.

A ma famille

A mes amis.

Résumé:

L'objectif de cette étude est de contribuer à faire connaître le danger de la pollution de l'air, en particulier celle générée par le gaz CO₂ et son impact sur la qualité de l'air et sur la qualité de vieilles bâtisses vestiges de cet art de construire spécifique à la vallée du M'ZAB ; c'est dans ce contexte que ce travail de recherche a pour finalité l'étude de l'impact des morphologies urbaines d'un Canyon urbain, à la structure irrégulière faisant partie du patrimoine architectural du Ksar de Ghardaïa, sur la qualité de l'air. Une méthodologie combinée a été adoptée pour étudier le mouvement de la pollution de l'air dans ce Canyon urbain ; la première démarche consiste en une technique de prises de mesures sur le terrain d'une durée de deux jours (5-6 Juillet 2013) qui dévoilent un faible confort thermique et un taux de CO₂ élevé atteignant les 400 ppm. La seconde démarche est la mise en œuvre de simulations par CFD en 3D qui se sont soldées par des améliorations significatives et par la projection de deux propositions d'optimisation : La première proposition a pour objectif l'augmentation du volume de déplacement du vent parallèle, en réduisant le prospect du Canyon urbain de 1,34 à 0,64; de cette première proposition résulte de notables améliorations de l'ordre de 46% par rapport à la géométrie réelle. La seconde proposition consiste à mieux disperser le CO₂ par rapport à la géométrie réelle par une mise à niveau des bâtiments constituant l'aval du Canyon urbain ; cette configuration de construction inégale a apporté une amélioration de 36% et a permis de mieux dégager la pollution par rapport à la géométrie réelle.

Mot clés : Ghardaïa, morphologie urbaine, CFD, îlot de chaleur urbain, pollution de l'air, CO₂.

ملخص :

غرداية مدينة تقع جنوب الجزائر، تتميز بمخطط عمراني يتكيف بشكل جيد مع المناخ الحار والجاف الذي تمتاز بهما. وقد صنفت هذه المدينة من طرف اليونسكو كتراث عالمي يجب حمايته، بهدف حماية المدينة القديمة من تلوثات الهواء وخاصة من غاز ثاني أكسيد الكربون، هذا الغاز الذي له تأثير كبير على المباني الإباضية القديمة والتميزة. لذا تناولت دراسة هذا البحث إلى حركة سير غاز ثاني أكسيد الكربون المنبعث على المناطق الحضرية وكذا على الشارع الرئيسي الغير منتظم المكون لقصر غرداية.

اعتمدت اثناء البحث منهجية مركبة من خطوتين لدراسة حركة تلوث الهواء بثاني اكسيد الكربون على مستوى الشارع الرئيسي. الخطوة الأولى تضمنت تقنية القياسات الميدانية، حيث ان هذه القياسات اخذت في يومين من شهر جويلية (5 و 6) من سنة 2013، حيث سجلت القياسات مستويات عالية من ثاني اكسيد الكربون تصل الى غاية مستوى 400 جزء في المليون.

الخطوة الثانية كانت باستخدام احدث تكنولوجيات المحاكاة، حيث تم اقتراح تحسينات كبيرة عبر الاقتراحين التاليين :
التحسين الأول تم محاكاته لهدف تحسين زيادة تدفق الرياح الموازية. و ذلك بخفض نسبة الارتفاع و العرض على مستوى آخر الشارع من 1.34 إلى 0.64، هذا الاقتراح الاول قام بتحسينات معتبرة تقدر بنسبة 46% بالمقارنة مع مخطط الشارع الأصلي. التحسين الثاني تم محاكاته قصد تحصيل نتائج تفريق ثاني اكسيد الكربون احسن من نتائج مخطط الشارع الأصلي، وذلك من خلال تخفيض مستوى علو المباني في آخر الشارع، هذا الاقتراح الثاني هو الآخر أتى بتحسينات تقدر ب 36%.

كلمات البحث: غرداية، مورفولوجيا حضرية، المحاكاة، جزيرة الحرارة الحضرية، تلوث الهواء، غاز ثاني اكسيد الكربون.

Abstract:

The city of Ghardaïa located in south of Algeria is characterized by its vernacular urban structure well adapted to the hot arid climate of the region. The old heritage city of Ghardaïa was listed by the UNESCO a protected city. To protect the old city from the polluted air which has a great impact on old building especially from the mean polluted Gaz-CO₂. The aim of this study is to optimize the air quality on irregular canyons.

A combined methodologies were adopted to study the air pollution movement, computational technique and field measurements, field measurements was carried out in the canyon for two (2)days of July (5-6),2013, shows that CO₂ accumulation can reach a high level up to 400ppm.

Computational simulation and significant improvements of more ventilation pathways in the canyon were used. The first improvement was made by increasing the parallel wind flow which reduced the canyon aspect ratio from 1.34-to-0.64; this reduction gives a considerable improvement of 46% of air quality. The second proposition is to disperse CO₂ better than real geometry using uneven building layouts which brings a 36% improvement to the dispersion;

Keywords: Ghardaïa, urban morphology, CFD, urban island of heat, air pollution, CO₂.

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES	10
LISTE DES TABLEAUX	19
NOMENCLATURE	21
CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE	
I.1. Pertinence du choix du site	28
I.2. Problématique	30
I.3. Hypothèses	30
I.4. Objectifs	30
I.5. La méthodologie	30
Chapitre II : LES SOURCES ÉNERGÉTIQUES URBAINES ET ICU	
Introduction	35
II.1. Les sources énergétiques d'un bâtiment	35
II.2. Les sources énergétiques urbaines	37
II.2.a. La chaleur anthropique.....	38
II.2.b. La chaleur sensible	39
II.2.c. La chaleur latente	41
II.2.d. La chaleur de stockage	42
II.2.e. Effet de l'albédo	42
II.3. L'îlot de chaleur urbain	43
II.3.a. Exemple de villes.....	43
II.3.b. ICU variables, et aspects dimensionnelles des villes.....	45
II.3.c. Les principales causes de l'ICU	46
II.4. L'atmosphère urbaine et ICU	48
II.4.a. La canopée urbaine « Urban Canopy Layer UCL »	48
II.4.b. La couche limite urbaine « Urban Boundary Layer UBL ».....	48
Conclusion	50
Chapitre III : MORPHOLOGIES URBAINE ET ÉCOULEMENTS D'AIR	
Introduction	53
III.1. Un Canyon urbain	53
III.1.a. Définitions et études théorique des Canyons.....	53

I.1.b. Définition du terme	54
I.1.c. Régularité et profondeur des Canyon	54
I.1.d. La typologie des Canyon	55
III.1.e. Intérêt de l'étude théorique des Canyons	55
III.2. L'atmosphère et l'écoulement de l'air dans un Canyon	55
III.3. Morphologies urbaine et écoulement du vent dans un Canyon.....	56
III.3.1. Importances des effets des configurations géométriques.....	56
III.3.2. Facteurs qui influencent l'écoulement d'air dans la couche	
(UCL)	57
III.3.2.1. Les configurations urbaines	57
III.3.2.2. Eléments morphologiques urbaines qui ont plus d'impact sur	
l'écoulement d'air	57
III.3.2.2.a. Les configurations non régulières des toits	57
III.3.2.2.b. La conception urbaine de la ville.....	57
III.3.2.2.c. La morphologie urbaine non-uniforme.....	58
III.3.2.2.d. Les intersections et l'écoulement du vent dans un Canyon.....	58
Classifications & avantages	58
Classification des segments.....	58
Avantage des intersections.....	59
Expériences sur les intersections dans les Canyons	59
Intérêts des intersections	60
III.3.2.3. Intérêt sur les éléments qui influencent l'écoulement d'air	
dans la couche (UCL)	60
III.4. Théorie « d'Edussuriya et al » pour désigner les éléments	
morphologiques qui ont une influence sur l'écoulement d'air	62
III.4.1. Présentation de la théorie	62
III.4.2. Objet de l'expérience du groupe de chercheurs d'Edussuriya	62
III.4.3. Intérêt de la méthode	65
III.5. Comportement d'écoulement des vents pour une morphologie	
urbaine	65
III.5.1. Scénarii d'écoulement de l'air	65
III.5.2. Classification « d'Oke »	65
III.5.3. Intérêt de la recherche d'Oke (1990)	68
III.6 Écoulement de face pour un bâtiment isolé	68

III.7. Effets d'orientations d'écoulement du vent par rapport un Canyon...	70
III.7.1. L'écoulement parallèle, perpendiculaire et oblique	70
III.7.2. Écoulement parallèle à un Canyon urbain	70
III.7.3. Écoulement perpendiculaire à un Canyon urbain.....	70
III.7.4. Écoulement oblique à un Canyon urbain.....	71
III.7.5. Intérêt de l'écoulement parallèle, perpendiculaire & oblique	71
III.8. Effet de rugosité « Roughness effect ».....	72
III.8.1. Le Canyon urbain et l'effet de rugosité	72
III.8.2. Equations et classifications de l'effet de rugosité.....	72
III.8.3. Comportement d'écoulement dans UBL et Equation de Charnock ...	72
III.8.4. Classification de Davenport (1960) & Wieringa (1980)	73
III.8.5. Conséquences de l'effet de la rugosité « Roughness effect ».....	75
Conclusion	75

CHAPITRE IV : POLLUTION URBAINE ET SIMULATION PAR CFD

Introduction	81
IV.1. La pollution est multidimensionnelle et multidisciplinaire	82
IV.2. Les avantages de la CFD.....	84
IV.3. Etat d'art de la simulation par CFD dans un microclimat, en commençant par la première publication en 1990.....	84
1. Le travail de recherche de Qin & Kot (1990)	84
2. Le travail de recherche de Xie et al (2004)	86
3. Le travail de recherche de Xie et al (2005)	89
4. Le travail de recherche de Gao et al (2003)	91
5. Le travail de recherche de Bady et al (2007)	92
6. Le travail de recherche de Bu et al (2008)	94
7. Le travail de recherche de Hefny & Ooka (2008)	94
8. Le travail de recherche de Hang et al (2008)	95
9. Le travail de recherche de Huang et al (2009)	96
10. Le travail de recherche de Lateb et al (2009)	98
11. Le travail de recherche de Tominaga et Stathopoulos (2010)	99
12. Le travail de recherche de Salim et al (2011)	99

13. Le travail de recherche de Gu et al (2011)	100
14. Le travail de recherche de Gallagher et al (2012)	101
15. Le travail de recherche de Hang et al (2012)	103
16. Le travail de recherche de Van Hooff & Blocken (2013)	104
Conclusion	106

CHAPITRE V : LA VILLE DE M’ZAB : Processus de développement, Caractéristiques morphologiques,....etc.

Introduction	113
V.1. La ville traditionnelle de la vallée de M’zab	113
V.1.1. Parcours de la cité à travers l’histoire	116
V.1.2. Nature et paysage de Ghardaïa	117
V.1.3. Principe d’organisation spatiale.....	117
V.1.4. Processus de développement	117
V.1.4.a. Période d’autarcie et de repli	117
V.1.4.b. Période d’ouverture et développement	118
V.2. Le site objet d’étude	121
V.2.a. Structure sociale et spatiale	121
V.2.b. Organisation spatiale.....	121
V.2.c. Les parcours	122
V.2.d. Les palmeraies et le confort thermique	122
V.2.e. Défis et menaces actuelles	122
V.3. Le Canyon urbain	123
V.3.1. Processus de développement.....	123
V.3.2. Typologie de la rue Canyon.....	124
V.3.3. Vocation du Canyon urbain.....	124
V.3.4. Mobilité urbaine aux fluctuations journalières	125
V.3.5. Vélocités du vent	125
V.3.5.a. Vitesse du vent Nord-est.....	126
V.3.5.b. Vitesse du vent Sud-est.....	126
V.3.5.c. Vitesse du vent Sud	127
V.3.6. Rugosité urbaine « roughness effect ».....	128
V.3.7. Les rues perpendiculaires par rapport au canyon urbain.....	128
Conclusion	130

CHAPITRE VI : MÉTHODOLOGIE DE MESURE ET DE SIMULATION PAR CFD

Introduction :	134
VI.1. Les méthodes adoptées pour l'étude de l'aérodynamique de l'air dans le milieu urbain	134
Les mesures à l'échelle réelle, réduite et la CFD	134
VI.1.1. Les mesures sur site	134
VI.1.2. Les mesures en laboratoire	135
VI.1.3. La modélisation numérique	135
Méthodes adoptées	135
VI.2. Ligne directrice de la méthodologie	135
VI.3. Les mesures sur terrain	136
VI.3.1. Echelle d'intervention.	136
VI.3.2. Présentation du site et précautions des mesures.	137
VI.3.3. Protocole de mesure :	138
VI.3.4. Choix des stations de mesures dans le canyon urbain	138
VI.3.5. Déroulement des campagnes de mesures	139
VI.3.5.a. Méthode du parcours urbain	139
VI.3.5.b. Choix des stations de mesures	139
VI.3.5.c. Les paramètres météorologiques mesurés	140
VI.3.5.d. Les instruments déployés	140
Les instruments de mesures à l'échelle réelle	140
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂] « <i>CEM, DT-802</i> »	141
Anémomètre pour le relevé de la température « <i>Velleman, DVM8020</i> »	142
Anémomètre pour le relevé de l'humidité relative « <i>Velleman, DVM8020</i> »	142
Anémomètre pour le relevé de vitesse du vent « <i>Velleman, DVM8020</i> »	142
Un luxmètre « <i>Velleman, DVM1300</i> »	143
Un sonomètre « <i>CEM, DT-815</i> »	144
Problème rencontrés.....	146
Conditions du ciel durant les mesures.....	146
Conditions du vent durant les mesures.....	146
Intérêt de la démarche de mesures à l'échelle réelle	147
VI.4. La simulation par CFD	147
VI.4.1. L'appel de la CFD pour les recherches environnementales	147

VI.4.2. Restructurations urbaines visant à résoudre le problème.....	148
VI.4.3. Application de la Théorie « d'Edussuriya et al »	150
VI.4.4. Les guides pratiques du CFD existants	151
VI.4.5. Méthode paramétrique pour déterminer le niveau de la concentration du CO ₂ au Canyon	151
VI.4.6. Modèle de simulation et degré de complexité	153
VI.4.7. Représentation mathématique du phénomène	153
VI.4.8. Représentation de la géométrie (étape de modelage)	154
VI.4.9. Modèle numérique	155
VI.4.10. Domaine de calcul	155
VI.4.11. Choix des conditions aux limites du domaine.....	156
VI.4.12. Choix de la grille de calcul « Computational Grid »	158
VI.4.13. Résolution de la grille pour des bâtiments complexe	158
VI.4.14. Etude de la grille du domaine de calcul	158
VI.4.15. Génération de maillage « Mesh generation »	159
VI.4.16. Démarche du modèle « d'Ansys »	160
Ansys, un modèle reconnu dans la mécanique de fluide	160
Ansys, un modèle exploité dans le domaine environnementale	160
VI.4.17. Protocole de simulation	161
Etapes de la simulation en CFD (ANSYS-CFX) du Canyon urbain de Ghardaïa	162
Etape 1 : Création d'une variable supplémentaire « Create an Additional Variable »	162
Etape 2 : Définir le domaine	162
Etape 3 : Création d'un sous domaine	163
Etape 4 : Création des conditions au limite « Create Boundary Condition »	164
Etape 5 : Création des valeurs initiales	168
Etape 6 : Critères de contrôle de solveur	169
VI.4.18. Convergences des variables	169
Intérêt de la méthodologie (expérimentale et partie CFD)	170
Conclusion	171

**CHAPITRE VII : MICROCLIMAT DU KSAR DE
GHARDAÏA ET DU CANYON URBAIN**

VII.1. Description du microclimat de Ghardaïa	175
VII.1.1. Introduction	175
VII.1.2. Le climat général de Ghardaïa	175
VII.1.2.a. Intensités de la température de la ville de Ghardaïa	175
VII.1.2.b. Humidité relative	177
VII.1.2.c. Vitesse et nature des vents	177
VII.1.3. Analyse climatique du Ksar de Ghardaïa, étude faite par Kitous S (2012)	178
VII.1.3.1. Conditions climatiques au-dessus des toits.	178
VII.1.3.2. Caractéristiques microclimatique	179
VII.1.3.2.a. Le rayonnement solaire	179
VII.1.3.2.b. Température de l'air	179
Effet de la topographie du site sur la température de l'air	180
Effet thermique du vent selon sa nature	180
Effet de la morphologie urbaine	180
VII.1.3.2.c. La température de surface	181
VII.1.3.2.c.1. Effet de la topographie sur la température des surfaces	181
VII.1.3.2.c.2. Effet de la morphologie urbaine sur la température des surfaces	182
Effet de l'orientation des rues.....	182
Effet du prospect H/W	182
Effet du passage couvert.....	182
VII.1.3.2.d. Température moyenne radiante.....	183
VII.1.3.2.e. Confort thermique dans les rues de ksar	184
Effet de la topographie du site sur le confort thermique.....	184
Effet de la morphologie urbaine sur le confort thermique.....	184
Effet de la ventilation urbaine sur le confort thermique.....	185
VII.1.4. Intérêt de l'étude globale de microclimat de Ghardaïa	185
VII.2. Microclimat et ambiance extérieur dans le canyon urbain	187
VII.2.a. Microclimat du Canyon urbain	187
VII.2.b. Intensité de la température de l'air au niveau du Canyon urbain	187

VII.2.c. Activités humaines par rapport aux radiations solaires dans le Canyon	190
VII.2.d. Humidité relative particulière du climat du Canyon urbain.....	192
VII.2.e. Mesures sur la qualité de l'air en CO ₂	194
VII.2.f. Mesures de la vélocité du vent au niveau du Canyon urbain	196
VII.2.g. Intérêt de l'étude microclimatique du canyon urbain	198
VII.3. Conclusion	198

CHAPITRE VIII : ETUDE D'OPTIMISATION DE LA QUALITÉ D'AIR DANS LE CANYON URBAIN

VIII.1. Introduction	203
VIII.2. Etude d'optimisation de la qualité de l'air dans le Canyon urbain.....	203
VIII.2.1. Intérêts de la simulation par CFD pour cette étude	203
VIII.2.2. Protocole de simulation des trois géométries	204
VIII.2.2.a. Protocole de simulation de la géométrie réelle	204
VIII.2.2.b. Protocole de simulation de la Modélisation 1	205
VIII.2.2.c. Protocole de simulation de la Modélisation 2	206
VIII.2.3. Résultats et discussions de simulations des trois géométries.....	207
VIII.3. Résultats de simulation pour les trois stations repère	208
VIII.3.1. Division de l'étude en trois stations	208
VIII.3.2. Résultats de simulation pour la station A	209
VIII.3.3. Résultats de simulation pour la station B	210
VIII.3.4. Résultats de simulation pour la station C	212
VIII.3.5. Intérêt de l'étude des trois stations	212
VIII.4. Analyse approfondie de la station C	213
VIII.4.1. Division de la station C en deux points de repères	213
VIII.4.2. Résultats de simulation au point 1 - station C	213
VIII.4.3. Résultats de simulation au point 2 - station C	216
VIII.4.4. Intérêt de l'étude détaillé de la station C	217
VIII.5. Comportements de dispersion complexe en CO₂ à la station C	217
VIII.6. La station C et la simulation par CFD en 3D de la pollution	219
VIII.6.1. la configuration du Canyon influence son environnement	219
VIII.6.2. Simulation de la pollution pour la géométrie actuelle (par CFD /3D)...	219
VIII.6.3. Simulation de la pollution pour le Modèle 1 (par CFD /3D).....	220

VIII.6.4. Simulation de la pollution pour le Modèle 2 (par CFD /3D).....	221
VIII.6.5. Intérêt de la simulation par CFD en 3D de la pollution sur la station C & son environnement (pour les trois géométries)	222
VIII.7. Conclusion	222
 CHAPITRE IX : CONCLUSION GÉNÉRALE 	
Bilan de notre recherche. Limites de recherches et perspectives. Intérêt de la démarche.....	228
Références bibliographiques	235
Annexes	
Annexe 1 : Détails de mesure sur terrain au niveau du canyon urbain	245
Annexe 2 : Prises de vue photographiques horaires du canyon, journées du 5 et 6 juillet 2013	252
Annexe 3 : Caractéristiques des appareils de mesure	266

CHAPITRE I : INTRODUCTION GENERALE

Fig. I.1. 09 éléments morphologiques urbains majeurs, désignés par une **méthode statistique**, qui ont une influence sur l'écoulement de l'air dans un Canyon urbain (**Edussuriya et al., 2014**)..... 27

CHAPITRE II : LES SOURCES ÉNERGÉTIQUES URBAINES ET ICU

Fig. II.1. Représentation schématique des flux impliqués dans le bilan énergétique de (a) un volume complet du bâtiment, (b) un local dans un bâtiment et (c) une personne dans une pièce (**Oke, 1990**)..... 36

Fig. II.2. Variation diurne de rayonnement solaire direct sur des surfaces pour une ville de latitude 40 ° N (solstice d'été - 22 juin) (**Oke, 1990**) 37

Fig. II.3. Représentation schématique des flux impliqués dans l'énergie (**Oke, 1990**) 38

Fig. II.4. Bilan énergétique synchronique entre Q^* , Q_H , Q_E et ΔQ_S (les données sont des moyennes de 30 jours pour Vancouver), (a) un site en banlieue. (b) un site rural (**Oke, 1990**)..... 41

Fig. II.5. Différents albédos pour un environnement urbain (la valeur de l'albédo est [0 à 1], également exprimée [%]) dépend de la couleur de l'obstacle rencontré (**Urban stress, 2017**) 43

Fig. II.6. Variations de température (durant la nuit) à Paris et ses environs pendant la canicule de 2003, une intensité de 7°C, à cause de l'Îlot de Chaleur Urbain - ICU (**ONERC, 2010**)..... 45

Fig. II.7. l'îlot de chaleur urbain à New York le 14 août 2002 présente une différence de 8°C entre le centre urbain et la périphérie (**ONERC, 2010**) 45

Fig. II.8. Section sur la variation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) (**Oke, 1990**)..... 46

Fig. II.9. Inter-réflexions schématisées au Canyon (**Ca et al., 1995**)..... 47

Fig. II.10. Représentation schématique de l'atmosphère urbaine illustrant une classification à deux couches urbaines, et la création de la Panache Urbaine « Urban Plume » sous l'effet de la vitesse du vent >3m/s (**Oke, 1990**)..... 49

Fig. II.11. Vitesse du vent faible <3m/s, Un dôme urbain virtuel se crée, il sera constitué de bulle d'air chaud qui se forme et qui se reconstitue à chaque fois par effet de mouvements convectifs (**Gyr et al., 1995**)..... 49

Liste des figures

Fig. II.12. Mouvements convectifs de l'aérodynamique de l'air pour un échantillon de la canopée urbaine « UCL » (Gyr et al., 1995)	49
---	----

CHAPITRE III : MORPHOLOGIES URBAINE ET ÉCOULEMENTS D'AIR

Fig. III.1. Rapport de prospect (H/W) et angle d'azimut solaire pour une rue Canyon (Louka et al., 2000)	54
Fig. III.2. Schéma de l'expérience d'Edussuriya et al (2014), pour désigner par méthode d'analyse statistique , les paramètres morphologiques les plus importants pour l'écoulement d'air dans un Canyon urbain.....	64
Fig. III.3. Régime d'écoulement associé à géométries urbaines différentes dans le cas d'écoulement à rugosité isolé (OKE, 1990)	66
Fig.III.4. Régime d'écoulement associé à géométries urbaines différentes dans le cas d'écoulement à interférence de sillage « Wake interference flow » (OKE, 1990)	67
Fig.III.5. Régime d'écoulement associé à géométries urbaines différentes dans le cas de l'écoulement rasant « Skimming flow» (OKE, 1990)	67
Fig.III.6. Dans le cas d'écoulement perpendiculaire pour Canyon urbain, le côté sous le vent est généralement appelé Leeward et l'autre est le côté face au vent s'appelle Winward (Yip et al., 2006)	68
Fig.III.7. a) Modèles d'écoulement à travers un bâtiment isolé, b, c) les profils de vitesse et les zones d'écoulement avec le bâtiment orienté perpendiculairement à l'écoulement. d) orientation diagonale par rapport à l'écoulement (OKE, 1990)	69
Fig. III.8. Effet de recirculation de l'air pour un canyon urbain (Santé, 2017)	71
Fig. III. 9. Répartition verticale des différentes couches de circulation d'air au-dessus d'un environnement urbain (Rotach, 1999)	73

CHAPITRE IV : POLLUTION URBAINE ET SIMULATION PAR CFD

Fig. IV.1. La pollution par degré d'échelle spatiale, allant de l'échelle globale à l'échelle humain (ou matérielle) (Blocken et al, 2013)	83
Fig. IV.2. Le canyon est entre deux configurations différentes de bâtiments (Qin & Kot, 1990)	85

Liste des figures

Fig. IV.3. Variation de la vitesse du vent en hauteur au canyon urbain à partir d'une hauteur de 2m par rapport au sol (Qin & Kot, 1990)	85
Fig. IV.4. Variation de la concentration moyenne du NO_x et O₃ en hauteur (Qin & Kot, 1990)	86
Fig. IV.5. Configurations pour les surfaces ensoleillées (Xie et al, 2004)	87
Fig. IV.6. Profil d'un canyon pour un écoulement d'air et concentration de polluant dans un canyon urbain asymétrique gradué avec le sens de l'écoulement d'air « stepup notch » ($\mu = 2 \text{ ms}^{-1}$, $\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$) (Xie et al, 2004)	88
Fig. IV.7. Ecoulement d'air et concentration de polluant en profil dans un canyon urbain asymétrique gradué en contre sens de l'écoulement d'air « stepdown notch » ($\mu = 2 \text{ ms}^{-1}$, $\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$) (Xie et al, 2004).....	89
Fig. IV.8. Différentes formes de tourbillons et degré de concentrations de polluant pour différentes H_1/H_2 (1 , 0.88 , 1.4 et 2.33), qui correspondent à un prospect de (H/W) 3.5 (Xie et al, 2005).....	91
Fig. IV.9. Description pour simulation par CFD en 3D d'un bâtiment-modèle et domaine de calcul (Gao et al, 2003)	92
Fig. IV.10. Domaine du calcul entre deux bâtiments modèle (Bady et al (2007))	93
Fig. IV.11. Concentration de pollution pour des largeurs différentes d'un canyon urbain : (a) $D/H=0.6$; (b) $D/H=1.0$; (c) $D/H=1.5$; (d) $D/H=2.0$. (Bady et al, 2007)	93
Fig. IV.12. Concentration de pollution pour des hauteurs différentes d'un canyon urbain : (a) $H/D=0.4$; (b) $H/D=0.6$; (c) $H/D=0.8$; (d) $H/D=1.0$. (Bady et al, 2007).	93
Fig. IV.13. Configuration du modèle. (a) Plan horizontal, (b) Plan vertical (Bu et al, 2008).....	94
Fig. IV.14. Cellules voisines typiques : (a) Cellules en tétraèdres, (b) Cellules en hexaèdres (Hefny & Ooka, 2008).....	95
Fig. IV.15. Style des maillages/grilles utilisés dans des projets de simulation en CFD (cellule en hexaèdres ou tétraèdres) (Hefny & Ooka, 2008)	95
Fig. IV.16. Modèles des villes utilisées. (a) ville circulaire, (b) ville carrée, (c) ville longue de forme rectangulaire (Hang et al, 2008)	96
Fig. IV.17. Simulation en par CFD en 2D des vecteurs de vitesse de l'air et contours de concentrations de polluant à l'intérieur d'un canyon urbain : (a)	

Liste des figures

Canyon en toit simple et deux parois identique en hauteur ; (b & c) Canyon de type « stepup » avec un toit incliné sur un seul fragment ; (d) Canyon de type « stepdown » avec un toit incliné sur un seul fragment (Huang et al, 2009)	97
Fig. IV.18. Vue générale sur la grille par modèle Fluent (M Lateb et al, 2009)	98
Fig. IV.19. Vue en élévation du bâtiment BE et la tour de Foubourg. Toutes les dimensions (M Lateb et al, 2009)	99
Fig. IV.20. Positions de la source de la pollution en ligne et plantation d'arbres. (a) La configuration de la soufflerie (Wind Tunnel: WT), (b) Le domaine de calcul de la simulation par CFD en 3D (Salim et al, 2011)	100
Fig. IV.21. Une ligne typique de flux d'air dans un Canyon urbain non-uniforme (Gu et al (2011))	101
Fig. IV.22. Coupe transversale du canyon urbain modèle asymétriques (a) $H1 / H2 = 0.5$, avec deux LBW aux sentiers et (b) $H1 / H2 = 1.5$ avec un seul LBW central. (Gallagher et al, 2012)	102
Fig. IV.23. Détermination de la différence de la concentration de polluants obtenue en comparant un modèle LBW au modèle de référence au niveau d'un sentier (Gallagher et al, 2012)	103
Fig. IV.24. Ligne Aérodynamique en 3D, (a) bâtiments uniformes, (b) écarts-types de hauteur « Larger standard deviations » (Hang et al, 2012)	104
Fig. IV.25. Distribution de la vélocité verticale, (a) bâtiments uniformes, (b) écarts-types de hauteur « Larger standard deviations » (Hang et al, 2012)	104
Fig. IV.26. Indication des quatre positions internes de mesures : de températures, concentrations d'humidités, concentrations de CO ₂ , (a) Section horizontale; (b) Section verticale (Van Hooff & Blocken, 2013)	105
Fig. IV.27. (a) Températures intérieures extérieures [θ : °C] mesurées durant la présence du public. (b) Concentration intérieures et extérieures d'humidité [X_1 : g/kg] (Van Hooff & Blocken, 2013)	105
Fig. IV.28. Distribution de la concentration du CO ₂ (ppm) en section horizontale +4.65 m au dessus de la plate forme du stade « ArenA deck » pour quatre différents moments (a) $t = 0$ s; (b) $t = 300$ s; (c) $t = 900$ s; (d) $t = 1800$ s (Van Hooff & Blocken, 2013)	106

Liste des figures

CHAPITRE V : LA VILLE DE M’ZAB ET LE CANYON URBAIN	
Fig. V.1. la ville de Ghardaïa avant la période coloniale (Ravereau et al., 2003).....	115
Fig. V.2. vue aérienne du Ksar de Ghardaïa (Arthus-Bertrand, 2014).....	115
Fig. V.3. Le Ksar de Ghardaïa à la période précoloniale (Djaadi et al., 1996).....	118
Fig. V.4. Le Ksar de Ghardaïa en 1953 - pendant la période Coloniale (Djaadi et al., 1996).....	120
Fig. V.5. Photo satellitaire du Ksar de Ghardaïa - Actuelle 2015(Google map, 2015)	120
Fig. V.6. Processus de la création du Canyon (a) le Canyon n’existait pas avant (Djaadi et al., 1996) , (b) Après l’arrivée des collons, ils ont délimité le Ksar par des routes à des fins de contrôle et de sécurité, donc c’est le début de constitution de la deuxième paroi du Canyon (Djaadi et al., 1996), (c) période actuelle, la route est devenue une artère importante de la ville, un axe commercial et une voie de circulation « <i>Un Canyon Urbain</i> » (Google, 2015).....	123
Fig. V.7. Schéma du Canyon urbain.....	124
Fig. V.8. (a/b) Plusieurs activités commerciales et modes mécanique variés sur une surface non suffisante, pour les piétons ou pour la circulation mécanique (Auteur)	125
Fig. V.9. L’environnement à 2 km montre ; des vents d’hiver ralentis par le Ksar (le Ksar sur une éminence), et des vents d’Eté ralentis par l’extension urbaine sous l’effet de la rugosité (Auteur).....	127
Fig. V.10. Le Canyon est entouré par des montagnes du côté Sud, l’ancien Ksar du côté Nord (Google map, 2015)	128
Fig. V.11. Prospect de chaque ruelle (cf. Tableau. V.2.) du Canyon Street (Auteur)	129
Fig. V.12. Ruelle (N°7) perpendiculaire au Canyon (cf. ruelle n° 2. Tableau. V.2.) (Auteur)	129
 Chapitre VI : MÉTHODOLOGIE DE MESURE ET DE SIMULATION PAR CFD	
Fig. VI.1. Principe de la méthodologie choisie.....	136
Fig. VI.2. Le Canyon d’étude dans son environnement	137
Fig. VI.3. Positionnement des stations de mesure dans le cas d’étude (A, B et C)	140
Fig. VI.4. Appareil «CEM, DT-802» de mesure du CO ₂ , de température et d’humidité	141
Fig. VI.5. Un Anémomètre « Velleman, DVM8020 »	143
Fig. VI.6. un luxmètre « Velleman, DVM1300 »	144
Fig. VI.7. un sonomètre « CEM, DT-815 ».....	144

Liste des figures

Fig. VI.8 ; a) Configuration géométrique et formelle du cas d'étude ; b) Reconfiguration optimisée 1; c) Reconfiguration optimisée 2	149
Fig.VI.9. Identification des facteurs d'impact sur l'écoulement d'air pour une rue Canyon [55% de l'ensemble d'éléments sont pris en charge] (Edussuriya et al 2014)	150
Fig. VI.10. Les positions de chaque station de mesure (A, B et C) avec les dix huit (18) voitures	152
Fig. VI.11. Protocole de simulation: répartition des véhicules	152
Fig. VI.12. Domaine de Calcul et conditions limites schématisées	157
Fig. VI.13. Domaine de Calcul avec la configuration du Canyon urbain	157
Fig. VI.14. Disposition des éléments de la grille près de la surface solide en maillage non structuré (Tominaga et al., 2008)	158
Fig. VI.15. Grille du domaine du calcul, estimé à 1.4 million d'éléments – géométrie actuelle	160
Fig. VI.16. Étapes générales du model ANSYS-CFX	161
Fig. VI.17. Création d'une variable supplémentaire	162
Fig. VI.18. Définir le domaine	163
Fig. VI.19. Création d'un sous domaine.....	164
Fig. VI.20. Condition de limite d'entrée.....	165
Fig. VI.21. Condition de limite de sortie.....	166
Fig. VI.22. Condition de limite ouvert « Openning boundary condition ».....	167
Fig. VI.23. Création des valeurs initiales.....	168
Fig. VI.24. Critères de contrôle de solveur.....	169
Fig. VI.25. Convergences des variables.....	170

CHAPITRE VII : MICROCLIMAT DU KSAR DE GHARDAÏA ET DU CANYON URBAIN

Fig. VII.1. Profil mensuel de la température de l'air. Le mois de Juillet étant le mois le plus chaud de l'année (ONM, 2012)	176
Fig. VII.2. Température moyenne maximale de l'air pendant le jour pour la période (2010-2012) pendant le mois de Juillet (ONM, 2012)	176
Fig. VII.3. Profil journalier de l'humidité relative de l'air, H% variée de 16% à 31% (MNO, 2012)	177

Liste des figures

Fig. VII.4. Photo satellitaire du Ksar de Ghardaïa (Google map, 2015)	179
Fig. VII.5. Profil des températures mesurées dans le Canyon (Auteur). Profil de température station ONM (MNO, 2012)	189
Fig. VII.6. Comparaison entre les températures mesurées dans le Canyon et de L'ONM le 6 Juillet (MNO, 2012)	189
Fig. VII.7. Le Canyon au 6 juillet 2013 à 9h , l'interaction entre l'absence des radiations solaires T et les activités humains au matin de 7h à 12h	191
Fig. VII.8. Photo du Canyon le 6 juillet 2013 prise à 15h , toutes les activités humaines s'engourdissent à midi pendant l'été pour ce canyon urbain d'orientation E/O	191
Fig. VII.9. Le Canyon urbain au 6 Juillet 2013 à 19h , les activités humaines reprennent après l'absence des radiations solaires, en après midi de 17H à 20H	192
Fig. VII.10. Humidités relatives des deux zones (Canyon urbain / station ONM) pour le 5 Juillet (Auteur, MNO, 2012)	193
Fig. VII.11. Humidités relatives des deux zones (Canyon urbain / station ONM) pour le 6 Juillet (Auteur, MNO, 2012)	194
Fig. VII.12. Valeurs du CO ₂ mesurées dans la rue Canyon pendant les 5 et 6 juillet 2013 (Auteur).	195
Fig. VII.13. Photos du Canyon, démontrent la diversité des motorisations et gabarits des véhicules qui circulent.	195
Fig. VII.14. Comparaison entre les vitesses vents m/s mesurés et de L'ONM le 5 Juillet (Auteur, MNO, 2012)	197
Fig. VII.15. Comparaison entre les vitesses vents m/s mesurés et de L'ONM le 6 Juillet (Auteur, MNO, 2012)	197
 CHAPITRE VIII : ETUDE D'OPTIMISATION DE LA QUALITÉ D'AIR DANS LE CANYON URBAIN	
Fig. VIII.1. Stations de mesures (A, B, C, 1 et 2) dans le Canyon urbain	204
Fig. VIII.2. Caractéristiques du Canyon urbain - géométrie réelle	205
Fig. VIII.3. Grille du domaine de calcul estimé à 1.4 million d'éléments – géométrie actuelle	205
Fig. VIII.4. Le contexte typologique urbain de la rue Canyon – géométrie actuelle ..	205

Liste des figures

Fig. VIII.5. Schéma du Canyon urbain – Modèle 1 : Alignement le dernier îlot.....	206
Fig. VIII.6. Grille du domaine de calcul estimé à 1.4 million d'éléments – Modèle 1	206
Fig. VIII.7. Schéma du Canyon urbain – Modèle 2 : Hauteur diminué du dernier îlot	207
Fig. VIII.8. Grille du domaine du calcul estimé à 1.4 million d'éléments – Modèle 2	207
Fig. VIII.9. Profil global des concentrations de CO ₂ [ppm] le long de la rue canyon des trois géométries, montrant une dispersion non-uniforme.	208
Fig. VIII.10. Concentrations du CO ₂ simulé par CFD des trois géométries dans la station A	209
Fig. VIII.11. Concentrations du CO ₂ [mesuré / simulé] pour les trois géométries dans la station B	211
Fig. VIII.12. Ruelle perpendiculaire au Canyon (<i>Cf. Fig. V.6.</i> Ruelle perpendiculaire au Canyon), est couverte par des matériaux légers, cette pratique ralentit la ventilation et le dégagement de la pollution expulsée par les voitures.	211
Fig. VIII.13. Concentrations du CO ₂ simulé par CFD pour les trois géométries dans la station C	212
Fig. VIII.14. (À gauche) Les points 1 et 2 de la station C. (À droite) Positions des stations [A, B et C], et les points en amont pour chaque rue	214
Fig. VIII.15. Concentrations du CO ₂ simulé par CFD des trois géométries au point 1	214
Fig. VIII.16. Concentrations du CO ₂ simulé par CFD des trois géométries au point 2	216
Fig. VIII.17. Comportement d'écoulement d'air autour d'un bâtiment isolé, vues latérales (a) Lignes de courant de l'aéroulque d'air et les zones d'écoulement, (b) Profils de la vitesse d'air et zone d'écoulement pour un bâtiment isolé orienté vers le flux d'air	218
Fig. VIII.18. Vue en plan des lignes pour courant d'aéroulque d'air, de deux orientations de bâtiments en face aux écoulement d'air (Oke, 1990)	218
Fig. VIII.19. Simulation en 3D de la dispersion du CO ₂ [ppm] au Canyon urbain. l'actuelle géométrie du Canyon crée des vortex turbulents (<i>tV</i>) qui affectent toutes les faces, même celle qui sont en faces (<i>Pf</i>). Vues dans le Canyon urbain (a) Vue au Canyon sur la station C, en parallèle au sens de l'écoulement d'air, (b) Vue au sens inverse.	219
Fig. VIII.20. Simulation par CFD en 3D de la dispersion du CO ₂ [ppm] au Canyon urbain. Le Modèle 1 apporte une qualité d'air optimisé (mieux de 46 % que	

Liste des figures

la géométrie actuelle). Vues dans le Canyon urbain (a) Vue au Canyon sur la station C, en parallèle au sens de l'écoulement d'air, (b) Vue au sens opposé	220
Fig. VIII.21. Simulation par CFD en 3D de la dispersion du CO ₂ [ppm] au Canyon urbain: La configuration urbaine du Modèle 2 permet une meilleure ventilation de la rue et augmente le taux de dissipation de la pollution (de 36%) à cause de la hauteur faible du dernier bâtiment (Prospect [H/W]=0.76)	221
CHAPITRE IX : CONCLUSION GÉNÉRALE	
Figure. IX.1. Démarche de la recherche, limites et paramètres adoptés.....	231
Figure. IX.2. Future recherche.....	232
Figure. IX.3. Intérêt de la démarche.....	233

CHAPITRE II : LES SOURCES ÉNERGÉTIQUES URBAINES ET ICU

Tableau. II.1. Moyenne de chaleurs anthropiques (Q_F) dégagées des zones urbaines sélectionnées (Oke, 1990)	39
Tableau. II.2. Propriétés thermiques des certains matériaux dans la construction (Oke, 1990)	40
Tableau. II.3. Propriétés radiatives des matériaux et des zones urbaines typiques (Oke, 1990)	43
Tableau. II.4. Les hypothèses qui provoquent l'émergence de l'îlot de chaleur urbain (Oke, 1990)	47

CHAPITRE III : MORPHOLOGIES URBAINE ET ÉCOULEMENTS D'AIR

Tableau.III.1. Nature du Canyon urbain par rapport au prospect (H/W) (Vardoulakis et al., 2003)	55
Tableau.III.2. Les couches atmosphériques ; UCL et UBL (OKE, 1990).	56
Tableau.III.3. Classements des sections des Canyons par rapport à leurs rapports d'intersections (Vardoulakis et al., 2003).	59
Tableau. III.4. Après une méthode d'analyse statistique , seulement neuf éléments morphologiques sont les plus importants pour l'écoulement de l'air dans un Canyon urbain (Edussuriya et al 2014).	63
Tableau. III.5. Ralentissement de l'écoulement de l'ai par l'effet de rugosité	72
Tableau. III.6. Classement de rugosité de l'espace urbain jusqu'à la campagne (Oke, 2004)	74

CHAPITRE V : LA VILLE DE M'ZAB ET LE CANYON URBAIN

Tableau. V.1. Les Ksours de Mzab (Mapcarta, 2017, Djaadi et al., 1996, Benyoucef).....	116
Tableau. V.2. L'organisation spatiale du ksar de Ghardaïa en couples d'opposition...	121
Tableau. V.3. Caractéristiques de chaque rue (Auteur)	130

CHAPITRE VI : MÉTHODOLOGIE DE MESURE ET DE SIMULATION PAR CFD

Tableau. VI.1. Récapitulatif du protocole de mesure menée dans le canyon urbain...	145
Tableau. VI.2. Conditions de l'état du ciel durant les campagnes de mesures.....	146

Liste des tableaux

Tableau. VI.3. Conditions d'écoulement du vent durant les campagnes de mesures (ONM)	147
Tableau. VI.4. Caractéristiques des voitures modèles (EEA, 2012, Neufert, 1999)..	153
Tableau. VI.5. Etude de grille « Mesh study »	159
 CHAPITRE VIII : ETUDE D'OPTIMISATION DE LA QUALITÉ D'AIR DANS LE CANYON URBAIN	
Tableau. VIII.1. Maillage et domaine. (a) Cas Réel, (b) Modèle 1, (c) Modèle 2.....	205
Tableau. VIII.2. Résultats et valeurs des concentrations en CO ₂ dans les trois stations A, B et C (mesurés et simulés)	209
Tableau. VIII.3. Caractéristiques générales de chaque rue. (Cf. Fig. VIII.14)	215
Tableau. VIII.4. Concentrations du CO ₂ au point 1 et Caractéristiques des rues	216
Tableau. VIII.5. Concentrations du CO ₂ au point 2 et Caractéristiques des rues	217
Tableau. VIII.6. Résultat de simulation en 3D de la géométrie réelle.	220
Tableau. VIII.7. Résultat de simulation en 3D du Modèle 1	221
Tableau. VIII.8. Résultat de simulation en 3D du Modèle 2	222

Nomenclature

Caractères Grecs

MINUSCULES

Désignation	Unité	Description
α	%	Albédo
ε	%	Émissivité
$k - \varepsilon$	-	Modèle du RANS
u	m/s	Vitesse
τ_{ij}	-	Tenseur des contraintes
ρ	kg/m ³	Masse volumique
ρg	m/s	Gravitationnel du corps
$\sigma_k \text{ et } \sigma_\varepsilon$	-	Prandtl turbulent
ν	m ² /s	Viscosité cinématique

Caractères Grecs

MAJUSCULE

Désignation	Unité	Description
μ_t	-	Viscosité turbulente
ΔQ_A	W	Variation nette de stockage de l'énergie par les matériaux.
ΔQ_S	W	Chaleur de stockage.
ΔQ_A	W	Energie advectif.

Caractères latins

MAJUSCULE

Désignation	Unité	Description
ABL	-	Atmospheric Boundary Layer
CFD	-	Computational Fluid Dynamics
C	mg/m ³	Concentration de polluants
CO ₂	ppm	Concentration de l'air par le gaz du Dioxyde de Carbone (en petite particule / million)
E	Lux	Eclairage
F	N	forces externes du corps

Nomenclature

G_b	-	Génération de l'énergie cinétique turbulente due à la flottabilité
G_k	-	Génération de l'énergie cinétique turbulente due au gradient de vitesse moyenne
HR	%	Humidité relative de l'air
H/W	%	Rapport de Prospect
ICU	°C	Îlot de Chaleur Urbain
LES	-	Large-Eddy Simulation, équations pour le traitement de la turbulence en mécanique de fluide
L/W	%	Rapport d'intersection
NO _x	-	Les oxydes d'azote
O ₃	-	L'ozone
Q^*	W	Net rayonnement de tout-ondes de l'extérieur du bâtiment.
Q_F	W	Total de chaleurs internes anthropiques rejetées.
Q_G	W	Chaleur de conduction entre le bâtiment et le sol.
Q_H et Q_E	W	Chaleur échange sensible et latente avec l'air extérieur.
RANS	-	Reynolds Averaged Navier Stokes, équations pour le traitement de la turbulence en mécanique de fluide
RBL	-	Rural Boundary Layer
S	DB	Intensité sonore
S	-	Source de chaleur volumétrique
T	°C	Température de l'air
UCL	-	Urban Canopy Layer
UBL	-	Urban Boundary Layer
Y_M	-	Contribution de la fluctuante dilatation en turbulence compressible pour le taux de dissipation globale

CHAPITRE I

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Pertinence du choix de site ; Problématique ; Hypothèses ; Objectifs ;

La méthodologie

Durant les dernières années, on assiste à la naissance d'une nouvelle tendance qui préoccupe les chercheurs scientifiques dans le monde entier il s'agit de la « Maîtrise des ambiances » qui touche globalement le domaine d'architecture et d'urbanisme,

Cette approche d'analyse est extrêmement complexe et difficile à maîtriser en vue de la pluralité des éléments et des paramètres qui la composent. En conséquence, cette tendance commence graduellement à caractériser l'architecture extérieure, on remarque de ce fait que, la quasi majorité des recherches scientifiques actuelles qui traitent les ambiances et le confort thermique reste confinée aux espaces intérieurs, les sujets qui traitent les ambiances et le confort extérieur en revanche sont beaucoup plus rares (Santamouris et al, 1999).

La ville saharienne a été construite avec une qualité parfaite d'ambiance (intérieure et extérieure) et avec un degré de confort très élevé par rapport à son environnement climatique et son contexte urbain ancien. Actuellement avec l'émergence des problèmes environnementaux contemporains tels que la pollution, Îlot de Chaleur Urbain (ICU)...etc, la ville est devenue vulnérable, à cause de nombreux problèmes tels que: urbanisation récente en forte augmentation; déclin de la forme urbaine traditionnelle et des valeurs architecturales vernaculaires...etc. (Bouchair, 2004)

La pollution a des effets néfastes et chroniques sur la santé humaine, sur l'écosystème et sur le climat (Lee DS et al, 2010, Uherek E et al, 2010, Viegas J et al, 2015). Le CO₂ est le premier et le plus important polluant atmosphérique parmi beaucoup d'autres polluants tels que NO_x, CO,...etc, menaçant la ville. Selon l'Organisation Mondiale de Météorologie (OMM), l'utilisation de l'énergie fossile et les activités humaines sont responsables de cette émission du CO₂, qui est à l'origine du réchauffement de la planète (WMO, 2014). En plus, le Dioxyde de Carbone est le plus important gaz anthropiques (GHG) à effet de serre (Lee TW et al, 2011), son taux annuel a augmenté de 80 % entre 1970 et 2004, ainsi ce taux est considéré comme un taux maximal par rapport aux autres gaz à émissions anthropogéniques (Metz B et al, 2007). En milieu urbain, la principale source du CO₂ est la circulation routière (STOA, 1998), ce taux de CO₂ arrive selon Uherek et al (2010) à un seuil élevé de 72.3% par rapport aux circulations aérienne, maritime et ferroviaire (Uherek et al, 2010). La pollution en CO₂ est l'un des indices réels de la pollution atmosphérique locale et à petite échelle (micro-scale) qui engendre des détériorations du cadre bâti, perturbations du confort

extérieur, elle participe aussi de façon indirecte à la formation de l'îlot de chaleur urbain et contribue à la hausse de la consommation d'énergie.

Le microclimat urbain (micro-scale/micro-échelle) est le résultat d'une interaction complexe entre de nombreux éléments de la nature morphologique urbaine qui comporte entre autre ; le degré de l'activité humaine, la conception architecturale et la typologie urbaine, la morphologie naturelle (sol, végétation,...), la qualité des aménagements extérieurs et les phénomènes physiques (Aérauliques de l'air, températures, humidités, etc.).

Le microclimat influence considérablement l'écoulement de l'air dans la couche du canopée urbaine (UCL) et crée une distinction par rapport à la couche limite urbaine (UBL), cependant l'aéraulique du vent au canopée urbaine réelle est beaucoup plus complexe (**Blocken et al, 2013, Assimakopoulos et al, 2006**) puisque la géométrie urbaine a des aspects pluriels et changeables et se caractérise par des descriptions paramétriques variables et des designs multiples (**Eddusuriya et al, 2011**).

Généralement, le canyon urbain est le composant le plus important d'un microclimat urbain étant donné que la mobilité urbaine s'exerce, en majeure partie, au niveau du canyon urbain, de ce fait, c'est le canyon qui s'expose en premier aux problèmes de la pollution atmosphérique de par la circulation mécanique.

Les travaux de recherches menés sur les canyons urbains dictent une complexité de maîtrise à cause de l'existence de beaucoup d'éléments géométriques qui les composent. Toutefois, le sujet du canyon urbain est considérablement abordé dans la littérature scientifique avec tous ces aspects typologiques, il a été prouvé ainsi que chaque élément morphologique peut apporter un degré d'optimisation différent par rapport aux autres composants notamment en ce qui concerne à la qualité d'air.

Nous avons classifié en quatre grandes entités les éléments les plus importants dans un canyon urbain qui sont cités par les littératures scientifiques et qui influencent considérablement l'écoulement d'air, ils sont comme suit;

1. Un Canyon urbain non-uniforme (asymétrie et irrégularité) qui touche les aspects suivants : Rapport de prospect (H/W) ; Orientation par rapport à une vitesse d'air ; Hauteurs bâtiments ; Largeurs des îlots au bords des Canyons, il procure une meilleure ventilation et un écoulement d'air élevé, aussi ils peuvent favoriser des phénomènes physiques pour l'aéraulique de l'air tels que : vent basculant, convergence du flux

d'air, divergence horizontale et grands échanges à l'échelle de masse d'air à l'intérieur et au-dessus des canyons urbains (Gu et al., 2011, Edussuriya et al., 2011, Soulhac et al., 2009, Carpentieri et al., 2009, Xie et al., 2005, Kastner-Klein et al., 2004, Chan et al., 2003, Chan et al., 2001, OKE, 1990).

2. Des configurations inclinées non-uniformes pour les toits pouvant conduire à des flux d'air dispersés dans le canyon (Kastner-Klein et al., 2004, Balogun et al., 2010);
3. Les emplacements des espaces ouverts et les ceintures vertes dans la conception urbaine des villes jouent un rôle important pour la ventilation urbaine (par effet de discontinuité urbaine) (Edussuriya et al., 2011, Ali-Toudert et al., 2005, Chan et al., 2001, Givoni, 1998).
4. Les intersections dans un canyon et les sections intermittentes génèrent plus de tourbillons par rapport à un canyon urbain allongé sans intersection (Chan et al., 2003).

Suite à une analyse scientifique, la projection réaliste urbaine peut cibler l'élément morphologique défaut, afin d'optimiser l'aéroulque de l'air et de promouvoir la ventilation du site.

Avant d'intervenir sur le terrain et de faire une restructuration, la désignation du paramètre morphologique urbain qui influence l'écoulement d'air urbain est difficile à cibler, du fait que les paramètres sont multiples et divers.

En conséquence, Edussuriya et al (2014) ont développé une **approche statistique** pour définir le paramètre morphologique urbain le plus important, qui affecte l'aéroulque de l'air, surtout au niveau d'un Canyon urbain, leurs démarche a été mené dans la ville métropolitaine de Hong Kong, à travers des mesures sur terrain de la pollution d'air et toutes les données microclimatiques, l'étude donc s'est basée sur le contrôle de **20** cités résidentielles urbaines divisées sur cinq grands quartiers de Hong Kong, **21** variables morphologiques ont été identifiés et classifiés. Il résulte par **méthode statistique**, que parmi ces nombreux facteurs morphologiques urbains, seulement **09** éléments ont une influence réelle sur la qualité de l'air et de la concentration de la pollution (Edussuriya et al., 2014).

- La méthode a identifiée seulement ;
- La densité de surface;
 - Occlusivité;
 - Hauteur de rugosité aérodynamique;
 - Volume construit;
 - Facteur de compacité;
 - Prospect;
 - Distance entre bâtiment;
 - Hauteur moyenne des bâtiments;
 - Standard déviation de la hauteur du bâtiment.

Fig. I.1. 09 éléments morphologiques urbains majeurs, désignés par une **méthode statistique**, qui ont une influence sur l'écoulement de l'air dans un Canyon urbain (Edussuriya et al., 2014).

Même avec ce degré de maîtrise, l'ambiguïté reste toujours, du fait qu'il manque un moyen d'estimer scientifiquement une qualité d'intervention, cela amène à des difficultés de maîtrise pour tous les partenaires de construction (architectes, urbanistes,...), soit au moment de l'étude conceptuelle d'un projet pendant la période d'optimisation concernant un problème urbanistique constaté sur un cas réalisé, il se peut donc que la CFD « Computational Fluid Dynamic » soit une solution.

La simulation par CFD est une démarche récente et un outil fort, parce qu'elle conduit à une lecture globale et complète sur un microclimat, elle assure un contrôle élevé de la couche limite urbaine UBL (Urban Boundary Layer) puisque la CFD modélise à l'échelle réelle tous les paramètres de la couche de la canopée urbaine UCL (Urban Canopy Layer), aussi des paramètres de la couche supérieure d'un microclimat au dessus des toits. Cet outil permet à des études paramétriques de comparer et d'évaluer d'autres conceptions, en particulier lorsque ces configurations géométriques sont incluses dans le même domaine de calcul. Encore, cette méthodologie est considérée comme la meilleure démarche pour une stratégie rapide et économique. En plus, l'application de la CFD permet une maîtrise parfaite de l'aéraulique de l'air; qualité de l'air; pollution diffusée; confort thermique; confort du vent; effets de façades; effets de toits; effets de pavages et effet de la végétation ou les surfaces d'eau (Van Hooff T, 2013).

Malgré une utilisation de la CFD, de nombreuses recherches actuelles en CFD prennent en compte lors de l'analyse que des exemples idéals, qui ne reflètent pas la réalité entière, ces modèles simples traitent souvent des géométries non complexes ou des concepts morphologiques en cubes isolés. Au niveau des résultats, ces modèles idéals donnent des conclusions erronées sur le flux d'air réel, et sur la longueur de rugosité urbaine réelle. ([Chan et al, 2003/2002](#)).

Cette présentation concerne donc les nouveaux défis qui menacent une ville, surtout la pollution, ainsi que les éléments morphologiques constatés par statistique qui influencent l'écoulement et la dispersion du CO₂ dans un microclimat et la présentation de la CFD qui est utilisée souvent pour des typologies génériques.

L'avancée méthodologique dans cette étude se manifeste d'une part par le fait de l'usage combiné des mesures sur terrain (T°C, H%, CO₂/ppm,..) et la simulation par CFD en 3D **du cas réel**, pour évaluer l'effet de la morphologie urbaine vernaculaire sur la dispersion du CO₂ dans un microclimat. D'autre part, avec l'aide de la simulation par CFD en 3D, des faibles restructurations urbaines peuvent devenir des propositions urbaines alternatives, afin d'optimiser la qualité d'air, de réduire le CO₂ et de protéger l'héritage architecturale vernaculaire contre les effets de la pollution.

L'objectif de cette recherche est d'étudier la configuration, la répartition et l'évaluation de la teneur de l'air en CO₂ sur la morphologie vernaculaire urbaine dans la ville traditionnelle de Ksar de Ghardaïa au Sud de l'Algérie.

Le but principal de ce travail est de répondre aux besoins contemporains de la vie humaine des M'zab, par des restructurations minimales sur leur patrimoine urbain.

I.1. Pertinence du choix du site

Notre volonté d'appliquer cette méthodologie d'analyse dans les régions arides pour la rive sud de la méditerranée, provient du fait que la quasi majorité des études récentes qui traitent l'écoulement d'air ne prend en charge que les sites qui se trouvent en Europe, en Amérique du nord ou en Asie, par contre les régions chaudes et arides de typologie vernaculaire comme le cas de notre région n'ont pas été analysées ou étudiées par le même degré de niveau de recherche ([Kitous S., 2012](#)).

Notre cas d'étude se trouve dans la vallée du M'ZAB, qui se distingue par une position géographique extrêmement difficile et entièrement localisée dans le désert Algérien ; sa température très élevée pendant la période estivale de **36.8°C à 46°C**, cette ville se caractérise

aussi par un paysage rocheux et difficile d'accès et par un climat très sec où l'humidité relative moyenne varie seulement de **50** à **60** mm (Benyoucef, 2010).

Dans les villes historiques partout dans le monde, le développement durable caractérise implicitement leurs architectures. En Algérie en particulier, à la Casbah, en Kabylie ou ailleurs, la typologie architecturale ancienne avait adopté les concepts de base du développement durable, surtout l'aspect relatif à la protection contre les radiations solaires (comme le tissu urbain compact, murs épais avec des matériaux locaux de haute compacité, ruelles de faible largeur, passages couverts et ombrés) (Kitous S., 2012). Pareil pour la vallée du M'Zab, qui est une région saharienne, et pourtant dans ce désert inhospitalier, les habitants ont su s'adapter, ils ont bâti des Ksour d'une haute qualité d'ambiance extérieure en complète harmonie avec la nature.

L'époque contemporaine et son corollaire le nouveau mode de vie émergeant, sans cesse innovant, Ghardaïa comme d'autres régions du pays, est confrontée au problème de l'Îlot de Chaleur Urbain (ICU), à la pollution atmosphériques et à la détérioration de la qualité du microclimat de la cité. La réalité actuelle urbaine se conjugue par un bouleversement spatial non aligné avec les notions urbanistiques théoriques, posant de nouveaux défis d'aménagement, à cause de la mobilité humaine croissante et l'étalement incontrôlé du cadre bâtis. Ces menaces ont affaibli la qualité du patrimoine historique de la ville de Ghardaïa découlant du changement et de la modification de la structure urbaine, qui s'est accentuée par l'augmentation de l'énergie sensible (Q_H) ainsi que celle de l'énergie de stockage (ΔQ_S), sous l'effet de la diminution de la richesse des palmeraies (Bouchair, A., 2004).

Cette étude s'appuie sur une analyse d'un canyon urbain qui se situe au cœur de la ville, à proximité du célèbre Ksar de Ghardaïa, celui-ci était choisi pour sa densité particulière et importante en activité commerciale, circulation mécanique et humaine. Ce canyon est irrégulier, il a une largeur variable de **7,9m** à **5,2m** et une longueur non rectiligne de **139 m** il est actuellement l'artère la plus importante de la ville.

I.2. Problématique

D'après les constatations précédentes, les éléments morphologiques urbains influencent considérablement le microclimat. Toutefois, les éléments de morphologies urbaines et les composantes du microclimat sont nombreux et difficiles à maîtriser simultanément. En conséquence, le cadre de cette étude est délimité, elle vise à étudier l'écoulement de l'air et la concentration de l'air en CO₂ dans une rue Canyon dans le Ksar de Ghardaïa.

La question : **Est-ce que les éléments morphologiques urbains pour le Canyon urbain du Ksar de Ghardaïa ont un impact sur l'écoulement de l'air et la Concentration en CO₂ ?**

I.3. Hypothèses

1. La morphologie actuelle du Canyon urbain du Ksar de Ghardaïa a un impact sur l'écoulement de l'air ainsi que sur la concentration du CO₂, du fait, que cette concentration en CO₂ est considérée comme linéaire, dégagée par la circulation mécanique.
2. Des configurations géométriques alternatives proposées peuvent optimiser la qualité de l'air, et faire aplanir le taux maximal de la concentration en CO₂.

I.4. Objectifs :

- Participer au développement des outils d'aide à la décision, puisqu'ils sont considérés comme les méthodes les plus prometteuses pour les années à venir, aussi la simulation par CFD en 3D fait partie de cette vision de développement.
- Utiliser la simulation par CFD en 3D et favoriser une démarche d'analyse scientifique d'un projet architectural pour la phase de conception ou pour un projet déjà réalisé, afin de cibler l'élément défaut d'une morphologie urbaine pour faire aboutir ainsi à des solutions alternatives d'optimisations.
- Adopter une méthodologie qui permet d'envisager des formes plus complexes pour des motifs urbains différents, afin de mieux identifier et comprendre des effets géométriques (réels ou proposés) ou des scénarii microclimatiques donnés.

I.5. La méthodologie

La méthodologie dans notre recherche adopte **une phase d'analyse** et **une phase d'optimisation**. La phase d'analyse de l'état de fait est divisée en deux parties, **une partie de prise de mesures** des conditions microclimatiques du canyon urbain (qualité de l'air en CO₂

[ppm], températures [°C], humidité [%], éclairement [lux], vitesse de vent [m/s], intensité sonore[DB]) afin de définir et d'identifier le contexte d'intervention, une **deuxième partie** dans laquelle nous avons introduit le maximum de données microclimatiques au modèle Ansys-Cfx afin d'obtenir une vision générale sur l'aéroulque de l'air et la concentration en CO₂ tout le long du Canyon urbain, pour citer les obstacles morphologiques (architecturales et urbanistiques) qui perturbent l'aéroulque de l'air et la dispersion du polluant au sein de notre Canyon.

Après cette phase d'analyse, **la phase d'optimisation** sert à proposer des aspects morphologiques alternatifs et pertinents, de ce fait les conséquences et les résultats sont minutieusement estimables et contrôlables.

L'optimisation morphologique adoptée dans notre recherche consiste à restructurer le canyon urbain à la zone de concentration de polluant (en aval du canyon), l'intervention INSITU consiste à proposer deux grandes solutions urbanistiques (qui touchent en grande partie le prospect, hauteur des bâtiments, distance entre bâtiments, densité de surface et le volume construit), ces aspects ont été choisis parmi neuf autres, ils ont été estimés par **méthode statistique** comme les plus influant sur l'écoulement de l'air dans un canyon urbain. Cette démarche a été réalisée par les chercheurs [Edussuriya et al \(2014\)](#) (§.Chap. III & VI. théorie d'Edussuriya et al)

Le canyon urbain a connu une déviation par rapport à sa finalité, d'où un effet de cumul qui se distingue par la pollution de cette zone. En conséquence et suivant la méthode d'[Edussuriya et al \(2014\)](#), **la première grande solution** urbanistique proposée donne avantage pour un écoulement parallèle et régulier par rapport à l'axe médiane du canyon, cette intervention touche spécialement les aspects du prospect, distance entre bâtiments, volume construit et densité de surface.

La deuxième grande intervention est la création d'une configuration typologique urbaine différente au niveau du dernier îlot, cette proposition touche spécialement les aspects du prospect, hauteur des bâtiments, distance entre bâtiments, densité de surface et volume construit.

Chapitre II : Dans ce chapitre les différentes échelles de sources d'énergie ont été abordées, en commençant par l'échelle de bâtiment et son (Q^*) qui représente le rayonnement global de toutes ondes à l'extérieur du bâtiment, qui se compose d'une chaleur sensible, latente, chaleur de conduction et chaleur de stockage de ses matériaux. En deuxième échelle, les sources

énergétiques urbaines seront détaillées, par la même logique que la présentation des sources d'énergie d'un bâtiment.

Les sources énergétiques seront abordées, puisque, elles sont responsables des mouvements convectifs urbains, interférant ainsi les couches atmosphériques (**UCL & UBL**) qui correspondent respectivement, à la couche de la canopée urbaine et à la couche de limite urbaine.

Ensuite, l'îlot de chaleur urbain ICU sera présenté et traité de façon détaillée en insistant sur les enjeux de son intensité. En troisième volet, l'atmosphère urbaine sera présentée.

Chapitre III : il s'agit de l'état de l'art du domaine « *Morphologies urbaine et écoulements d'air* » en se basant sur les principaux travaux de nombreux chercheurs à travers le monde, parmi eux : **Oke et al, Chan et al et Vardoulakis et al**...Etc.

Ce chapitre permet d'abord d'identifier les principales théories qui prennent en considération la définition du Canyon urbain par ; sa typologie, sa longueur, sa largeur et son gabarit.

Dans cette phase également, l'effet d'une étude combinatoire entre la morphologie du Canyon et l'aérodynamique urbaine est abordée d'une manière profonde et détaillée en citant en particulier les travaux et les expériences de **Santamouris et al, Assimakopoulos et al, Ali-Toudert, Balogun et al, Carpentieri et al, Soulhac et al. Kastner-Klein et al.**

Les intersections et les sections intermittentes dans les Canyons sont davantage citées dans cette partie, en démontrant leurs avantages et leurs intérêts, suite à la présentation de quelques exemples à travers le monde, une étape supplémentaire sera utile pour leurs classifications par rapport à ces segments.

Parallèlement, on présente une recherche très récente et très intéressante faite par **Edussuriya et al (2014)**, s'appuyant sur **méthodes d'analyses statistiques** pour citer d'une manière scientifique les éléments géométriques les plus influents sur l'Aérodynamique d'air urbaine.

Dans cette section finale, l'aérodynamique de l'air est influencée par de nombreux facteurs qui seront présentés, comme suit:

- Le changement de rapport de prospect d'un Canyon urbain, crée des régimes d'écoulement d'air différents (classification d'**Oke (1990)**).
- La direction du vent par rapport à l'orientation de l'axe du Canyon (écoulement parallèle, perpendiculaire ou bien oblique) ;
- Effet de rugosité ou la longueur de rugosité « **Roughness effect** » ;

Chapitre IV :

Ce chapitre présente l'état de l'art de la modélisation de la dispersion des polluants par CFD pour estimer une qualité d'air (intérieure/extérieure) dans un environnement bâti. Seize articles par ordre chronologique suivant l'avancée technologique du CFD (**à partir de l'année 1990**) seront identifiés, ces exemples appliquent des études combinatoires entre les mesures sur terrain, la soufflerie et la CFD, pour estimer la dispersion des polluants pour un microclimat. La plupart de ces sujets de recherches traitent des modèles génériques pour un bâtiment isolé ou canyon urbain isolé, elles traitent parfois des configurations réelles d'un tissu urbain.

Chapitre V : Ce chapitre présente d'abord la ville du patrimoine mondial « la ville de Ghardaïa », en présentant les particularités de son paysage et de sa nature ainsi que sa typologie unique au monde, cela en matière d'organisation spatiale et sociale ou de son mode constructif, cette partie d'étude traite le processus de développement pendant le repli et l'autarcie et pendant l'ouverture de l'espace M'Zabien. De même, les parcours et les ruelles de cette ville millénaire seront traités, en mettant l'accent sur la vélocité des vents dominants exposés au Ksar. En deuxième échelle, le site objet d'étude « la rue Canyon », sera identifié en présentant, son processus de développement, sa typologie, ces activités et ces vélocités de vents. L'objectif de cette section d'étude consiste à distinguer les problèmes existants dans le Canyon afin de les bien analyser, pour trouver ensuite des solutions alternatives et proposer des restructurations urbaines.

Chapitre VI : Ce chapitre présente la méthodologie et la démarche utilisée. **En premier lieu**, une manière de présenter les moyens et les outils utilisés afin d'identifier le contexte d'intervention. **En seconde lieu**, la démarche du CFD sera présentée afin de simuler la géométrie réelle ainsi que deux propositions alternatives d'optimisation. **En troisième lieu**, les étapes de la simulation de l'écoulement aéraulique au niveau du Canyon urbain de la ville de Ghardaïa seront présentées d'une manière détaillée et approfondie.

Chapitre VII : Ce chapitre aborde le thème « **Microclimat du Ksar de Ghardaïa et du Canyon urbain** », il est composé de deux parties, l'une traite l'influence de la morphologie urbaine sur le microclimat global du ksar de Ghardaïa, l'autre aborde l'étude du microclimat au niveau du Canyon urbain. **Chapitre VIII :** Consiste à optimiser la qualité de l'air du Canyon urbain, à l'aide de la simulation par CFD en 3D, en projetant des configurations géométriques alternatives.

CHAPITRE II :

LES SOURCES ÉNERGÉTIQUES URBAINES ET ICU (Ilot de Chaleur Urbain)

« Nous façonnons nos bâtiments; ce sont eux qui nous façonnent ensuite »¹

(1) Winston Churchill

Introduction :

Dans ce chapitre les différentes échelles de sources énergétiques vont être abordées ainsi que leurs mouvements convectifs qui influencent l'écoulement d'air, en commençant d'abord par l'échelle de bâtiment et son (Q^*) qui représente le rayonnement global de toutes les ondes de l'extérieur du bâtiment qui se compose d'une chaleur sensible, latente, chaleur de conduction et chaleur de stockage qui concerne ses matériaux composants. En deuxième échelle et par la même méthodologie, les sources énergétiques urbaines seront abordées d'une façon plus profonde.

Par la suite, l'îlot de chaleur urbain ICU sera présenté et traité de façon détaillée en mettant en apparence les enjeux et les causes de son intensité. En troisième lieu, l'atmosphère urbaine et le comportement de l'écoulement de l'air à l'échelle atmosphérique vers l'échelle de la ville seront présentés et traités de manière détaillée.

II.1. Les sources énergétiques d'un bâtiment :

Un bâtiment est la source primaire pour une énergie urbaine, selon [Oke \(1990\)](#) l'énergie dans un bâtiment est constituée des sources diverses, des chaleurs de source humaine Q_F , et de la chaleur d'échange sensible et latente avec l'air extérieur Q_H et Q_E , de l'énergie d'échange entre le bâtiment et le sol Q_G , ainsi que l'échange entre les matériaux et le volume interne ΔQ_A (Fig. II.1).

Le bilan énergétique complet d'un bâtiment et son volume d'air est donné sous la formule suivante (Equ. II.1):

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + Q_G + \Delta Q_S \quad (\text{Equ. II.1})$$

D'où :

- Q^* : Net rayonnement de tout-ondes de l'extérieur du bâtiment.
- Q_F : Total de chaleurs internes anthropiques rejetées.
- Q_H et Q_E Chaleur échange sensible et latente avec l'air extérieur.
- Q_G La chaleur de conduction entre le bâtiment et le sol.
- ΔQ_A la variation nette de stockage de l'énergie par les matériaux de construction et le volume d'air enfermé.

L'entrée des rayons directs à courtes ondes par rapport aux faces d'une maison est très inégale, en raison de la géométrie tridimensionnelle de la maison. L'appréciation de la complexité de l'entrée de ces rayons solaires est obtenue en tenant compte des remarques suivantes:

- Les murs en orientation clairement Est reçoivent un pic précoce en faisceau direct de rayonnement solaire (S) peu de temps après le lever du soleil, parce que leurs surfaces de réception sont illuminées dès que le soleil est presque au zénith (altitude solaire est faible θ est faible) (**Fig. II.2**).
- Au milieu de la journée dans l'hémisphère Nord: le mur de face Sud est le plus favorisé (**Fig. II.2**).
- Les murs de la façade Nord ne reçoivent les radiations que pendant la période du solstice d'été (**Fig. II.2**).

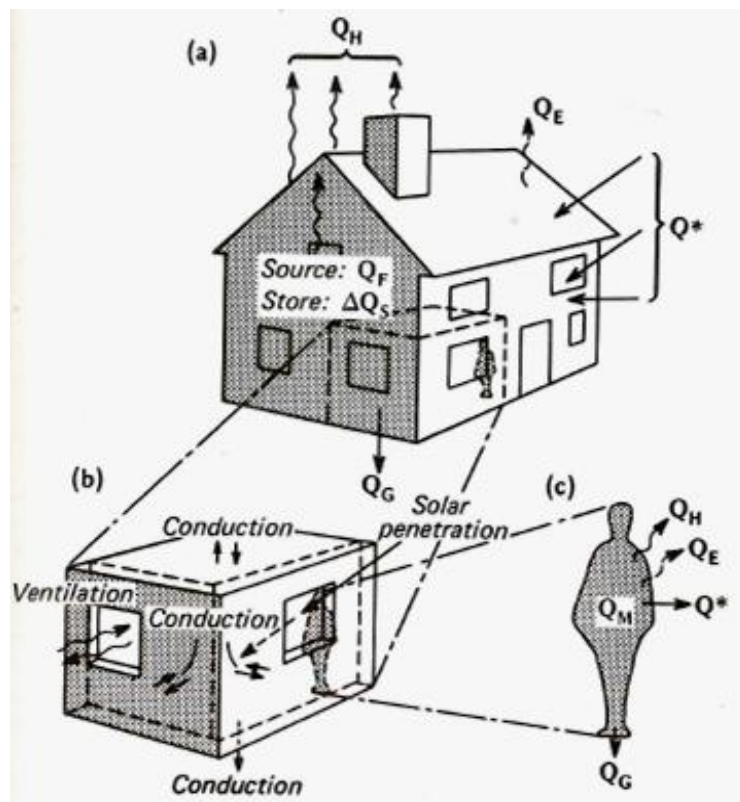


Fig. II.1. Représentation schématique des flux impliqués dans le bilan énergétique de (a) un volume complet du bâtiment, (b) un local dans un bâtiment et (c) une personne dans une pièce (Oke, 1990).

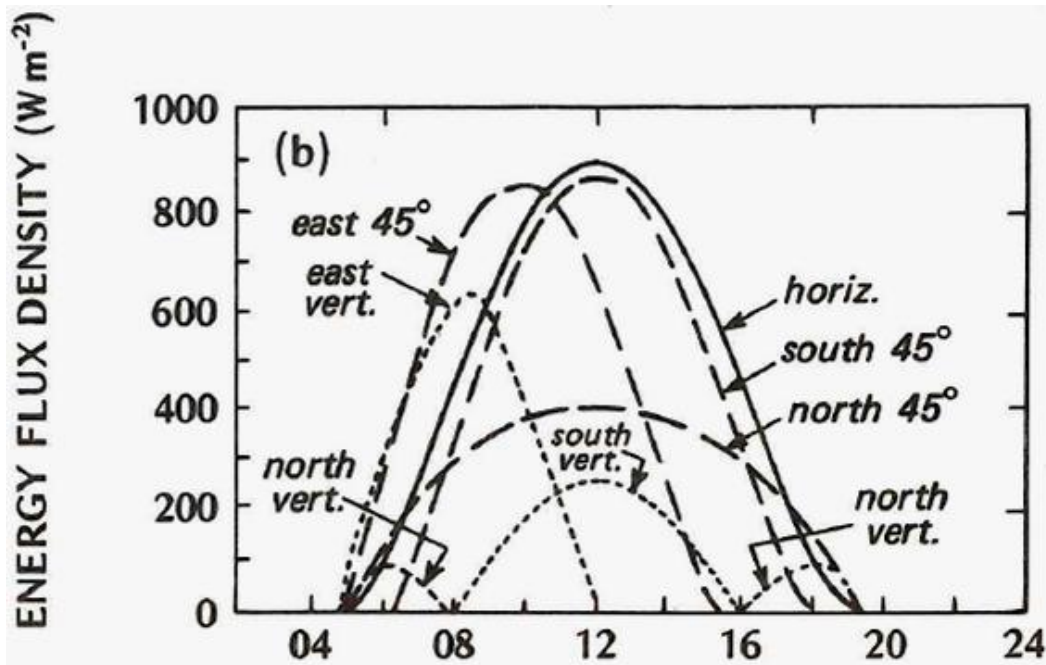


Fig. II.2. Variation diurne de rayonnement solaire direct sur des surfaces pour une ville de latitude 40° N (solstice d'été - 22 juin) (Oke, 1990).

II.2. Les sources énergétiques urbaines:

À l'échelle urbaine, le calcul d'énergie globale résultante de toutes les sources d'énergies est très difficile. D'abord cette énergie est définie comme étant un ensemble de plusieurs sources énergétiques au niveau de la canopée urbaine. Selon Oke (1990) le rayonnement net Q^* dans la canopée urbaine est additionné aux chaleurs anthropiques Q_F . D'une manière plus détaillée, l'énergies globales font la composition de chaleur sensible et latente Q_H et Q_E , et de la chaleur de stockage ΔQ_S et le terme advectif ΔQ_A (Fig. II.3, Equ. II.2).

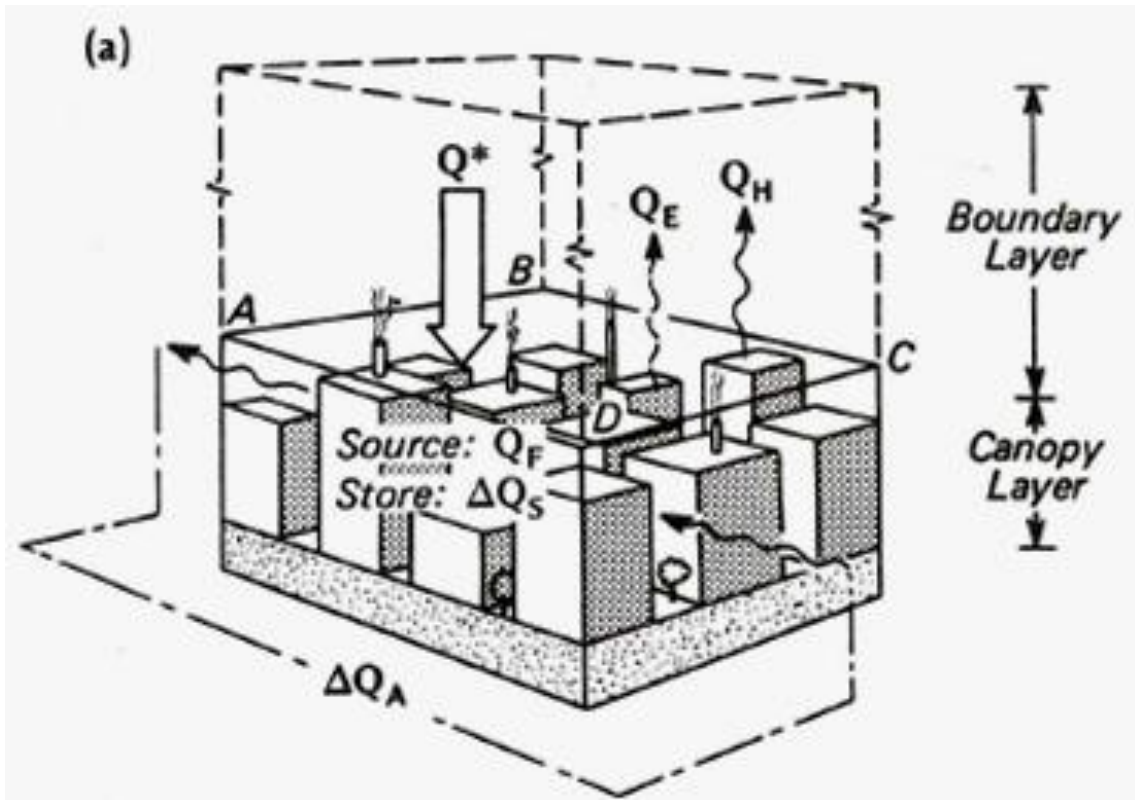


Fig. II.3. Représentation schématique des flux impliqués dans l'énergie (Oke, 1990).

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (\text{Equ. II.2})$$

D'où :

- Q^* : est le bilan radiatif appelé aussi le rayonnement net.
- Q_F : est le flux de chaleur anthropique.
- Q_H et Q_E correspondent respectivement au flux turbulents de chaleur sensible et latente.
- ΔQ_S est la chaleur de stockage.
- ΔQ_A est le terme advectif, il est souvent négligé à cause de sa valeur relativement faible à l'échelle urbaine et sa difficulté liée à sa mesure.

II.2.a. La chaleur anthropique Q_F :

Selon Oke (1990), le tableau (II.1) ci-dessous permet de comprendre le phénomène de la chaleur anthropique (Q_F), qui marque différents climats dans différentes positions géographiques. Les données présentées concernent les énergies dans les villes d'origine diverses (Electricités, Gaz, charbon, conversion solaire, essence, bois, etc.) pour les besoins essentiels de chauffage, d'industrie, de transport et d'éclairage (Fig. II.4).

La moyenne de la densité calorifique anthropique (Q_F) dépend en principe de l'énergie utilisée par les individus et de la densité des populations dans les villes.

Dans certaines villes, les sources anthropiques peuvent dépasser la valeur du rayonnement net ($Q_F > Q^*$), notamment pendant l'hiver comme la ville de Manhattan et la ville de Fairbanks, ces villes ont cette particularité puisqu'elles se trouvent dans l'hémisphère nord (sont très froides en hiver). Toutefois, en été cette chaleur anthropique peut être négligeable par rapport aux sources d'ensoleillement, cela est démontré dans le tableau (II.1) et confirmé aussi par Offerle (2003) (Offerle et al., 2003).

Tableau. II.1. Moyenne de chaleurs anthropiques (Q_F) dégagées des zones urbaines sélectionnées (Oke, 1990)

Espace urbain	Année	période	Populatio n ($\times 10^6$)	Densité de la population personnes /km ²	Per capita Consommation d'énergie (Mj $\times 10^3$)	Q_F W/m ²	Q^* W/m ²
Manhattan (40°N)	1967	Annuelle	1.7	28 810	128	117	93
		Eté				40	
		Hiver				198	
Montréal (45°N)	1961	Annuel	1.1	14 102	221	99	52
		Eté				57	92
		Hiver				153	13
Budapest (47°N)	1970	Annuel	1.3	11 500	118	43	46
		Eté				32	100
		Hiver				51	-8
Sheffield (53°N)	1952	Annuel	0.5	10 420	58	19	56
West Belin (52°N)	1967	Annuel	2.3	9 830	67	21	57
Vancouver (49°N)	1970	Annuel	0.6	5 360	112	19	57
		Eté				15	107
		Hiver				23	6
Hong Kong (22°N)	1971	Annuel	3.9	3 730	34	4	~110
Singapore (1°N)	1972	Annuel	2.1	3 700	25	3	~110
Los Angeles (34°N)	1965- 70	Annuel	7.0	2 000	331	21	108
Fairbanks (64°N)	1965- 70	Annuel	0.0 3	810	740	19	18

II.2.b. La chaleur sensible Q_H

Selon Ringenbach (2004), une partie d'énergie stockée par les matériaux, qu'il s'agisse de matériaux de revêtement des espaces urbains ou des matériaux de construction de bâtiments (qui sont utilisées au niveau des façades). Chaque matériau est différent de l'autre par sa

performance thermique (**Tableau. II.2**) et accumule certaine énergie pendant la journée et restitué durant la nuit cette énergie collectée (**Fig. II.4**). Par ces aspects, la ville se distingue de la campagne, parce que ce comportement énergétique augmente d'une façon considérable l'intensité de l'îlot de chaleur urbaine. Scientifiquement, la chaleur sensible QH crée un espace dynamique d'échange par convection thermique entre les surfaces couvertes et l'air au-dessus et cela dès le coucher de soleil (pendant la nuit) ou par un effet mécanique sous l'effet de la force de pression, il en résulte un courant d'air de forme de boucle. Il faut ajouter, que cette chaleur sensible QH varie d'un quartier à un autre selon la conception d'aménagement et les matériaux utilisés, elle peut y aller jusqu'à une différence de 40% (**Schmid et al., 1991**).

En milieu naturel (à la campagne), la chaleur latente QE est supérieure, néanmoins cette source d'énergie permet de rendre l'environnement plus frais après le coucher de soleil assez rapidement par rapport à la ville (**Ringebach, 2004**).

Tableau. II.2. Propriétés thermiques des certains matériaux dans la construction (**Oke, 1990**)

Matériaux Etat sèche	Remarque	ρ densité $\text{kg m}^{-3} \times 10^3$	c Chaleur spécifique $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1} \times 10^3$	C Capacité thermique $\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1} \times 10^6$	k Conductivité thermique $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$	K Diffusion thermique m^2 $\text{s}^{-1} \times 10^{-6}$	μ admittance thermique $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1/2} \text{K}^{-1}$
Asphalte		2.11	0.92	1.94	0.75	0.38	1205
Béton	Poreux	0.32	0.88	0.28	0.08	0.29	150
	Plein	2.40	0.88	2.11	1.51	0.72	1785
Pierre brique	Moyenne	2.68	0.84	2.25	2.19	4.93	2220
	Moyenne	1.83	0.75	1.37	0.83	0.61	1065
Tuile d'argile	Moyenne	1.92	0.92	1.77	0.84	0.47	1220
Bois	Leger	0.32	1.42	0.45	0.09	0.20	200
	Lourd	0.81	1.88	1.52	0.19	0.13	535
Métal		7.85	0.50	3.93	53.3	13.6	14475
verre		2.48	0.67	1.66	0.74	0.44	1110
Plâtre	Gypse	1.28	1.09	1.40	0.46	0.33	795
Plaque de plâtre	Moyenne	1.42	1.05	1.49	0.27	0.18	635
Isolation	Polystyrène	0.02	0.88	0.02	0.03	1.50	25
	Liège	0.16	1.80	0.29	0.05	0.17	120

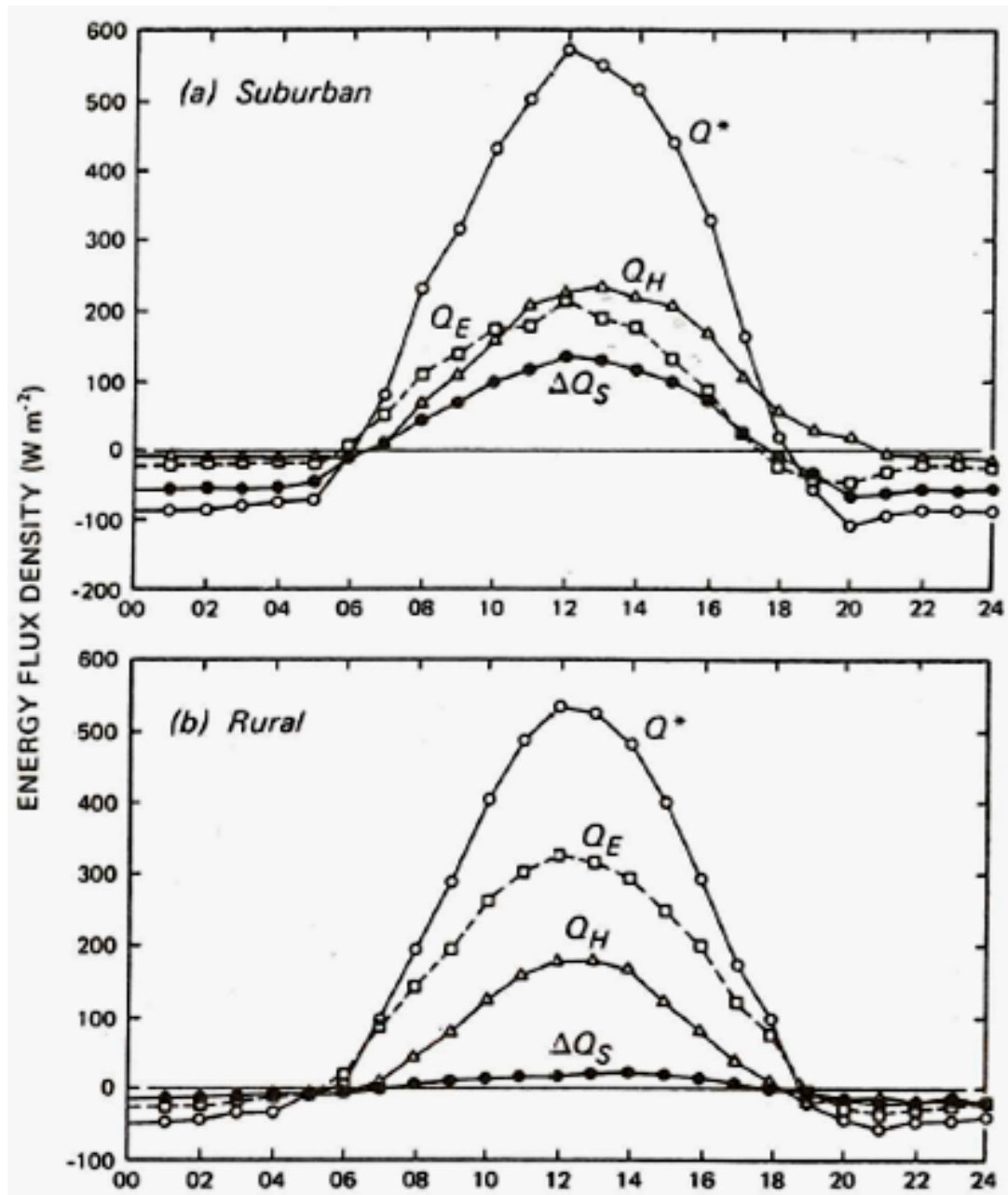


Fig. II.4. Bilan énergétique synchronique entre Q^* , Q_H , Q_E et ΔQ_S (les données sont des moyennes de 30 jours pour Vancouver), (a) un site en banlieue. (b) un site rural (Oke, 1990).

II.2.c. La chaleur latente Q_E

Selon Ringenbach (2004), cette énergie concerne plus exactement l'énergie de l'évapotranspiration du couvert végétal. Il s'agit de faire entrer l'eau dans son cycle naturel, d'évaporer l'eau infiltrée à travers le sol et de la rendre à l'atmosphère, ce cycle est applicable seulement dans la campagne (Fig. II.4).

Dans les villes, les eaux pluviales ont un autre circuit, elles parcourent les égouts après avoir traversées des zones et des surfaces imperméables.

Donc en ville, la végétation est remplacée par des matériaux étanches et cette énergie de la chaleur latente est devenue presque nulle, donc cette énergie sera renvoyée contribuant ainsi à accentuer la chaleur sensible Q_H et la chaleur de stockage ΔQ_S (Ringenbach, 2004).

II.2.d. La chaleur de stockage ΔQ_S

Selon Ringenbach (2004), il s'agit de l'énergie stockée dans le sol et les matériaux (Fig. II.3-4). Choisir un matériau dépend de sa capacité à transmettre ou à stocker l'énergie. Le remplacement de la végétation par les matériaux en ville augmente considérablement cette énergie ΔQ_S , en accentuant l'effet de piégeage de température entre les bâtiments, le plus souvent par l'usage de ces matériaux comme revêtement aux niveaux des élévations des parois pour les rues et les canyons urbains (Tableau. II.3). En ville, ces énergies accumulées le jour seront restituées pendant la nuit, tandis que la campagne se refroidit plus rapidement (Ringenbach, 2004).

II.2.e. Effet de l'albédo

Selon Bozonnet (2005), un bon choix de matériaux peut augmenter l'albédo. Quand l'albédo est supérieur, il peut fortement diminuer l'effet de l'îlot de chaleur urbain (ICU). L'urbanisation forte entraîne souvent un faible Albédo (Bozonnet, 2005). Une expérience faite par Akbari et al (2001) démontre que l'usage des matériaux à forte albédo sur les toits des écoles de la Californie peut faire diminuer la consommation d'énergie destinée à la climatisation de 35% (Akbari et al., 2001). Scientifiquement, l'albédo est une quantité d'énergie solaire réfléchi vers le haut. Il est estimé en pourcentage (%) ou par une valeur comprise entre 0 et 1. Plus albédo est élevé, plus la surface est réfléchissante (Fig. II.5). Les éléments qui contribuent le plus à l'albédo sont les surfaces de couleurs claires, l'eau et les nuages. Par exemple, un albédo de la neige est de 0,87, soit donc 87 % de l'énergie solaire est réfléchi (Futura planet, 2017).

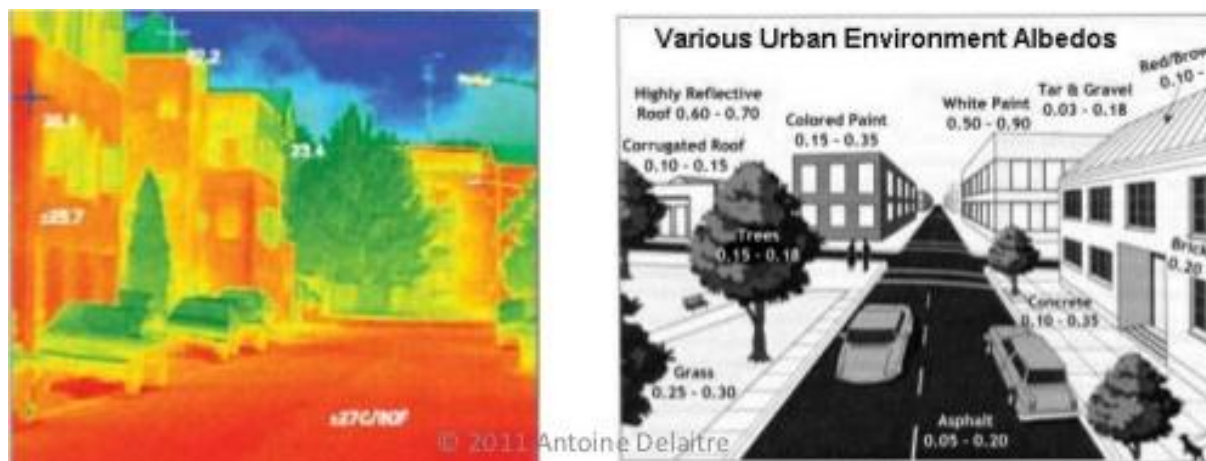


Fig. II.5. Différents albédos pour un environnement urbain (la valeur de l'albédo est [0 à 1], également exprimée [%]) dépend de la couleur de l'obstacle rencontré (Urban stress, 2017).

Tableau. II.3. Propriétés radiatives des matériaux et des zones urbaines typiques (Oke, 1990)

surface	Albédo α	Émissivité ϵ	surface	Albedo α	ϵ émissivité
1. Routes			4. fenêtres Vitrage Clair		
Asphalte	0.05-0.20	0.95	Angle <40°	0.08	0.87-0.94
2. Murs			Angle 40°-80°	0.09-0.52	0.87-0.92
Béton	0.10-0.35	0.71-0.90	5. Peinture		
Brique	0.20-0.40	0.90-0.92	Blanche, badigeon	0.50-0.90	0.85-0.95
Pierre	0.20-0.35	0.85-0.95	Rouge, Marron, Vert	0.20-0.35	0.85-0.95
Bois		0.90	Noir	0.02-0.15	0.90-0.98
3. Toiture			6. L'air urbain		
Goudron et gravier	0.08-0.18	0.92	intervalle	0.10-0.27	0.85-0.96
Tuile	0.10-0.35	0.90	Moyenne	0.15	~ 0.95
Ardoise	0.10	0.90			
Chaume	0.15-0.20				
Tôle Ondulée	0.10-0.16	0.13-0.28			

III.3. L'îlot de chaleur urbain ICU

III.3.a. Exemple de villes

Selon ONERC (2010), l'air dans la canopée urbaine est plus chaud que dans la campagne, c'est l'effet d'îlot de chaleur urbain qui est considéré comme un microclimat spécifique au

milieu d'un environnement urbain, sa forme et sa taille varient dans l'espace, notamment entre deux cités, dans le temps (variable pendant la journée) pour les raisons et les caractéristiques suivantes (ONERC, 2010).

- Météorologiques.
- Des particularités de localisation.
- Conceptions urbanistiques.

Toujours selon les figures (II.6/7). ONERC (2010) confirme l'impact de la morphologie urbaine sur l'îlot de chaleur urbain, puisque scientifiquement le stress thermique urbain dépasse nettement celui du périurbain (à la campagne), puisque au centre l'ICU s'intensifie juste après le coucher de soleil sous l'effet des sources énergétiques urbaines globales [Q^*], ce stress disparaît tardivement quelques heures après le coucher de soleil. A la même période en revanche, la campagne profite d'un effet de refroidissement nocturne grâce à la contribution de la **chaleur latente Q_E** .

La vitesse et la nature du vent à l'intérieur d'une ville influencent l'intensité de l'ICU, on constate ainsi que : En présence d'un écoulement de vent modéré de vitesse de **3 à 6 m/s**, le champ de température prend la forme d'un panache étiré selon l'axe de l'écoulement (Fig. II.10) ; mais l'ICU disparaît sous l'effet de vitesse de vent de **11m/s**. Avec la nébulosité l'ICU diminue, les nuages interviennent en augmentant le refroidissement radiatif nocturne, cela veut dire que pendant l'été l'ICU est intense tandis que durant une saison pluvieuse il est faible et moins fréquent.

Selon toujours le rapport de l'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique Français (ONERC), Paris a enregistré pendant la canicule de **2003** un excès de température de **7°C** de différence entre le centre et la campagne (Fig. II.6/7) (ONERC, 2010). La schématisation surfacique de température de l'air a montré que le jour du **14 août 2002** est considéré comme le jour le plus chaud de cette année pour la ville de New York. À **6h**, la carte présente un écart de **8°C** d'intensité de l'ICU entre le cœur de la ville et la périphérie moins de **100 km**. L'ICU peut être atténué, Selon (ONERC, 2010), grâce à la plantations d'arbres, des toitures avec du végétale sous l'effet de la **chaleur latente Q_E** , ou par l'usage des surfaces avec important valeur d'albédo .i.e. qui réfléchissent une grande partie du rayonnement solaire au lieu de l'absorber.

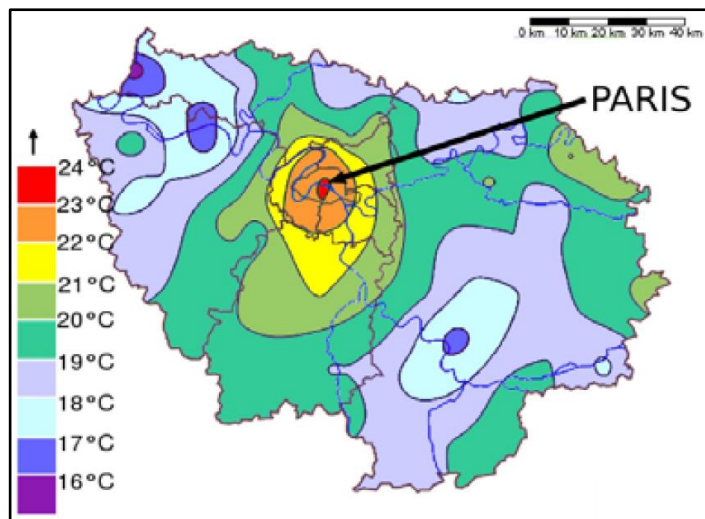


Fig. II.6. Variations de température (durant la nuit) à Paris et ses environs pendant la canicule de 2003, une intensité de 7°C, à cause de l'Îlot de Chaleur Urbain - ICU (ONERC, 2010).

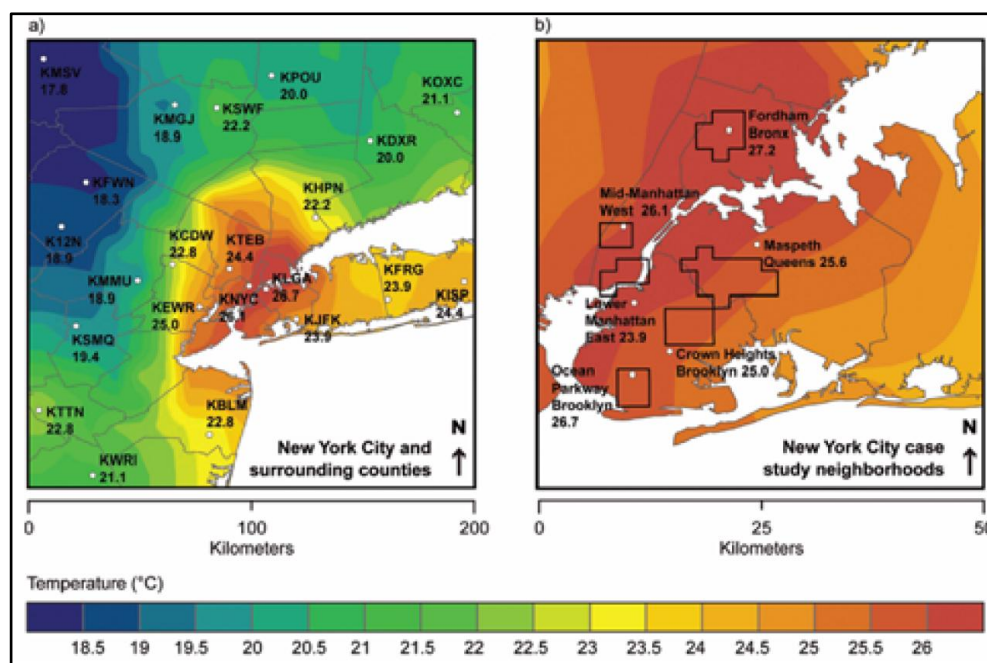


Fig. II.7. l'îlot de chaleur urbain à New York le 14 août 2002 présente une différence de 8°C entre le centre urbain et la périphérie (ONERC, 2010).

II.3.b. ICU variables, et aspects dimensionnels des villes

Les villes occupent un micro climat adapté à leurs échelles par le fait de l'existence de «l'îlot de chaleur urbain-ICU», ce phénomène signifie un excès de chaleur à l'intérieur de la ville par rapport à la campagne, selon les recherches de Oke (1990), une différence de 2°C de maxima d'intensité de l'ICU peut être enregistrée pour une ville de 1000 habitants. Une

différence de 12 °C en revanche, peut être enregistrée pour une ville de plusieurs millions de citoyens (Oke, 1990).

Selon Oke (1990), la figure (II.8) montre les variations de température de l'air en rapport avec la dimension horizontale, en traversant la campagne vers le centre urbain d'une grande ville avec du ciel sans nuages ; des vents légers ou bien juste après le coucher du soleil. En outre, la température de l'air est différente par rapport à la dimension verticale d'une couche à une autre. Selon Santamouris et al (1999), la différence de température est importante par stratification atmosphérique, une valeur de 3°C est enregistrée dans une expérience au cours de la journée entre deux élévations différentes dans une couche de la canopée urbaine (Santamouris et al., 1999).

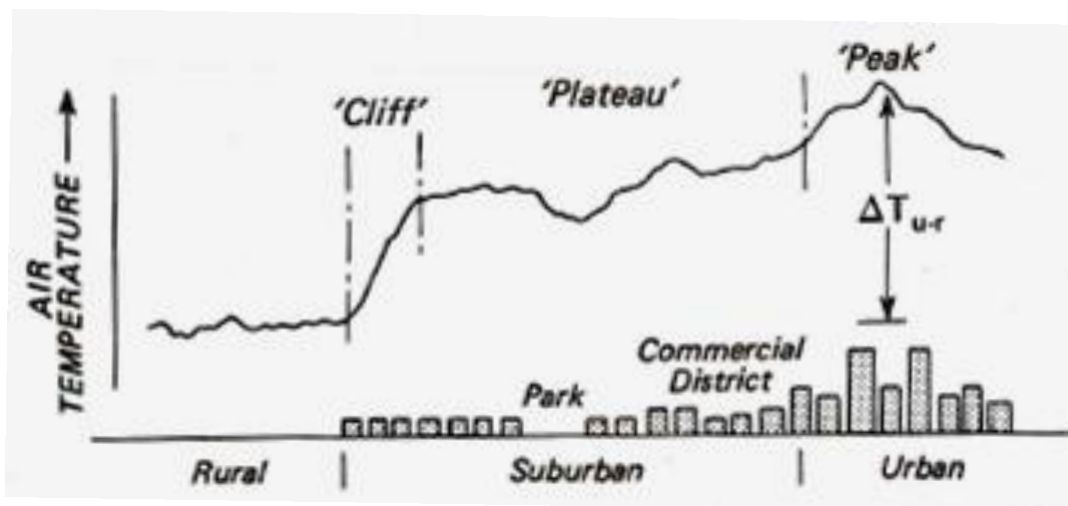


Fig. II.8. Section sur la variation de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) (Oke, 1990)

II.3.c. Les principales causes de l'ICU

Selon Oke 1990, l'émergence de l'îlot de chaleur urbain a été attribuée à diverses causes comme indiqué dans le tableau (Tableau. II.4, Fig. II.9). Toutes ces «causes» citées en hypothèses dans le tableau ont été vérifiées scientifiquement, leurs contributions à rendre des zones urbaines plus chaudes, ont été prouvées.

- En Été, les **"causes" 1 et 5** semblent possibles, avec un degré en moins pour les **"causes" 4 et 6**, qui peuvent être combiné pour faire une Canopée ou un entrepôt de chaleur sensible par jour.

- Après le coucher de soleil, les **"causes" 3 et 7** empêchent la dissipation rapide de la chaleur, elles tiennent à maintenir les températures urbaines plus élevées que dans la campagne.
- En Hiver, le rôle de **"cause" 4** est susceptible de devenir le plus important, voire le plus dominant.

Tableau. II.4. Les hypothèses qui provoquent l'émergence de l'îlot de chaleur urbain (Oke, 1990).

Les anomalies qui provoquent L'ICU	Causes
1 Augmentation d'absorption des radiations de courtes ondes.	Augmentation des surfaces et inter-réflexions par la géométrie du Canyon.
2 Augmentation des radiations de longues ondes de la voûte céleste.	Une plus grande absorption et réémission due de la pollution de l'air.
3 Diminution de perte des radiations de longues ondes.	Réduction du facteur de la vue de ciel due par la géométrie du Canyon.
4 Source de chaleur anthropogénique.	Dû à la déperdition calorifique des constructions et trafic
5 Stockage accrue de chaleur sensible.	Augmentation de l'admission thermique due aux matériaux de construction.
6 Diminution de l'évapotranspiration.	Augmentation de l'imperméabilité de l'eau (usage de matériaux de construction imperméable) et manque de la végétation au milieu urbain.
7 Diminution des transferts thermiques par transport.	Diminution de la vélocité des vents au Canyon urbain.

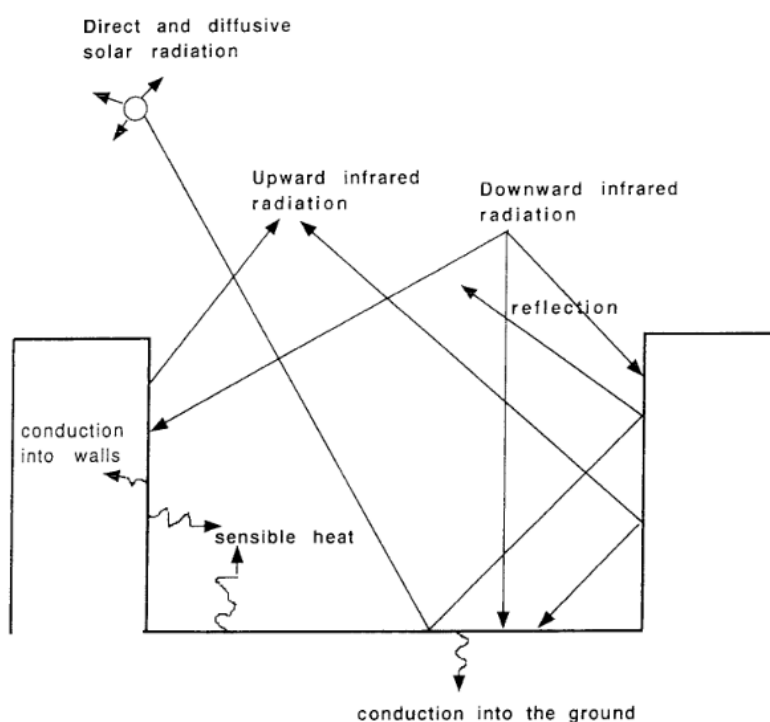


Fig. II.9. Inter-réflexions schématisées au Canyon (Ca et al., 1995).

II.4. L'atmosphère urbaine et ICU

Le volume de l'îlot de chaleur urbain (ICU) est variable surtout en hauteur. **Pendant le jour**, selon [Ringebach \(2004\)](#), la convection est importante et l'îlot de chaleur urbain peut s'étendre de **600m** jusqu'à **1500m** au dessus de la ville. **Pendant la nuit** en revanche, cette couche s'installe à moins de **300m** de hauteur.

L'atmosphère aussi au-dessus d'une ville est instable, elle se compose de deux parties générées par la couche limite de la ville.

II.4.a. La canopée urbaine « Urban Canopy Layer UCL » :

Dans cette couche (**Fig. II.3**) de nombreux processus physiques se produisent, comme le flux de chaleur sensible ou latente, cette couche s'étale du sol jusqu'à la hauteur des toits des immeubles, elle contient; les activités humaines ; les volumes des bâtiments ; l'air qui circule entre les constructions et le sol jusqu'à une certaine profondeur. Le microclimat à cette échelle, est déterminé essentiellement par l'interaction entre la morphologie urbaine et l'écoulement de l'air.

II.4.b. La couche limite urbaine « Urban Boundary Layer UBL »

Selon [Ringebach \(2004\)](#), cette couche fait partie de l'atmosphère, sa partie inférieure est affectée par la présence de la ville. Généralement dans le cas de l'îlot de chaleur urbain, cette couche peut avoir plus d'air chaud (en provenance de la ville) que d'air frais (de la campagne) (**Fig. II.10-12**). Son épaisseur peut prendre plusieurs centaines de mètres, elle dépend essentiellement ; des paramètres de surfaces ; de l'étendue de la ville et des conditions atmosphériques.

Dans le cas, où la vitesse du vent dépasse $> 3\text{m/s}$, cette couche reconstituée est poussée par l'écoulement du vent vers la campagne, comme résultat un panache urbain « **Urban Plume** » se crée au-dessus de la couche limite rurale « Rural Boundary Layer **RBL** » (**Fig. II.10**). En revanche, dans le cas où la vitesse du vent est inférieure $< 3\text{m/s}$, un dôme urbain virtuel se crée (**Fig. II.11**) et sera constitué de bulle d'air chaud qui se forme et qui se reconstitue à chaque fois par effet de mouvements convectifs.

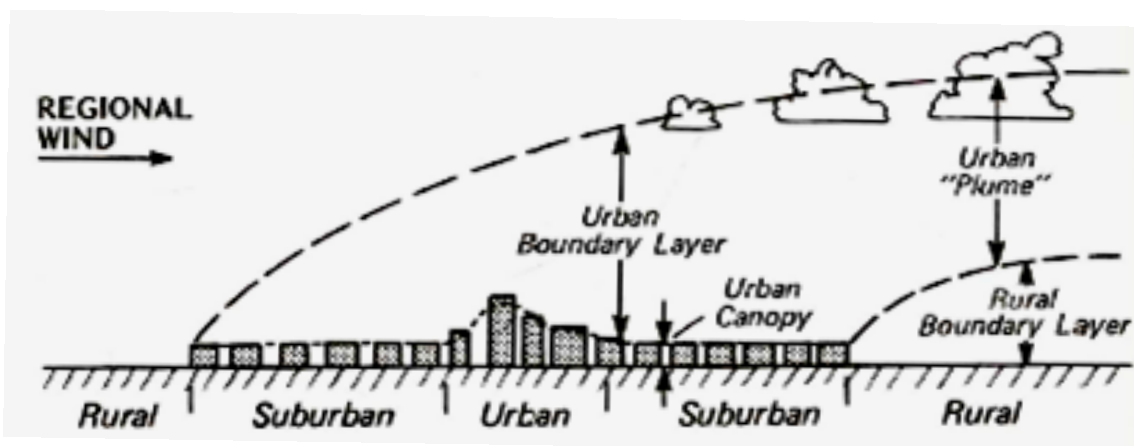


Fig. II.10. Représentation schématique de l'atmosphère urbaine illustrant une classification à deux couches urbaines, et la création de la Panache Urbaine « Urban Plume » sous l'effet de la vélocité du vent $>3\text{m/s}$ (Oke, 1990).

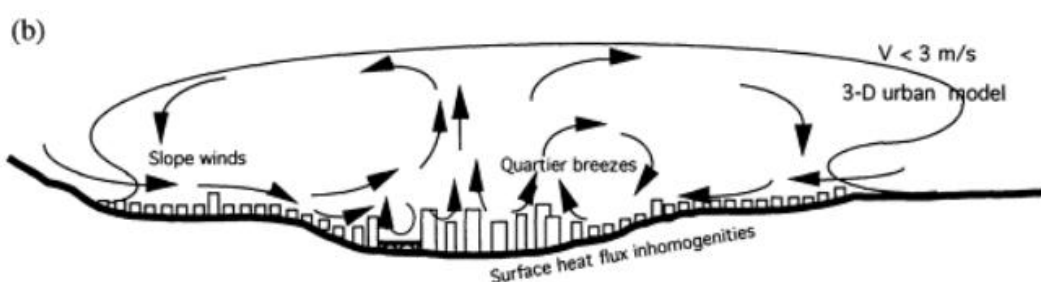


Fig. II.11. Vélocité du vent faible $<3\text{m/s}$, Un dôme urbain virtuel se crée, il sera constitué de bulle d'air chaud qui se forme et qui se reconstitue à chaque fois par effet de mouvements convectifs (Gyr et al., 1995).

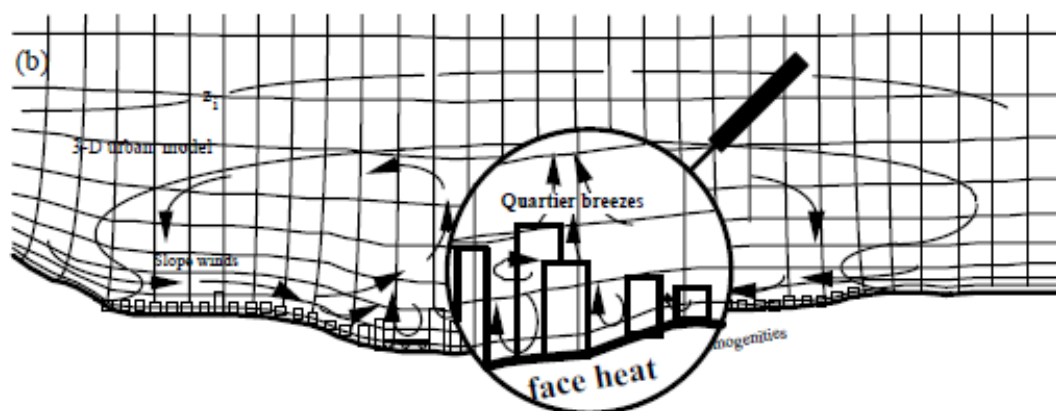


Fig. II.12. Mouvements convectifs de l'aérodynamique de l'air pour un échantillon de la canopée urbaine « UCL » (Gyr et al., 1995).

Conclusion

Deux échelles, pour les sources d'énergie, ont été abordées, l'échelle du bâtiment et l'échelle urbaine, les deux ont un Q^* qui représente le rayonnement net. Ce bilan d'énergie est une composition de plusieurs énergies d'où l'échelle du bâtiment se compose de la chaleur sensible, latente, de la chaleur de conduction et de la chaleur de stockage de ses matériaux. Par contre, l'échelle urbaine se compose essentiellement des sources de la même nature comme une simple maison, mais d'une façon plus complexe.

Les enjeux et les causes de l'intensité de l'îlot de chaleur urbaine ICU, l'atmosphère urbaine et le comportement de l'écoulement de l'air à l'échelle atmosphérique ont été traités et présentés dans le chapitre.

L'objectif principal de la présentation de ces sources énergétiques est de montrer leur influence considérable par ces effets de mouvements convectifs sur l'aérodynamique de l'air au niveau de la canopée urbaine. Ces théories et ces expériences faites sur l'atmosphère urbaine vont nous servir comme moyens de comprendre l'aérodynamique de l'air dans un Canyon urbain qui sera présenté dans les chapitres suivants.

References

Revues scientifiques

- Akbari, H., Pomerantz, M. & Taha, H. 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70, 295-310.
- Ca, V. T., T, A., Ito & S, A. 1995. Characteristics of wind field in a street canyon. *Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics* [Online].
- Gyr, A., Rys, F.-S., Mestayer, P. & Anquetin, S. 1995. Climatology of Cities. *Diffusion and Transport of Pollutants in Atmospheric Mesoscale Flow Fields*. Springer Netherlands.
- Offerle, B., B, C. S., Grimmond, K., Fortuniak, T., Oke, R. & Klysik, K. 2003. Temporal variability in heat fluxes over a northern european downtown. Fifth International Conference on Urban Climate, ICUC-5, Todz, 1-5 september 2003.

- Onerc 2010. Villes et adaptation au changement climatique. Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique ed. France.
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Koronakis, I., Livada, I. & Asimakopoulos, D. 1999. Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. *Atmospheric Environment*, 33, 4503-4521.
- Schmid, H. P., Cleugh, H. A., Grimmond, C. S. B. & Oke, T. R. 1991. Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 54, 249-276.

Sitographies

- Futura planet, 2017, <http://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-albedo-1023/>. Page consulté le 23 Août 2017.
- Urban stress, 2017, <https://www.slideshare.net/aldelaitre/iii-urban-stress>. Page consulté le 24 Août 2017.

Livres de référence

- Oke, T. R. 1990. *Boundary Layer Climates Second edition*, London.

Thèses et mémoires

- Bozonnet, E. 2005. *Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments Cas de la rue canyon*. Thèse de Doctorat, Université de la rochelle.
- Ringenbach, N. 2004. *Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine: mesures,modélisation et validation sur Strasbourg*. Thèse de Doctorat, université louis pasteur Strasbourg I. France.

CHAPITRE III :

MORPHOLOGIES URBAINE ET ECOULEMENT D'AIR

« Dans la rue, tout me semble écrit, la ville est une architecture écrite »¹

(1) Jean Marie Gustave Le Clergie.

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'état de l'art relatif à l'étude d'impact des morphologies urbaine d'un Canyon urbain sur les écoulements d'air. Nous commençons par la présentation de quelques expériences et travaux de chercheurs les plus connus dans le domaine comme ; **Oke** ; **Chan** ; **Vardoulakis** ; **Santamouris** ; **Assimakopoulos** ; **Ali-Toudert** ; **Balogun** ; **Carpentieri** ; **Soulhac** ; **Kastner-Klein** ...Etc. Nous évoquerons aussi d'une façon globale les principales théories qui prennent en considération la définition d'un Canyon urbain, ses typologies et sa classification.

Nous allons élargir le champ de notre investigation à d'autres domaines en intéressant à plusieurs sujets contigus, comme les recherches qui prennent en considération les avantages des intersections au niveau d'un Canyon urbain et les classements de leurs segments.

Dans la seconde partie, la récente recherche scientifique d'**Edussuriya et al (2014)** sera abordée, puisqu'elle s'appuie sur une méthode d'analyse statistique dans laquelle les chercheurs citent les éléments morphologiques urbains les plus influents sur l'écoulement de l'air pour un Canyon urbain. De plus, certains éléments et aspects pour les canyons urbains seront traités entre autres ; l'étude d'impact de la vitesse du vent par rapport à l'axe d'un Canyon urbain (écoulement parallèle, perpendiculaire et oblique) ; l'écoulement du vent en face d'un bâtiment isolé ;

L'effet de la rugosité « *Roughness effect* » sur l'aérodynamique de l'air sera présenté à la fin du chapitre.

III.1. Un Canyon urbain

III.1.a. Définitions et études théorique des Canyons

D'après les enjeux microclimatiques et le nombre important des littératures scientifiques réalisés aux niveaux des Canyons urbains, les chercheurs scientifiques essayent depuis plusieurs années de donner des définitions à une rue canyon. La typologie et le rapport de prospect (**H/W**) sont considérés comme deux éléments importants pour définir un Canyon urbain.

III.1.b. Définition du terme Canyon urbain

Un canyon urbain est un terme récent, qui signifie en général un boulevard relativement étroit avec des bâtiments alignés en continu le long des deux côtés (Nicholson, 1975), ce terme est utilisé également pour définir les grands boulevard (Vardoulakis et al., 2003).

Une définition au sens plus large du terme est exploitée, elle comprend aussi selon Vardoulakis (2003) les ruelles urbaines qui sont flanquées par des bâtiments discontinus sur les deux rives, il s'agit également des bâtiments avec des ouvertures. La définition d'un Canyon est généralement exprimée par le prospect (H/W) qui est le rapport entre la hauteur (H) divisé par son largeur (W) (Fig.III.1) (Vardoulakis et al., 2003).

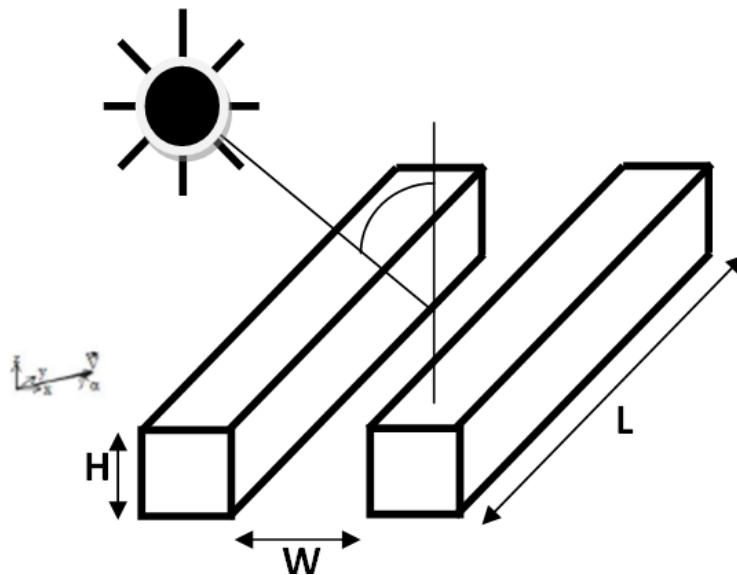


Fig.III.1. Rapport de prospect (H/W) et angle d'azimut solaire pour une rue Canyon (Louka et al., 2000)

III.1.c. Régularité et profondeur des Canyon

Selon Vardoulakis (2003), un Canyon urbain est dit régulier lorsqu'il a un rapport de prospect d'environ ou égal à 1, avec la non-existence de grandes ouvertures sur les deux parois. Une rue Canyon peut avoir un ratio inférieur à 0.5 (canyon large), tandis qu'une valeur de 2 peut être affectée pour un Canyon profond (Tableau.III.1) (Vardoulakis et al., 2003).

Tableau.III.1. Nature du Canyon urbain par rapport au prospect (**H/W**) ([Vardoulakis et al., 2003](#)).

Rapport de prospect	Nature du Canyon urbain
$\frac{H}{W} \approx 1$	Canyon urbain régulier
$\frac{H}{W} \approx 0.5$	Canyon urbain large
$\frac{H}{W} \approx 2$	Canyon urbain profond

III.1.d. Typologies des Canyons

Selon [Vardoulakis](#), l'air s'écoule différemment dans les Canyons urbains par rapport à leurs typologies, donc il est évident aussi de classer ces Canyons urbains selon cette typologie.

- Des **canyons symétriques** quand les bâtiments des deux côtés de la rue Canyon ont approximativement tous la même hauteur.
- ou **Canyons asymétrique**, pour les cas avec des différences significatives entre les hauteurs de bâtiments ([Vardoulakis et al., 2003](#)).

III.1.e. Intérêt de l'étude théorique des Canyons

La meilleure méthode permettant de définir un Canyon urbain est de commencer d'abord par son rapport de prospect : Un rapport de prospect de valeur **2** correspond à un Canyon urbain large ; Un rapport de prospect (**H/W**) de valeur **0.5** correspond en revanche à un Canyon urbain profond ; en fin, un (**H/W= 1**) correspond à un Canyon urbain régulier.

Un Canyon urbain est défini aussi par sa typologie. En conséquence, un Canyon qui est composé des bâtiments continus est dit Canyon symétrique, cependant lorsque le Canyon est composé des bâtiments discontinus, il est dit un Canyon asymétrique.

III.2. L'atmosphère et l'écoulement de l'air dans un Canyon

C'est à partir de l'échelle globale planétaire « **macro-scale, (L > 6500 km)** » que commencent les enjeux du climat d'une ville, notamment la qualité de l'air et les vents synoptiques. Cependant c'est l'échelle du microclimat « **micro-scale, L <10 km** », qui englobe de grandes

influences et d'énormes complexités d'échanges, soit au sens de l'atmosphère vers la terre ou au sens inverse.

L'écoulement du vent en milieu urbain est caractérisé par le développement de deux couches d'écoulement : une couche à la canopée urbaine (**UCL – Urban Canopy Layer**) qui se limite du sol jusqu'à la hauteur du bâtiment et une couche de limite urbaine (**UBL – Urban Boundary Layer**) qui se développe au-dessus des toits (**Tableau.III.2**) (**OKE, 1990**).

Au niveau du Canyon urbain, l'aérodynamique de l'air se produit au niveau de la canopée urbaine (**UCL**) et elle est fortement influencée par la couche supérieure, la pollution atmosphérique urbaine dans un canyon est dépendante du profil de couche limite urbaine. En conséquence, cet écoulement du vent dans le canyon urbain est significativement influencé par la structure de cette couche supérieurs notamment par son interaction avec celle de la couche limite rurale (**So et al., 2005, Kastner-Klein et al., 2004, Chan et al., 2001, Santamouris et al., 1999, OKE, 1990**)

Tableau.III.2. Les couches atmosphériques ; UCL et UBL (**OKE, 1990**).

Les couches atmosphériques au dessus la ville	Position de la couche par rapport à l'hauteur
une couche à la canopée urbaine (UCL – Urban Canopy Layer)	qui se limite du sol jusqu'à la hauteur du bâtiment.
la couche limite urbaine (UBL / Urban Boundary Layer)	qui se développe au-dessus des toits jusqu'à centaines de mètres.

III.3. Morphologies urbaine et écoulement du vent dans un Canyon

III.3.1. Importances des effets des configurations géométriques

Selon **Vardoulakis (2003)**, Le microclimat des canyons urbains est forcément contrôlé par les effets micro-météorologiques engendrés par la morphologie urbaine plutôt que par les forces de la couche méso-échelle (Méso-scale) c'est-à-dire la couche limite urbaine (**UBL**) (**Vardoulakis et al., 2003**).

Les flux localisés à l'échelle microclimatique sont le résultat de l'interaction entre le champ d'écoulement du vent avec les configurations géométriques de l'environnement immédiat. De ce fait, des variations atmosphériques à petite échelle se créent et modifient ainsi les débits d'air dans la couche supérieure de limite urbaine (UBL) (So et al., 2005, Chan et al., 2001).

III.3.2. Facteurs qui influencent l'écoulement d'air dans la couche (UCL)

III.3.2.1. Les configurations urbaines

En général, les études combinatoires qui traitent à la fois la géométrie urbaine et l'écoulement du vent dans un Canyon urbain sont particulièrement rares (Ali-Toudert and Mayer, 2006). Aussi les études de l'écoulement d'air dans la canopée urbaine (UCL) sont beaucoup plus complexes (Assimakopoulos et al., 2006) étant donné que la géométrie urbaine acquiert des aspects et des conceptions complexes et changeables et des détails urbains qui se développent à des descriptions diverses (Edussuriya et al., 2011). Toutefois, il est difficile de définir le paramètre plus important ou celui qui a le plus d'impact sur l'écoulement de l'air dans un Canyon urbain.

III.3.2.2. Eléments morphologiques urbaines qui ont plus d'impact sur l'écoulement d'air

D'après l'analyse de nombreux articles scientifiques, afin de désigner le ou les paramètres les plus importants qui influencent considérablement l'écoulement de l'air dans un Canyon urbain, on peut distinguer les catégories d'éléments suivantes:

III.3.2.2.a. Les configurations non régulières des toits

Les configurations non régulières des toits conduisent à des changements de la direction d'écoulement, de ce fait les expériences dans les laboratoires de soufflerie prouvent de petits changements dans la vitesse des vents au niveau des toits peuvent conduire à des flux très dispersés dans le canyon (Kastner-Klein et al., 2004, Balogun et al., 2010).

III.3.2.2.b. La conception urbaine de la ville

Évidemment, la conception urbaine de la ville perturbe l'écoulement d'air, non seulement par effet de rugosité « **roughness effect** » causé par la morphologie urbaine, mais plutôt par les effets de mouvements convectifs causés par les sources énergétiques urbaines qui ont impact considérable sur la turbulence de l'aérodynamique de l'air (Cf. chapitre II. Les sources énergétiques urbaines) (Chan et al., 2001, Edussuriya et al., 2011, ALI-TOUDERT et al., 2005).

III.3.2.2.c. La morphologie urbaine non-uniforme

Les résultats obtenus sont: des vents basculants, convergence du flux d'air, divergence horizontale et grands échanges à l'échelle de masse d'air à l'intérieur et au-dessus des canyons urbains (Gu et al., 2011) ; Des écoulements de vents variables (Carpentieri et al., 2009, Soulhac et al., 2009) ; Une meilleure ventilation (Chan et al., 2001).

Les phénomènes physiques cités ci-dessus concernent l'aéroulque de l'air d'un Canyon urbain *non uniforme* et sont causés par les aspects morphologiques urbains suivants : La disposition alternée des espaces ouverts et les ceintures vertes par rapport aux constructions (GIVONI, 1998) ; La disposition inégale des bâtiments par rapport au prospect (H/W), et les profondeurs non uniformes des constructions (Edussuriya et al., 2011, Gu et al., 2011, Soulhac et al., 2009, Chan et al., 2003, OKE., 1990).

III.3.2.2.d. Les intersections et l'écoulement du vent dans un Canyon

Classifications & avantages

Les intersections sont utiles pour la conception urbaine, il s'agit d'une rupture et d'une typologie intermittente du cadre bâtis qui servent parfois à diviser un Canyon en plusieurs segments. Ces détachements du cadre physique ont des raisons fonctionnelles, telles que la liaison entre les tissus urbains, la circulation piétonne et les déplacements de trafics. Au même temps, ces intersections jouent un rôle important pour la ventilation et la dispersion des polluants. Des expériences faites sur des modèles réduits en soufflerie et par les simulations en CFD démontrent l'avantage de ces intersections.

Classification des segments

Selon Vardoulakis, la longueur (**L**) du canyon urbain présente la distance d'un segment d'une rue raccordant deux intersections. En conséquence, la longueur globale d'un canyon urbain est divisée en sections, ces dernières sont identifiées comme étant une distance entre deux grands carrefours (Vardoulakis et al., 2003). Ainsi, les intersections pour un Canyon urbain sont identifiées par rapport à leurs longueurs de distance qui sont présentées et sont comme suit dans le tableau (III.3) ci-dessous :

Tableau.III.3. Classements des sections des Canyons par rapport à leurs rapports d'intersections (Vardoulakis et al., 2003).

le rapport de calcul des intersections	Natures des sections
$\frac{L}{H} \approx 3$	correspond à une section courte
$\frac{L}{H} \approx 5$	s'identifie souvent comme une section moyenne
$\frac{L}{H} \approx 7$	Est une section longue
<i>(L) Longueur d'un segment pour un Canyon, (H) Hauteur des bâtiments</i>	

Avantage des intersections

La subdivision d'un Canyon urbain a pour objectif d'optimiser la ventilation urbaine et l'écoulement de l'air. Certaines expériences ont apportées beaucoup de théories sur ces avantages, à noter:

Expériences sur les intersections dans les Canyons

D'après les travaux et les expérimentations faites par des chercheurs en vue de démontrer les avantages des intersections dans les rues Canyon, ils ont exécutés leurs recherches sur des modèles réels ou bien sur des modèles réduits en soufflerie, ce qui a permis de générer les théories suivant:

1. Les intersections peuvent fournir des zones de basse pression (Vardoulakis et al., 2003) et des mécanismes puissants pour la dispersion. En conséquence, l'écoulement du vent peut se basculer entre les différentes ruelles perpendiculaires (Dobre et al., 2005).
2. D'après les recherches en soufflerie de Balogun et al (2010), les intersection dans les Canyons urbains optimisent l'écoulement du flux d'air par un effet de combinaison complexe entre une bifurcation du flux canalisé, une recirculation et un effet de tourbillons de coins (Balogun et al., 2010).
3. Les essais de Soulhac et al (2009) sur des modèles réduits dans la soufflerie démontrent que intersections influencent l'uniformité de la vélocité de l'air et la concentration du polluant au niveau du segment qui se trouve entre deux intersections d'un Canyon urbain (Soulhac et al., 2009).

4. Les intersections au niveau des Canyons urbains génèrent plus de vortex, ces derniers développent aussi plus de tourbillons aléatoires avec des directions non uniformes, ce qui engendre une dispersion meilleure, par la suite le Canyon deviendra ventilé et aéré (Chan et al., 2003).
5. En plus, les coins des intersections développent des effets de vortex intermittents qui développent d'abord la turbulence et ensuite la ventilation du Canyon (Georgakis and Santamouris, 2006).

Intérêts des intersections

Après de longues années d'analyses dans les laboratoires d'essais en soufflerie « Wind-tunnel », par des modélisations numériques ou par des simulations en CFD, les intersections au niveau des Canyons urbains ont été l'objet d'étude de plusieurs articles scientifiques et ont devenues un domaine de recherche spécifique.

On résume quelques théories de l'apport des intersections pour un Canyon urbain.

1. Favorisent la circulation du vent et le basculent entre les différentes rues perpendiculaires (Dobre et al., 2005);
2. Favorisent une combinaison complexe de flux canalisés bifurqués (Balogun et al., 2010);
3. Influencent également la vitesse du vent et la répartition des concentrations de polluants et génèrent plus de tourbillons pour une meilleure dispersion (Chan et al., 2003);
4. Fournissent une zone de basse pression et des puissants mécanismes de dispersion (Vardoulakis et al., 2003);
5. Développent aussi des tourbillons intermittents (Georgakis and Santamouris, 2006).

III.3.2.3. Intérêt sur les éléments qui influencent l'écoulement d'air dans la couche (UCL)

Dans cette partie d'étude, l'interaction entre la morphologie urbaine et l'écoulement a été abordé étant donné que la morphologie urbaine est variable et prend plusieurs scénarios, donc il est essentiel de ne présenter que les domaines les plus influents qui sont :

1. Les expériences scientifiques prouvent que les toitures avec des configurations variables conduisent à des flux très dispersés dans le Canyon urbain (**Kastner-Klein et al., 2004, Balogun et al., 2010**).
2. La conception d'une ville influence l'écoulement de l'air par sa morphologie spécifique, cette dernière détermine l'écoulement de l'air dans Canyon urbain sous l'effet de rugosité « **roughness effect** » et sous l'effet des mouvements convectifs causés par les sources énergétiques urbaines (**Chan et al., 2001, Edussuriya et al., 2011, Ali-Toudert et al., 2005**).
3. Quelque-soit le contexte relatif au concept urbain **non-uniforme**, il provoque l'un des comportements de l'aéraulique l'air dans un Canyon urbain, qui sont : des vents basculants ; convergence du flux d'air ; divergence horizontale et grands échanges à l'échelle de masse d'air à l'intérieur et au-dessus des canyons urbains (**Gu et al., 2011**) ; Des écoulements de vents variables (**Carpentieri et al., 2009, Soulhac et al., 2009**) et une meilleure ventilation (**Chan et al., 2001**).
4. Les intersection aussi provoquent la turbulence de l'écoulement d'air (*Cf. la section au-dessus*).

Malgré le grand nombre des recherches qui ont investies dans ce domaine pour cibler les éléments influents sur l'écoulement d'air dans les Canyons urbains, les lacunes subsistent, d'après **Chan et al (2003, 2001)**, les recherches visant à faire dissiper les polluants ou à développer des tourbillons de dispersion dans Canyon urbain ou dans un tissu urbain complexe n'ont jamais abouti à une démarche explicite, avec les méthodologies basées sur l'analyse d'un seul élément morphologique. Néanmoins, la solution idéal est donc de prendre à la fois beaucoup de considérations morphologiques et de stratégies (**Chan et al., 2003, Chan et al., 2001**).

Pour la section suivante, nous présenterons la **Théorie d'Edussuriya et al (2014)**, puisque ces recherches prouvent et définissent par leur **une méthode d'analyse statistique** un grand nombre de facteurs qui influencent la dissipation de la pollution dans les canyons urbains.

III.4. Théorie « d'Edussuriya et al » pour désigner les éléments morphologiques qui ont une influence sur l'écoulement d'air

III.4.1. Présentation de la théorie

Il existe un nombre important d'éléments morphologiques urbains qui ont une influence sur l'écoulement de l'air dans un Canyon urbain, celui la représente, d'après les expériences scientifiques, une projection importante d'éléments morphologiques par un comportement complexe.

En revanche, les chercheurs [Edussuriya et al \(2014\)](#), ont développé dans une expérience **une méthode d'analyse statistique**, pouvant analyser plusieurs facteurs morphologiques urbains qui ont une influence sur l'écoulement d'air dans un Canyon urbain et de distinguer ainsi les éléments les plus important.

III.4.2. Objet de l'expérience du groupe de chercheurs d'Edussuriya

Les éléments morphologiques urbains qui ont une influence sur l'écoulement d'air dans un canyon urbain sont multiples. D'ailleurs, il est difficile de distinguer l'élément le plus influant.

[Edussuriya et al \(2014\)](#) ont développé une démarche statistique pour définir le paramètre morphologique urbain le plus important qui affecte l'écoulement de l'air. Pour leurs expériences, ils ont choisi un canyon urbain dans la ville métropolitaine de Hong Kong. L'objectif de leurs études se base sur le contrôle de 20 cités résidentielles urbaines réparties sur cinq grands quartiers de Hong Kong, en vue de mesurer en temps réel le taux de la pollution d'air et toutes les données microclimatique, cela à travers des mesures sur terrain et par des **analyses statistiques**. Le résultat, 21 variables morphologiques ont été identifiées et classifiées, il est démontré aussi que parmi ces nombreux facteurs morphologiques urbains, 09 éléments seulement ont une influence réelle sur la qualité de l'air et de la concentration de la pollution.

Ce groupe de chercheurs précisent que, malgré la désignation de ces neuf éléments qui peuvent servir à estimer avec précision le degré d'incidence sur la pollution atmosphérique pour les rues Canyons, il est évident que les fluctuations de la vitesse des vents, le degré de la température de l'air et la concentration en humidité ont encore leurs influences sur le bilan global de la méthode (**Fig. III.2**).

[Edussuriya et al \(2014\)](#) : « 21 morphological variables are identified and calculated based on the geometry of the urban fabric. Using principal component analyses, it is shown that out of the many urban morphological factors, only five morphological

variables (plan area density, occlusivity, aerodynamic roughness height, mean built volume, compactness factor) and four land development factors (aspect ratio, distance between building, mean building height and standard deviation of building height) »

« nine variables (plan area density, compactness factor, occlusivity, aerodynamic roughness height, average size of building volume, aspect ratio, distance between buildings, mean building height and standard deviations of building heights) »

La méthode d'analyse statistique des chercheurs **Edussuriya et al (2014)** admet seulement neuf facteurs morphologiques pour un tissu urbain complexe, qui ont une influence logique et scientifique sur le degré de la pollution et qui sont présentés dans le tableau **(III.4)** suivant:

Tableau. III.4. Après une **méthode d'analyse statistique**, seulement neuf éléments morphologiques sont les plus importants pour l'écoulement de l'air dans un Canyon urbain **(Edussuriya et al 2014)**.

Neuf éléments	Désignation des facteurs morphologiques les plus influents
1	La densité urbaine [<i>Area density</i>].
2	Occlusivité [<i>Occlusivity</i>].
3	Profondeur de rugosité [<i>Roughness height</i>]
4	Volume bâti [<i>built volume</i>]
5	Facteur de contiguïté [<i>Contiguity factor</i>]
6	Prospect [<i>Aspect ratio</i>]
7	Distance entre les constructions [<i>Distance between building</i>]
8	Hauteurs des constructions [<i>Building height</i>]
9	Ecart type de la hauteur du bâtiment signaler des différences significatives entre les groupes avec deux concentrations de particules et de NOx [<i>Groups with both PM and NOx concentrations</i>]

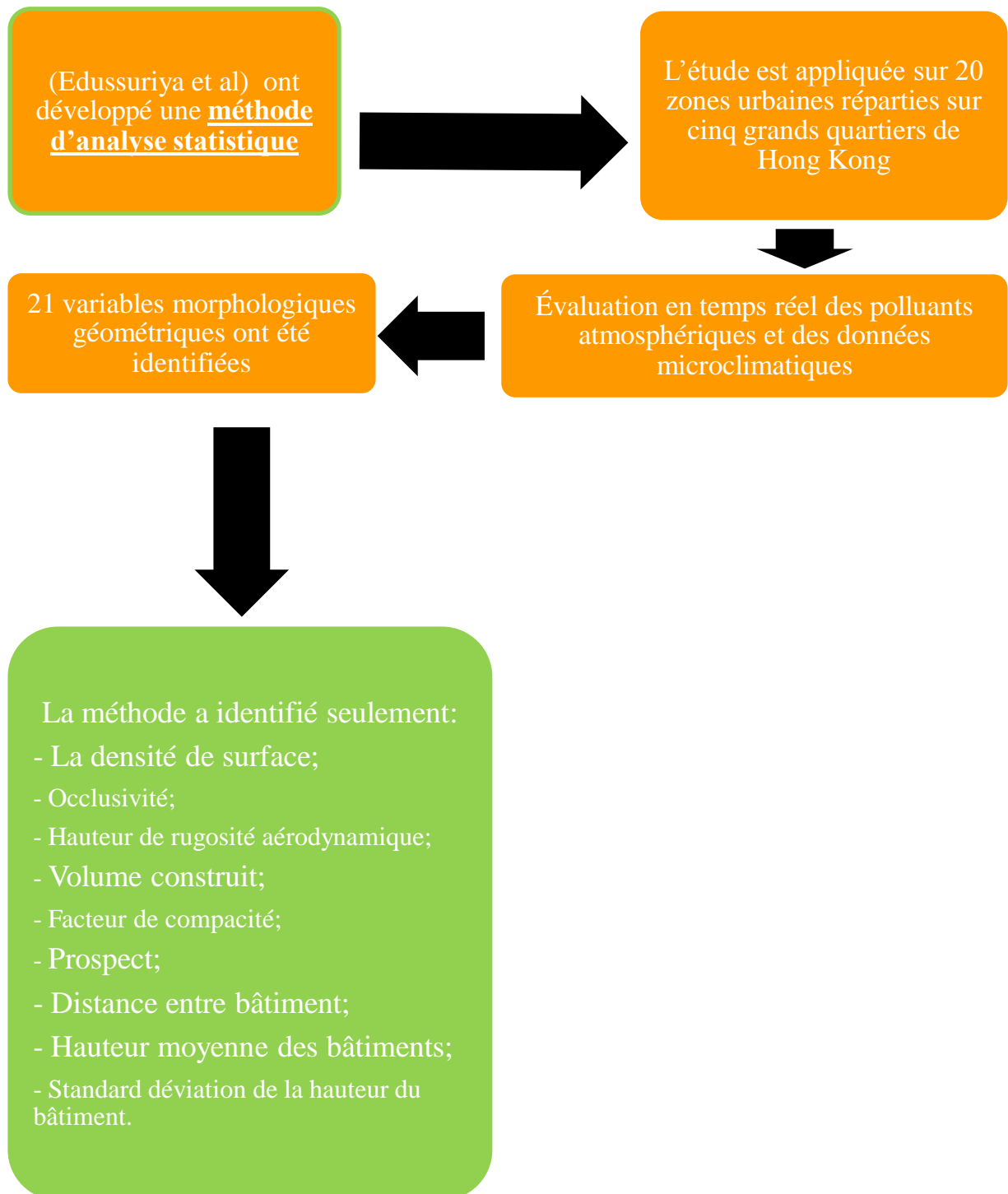


Fig. III.2. Schéma de l'expérience d'**Edussuriya et al (2014)**, pour désigner par **méthode d'analyse statistique**, les paramètres morphologiques les plus importants pour l'écoulement d'air dans un Canyon urbain.

III.4.3. Intérêt de la méthode

Cette méthode d'analyse statistique est qualifiée comme un outil performant pour la désignation du paramètre le plus influant pour l'écoulement d'air dans un tissu urbain complexe et notamment pour un Canyon urbain.

Suite à la confirmation de cette démarche scientifique par la communauté scientifique, le résultat de cette analyse va nous servir lors de la phase expérimentale de notre étude afin de désigner les éléments composants des propositions (1 & 2), l'objectif est donc d'optimiser la qualité de l'air dans le Canyon urbain de la ville de Ghardaïa.

III.5. comportement d'écoulement des vents pour une morphologie urbaine:

III.5.1. Scénarii d'écoulement de l'air

D'après de nombreuses recherches et d'expériences, l'étude combinatoire de l'écoulement d'air dans un Canyon urbain est devenue un domaine de recherche, du faite de l'existence de plusieurs aspects et paramètres qui changent à chaque fois le comportement de l'écoulement global.

Les chercheurs **OKE (1990)** et **Chan et al (2001)** ont abouti à prédire des scénarii d'écoulement de l'air en classifiant les régimes d'aéraulique de l'air dans un Canyon urbain par rapport à leurs ratios de Prospect (**H/W**). Ces classifications sont comme suit:

III.5.2. Classification « d'Oke » :

- a. Dans le cas écoulement à rugosité isolé « **Isolated roughness flow** ». les constructions sont relativement espacées (**H / W <0,4** pour un bâtiment cubique, **<0,3** pour des bâtiments en rangée) leur configuration d'écoulement apparaît presque comme si elles ont été isolées avec absence d'interactions entre les structures, (**Fig. III.3**) deux vortex autonomes se développent de part et d'autre de la rue (**Rouil., 2004**).

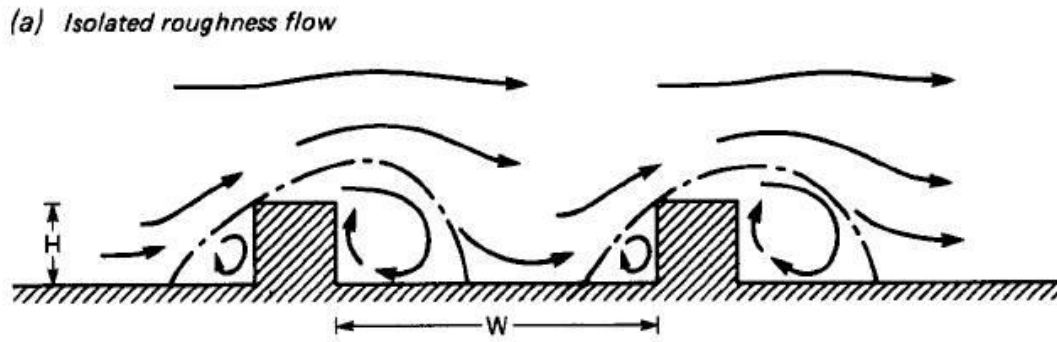


Fig. III.3. Régime d'écoulement associé à géométries urbaines différentes dans le cas d'écoulement à rugosité isolé (OKE, 1990).

- b. Dans le cas de l'écoulement à interférence de sillage « **Wake interference flow** », état intermédiaire entre le régime « d'écoulement à rugosité isolé & l'écoulement rasant (3^{ème} cas) », « **Isolated roughness & flow Skimming flow** ». L'espacement entre les bâtiments est étroit (H/W allant jusqu'à environ **0,7** pour les bâtiments en cubes, et **0,65** pour les bâtiments en rangées), un sillage du bâtiment en amont se crée et interfère avec le prochain en aval, menant à une configuration d'aérodynamique complexe, puisque plusieurs structures de turbulence peuvent interagir (**Fig. III.4**).

Selon Chan et al (2001-2003), un canyon large devrait être limité à une valeur de seuil pour l'écoulement rasant (**skimming flow**) (Chan et al., 2001), c'est à dire, au moment du changement d'écoulement à interférence de sillage (**Wake interference flow**) vers l'écoulement rasant (**Skimming flow**).i.e. au niveau du ratio ($H/W=0.7$) (Chan et al., 2003). Chan et al (2001), indiquent également que le rapport de (L/H) égal à **5** peut favoriser la transition de l'écoulement du flux d'air de l'état « **Wake flow** » à l'état d'écoulement « **Skimming flow** » (Chan et al., 2001).

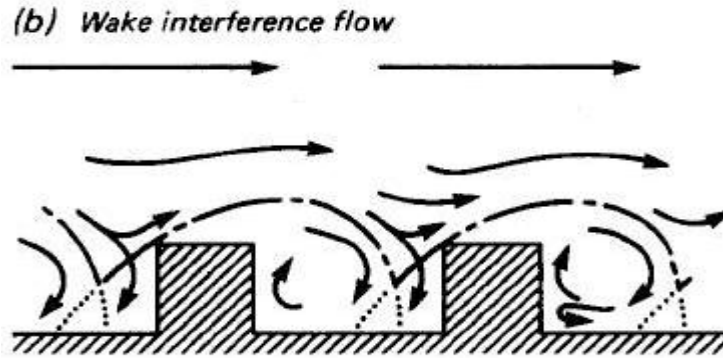


Fig. III.4. Régime d'écoulement associé à géométries urbaines différentes dans le cas d'écoulement à interférence de sillage « Wake interference flow » (OKE, 1990).

- c. Dans le cas de l'écoulement rasant « **Skimming flow** » ($H/W \approx 1$), qui a un espacement plus étroit que les précédents, l'écoulement du vent commence à glisser sur les sommets du bâtiment en conduisant à la création des vortex dans la cavité (souvent c'est le cas dans les Canyons urbains). Dans ce cas, des tourbillons agissent à l'intérieur de la rue avec peu d'échange avec l'extérieur. Ces tourbillons créent un effet de flux séparés derrière des obstacles pointus (Fig. III.5). Mais ici, il est renforcé par une division de la façade incidente vers deux parties de tourbillon avec un degré faible que l'écoulement à interférence de sillage « **Wake interference flow** ». Premièrement, partie inférieure de tourbillon « **Leeward** » produite par l'aérodynamique des obstacles de façade. Deuxièmement, partie supérieure de tourbillon « **Windward** » produite d'origine des obstacles précédents sous l'effet des sillages des bâtiments en amont (Fig. III.6).

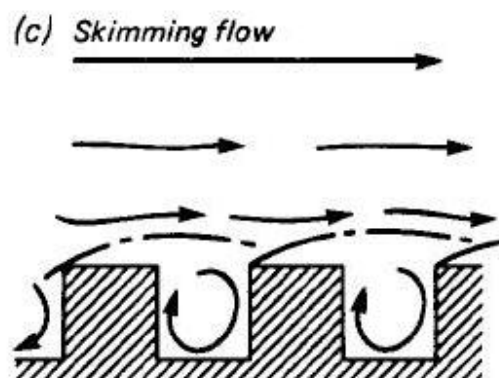


Fig. III.5. Régime d'écoulement associé à géométries urbaines différentes dans le cas de l'écoulement rasant « **Skimming flow** » (OKE, 1990).

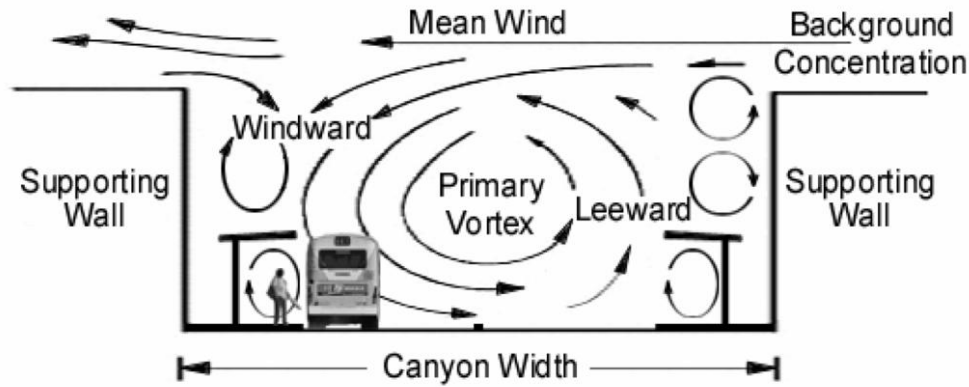


Fig.III.6. Dans le cas d'écoulement perpendiculaire pour Canyon urbain, le côté sous le vent est généralement appelé **Leeward** et l'autre est le côté face au vent s'appelle **Winward** (Yip et al., 2006).

- d. Dans ce cas de l'écoulement rasant « **Skimming flow** », le canyon est considéré comme profond ($H/W > 1.67$). Dans ce régime d'écoulement d'air, deux ou plusieurs vortex se créent verticalement entassés à l'intérieur du canyon urbain (Hang et al, 2012). Ce cas d'étude concerne exactement des canyons urbains avec un taux de population dense, qui provoque un faible écoulement d'air et mauvaise capacité de dispersion des polluants surtout à l'échelle des piétons (Hang et al, 2012).

III.5.3. Intérêt de la recherche d'Oke (1990)

De par la complexité de l'interaction des bâtiments en milieu urbain, les travaux du chercheur (OKE, 1990) sont très significatifs, il a pu classer des régimes d'écoulements d'air par rapport à des ratios de prospects (H/W), les régimes d'écoulement de l'air se résume comme suit:

1. Un écoulement à rugosité isolé « **Isolated roughness flow** », les constructions sont relativement espacées.
2. Un écoulement à interférence de sillage « **Wake interference flow** », l'espacement entre les bâtiments est étroit.
3. Ecoulement rasant « **Skimming flow** », l'espacement plus étroit que les précédents.

III.6. Écoulement de face pour un bâtiment isolé :

Selon le chercheur OKE (1990) un écoulement de vent en face d'un bâtiment ou un îlot isolé crée une perturbation complexe, qui nécessite une étude et une analyse approfondie (Fig.

III.7). Sur la base des études en soufflerie des modèles réduits (OKE, 1990), le comportement de l'aéraulique de l'air en face d'un bâtiment isolé produit les effets suivants:

- 1- une pression relativement élevée, générée par la poussée du vent en face du bâtiment;
- 2- une zone de pression maximale au niveau de la face centrale supérieure de l'îlot;
- 3- des zones de basse pression autour de l'îlot;
- 4- une zone de cavité qui se caractérise par une double circulation du tourbillon au niveau du sol intégrant les zones d'aspiration de paroi latérale dans une configuration en forme de fer à cheval.

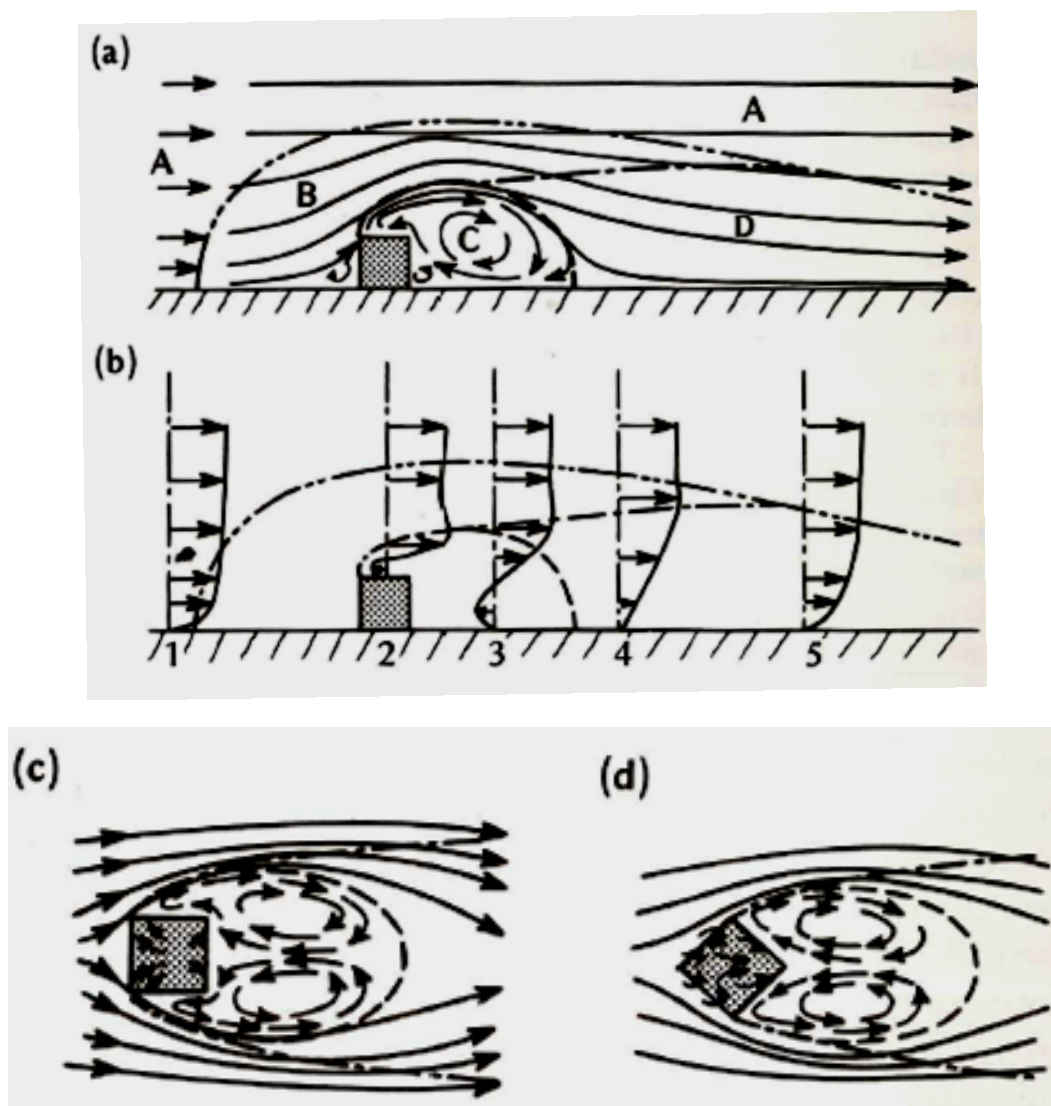


Fig.III.7. a) Modèles d'écoulement à travers un bâtiment isolé, **b, c)** les profils de vitesse et les zones d'écoulement avec le bâtiment orienté perpendiculairement à l'écoulement. **d)** orientation diagonale par rapport à l'écoulement (OKE, 1990).

III.7. Effets d'orientations d'écoulement du vent par rapport un Canyon

III.7.1. L'écoulement parallèle, perpendiculaire et oblique

Pour cette section de travail, nous étudions l'impact de la vitesse du vent par rapport à l'axe d'un Canyon urbain, notamment pour l'écoulement parallèle, perpendiculaire et oblique.

Puisque des directions variables d'écoulement d'air par rapport à une rue Canyon créent des phénomènes physiques complexes et variable par rapport l'angle d'incidence.

III.7.2. Écoulement parallèle à un Canyon urbain :

D'après les expériences, l'écoulement d'air parallèle au-dessus du toit développe une canalisation sur la longueur du canyon (Balogun et al., 2010, Dobre et al., 2005), et un écoulement en spirale (Dobre et al., 2005, Vardoulakis et al., 2003). Selon les recherches d'Oke (1990), Si le débit est parallèle à l'axe du Canyon, une canalisation peut provoquer « un effet de jet » de sorte que les vitesses du vent sont supérieures par rapport aux vitesses à l'air libre (OKE, 1990).

III.7.3. Écoulement perpendiculaire à un Canyon urbain:

Certaines hypothèses soulignent que l'écoulement du vent perpendiculaire développe en amont du bâtiment incident une couche de cisaillement qui est répandue sur le toit du bâtiment, avec une formation d'un ou de plusieurs tourbillons de recirculation dans le canyon (Fig. III.8), simultanément avec l'écoulement du vent perpendiculaire au-dessus du toit (Balogun et al., 2010, Dobre et al., 2005),

Il est également mentionné que l'écoulement du vent perpendiculaire favorise aussi la formation des tourbillons de sens droit et de sens gauche avec un soufflage de tourbillons ascendant (**Upwind**) le long de la façade chaude et de tourbillons descendants (**downward**) le long d'une façade froide (Georgakis and Santamouris, 2006).



Fig. III.8. Effet de recirculation de l'air pour un canyon urbain (Santé, 2017).

III.7.4. Écoulement oblique à un Canyon urbain

L'écoulement de l'air au niveau du Canyon urbain est composé d'une superposition linéaire des vents parallèles et des vents perpendiculaires (Dobre et al., 2005).

Selon les recherches d'Oke (1990), si le vent est orienté vers un angle diagonal par rapport à l'axe du Canyon, un tourbillon prend l'effet de "tire-bouchon" en simultanéité avec un effet d'allongement de l'écoulement de l'air sur la longueur du Canyon urbain (OKE, 1990).

D'après les expériences faites sur des modèles à échelle réduite en soufflerie, l'écoulement des vents oblique développe une combinaison d'interactions complexes entre flux canalisés, recirculation hélicoïdaux, flux en bifurcation et tourbillons de coin (Balogun et al., 2010, Dobre et al., 2005).

III.7.5. Intérêt de l'écoulement parallèle, perpendiculaire & oblique, pour un Canyon

D'après les résultats d'analyses de nombreuses expériences faites dans les laboratoires de soufflerie ou sur des modèles réels, dans le but d'étudier l'impact de l'angle d'incidence de l'écoulement de l'air sur un Canyon urbain :

L'écoulement parallèle développe une canalisation sur la longueur du canyon, et un écoulement en spirale.

L'écoulement perpendiculaire développe une couche de cisaillement sur le toit, avec une formation des tourbillons de recirculation dans le canyon, il favorise aussi la formation des tourbillons de sens droit et de sens gauche avec un soufflage de tourbillons ascendant

(**Upwind**) le long de la façade chaude et de tourbillons descendant (**downward**) le long d'une façade opposée.

L'**écoulement oblique** est composé généralement d'une superposition linéaire des vents parallèles et des vents perpendiculaires.

III.8. Effet de rugosité « Roughness effect »

III.8.1. Le Canyon urbain et l'effet de rugosité

Scientifiquement, la morphologie urbaine est considérée comme des obstacles qui bloquent les vitesses des vents et participent considérablement à l'effet de rugosité « **roughness effects** ». Pour certains cas, l'écoulement d'air peut s'affaiblir jusqu'à 68% ou bien à 82% dans un Canyon urbain par l'effet de rugosité (Georgakis & Santamouris, 2006).

III.8.2. Equations et classifications de l'effet de rugosité

L'écoulement des vents en passant d'un milieu à un autre ralentit par l'effet de rugosité (Tableau. III.5), l'effet de la rugosité donc est un phénomène important pour l'écoulement de l'air dans une morphologie urbaine. Actuellement, de nombreuses recherches scientifiques essaient de quantifier l'effet de la rugosité soit par des équations mathématiques soit par des classifications.

Tableau. III.5. Ralentissement de l'écoulement de l'air par l'effet de rugosité

Obstacles	Causes
Obstacles naturels	la topographie, pour cela il est important de définir l'orientation de la topographie par rapport à la direction du vent et au même temps de définir le degré d'inclinaison.
	la couverture végétale la densité et la hauteur des arbres.
Morphologie urbaine	Les bâtiments ralentissent l'écoulement des vents.

III.8.3. Comportement d'écoulement dans UBL et Equation de Charnock :

Selon Bozonnet (2005), en milieu urbain l'écoulement de l'air dû au vent dominant est différent du profil défini en site homogène. L'écoulement est ainsi fortement perturbé aux abords des bâtiments, en revanche, au-delà d'une zone appelée « **zone de mélange** » le profil

de l'écoulement redevient similaire. Dans la figure (III.9), on distingue le comportement d'écoulement suivant des couches de rugosité, qui sont :

- La zone d'écoulement perturbée, ou la couche limite de surface, ou « **surface layer** » (Figure III. 9) s'étend sur plusieurs dizaines de mètres au-dessus des bâtiments.
- Dans la partie inférieure, $Z < Z_R$, l'écoulement est perturbé et des écoulements secondaires verticaux ou transversaux sont observés, cette zone est appelée sous couche limite rugueuse ou « **Roughness Sublayer** ».
- Dans la couche limite « **canopée urbaine** » ou Urban Canopy Layer (UCL), de hauteur moyenne Z_H , l'écoulement d'air est fortement diminuée, dans cette hauteur l'effet de la rugosité est déduit suivant la classification d'Oke (1990) ou calculé suivant une équation qui représente la déviation standard de la vitesse du vent S_u et de la direction du vent S_d , ou suivant une classification (Equ III.1/2, Tableau III.6) (WMO, 2008)

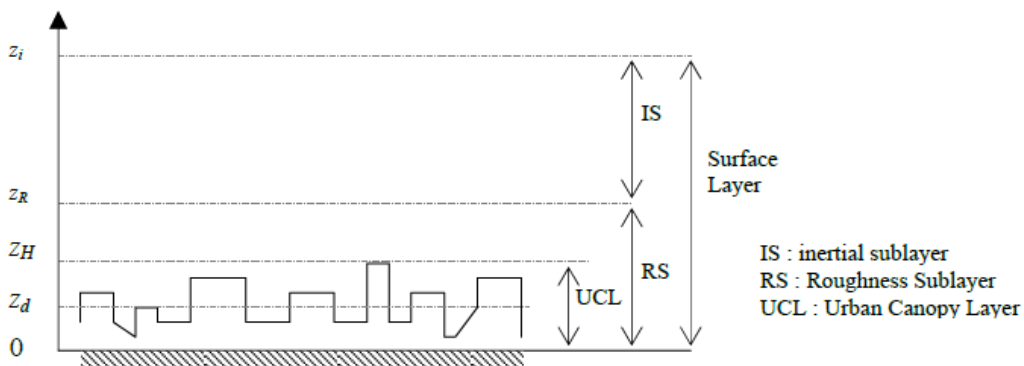


Fig. III. 9. Répartition verticale des différentes couches de circulation d'air au-dessus d'un environnement urbain (Rotach, 1999).

$$s_u / U = C_u k [\ln (z/Z_{0u})]^{-1} \quad \text{(Equ III.1)}$$

$$s_d / U = C_v k [\ln (z/Z_{0u})]^{-1} \quad \text{(Equ III.2)}$$

III.8.4. Classification de Davenport (1960) & Wieringa (1980)

La classification de Davenport (1960) adaptée par Wieringa (1980B) qui ont développés une classification aérodynamique Z_0 des terrains en termes de longueurs de rugosité qui se réfère, en général à la classe de rugosité et à la longueur de rugosité, les paysages ayant une forte rugosité (avec obstacles) sont rattachés à la classe de rugosité 8 tandis que la surface de la mer est classée 0 (Tableau III.6) (WMO, 2008, Oke, 1990).

Tableau. III.6. Classement de rugosité de l'espace urbain jusqu'à la campagne (Oke, 2004)

Zone Climatique Urbaine	Image	Classe de Rugosité	Prospect	% Bâti
1. urbain développé intensément, avec des immeubles détachés et rapprochés avec revêtements de sol, ex immeubles de grande hauteur. (Paysage imperméable)		8	>2	>90
2. urbain développé intensément, hautement dense avec 2 – 5 niveaux, bâtiments attachés ou très rapprochés. (Paysage imperméable)		7	1.2 – 2.5	> 85
3. urbain développé fortement, moyennement dense par rangés ou détachés mais les maisons, magasins et appartements sont rapprochés, ex : habitation urbaine. (Paysage peu perméable)		7	0.5 – 1.5	70
4. urbain développé fortement, intensité faible, bâtiments de faible hauteur, parking couvert, ex : supermarchés, entrepôts. (Paysage peu perméable)		5	0.05 – 0.2	75 - 95
5. développement moyen, densité faible, maisons de 1-2 étages, ex : habitations périphériques. (Paysage peu perméable)		6	0.2 – 0.5, > 1	35 - 65
6. usage mixte avec de large bâtiments en paysage ouvert (et perméable), ex : institutions comme hôpitaux, universités, aéroports.		5	0.1 – 0.5	< 40
7. développement semi rural avec des maisons dispersées dans la nature ou champs d'agriculture (paysage perméable), ex : fermes.		4	>0. 05,	< 10

III.8.5. Conséquences de l'effet de la rugosité « *Roughness effect* »

L'effet de rugosité « **roughness effects** » stagne l'écoulement d'air au milieu urbain, du fait de l'existence des configurations géométriques variables en hauteur et sur le plan horizontal. En conséquence, l'écoulement s'affaiblit à 68% ou à 82% selon le concept morphologique urbain du Canyon ([Georgakis & Santamouris, 2006](#)).

Le calcul de l'effet de rugosité s'effectue par des équations mathématiques (**Relation de Charnock**) ou grâce à des classifications aérodynamiques (Z_0) de l'environnement urbain en termes de longueurs de rugosité ([Oke., 1990](#), [Davenport.,1960](#), [Wieringa., 1980](#)).

Conclusion

L'interaction entre l'aéraulique de l'air et la conception morphologique urbaine d'un Canyon a été traitée dans ce chapitre d'une manière approfondie, en faisant appel à plusieurs théories et travaux de recherche. Le Canyon urbain également a été abordé, par la présentation de sa définition, ses classifications sous l'effet de l'écoulement de l'air et ses typologies morphologiques.

L'influence des éléments morphologiques urbains sur l'écoulement du vent dans un Canyon a été le sujet de la deuxième section du chapitre, afin de clarifier cette notion, nous avons abordé les points suivants : les configurations non régulières des toits ; les conceptions urbaines des villes ; les morphologies urbaines non-uniformes et les sections intermittentes dans un Canyon. Le résultat de l'étude a indiqué que le meilleur scénario permettant d'optimiser l'écoulement de l'air dans un Canyon c'est de prendre plusieurs éléments morphologiques au même temps pour faire une étude sur un seul cas.

La **méthode d'analyse statistique** réclamée par les chercheurs [Edussuriya et al \(2014\)](#) a pu résoudre le problème de l'impact des éléments morphologiques urbains en ayant désigné les neuf éléments les plus influant dans un Canyon urbain.

D'autres domaines de recherches ont été étudiés, tel que ; les régimes d'écoulements d'air pour un Canyon par rapport aux ratios de prospect (H/W) ; Comportements des vitesses des vents dans un Canyon pour des orientations d'écoulements variables (parallèle, perpendiculaire et oblique) et l'effet de rugosité « **Roughness effect** ».

References:**Revues scientifiques**

- Ali-Toudert, F., Djenane, M., Bensalem, R. & Mayer, H. 2005. Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria. *Climate Research*, 243-256.
- Ali-Toudert, F. & Mayer, H. 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41, 94-108.
- Assimakopoulos, V. D., Georgakis, C. & Santamouris, M. 2006. Experimental validation of a computational fluid dynamics code to predict the wind speed in street canyons for passive cooling purposes. *Solar Energy*, 80, 423-434.
- Balogun, A., Tomlin, A., Wood, C., Barlow, J., Belcher, S., Smalley, R., Lingard, J. N., Arnold, S., Dobre, A., Robins, A., Martin, D. & Shallcross, D. 2010. In-Street Wind Direction Variability in the Vicinity of a Busy Intersection in Central London. *Boundary-Layer Meteorology*, 136, 489-513.
- Carpentieri, M., Robins, A. & Baldi, S. 2009. Three-Dimensional Mapping of Air Flow at an Urban Canyon Intersection. *Boundary-Layer Meteorology*, 133, 277-296.
- Chan, A. T., Au, W. T. W. & So, E. S. P. 2003. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality—part II: multiple canopies and canyons. *Atmospheric Environment*, 37, 2761-2772.
- Chan, A. T., So, E. S. P. & Samad, S. C. 2001. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality. *Atmospheric Environment*, 35, 4089-4098.
- Chan, T. L., Dong, G., Leung, C. W., Cheung, C. S. & Hung, W. T. 2002. Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon. *Atmospheric Environment*, 36, 861-872.
- Dobre, A., Arnold, S. J., Smalley, R. J., Boddy, J. W. D., Barlow, J. F., Tomlin, A. S. & Belcher, S. E. 2005. Flow field measurements in the proximity of an urban intersection in London, UK. *Atmospheric Environment*, 39, 4647-4657.
- EEA 2012. Monitoring CO2 emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2012. European Environment Agency ed. Copenhagen K, Denmark.

- Edussuriya, P., Chan, A. & Malvin, A. 2014. Urban Morphology And Air Quality In Dense Residential Environments: Correlations Between Morphological Parameters And Air Pollution At Street-Level. *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 9, No. 1, 64 - 80.
- Edussuriya, P., Chan, A. & Ye, A. 2011. Urban morphology and air quality in dense residential environments in Hong Kong. Part I: District-level analysis. *Atmospheric Environment*, 45, 4789-4803.
- Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H. & Carissimo, B. 2010. Best Practice Guideline For The Cfd Simulation Of Flows In The Urban Environment. *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*. Chapel Hill, North Carolina, USA.
- Georgakis, C. & Santamouris, M. 2006. Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes. *Energy and Buildings*, 38, 367-376.
- Gu, Z.-L., Zhang, Y.-W., Cheng, Y. & Lee, S.-C. 2011. Effect of uneven building layout on air flow and pollutant dispersion in non-uniform street canyons. *Building and Environment*, 46, 2657-2665.
- Hargreaves, D. M. & Wright, N. G. 2007. On the use of the k- model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95, 355-369.
- Hunter, L. J., Johnson, G. T. & Watson, I. D. 1992. An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 26, 425-432.
- Kastner-Klein, P., Berkowicz, R. & Britter, R. 2004. The influence of street architecture on flow and dispersion in street canyons. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87, 121-131.
- Louka, P., Belcher, S. E. & Harrison, R. G. 2000. Coupling between air flow in streets and the well-developed boundary layer aloft. *Atmospheric Environment*, 34, 2613-2621.
- Nicholson, S. E. 1975. A pollution model for street-level air. *Atmospheric Environment (1967)*, 9, 19-31.
- Oke, T. R. 2004. Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites, international technical meeting on air pollution modelling and its application, banff, 25-29 october.

- Rotach, M. W. (1999). "On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion." *Atmospheric Environment* 33(24-25), pp. 4001-4008.
- Rouïl, L. 2004. Evaluation et contraintes d'application des modèles de rue. Convention n° 04000087. Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, France.
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Koronakis, I., Livada, I. & Asimakopoulos, D. 1999. Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. *Atmospheric Environment*, 33, 4503-4521.
- So, E. S. P., Chan, A. T. Y. & Wong, A. Y. T. 2005. Large-eddy simulations of wind flow and pollutant dispersion in a street canyon. *Atmospheric Environment*, 39, 3573-3582.
- Soulhac, L., Garbero, V., Salizzoni, P., Mejean, P. & Perkins, R. J. 2009. Flow and dispersion in street intersections. *Atmospheric Environment*, 43, 2981-2996.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M. & Shirasawa, T. 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1749-1761.
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K. & Gonzalez-Flesca, N. 2003. Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37, 155-182.
- WMO 2008. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, CH-1211 Geneva 2, Switzerland.
- Xie, X., Huang, Z., Wang, J. & Xie, Z. 2005. The impact of solar radiation and street layout on pollutant dispersion in street canyon. *Building and Environment*, 40, 201-212.
- Yip, M., Madl, P., Wiegand, A. & Hofmann, W. 2006. Exposure Assessment of Diesel Bus Emissions. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [Online], 3. Available: <http://www.mdpi.com/1660-4601/3/4/309>.

Sitographies

- Al-Khalidy, N. 2015. *Computational Fluid Dynamics Simulation of Turbulent Flows and Pollutant Dispersion Around Groups of Buildings* [Online]. Available: http://www.cham.co.uk/puc/puc_melbourne/papers/Paper1_Neihad.pdf [Accessed September, 6, 2015].

Thèses et mémoires

- Bozonnet, E., 2005, impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments cas de la rue canyon. Thèse de doctorat, université de la rochelle.

Livres de référence

Givoni, B. 1998. *Climate Considerations in Building and Urban Design*. John Wiley & Sons ed. USA.

Neufert, E. 1999. *Les éléments de projets de constructions*, Paris.

Oke, T. R. 1990. *Boundary Layer Climates Second Edition*, London.

CHAPITRE IV :

POLLUTION URBAINE ET SIMULATION PAR CFD

*« Je pense sincèrement que la pollution de la planète ce n'est pas aussi grave qu'en le dit
...C'est beaucoup plus grave qu'en le dit »¹*

*« Ces simulations informatiques sont rapidement devenues incontournables pour la
modélisation des systèmes naturels en physique, chimie et biologie, mais également des
systèmes humains en économie et en science sociale. Elles permettent de limiter le risque et
d'éviter le coût d'une série d'épreuves réelles (ex: essais de véhicules). Elles peuvent offrir un
aperçu sur le développement d'un système trop complexe pour simuler avec de simples
formules mathématiques (ex: ouragan) »²*

(1) Philippe Geluck.

(2) Steven Strogatz (**en**), The End of Insight (1970) John Brockman, What is your dangerous
idea?, HarperCollins. (ISBN 978-0-0612-1495-0)

Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons analyser les risques majeurs de la pollution en CO₂ et identifier les différentes échelles atmosphériques pour estimer une qualité d'air, à partir de l'échelle global planétaire jusqu'à l'échelle humain.

Vu l'importance de déterminer le niveau d'échelle à partir de laquelle il est préférable d'entamer une analyse. Notre intérêt de recherche consiste à cibler la micro-échelle (<10km), en dépit du fait que la pollution dans un microclimat dépend directement des échelles supérieures et globales « Global scale/Meteorological Mesoscale »

Dans ce chapitre, nous présenterons les avantages de l'utilisation de la technologie **CFD (Computational Fluid Dynamics)**, en la comparant aux approches classiques et empiriques: mesures en site et en soufflerie « Wind-tunnel ».

Ce chapitre décrit donc l'état de l'art concernant le thème de la modélisation de la dispersion des polluants par CFD pour analyser ou optimiser une qualité d'air (extérieure/intérieure) dans un environnement bâti. Seize articles par ordre chronologique (à partir de l'année 1990) et suivant l'avancée technologique du CFD seront identifiés ci-dessous d'une manière expansive.

Ces articles ont fait l'objet d'une édition d'un numéro spécial du journal Building and Environment en **2013**. Elle combine des études hybrides entre les mesures sur terrain, les mesures en soufflerie et la simulation par CFD, pour estimer la dispersion des polluants pour un microclimat. La plupart de ces sujets traitent des modèles génériques pour un bâtiment isolé ou canyon urbain isolé, parfois avec un rangé ou deux de part et d'autre du canyon urbain, ou ils traitent quelquefois des configurations réelles d'une partie d'une ville. ([Blocken et al, 2013](#)).

IV.1. La pollution est multidimensionnelle et multidisciplinaire

D'après l'OMM (Organisation Mondiale de Météorologie), les activités humaines et l'utilisation de l'énergie fossile sont les responsables de l'émission du CO₂ qui a causé le réchauffement de la planète par effet de serre (WMO, 2014). Le Dioxyde de Carbone est le plus important gaz anthropiques (GHG) à effet de serre (Lee TW et al, 2011), son taux annuel a augmenté de 80 % entre l'année 1970 et l'année 2004, ce taux est considéré comme un taux maximal par rapport à tous les gaz à émission anthropogénique (Metz B et al, 2007). Dans la ville, la principale source du CO₂ est la circulation routière (STOA, 1998), ce taux de CO₂ arrive selon Uherek et al (2010) à un seuil élevé de 72.3% par rapport aux circulations aérienne, maritime et ferroviaire. Les effets négatifs et chroniques sur la santé humaine, l'écosystème et le climat sont toujours attachés à la pollution en microclimat (Lee DS et al, 2010, Uherek E et al, 2010, Viegas J et al, 2015)

Sur la base des recherches précédentes, la pollution en CO₂ est l'un des indices réels de la pollution atmosphérique locale et à petite échelle (microscale). Les polluants propagés dans l'atmosphère par diverses sources sont dispersés (par effet d'advection et effet de diffusion) sur un large éventail d'échelles horizontales (L). Pour cela, on doit faire une distinction entre la dispersion à l'échelle globale ou à l'échelle macro « macro-scale » ($L > 6500\text{km}$), dispersion « meso-scale » ($10\text{km} < L < 6500\text{km}$) et dispersion microclimat « micro-scale » (sur une région inférieure à 10km) (Fig. IV.1).

La pollution urbaine a des effets négatifs soit sur les piétons au niveau de l'espace extérieur, soit sur les habitants au niveau de l'espace intérieur, même les matériaux de construction ont des comportements différents par rapport à la pollution de l'air. Donc la dispersion des polluants dans l'environnement urbain est un problème intrinsèque multidimensionnel et multidisciplinaire.



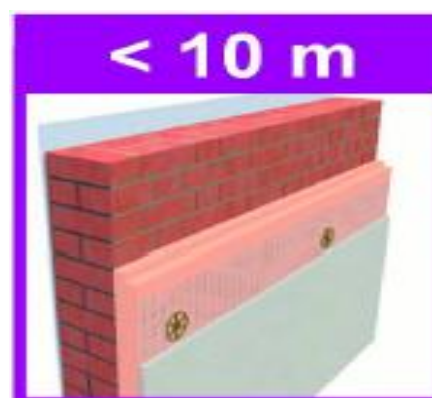
Echelle globale « Global Scale »



Echelle des bâtiments « Building Scale »



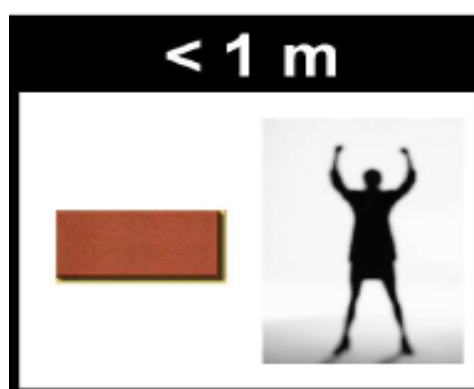
Meteorological Mesoscale



Echelles des matériaux « Component Scale »



Micro climat (Meteorological Microscale)



Material/Human Scale

Fig. IV.1. La pollution par degré d'échelle spatiale, allant de l'échelle globale à l'échelle humain (ou matérielle) (Blocken et al, 2013).

IV.2. Les avantages de la CFD.

La simulation par CFD est un outil performant, parce qu'elle prévoit une lecture globale sur le microclimat urbain, surtout au niveau de la couche limite urbaine (Urban Boundary Layer).

L'analyse d'un microclimat urbain dépend de la couche supérieure au dessus des toits. Cet outil permet d'effectuer des études paramétriques comparatives pour évaluer d'autres conceptions optimisées, en particulier lorsque ces différentes configurations sont incluses dans le même domaine et la même grille de calcul. En plus, cet outil est considéré comme moyen rapide et économique. L'application de la CFD a promu une maîtrise parfaite du microclimat et ses mécanismes : L'aéroulque de l'air ; La qualité de l'air; La pollution diffusée; Le confort thermique; Le confort au vent; Effets de façades; Effets de toits; Effets de pavages et Effet de la végétation ou des surfaces d'eau.

Certaines recherches actuelles en CFD prennent en compte lors de leurs analyse uniquement des exemples idéals qui ne reflètent pas la réalité entière, ces modèles simples traitent souvent des géométries non complexes ou des concepts morphologiques en cubes isolés. Au niveau des résultats, ces modèles idéals donnent des conclusions ne reflétant pas la réalité, comme par exemple la lecture de l'effet de la rugosité urbaine qui est mal projetée par ces modèles [Chan et al, 2003].

IV.3. Etat d'art de la simulation par CFD dans un microclimat, en commençant par la première publication en 1990.

1. le travail de recherche de Qin & Kot (1990).

Cette recherche a fourni l'une des premières publications sur l'application de cette technologie à la simulation par CFD. Qin & Kot (1990) ont étudié par simulation en CFD la dispersion des polluants autour des bâtiments, ils ont comparé les résultats avec des mesures sur terrain, l'objectif a été d'analyser l'écoulement du vent avec la dispersion du polluant, NO_x (Les oxydes d'azote) émis par les véhicules dans un canyon urbain entre deux bâtiments non similaires dans la ville de Shenzhen. La grande partie de l'étude a été centrée sur l'analyse de l'écoulement du vent (direction nord) du côté bâtiment tour (90m de hauteur) qui est disposé directement en amont par rapport au bâtiment inférieur (30m de hauteur) (Fig. IV.2). L'article rapporte un accord étroit et une concordance de la concentration du polluant du NO_x entre les simulations CFD et les mesures sur le terrain, avec une erreur de 25%, estimé par les spécialistes.

La section transversale sur canyon (**Fig. IV.2/3**) a mis en évidence un degré de concentration de polluant inégal et variable en hauteur, le taux maximal donc se trouve à l'échelle des piétons, à cause de l'accumulation due aux échappements des véhicules et en raison de l'effet de sillage du bâtiment tour qui a empêché la ventilation et la dispersion du polluant à l'intérieur du canyon (**Blocken et al, 2013. Qin & Kot, 1990**).

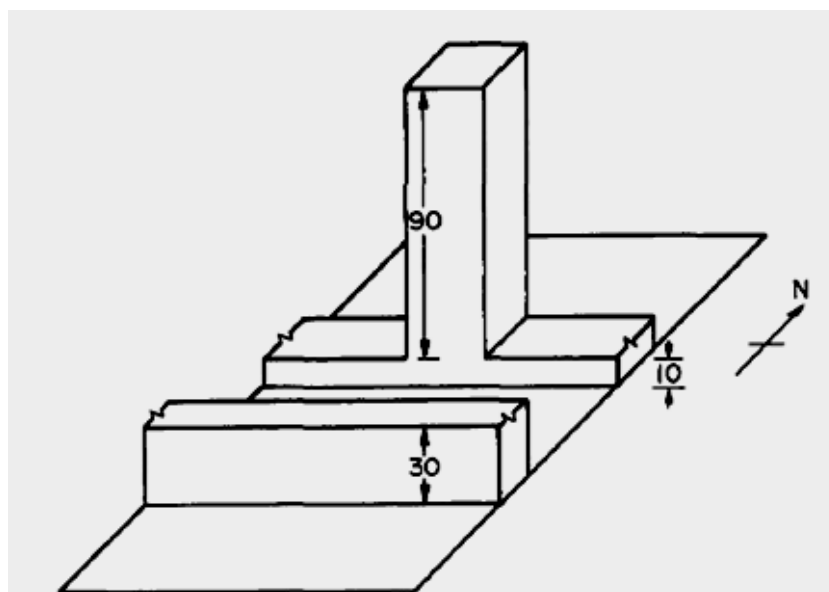


Fig. IV.2. Le canyon est entre deux configurations différentes de bâtiments (**Qin & Kot, 1990**).

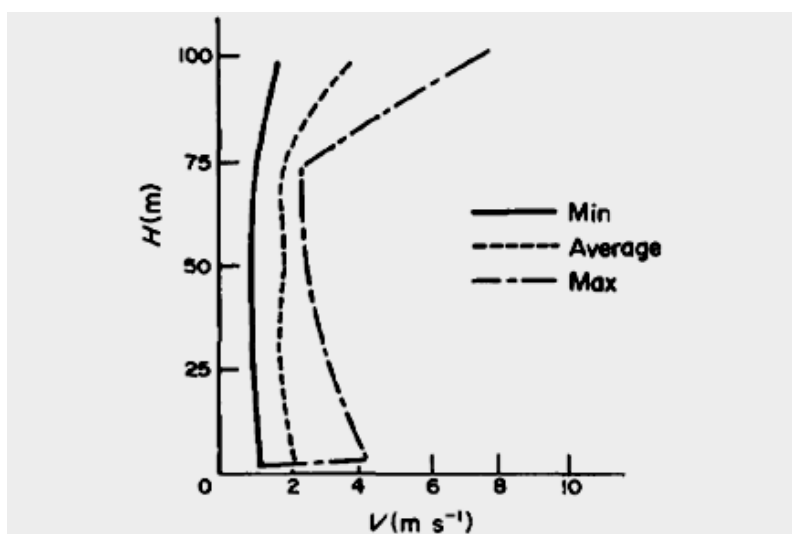


Fig. IV.3. Variation de la vitesse du vent en hauteur au canyon urbain à partir d'une hauteur de 2m par rapport au sol (**Qin & Kot, 1990**).

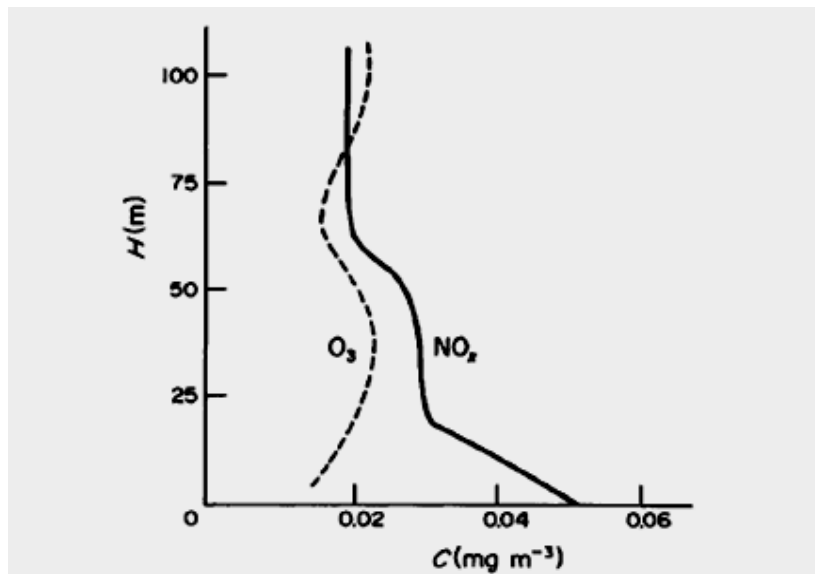


Fig. IV.4. Variation de la concentration moyenne du NO_x et O₃ (Ozone) en hauteur (Qin & Kot, 1990).

2. le travail de recherche de Xie et al (2004)

Xie et al (2004) se sont penchés sur l'utilisation de la simulation en CFD/2D dans l'impact du rayonnement solaire et des dispositions géométriques spécifiques sur la dispersion des polluants dans le cas des canyons urbains génériques, le profil du canyon générique a été analysé par rapport à sa structure en vortiques et ses concentrations en polluants.

Tout d'abord, pour les conditions isothermes, le résultat a démontré que la configuration asymétrique graduée avec le sens de l'écoulement d'air « stepup notch » diminue les niveaux concentrations de polluants par rapport à la configuration contraire « stepdown notch » (Fig. IV.5-7). Alors que dans le cas de l'ajout des paramètres, tels que le rayonnement solaire, la vitesse du vent ainsi que la température de l'air pour la configuration « stepup notch », les résultats ont donnés des taux élevés en concentrations de pollution dans le canyon au côté face de l'écoulement (Windward heated) (Fig. IV.5-7).

Par contre la configuration « stepdown notch » aux conditions (Windward heated & floor heated) a diminué le taux de pollution au canyon (Fig. IV.5-7), mais la condition (leeward heated) dans la même configuration a augmenté la concentration de la pollution. Il est très important d'ajouter, que pour toutes les conditions (l'isotherme, leeward heated, floor heated

ou windward heated) la configuration « stepdown notch» a développé deux tourbillons face à l'écoulement du vent « windward heated».

Cette recherche a démontré que, la géométrie d'un canyon urbain a une forte influence sur le nombre de tourbillons, l'écoulement d'air, la concentration de pollution et la dispersion de la pollution (Blocken et al, 2013. Xie et al, 2004).

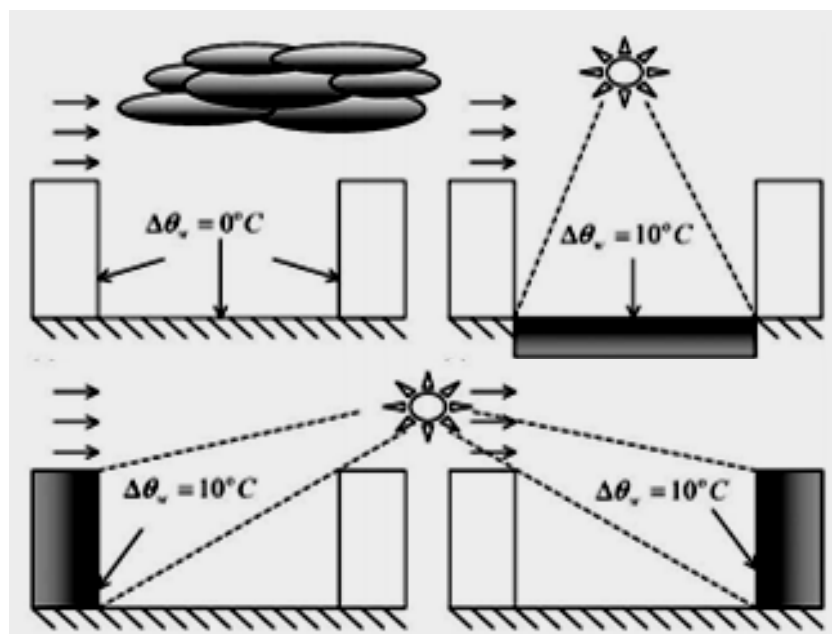


Fig. IV.5. Configurations pour les surfaces ensoleillées (Xie et al, 2004)

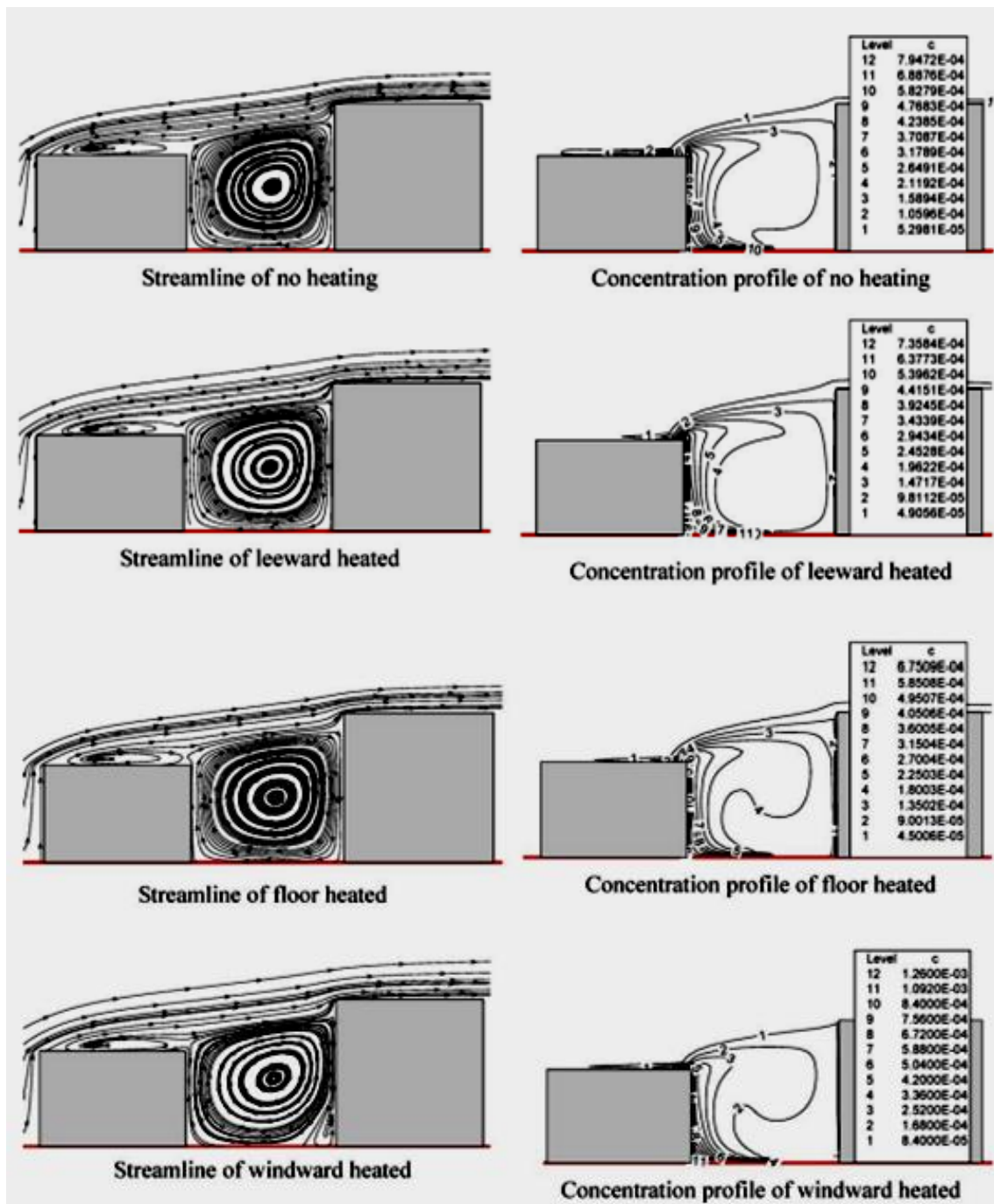


Fig. IV.6. Profil d'un canyon pour un écoulement d'air et concentration de polluant dans un canyon urbain asymétrique gradué avec le sens de l'écoulement d'air « stepup notch »

($\mu = 2 \text{ ms}^{-1}$, $\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$) (Xie et al, 2004)

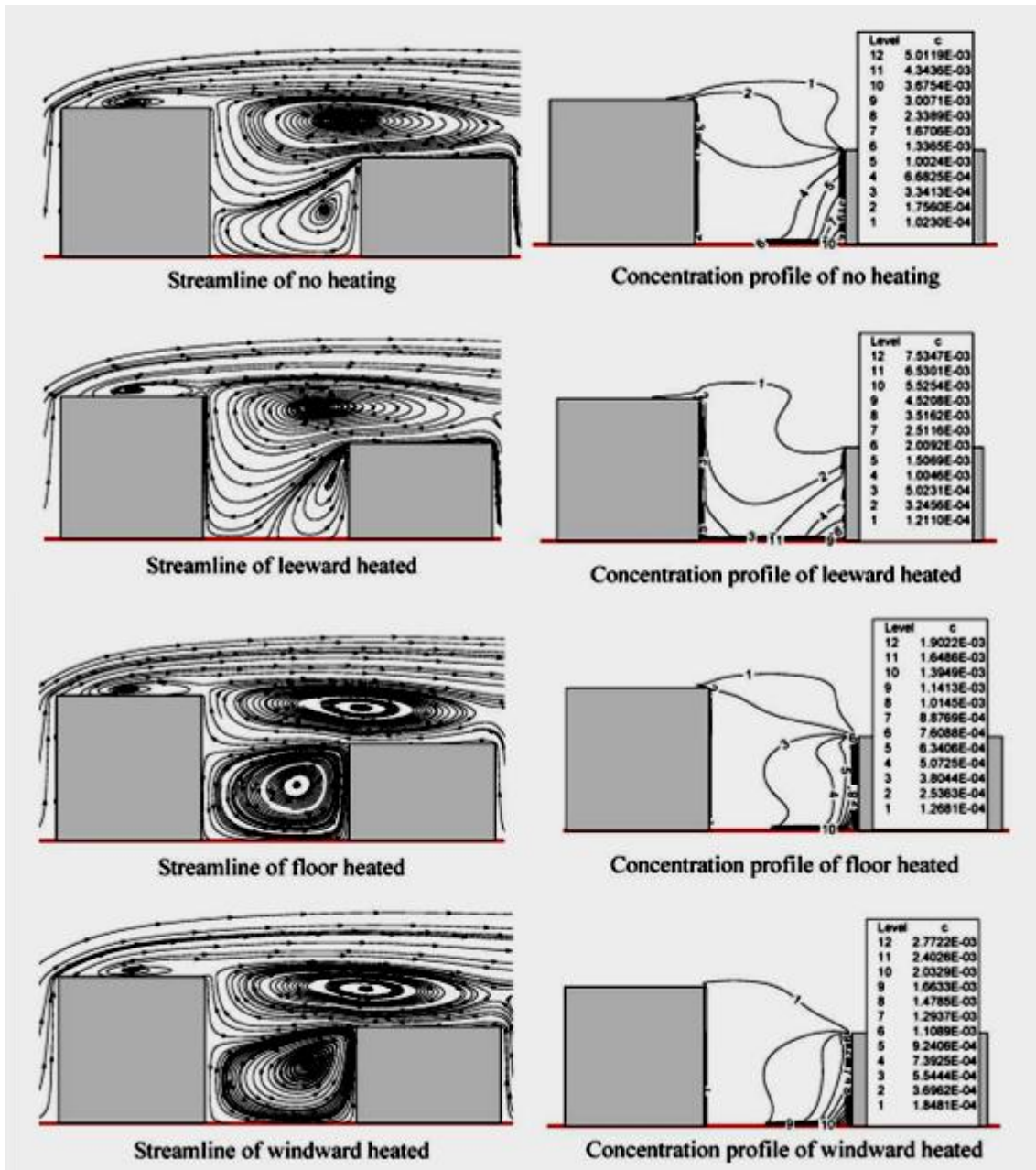


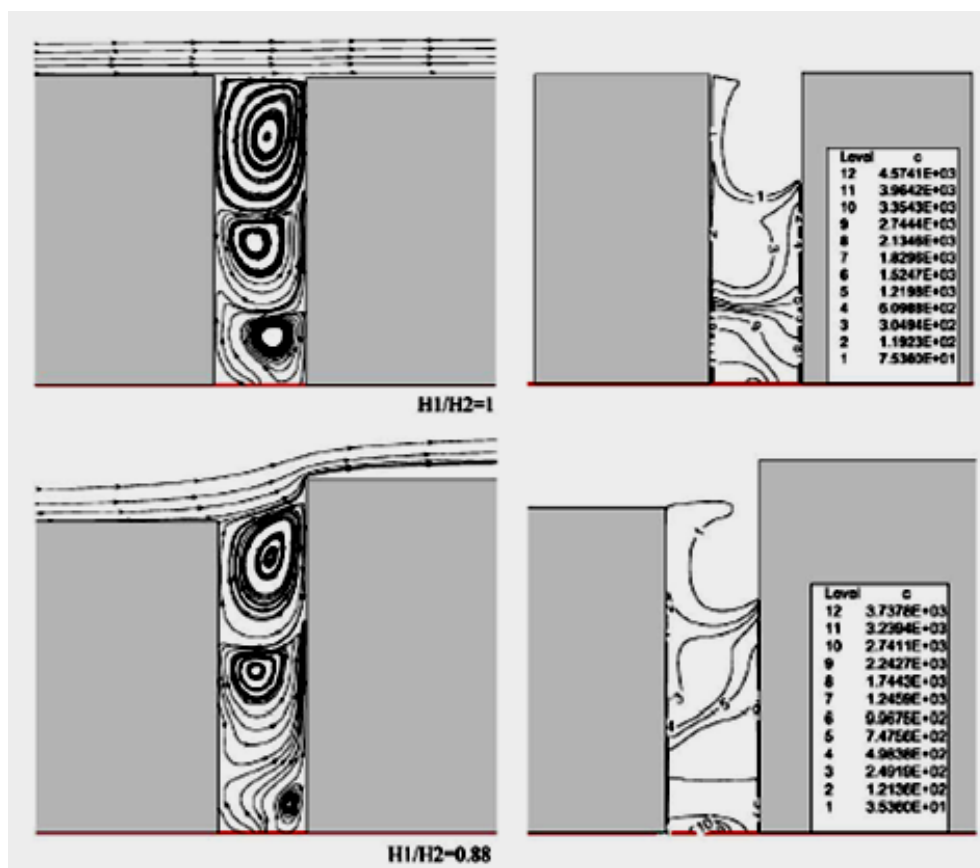
Fig. IV.7. Ecoulement d'air et concentration de polluant en profil dans un canyon urbain asymétrique gradué en contre sens de l'écoulement d'air « stepdown notch » ($\mu = 2 \text{ ms}^{-1}$, $\Delta\theta = 10^\circ\text{C}$) (Xie et al, 2004)

3. le travail de recherche de Xie et al (2005)

Plus tard, Xie et al (2005) ont étendu la partie isotherme de leur étude antérieure en étudiant les structures des vortex et les niveaux de concentration des polluants dans les canyons génériques. La méthodologie a été appliquée pour analyser un large éventail de rapports de prospects par l'outil de simulation par CFD en 2D.

Ils ont identifié différents régimes d'écoulement qui correspondent aussi à des configurations géométriques variables.

Parmi l'une de leurs expériences, l'exemple de la figure (IV.8) qui représente un rapport de prospect ($H/W=3.5$), démontre un comportement variable de dispersion du polluant, il présente des formes multiples de tourbillons, par la variation du rapport $H1/H2$ qui correspond aux valeurs: 1, 0.88, 1.4 et 2.33 (Blocken et al, 2013. Xie et al, 2005).



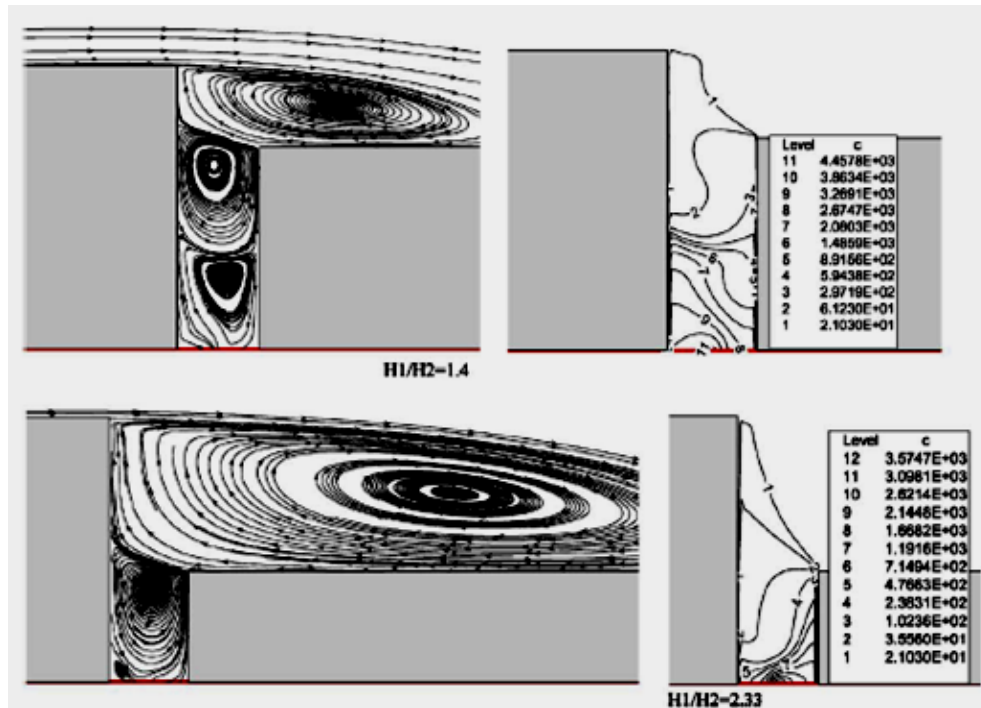


Fig. IV.8. Différentes formes de tourbillons et degré de concentrations de polluant pour différentes $H1/H2$ (1, 0.88, 1.4 et 2.33), qui correspondent à un prospect de (H/W) 3.5 (Xie et al, 2005)

4. le travail de recherche de Gao et al (2003)

Gao et al (2003) ont analysé la transmission du tracer du gaz (CO_2) entre les appartements d'un immeuble résidentiel de grande hauteur à Hong Kong (Fig. IV.9). Cela dans le cadre d'une recherche pour diagnostiquer la transmission aéroportée en cas d'infection.

Le couplage simulations extérieurs/intérieurs a mis en évidence le fait que la transmission d'une infection à travers l'air soit possible.

Pour cette raison, leur étude a abouti à la conclusion suivante : pour une même façade unilatérale une lutte contre une infection devrait être prise en compte quelque soit le type du gaz (Blocken et al, 2013, Gao et al, 2003).

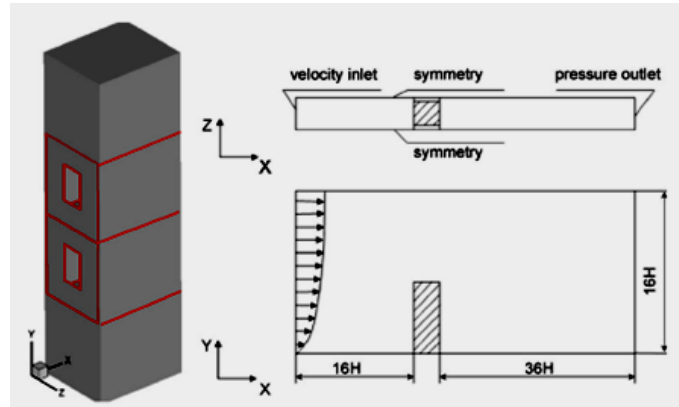


Fig. IV.9. Description pour simulation par CFD en 3D d'un bâtiment model et domaine de calcul (Gao et al, 2003).

5. le travail de recherche de Bady et al (2007)

Pour évaluer la qualité de l'air des zones urbaines par l'application des indices d'efficacité de la ventilation (EV) intérieure, Bady et al (2007) ont suggéré l'utilisation de trois indices d'efficacité de ventilation (EV) intérieur mentionnés ci-dessous dans le but d'évaluer la qualité de l'air des zones urbaines;

- Débit De Purge (DDP: le débit d'air effectif requis pour purger les polluants du domaine),
- Fréquence de Visite (FV: nombre de fois du polluant entrant dans le domaine)
- Temps de Séjour (TS: le temps qu'un polluant prend, dès son entrée {ou sa génération} dans le domaine jusqu'à sa sortie).

Ces indices ont été appliqués sur deux exemples de recherche, sur les figures ci-dessous (IV.10-12), des simulations par CFD en 3D ont été effectuées sur un modèle composé de deux bâtiments dans le but d'évaluer **les effets de la largeur** du canyon et de la **hauteur de ses immeubles**, surtout sur les indices (EV) d'un domaine situé à l'intérieur du canyon.

Le résultat de leurs recherches a démontré que ces indices sont capables de décrire le comportement des polluants dans le domaine du calcul, ce qui est très important pour obtenir une évaluation complète sur la qualité de l'air à l'intérieur du canyon, aussi ces indices d'efficacité de ventilation (EV) ont une influence pour estimer une ventilation à l'intérieur d'un canyon urbain (Blocken et al, 2013. Bady et al (2007).

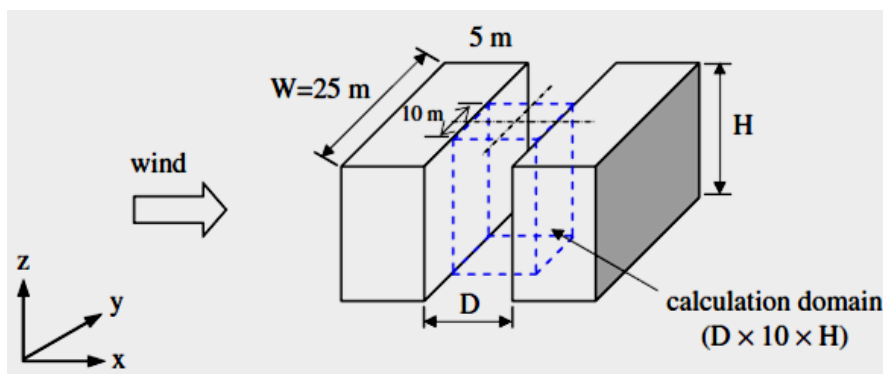


Fig. IV.10. Domaine du calcul entre deux bâtiments model (Bady et al, 2007).

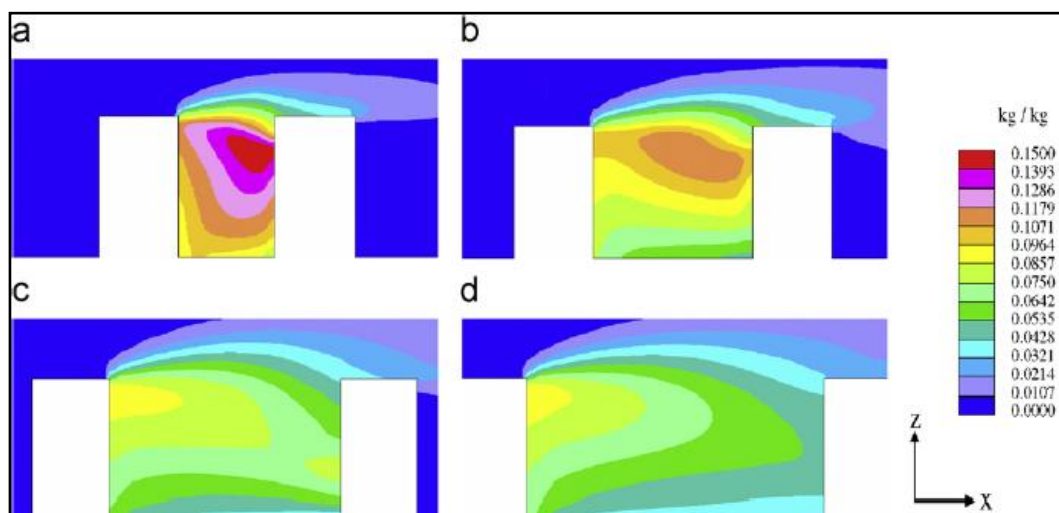


Fig. IV.11. Concentration de pollution pour des largeurs différentes d'un canyon urbain : (a) $D/H=0.6$; (b) $D/H=1.0$; (c) $D/H=1.5$; (d) $D/H=2.0$. (Bady et al, 2007).

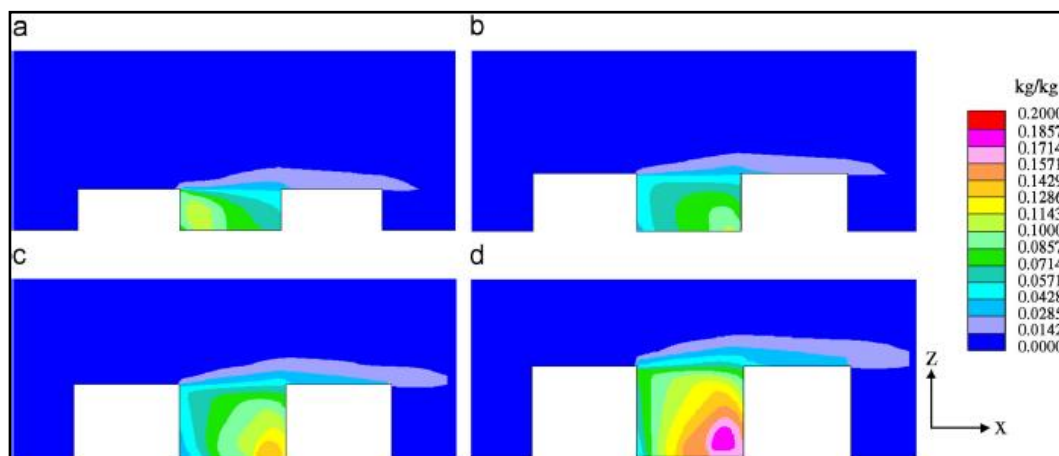


Fig. IV.12. Concentration de pollution pour des hauteurs différentes d'un canyon urbain : (a) $H/D=0.4$; (b) $H/D=0.6$; (c) $H/D=0.8$; (d) $H/D=1.0$. (Bady et al, 2007).

6. le travail de recherche de Bu et al (2008)

Bu et al (2008) ont développé deux nouveaux critères pour l'évaluation de l'écoulement du vent dans un environnement local ayant une fonction d'analyse des probabilités de dépassement « exceedance probability analysis ». Ces critères se sont basés respectivement sur le taux de changement d'air et sur l'énergie cinétique. La praticabilité et l'efficacité « The practicability and effectiveness » de ces critères ont été démontrées dans un modèle de canyon urbain exposé aux conditions du vent pour la ville de Tokyo (Fig.IV.13).

L'expérience a prouvé que les facteurs de configuration ont une performante ventilation locale, en l'occurrence l'orientation du canyon et son rapport du prospect (H/W) (Blocken et al, 2013. Bu et al, 2008).

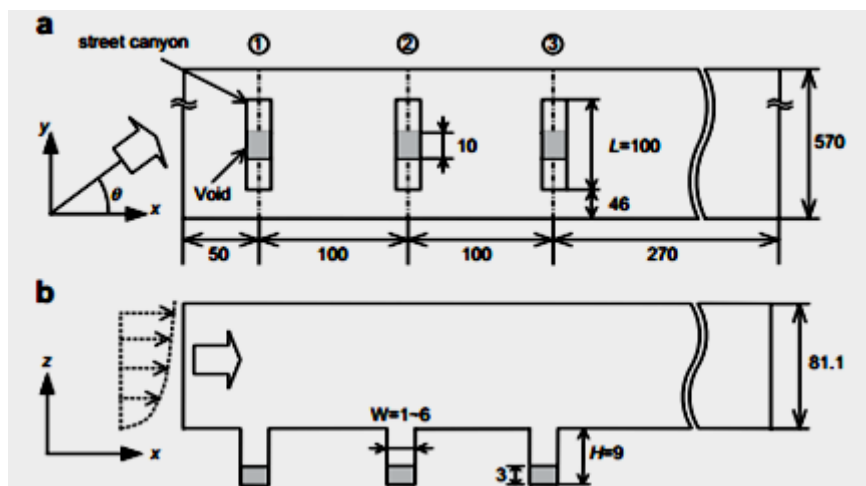


Fig. IV.13. Configuration du modèle. (a) Plan horizontal, (b) Plan vertical (Bu et al, 2008).

7. le travail de recherche de Hefny & Ooka (2008)

Hefny & Ooka (2008) ont analysé l'effet de la typologie de la grille (et plus particulièrement, la géométrie des cellules de la grille {maillage}) sur l'erreur numérique.

Sur la base de leurs recherches, ils ont estimé l'importance majeure de l'effet de la typologie de la grille, pour cette raison, une étude a été faite pour mieux établir une évaluation quantitative de l'influence de la géométrie des cellules du maillage sur les résultats de la dispersion des polluants autour des bâtiments, en simulations par CFD (Fig. IV.14/15), afin d'aider les modélisateurs à choisir le type de maillage le plus efficace pour leurs applications (Blocken et al, 2013. Hefny & Ooka, 2008).

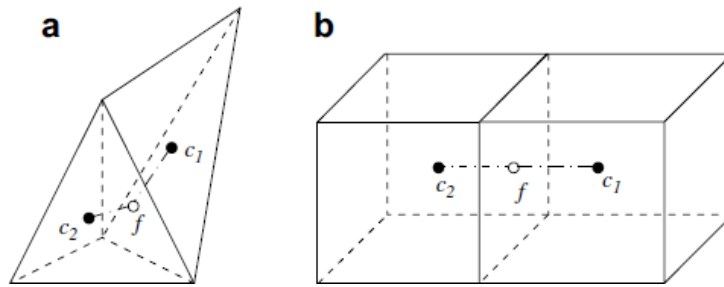


Fig. IV.14. Cellules voisines typiques : (a) Cellules en tétraèdres, (b) Cellules en hexaèdres (Hefny & Ooka, 2008).

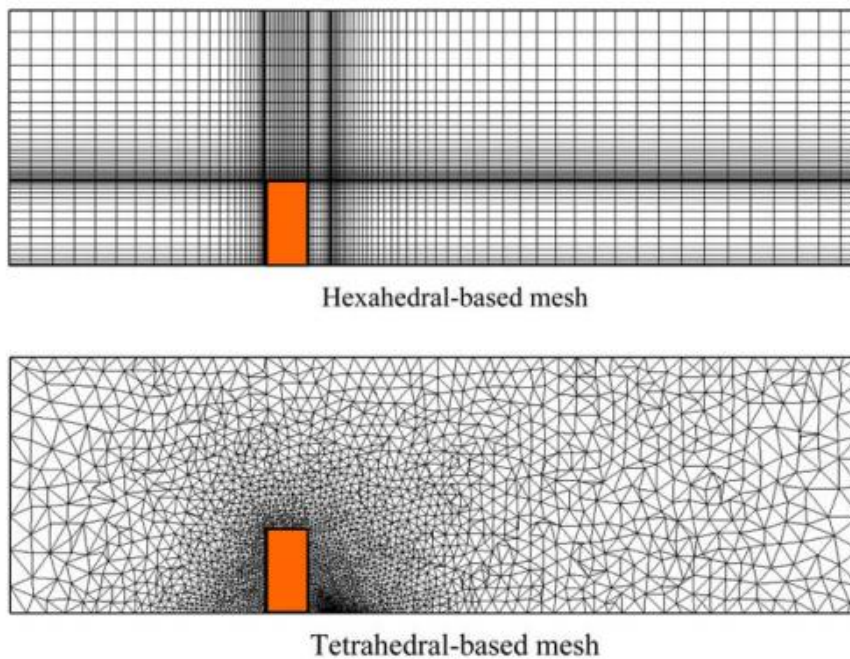


Fig. IV.15. Style des maillages/grilles utilisés dans des projets de simulation en CFD (cellule en hexaèdres ou tétraèdres) (Hefny & Ooka, 2008).

8. le travail de recherche de Hang et al (2008)

Hang et al (2008) ont évalué par simulation en CFD trois modèles de ville (idéalisés), en fonction de l'âge moyen local de l'air et de l'efficacité de l'échange d'air « in terms of the local mean age of air and the air exchange efficiency ».

La notion technique du phénomène « âge moyen local de l'air » indique le temps nécessaire que prend un air, allant du milieu extérieur (rural) en arrivant à la couche limite urbaine (UCL : Urban Canopy Layer. L'efficacité de cet échange du volume d'air veut dire une meilleure efficacité de vidange d'air pour les Canyons urbains à partir de l'air extérieur.

Cette méthodologie a été appliquée par les chercheurs sur des modèles urbains différents qui comprennent en occurrence (Fig. IV.16), un modèle d'une ville ronde, modèle d'une ville

carrée et une ville rectangulaire composée d'un Canyon disposé en parallèle au vent (Blocken et al, 2013. Hang et al, 2008).

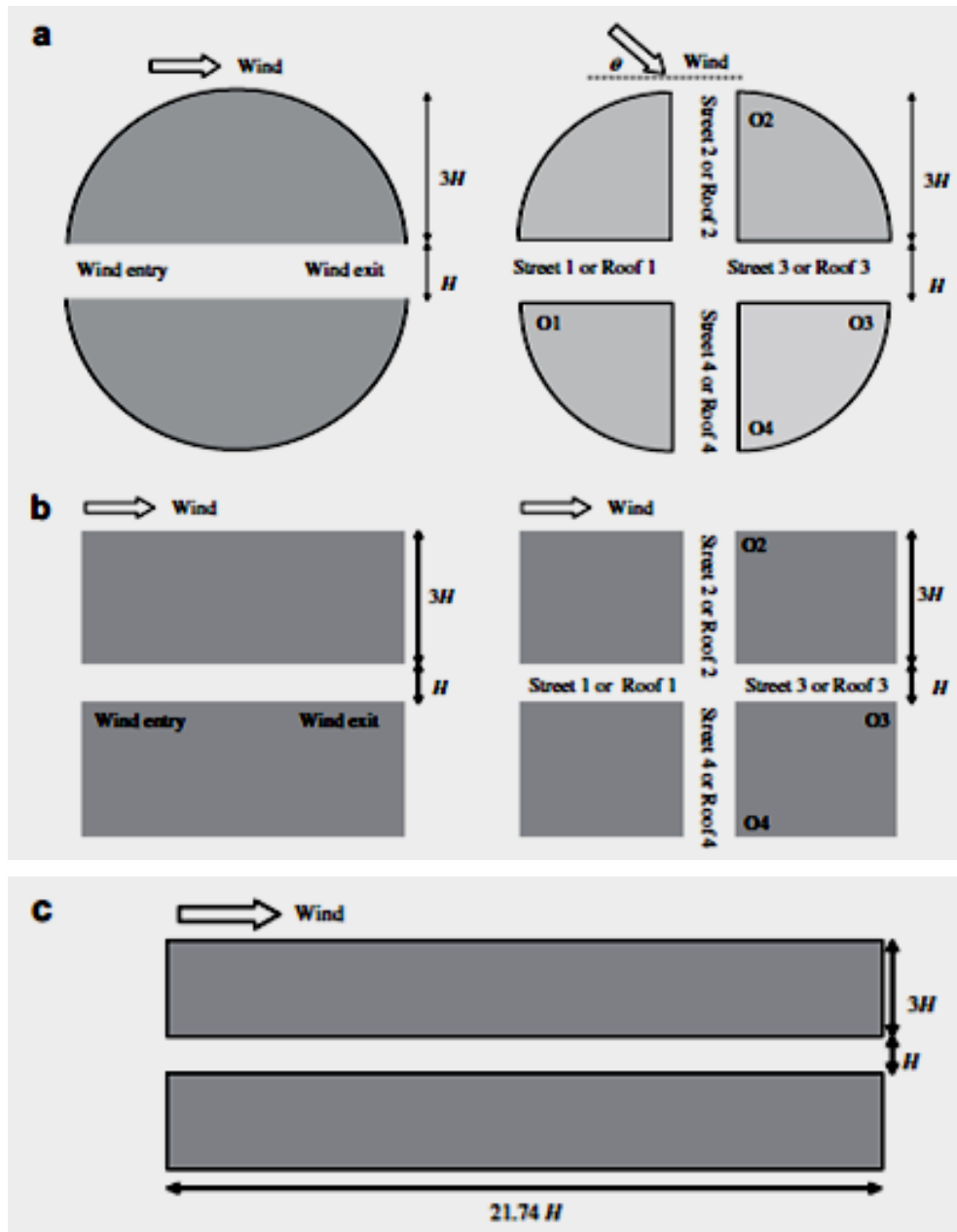


Fig. IV.16. Modèles des villes utilisées. (a) ville circulaire, (b) ville carrée, (c) ville longue de forme rectangulaire (Hang et al, 2008).

9. le travail de recherche de Huang et al (2009)

Huang et al (2009) ont étendu les études de Xie et al (2004 & 2005) (citer précédemment) en étudiant l'effet des toits en forme de pente sur le vecteur de la vitesse de l'air et sur les champs de concentrations des polluants, par la simulation CFD en 2D (Fig. IV.17).

Le résultat de leurs recherches a démontré que ces modifications géométriques ont des effets significatifs par rapport à la géométrie du toit simple, en soulignant que ces concentrations de polluants avec des toits inclinés sont beaucoup plus élevées dans les Canyons «stepdown» que dans les canyons «stepup» (Blocken et al, 2013. Huang et al, 2009).

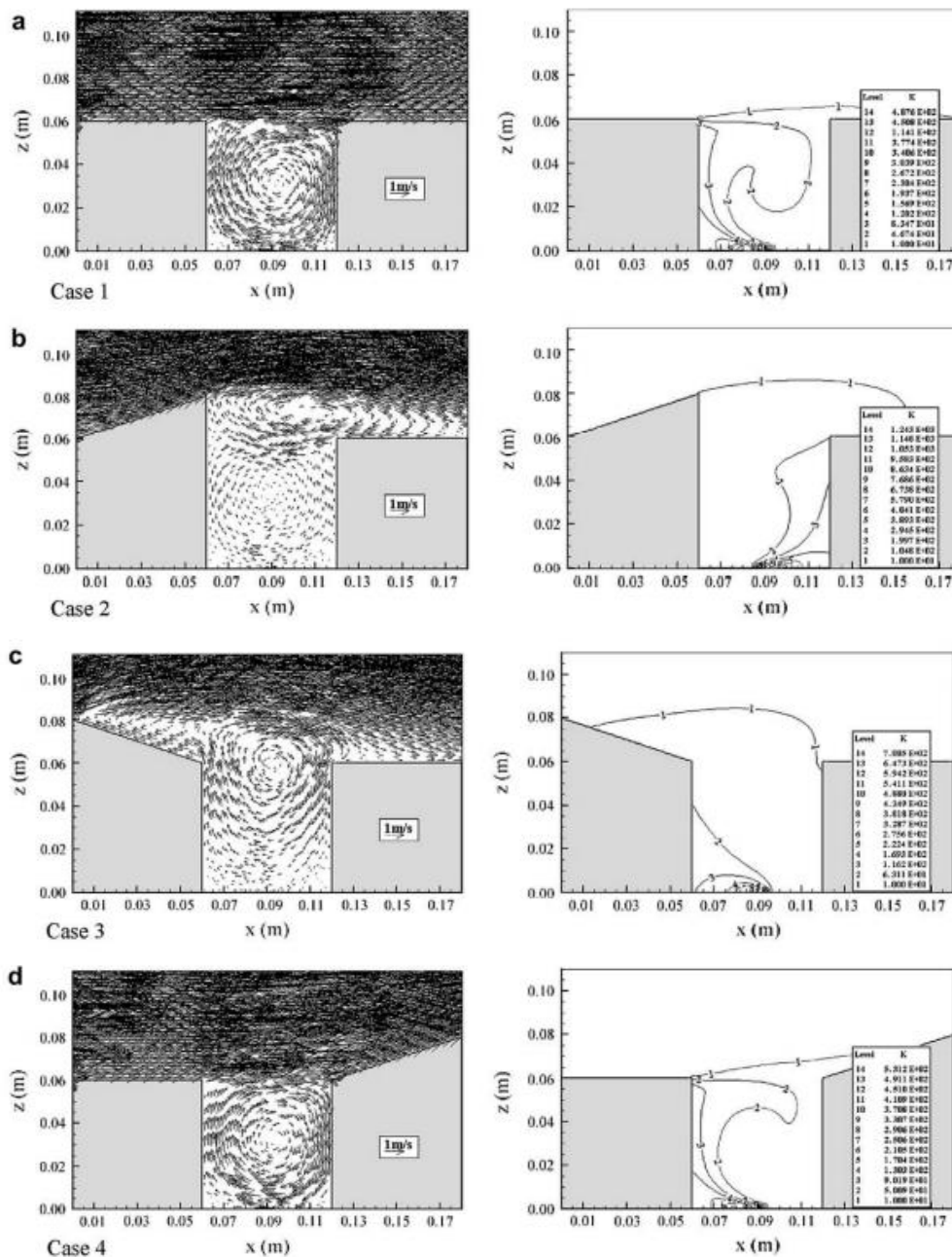


Fig. IV.17. Simulation en par CFD en 2D des vecteurs de vitesse de l'air et contours de concentrations de polluant à l'intérieur d'un canyon urbain : **(a)** Canyon en toit simple et deux parois identique en hauteur ; **(b & c)** Canyon de type « stepup » avec un toit incliné sur un seul fragment ; **(d)** Canyon de type « stepdown » avec un toit incliné sur un seul fragment (Huang et al, 2009).

10. le travail de recherche de Lateb et al (2009)

Lateb et al (2009) ont effectué des simulations par CFD en 3D d'une configuration de deux bâtiments à Montréal, dont le premier est disposé en amont par rapport à l'écoulement de l'air, a une hauteur de **45m** (à l'exclusion des structures en toiture) et le second de **12,5m** de hauteur disposé après le premier par rapport à l'écoulement d'air (toujours à l'exclusion des structures en toit). Comme dans l'étude de Qin et Kot (mentionnée précédemment), cette disposition de configuration et de vitesse du vent est également considérée comme problématique en termes de dispersion de polluants. Toutefois, les chercheurs ont souligné que la pollution qui se trouve au niveau du canyon urbain provient du toit du bâtiment BE « de basse hauteur » (Fig. IV.18 & 19).

Les résultats des simulations par CFD en 3D ont été comparés avec les données de la soufflerie et avec les essais sur terrain pour permettre une analyse complète sur les erreurs et les incertitudes inhérentes à la modélisation RANS avec le modèle $k - \varepsilon$ (Blocken et al, 2013. Lateb et al, 2009).

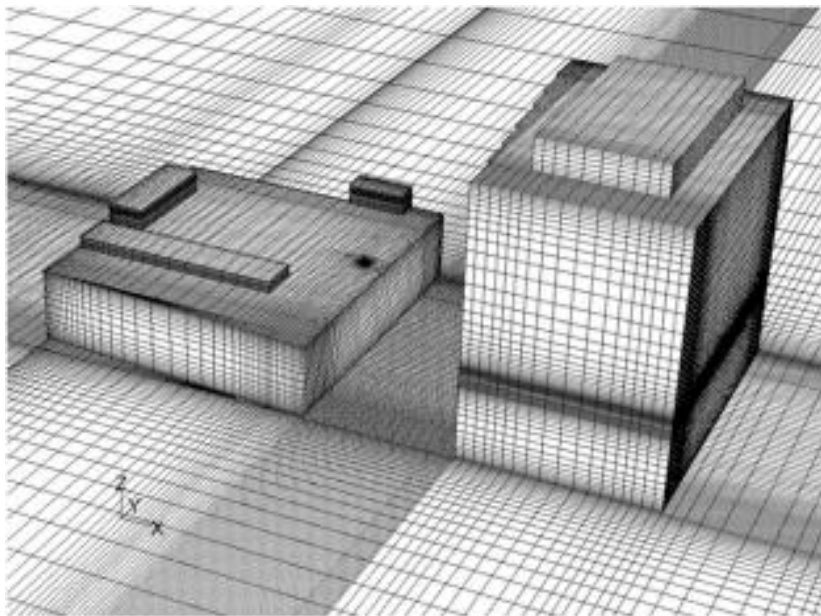


Fig. IV.18. Vue générale sur la grille par modèle Fluent (M Lateb et al, 2009).

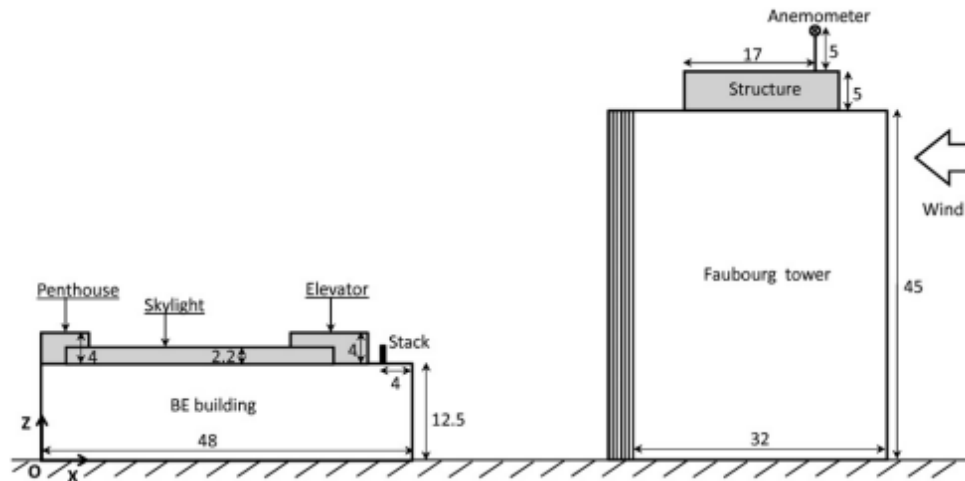


Fig. IV.19. Vue en élévation du bâtiment BE et la tour de Faubourg. Toutes les dimensions (M Lateb et al, 2009)

11. le travail de recherche de Tominaga et Stathopoulos (2010)

Les chercheurs ont fourni une comparaison détaillée entre les données de LES (Large-Eddy Simulation), RANS (Reynolds Averaged Navier Stokes) et de la soufflerie sur l'écoulement du vent ainsi que sur la concentration des polluants dans le cas d'un bâtiment isolé.

Les simulations RANS ont été réalisées avec le modèle $k - \epsilon$ du Groupe de Renormalisation (RNG) pour la fermeture « The RANS simulations were performed with the Renormalisation Group (RNG) k-e model for closure ». Malgré que les différences de vitesse entre LES et RANS ne sont pas importantes, le LES a nettement dépassé RANS dans l'analyse de la concentration des polluants car la diffusion horizontale a été bien reproduite par LES et non par RANS.

Cette étude a confirmé donc l'exactitude du LES pour la modélisation de la dispersion de panache « plume dispersion », près et autour de la construction isolée et a identifié la raison pour laquelle un écart de la modélisation RANS est obtenu (Blocken et al, 2013. Tominaga et Stathopoulos, 2010).

12. le travail de recherche de Salim et al (2011)

Salim et al (2011) ont reproduit numériquement les expériences de la dispersion de polluants du trafic dans un canyon urbain avec (ou sans) des arbres, sur la base des données avec RANS et LES (Fig. IV.20).

- D'abord pour le canyon sans arbres, les simulations par LES montrent un accord très étroit avec les données de la soufflerie pour les concentrations du polluant aux murs « mur de vent : Windward » et « sous le vent : leeward » du Canyon urbain.
- Pour les canyons urbains avec des arbres en revanche, l'accord entre LES et la soufflerie (Wind Tunnel) reste très proche pour le mur « leeward wall », alors qu'il se dégrade considérablement pour le mur « Windward wall ».

En effet, le mur « Windward wall » avec la présence des arbres engendre un accord entre RANS et WT, beaucoup mieux par rapport à une comparaison entre LES et WT. Bien que cela n'est pas mentionné par les auteurs, parce que la simulation par CFD suggère une certaine différence dans la modélisation sous l'effet aérodynamique des arbres en LES (Blocken et al, 2013. Salim et al, 2011).

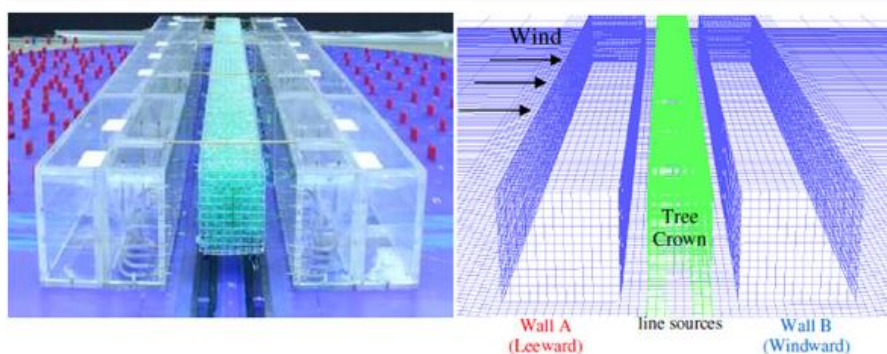


Fig. IV.20. Positions de la source de la pollution en ligne et plantation d'arbres. (a) La configuration de la soufflerie (Wind Tunnel: WT), (b) Le domaine de calcul de la simulation par CFD en 3D (Salim et al, 2011).

13. le travail de recherche de Gu et al (2011)

Gu et al (2011) ont étendu le travail de recherche de Xie et al (Mentionné précédemment) et le chercheur Huang et al (mentionné précédemment), en se concentrant sur les canyons non-uniformes. Leurs configurations a été constituées de bâtiments supérieurs et inférieurs en hauteur, placés sur une ligne décalée, pour cette configuration géométrique compliquée, seule la méthode du LES (Large-Eddy Simulation) a été appliquée.

Les simulations par CFD en 3D ont démontrées que les concentrations de polluants dans les canyons non-uniformes sont inférieures par rapport à celles des canyons uniformes, ce qui

laisse supposer que les dispositions non-alignées des bâtiments sont susceptibles d'améliorer la dispersion des polluants pour une zone urbaine (**Fig. IV.21**).

Les résultats de simulation ont indiqués également que les structures d'écoulement d'air dans les Canyons urbains non-uniformes sont plus compliquées que dans le canyon uniforme.

En plus, à l'intérieur des Canyons non-uniformes, l'écoulement d'air subit une divergence horizontale, une inclinaison et une convergence des courants d'air. Egalement la configuration non-uniforme laisse apparaître des échanges aériens à grande échelle en masse d'air à l'intérieur et au-dessus des Canyons urbains (entre les couches UCL, UBL) (**Blocken et al, 2013. Gu et al, 2011**).

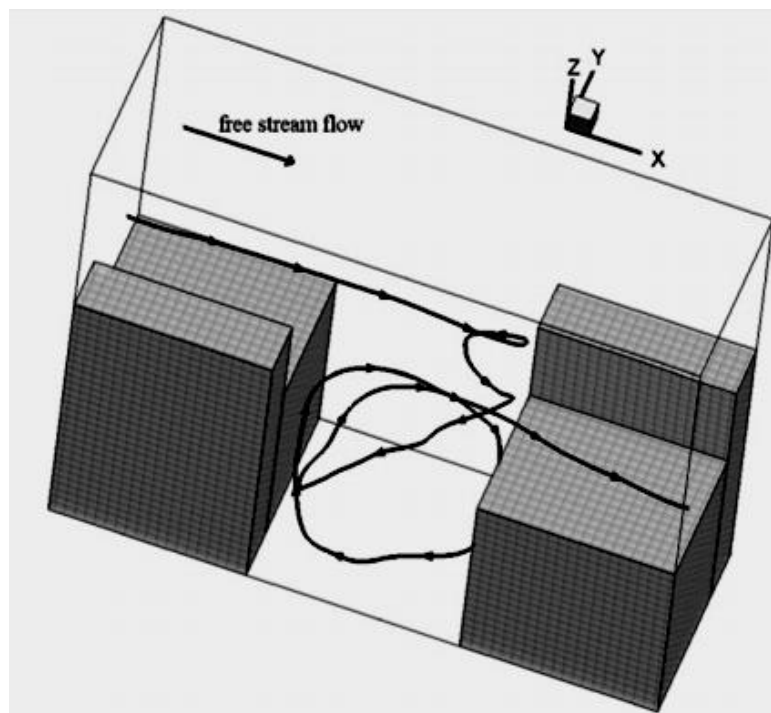


Fig. IV.21. Une ligne typique de flux d'air dans un Canyon urbain non-uniforme (**Gu et al (2011)**).

14. le travail de recherche de **Gallagher et al (2012)**

La mise en œuvre des contrôles passifs en milieu urbain est une approche récente pour protéger la santé humaine en manipulant les courants d'airs naturels. **Gallagher et al (2012)** ont analysé l'effet des contrôles passifs sous forme d'un mur de délimitation bas (Low

Boundary Wall-LBW), sur la pollution à l'échelle des piétons pour des Canyons urbains asymétriques (idéalisés).

Des solutions comme les commandes passives peuvent être projetées dans les Canyons urbains pour réduire l'exposition des polluants atmosphériques aux piétons sur les sentiers, cela par une commande de la dispersion naturelle (**Fig. IV.22/23**).

L'étude combinée entre le contrôle à l'échelle réelle et la modélisation numérique, a qualifié l'intérêt de l'existence d'un mur à faible hauteur (LBW) dans un canyon urbain de Dublin, en Irlande (**Gallagher et al, 2012**).

Les résultats de cette recherche ont révélés que les configurations géométriques des LBW peuvent produire une augmentation ou une diminution de la concentration de la pollution locale (**Blocken et al, 2013. Gallagher et al, 2012**).

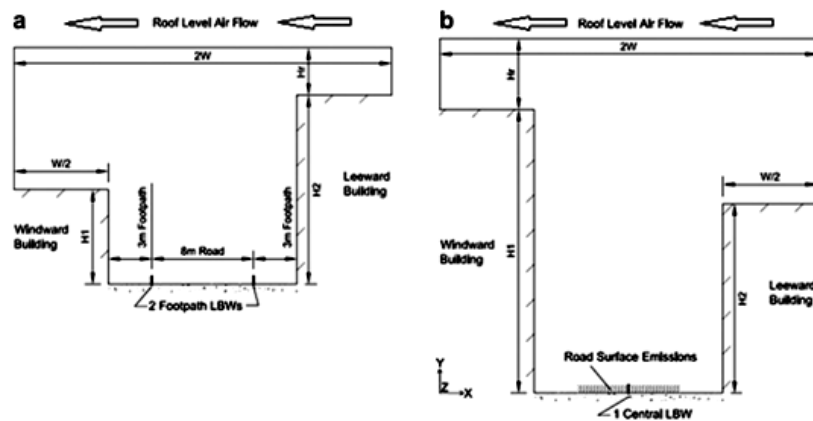


Fig. IV.22. Coupe transversale du canyon urbain modèle asymétriques (a) $H1 / H2 = 0.5$, avec deux LBW aux sentiers et (b) $H1 / H2 = 1.5$ avec un seul LBW central. (**Gallagher et al, 2012**).

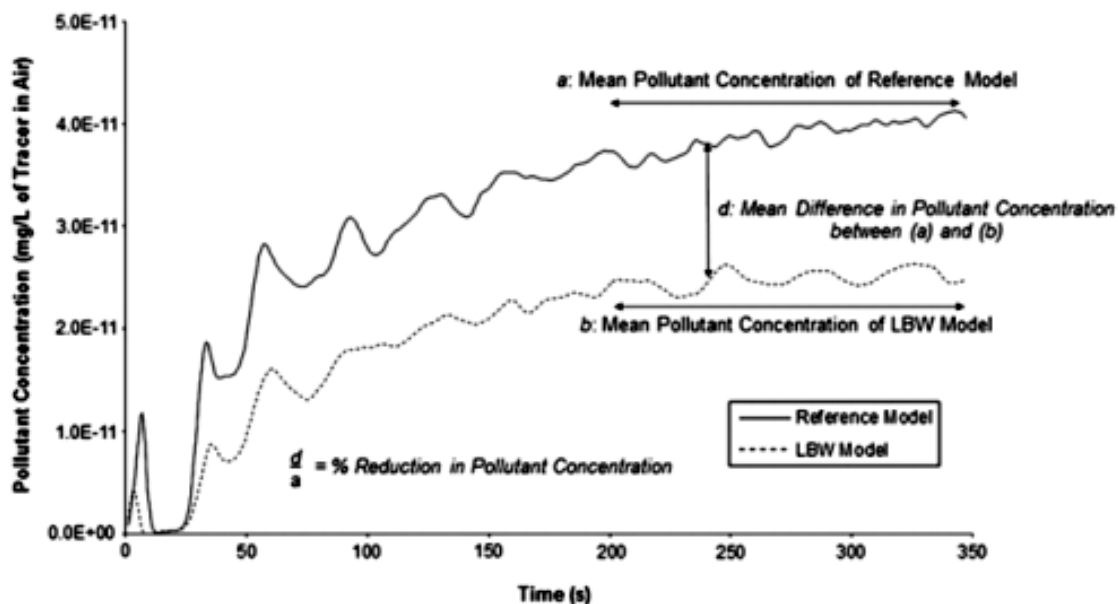


Fig. IV.23. Détermination de la différence de la concentration de polluants obtenue en comparant le modèle LBW avec le modèle de référence au niveau d'un sentier (Gallagher et al, 2012).

15. le travail de recherche de Hang et al (2012)

Hang et al (2012) ont étendu l'étude de Gu et al (2011) (Mentionnée précédemment), en analysant l'influence de changement des hauteurs de bâtiments sur la dispersion des polluants, ils ont également analysé la ventilation à l'échelle des piétons dans des rangées idéalisées de gratte-ciels (Hang et al, 2012).

Les bâtiments avec des hauteurs alternées « Larger standard deviations », ont induits à des ventilations meilleures (Fig.IV.24/25) (Blocken et al, 2013. Hang et al, 2012).

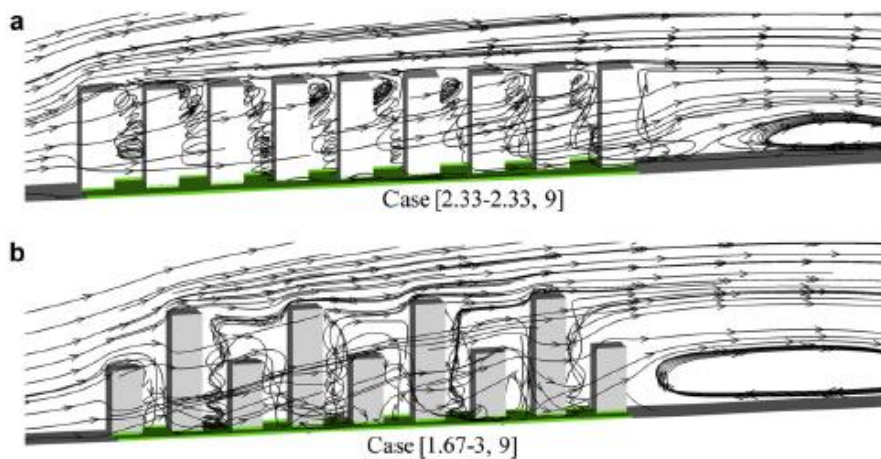


Fig. IV.24. Ligne Aérodynamique en 3D, (a) bâtiments uniformes, (b) écarts-types de hauteur « Larger standard deviations » (Hang et al, 2012).

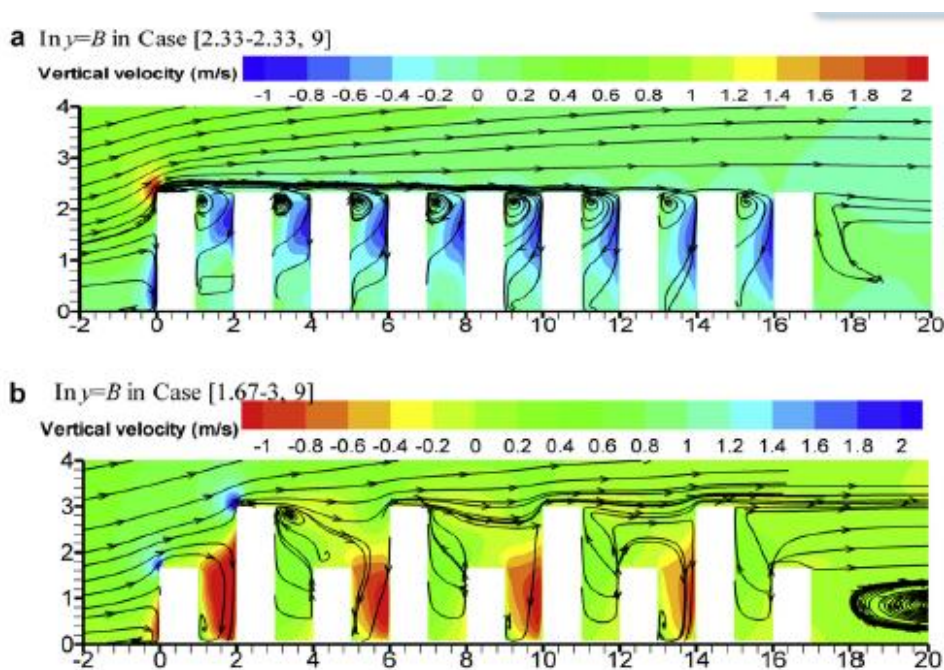


Fig. IV.25. Distribution de la vitesse verticale, (a) bâtiments uniformes, (b) écarts-types de hauteur « Larger standard deviations » (Hang et al, 2012).

16. le travail de recherche de Van Hooff & Blocken (2013)

Van Hooff & Blocken (2013) ont étudié la dispersion du CO_2 due au vent, à l'intérieur d'un stade semi-fermé (stade ArenA-Pays bas) (Fig.IV.26). Les simulations de la géométrie complexe du stade a été faite par RANS, avec le modèle $k - \epsilon$, les chercheurs ont reproduit les vitesses du vent qui ont été mesurées sur terrain au niveau des ouvertures de ventilation

(Fig.IV.26-28), ils ont reproduit également la décroissance de la concentration de CO_2 dans le complexe sportif (Fig.IV.26-28) (Blocken et al, 2013).

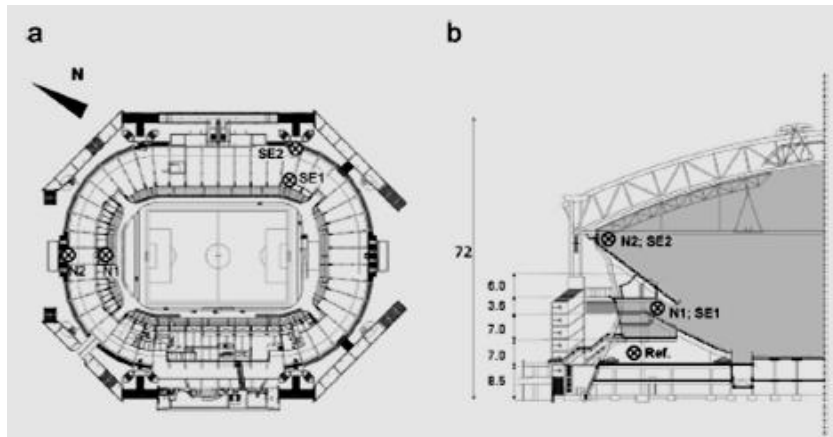


Fig. IV.26. Indication des quatre positions internes de mesures : de températures, concentrations d'humidités, concentrations de CO_2 , (a) Section horizontale; (b) Section verticale (Van Hooff & Blocken, 2013).

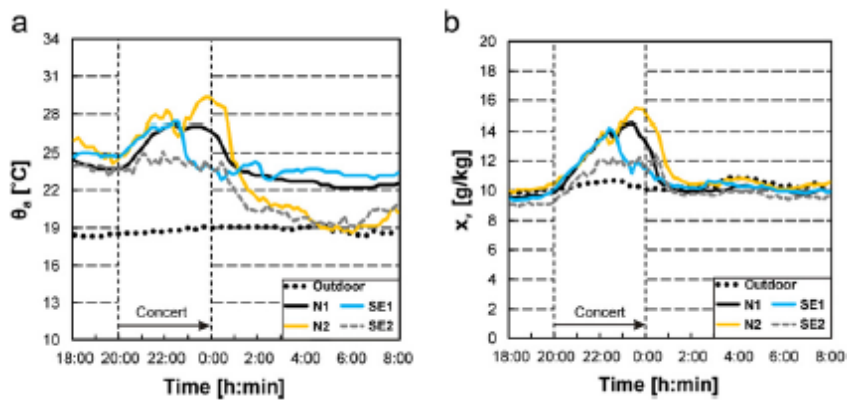


Fig. IV.27. (a) Températures intérieures extérieures [θ : °C] mesurées durant la présence du public. (b) Concentration intérieures et extérieures d'humidité [X_1 : g/kg] (Van Hooff & Blocken, 2013).

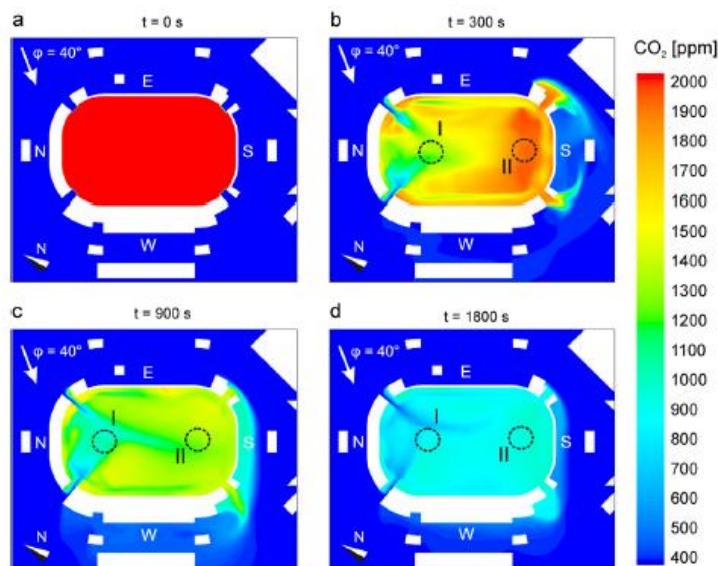


Fig. IV.28. Distribution de la concentration du CO₂ (ppm) en section horizontale +4.65 m au-dessus de la plate forme du stade « ArenA deck » pour quatre différents moments (a) t = 0 s; (b) t = 300s; (c) t = 900s; (d) t = 1800s (Van Hooff & Blocken, 2013).

Conclusion :

Seize (16) recherches scientifiques ont été présentées, toutes basées sur la simulation par CFD pour estimer la dispersion des polluants dans un microclimat spécifique.

La contribution principale de chacun fait partie de deux axes de recherches, soit d'une étude générique ou d'une étude de configuration géométrique particulière. L'étude générique c'est-à-dire une étude théorique d'un model, qui peut fournir des informations générales pouvant être exploité par la suite comme des arguments ou références pour d'autres cas d'étude ou des situations réelles. L'étude d'une configuration géométrique particulière en revanche, déploie l'avantage de la prise en compte de la complexité entière, de la configuration géométrique dans son contexte urbain.

Après une méthode d'application de simulation en CFD concernant la qualité de l'air dans un microclimat, la contribution principale de ces seize recherches est de prendre en charge des typologies multiples telles que : Des configurations géométriques 2D et 3D ; Canyons urbains ; Bâtiments isolés ; Ensembles de bâtiments ou partie d'une ville.

D'après la présentation de l'état de l'art du domaine pollution de l'air d'un microclimat par simulation en CFD, l'analyse de ces seize recherches a révélé certains points de divergence et de convergence qui peuvent être résumés comme suit

-
- a. 14 sur 16 articles ont focalisé leur travail sur la dispersion des polluants dans un environnement extérieur avec une rupture par rapport à la dispersion de l'environnement intérieur, à l'exception de deux articles, ceux des chercheurs **Gao et al (2003)** et **van Hooff & Blocken (2013)**, qui se sont basés dans leurs études de dispersion de polluant sur une approche de modélisation couplée (extérieure et intérieure), i.e. dans le même domaine de calcul, puisque le contexte de leurs recherche nécessite cette étude combinatoire (int/ext), le premier article analyse le taux d'infection entre appartement dans le cas d'une infection par un gaz, le deuxième exemple traite la concentration du CO₂ dans espace un ouvert (Stade Arena-Amsterdam).
 - b. 13 sur 16 articles ont été publiés dans les sept dernières années, sauf les articles de **Qin & Kot en 1990** et les deux articles de **Xie et al en 2005 et 2006**.
 - c. 13 sur 16 articles ont focalisé leurs recherches de la dispersion des polluants dans un environnement extérieur sur des bâtiments génériques ou sur des configurations théorique pour un canyon urbain, à exception de trois articles, celui de **Qin & Kot (1990)** qui a étudié une configuration de deux bâtiments à Shenzhen (Chine), l'article de **Lateb et al (2009)** qui se sont basés dans leurs recherche sur une configuration composé de deux bâtiments dans le centre-ville de Montréal (Canada) et enfin l'article de **van Hooff & Blocken (2013)** qui ont appliqué une modélisation sur le stade d'ARENA dans la ville d'Amsterdam.
 - d. 13 sur 16 articles ont fait leurs simulations par CFD en 3D, à l'exception de trois équipes de recherches qui sont **Xie al (2005/2006)** et **Huang et al (2009)** qui se sont basés dans leurs recherches sur des Canyon urbain en 2D.
 - e. 12 sur 16 articles mentionnés ci-dessus ont inclus dans leurs étude une partie de validation des résultats, par une étude combiné entre la simulation par CFD avec les mesures sur le terrain ou les mesures dans la soufflerie (Wind Tunnel), ou les deux à la fois. Il faut mentionner, que le recours à une validation n'est pas indispensable, mais permet une justification scientifique du contexte du sujet.

Les seize articles scientifiques mentionnés précédemment, ont été le sujet d'une édition spéciale du journal *Building & Environment*, leur domaine était, l'analyse par l'outil de la simulation en CFD, la pollution de l'air dans un microclimat.

En définitive et suivant l'ordre correspondant à l'analyse des travaux susmentionnés, l'originalité de notre sujet tient aux points spécifiques suivants qui le distinguent de ces recherches antérieures:

- a. Notre sujet qui traite la qualité de l'air au niveau d'un canyon urbain nécessite seulement une étude extérieure.
- b. Notre recherche est considérée comme un sujet d'actualité.
- c. Elle analyse la géométrie réelle du site d'intervention.
- d. Elle utilise des simulations par **CFD** en **3D** (une méthode récente), par ce que ce mode de présentation se rapproche beaucoup à la réalité (analyse profonde), par l'ajout d'une autre dimension (Axe de **Z**), l'analyse s'effectuera ainsi suivant trois dimensions au lieu d'en la faire en **2D** (une méthode ancienne).
- e. Enfin, nous considérons que la validation n'est pas importante, parce que l'idée principale de notre sujet de recherche est d'optimiser la qualité de l'air dans un Canyon urbain (dans le Ksar de Ghardaïa), on propose ainsi des configurations géométriques nouvelles en les analysant (seulement entre elles) suivant le même domaine de calcul et le même schéma de maillage (l'analyse est par rapport à des configurations géométriques)

References

Revue scientifique

Akbari, H., Kurn, D. M., Bretz, S. E. & Hanford, J. W. 1997. Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and Buildings*, 25, 139-148.

Balogun, A., Tomlin, A., Wood, C., Barlow, J., Belcher, S., Smalley, R., Lingard, J. N., Arnold, S., Dobre, A., Robins, A., Martin, D. & Shallcross, D. 2010. In-Street Wind Direction Variability in the Vicinity of a Busy Intersection in Central London. *Boundary-Layer Meteorology*, 136, 489-513.

- Bencheikh, H. & Rchid, A. 2012. The Effects of Green Spaces (Palme Trees) on the Microclimate in Arides Zones, Case Study: Ghardaia, Algeria. *Energy Procedia*, 18, 10-20.
- Dobre, A., Arnold, S. J., Smalley, R. J., Boddy, J. W. D., Barlow, J. F., Tomlin, A. S. & Belcher, S. E. 2005. Flow field measurements in the proximity of an urban intersection in London, UK. *Atmospheric Environment*, 39, 4647-4657.
- Georgakis, C. & Santamouris, M. 2006. Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes. *Energy and Buildings*, 38, 367-376.
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K. & Gonzalez-Flesca, N. 2003. Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37, 155-182.
- Chang CH, Meroney RN. Concentration and flow distributions in urban street canyons: wind tunnel and computational data. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2003; 91(9):1141e54.
- R, Sandberg M, Di Sabatino S. City breathability and its link to pollutant concentration distribution within urban-like geometries. *Atmos Environ* 2010;44(15):1894e903.
- Bady M, Kato S, Huang H. Towards the application of indoor ventilation efficiency indices to evaluate the air quality of urban areas. *Build Environ* 2008; 43(12). 1991e2004.
- Boppana VBL, Xie ZT, Castro IP. Large-eddy simulation of dispersion from surface sources in arrays of obstacles. *Bound-Layer Meteor* 2010;135(3): 433e54.
- Chen H, Castro IP. Near wall flow over urban-like roughness. *Bound-Layer Meteor* 2002;104(2):229e59.
- Coccal O, Thomas TG, Castro IP, Belcher SE. Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles. *Bound-Layer Meteor* 2006;121(3):491e519.
- Di Sabatino S, Buccolieri R, Pulvirenti B, Britter R. Simulations of pollutant dispersion within idealised urban-type geometries with CFD and integral models. *Atmos Environ* 2007;41(37):8316e29.
- Gu ZL, Zhang YW, Cheng Y, Lee SC. Effect of uneven building layout on air flow and pollutant dispersion in non-uniform street canyons. *Build Environ* 2011; 46(12):2657e65.
- Hagishima A, Tanimoto J, Nagayama K, Meno S. Aerodynamic parameters of regular arrays of rectangular blocks with various geometries. *Bound-Layer Meteor* 2009;132(2):315e37.

- Hang J, Li YG, Sandberg M. Experimental and numerical studies of flows through and within high-rise building arrays and their link to ventilation strategy. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2011;99(10):1036e55.
- Hang J, Li YG. Ventilation strategy and air change rates in idealized high-rise compact urban areas. *Build Environ* 2010;45(12):2754e67.
- Hang J, Li YG. Wind conditions in idealized building clusters e macroscopic simulations by a porous turbulence model. *Bound-Layer Meteor* 2010;136(1):129e59129e59
- Hang J, Sandberg M, Li YG. Pollutant dispersion in idealized city models with different urban morphologies. *Atmos Environ* 2009;43(38):6011e25.
- Jiang D, Jiang W, Liu H, Sun J. Systematic influence of different building spacing, height and layout on mean wind and turbulent characteristics within and over urban building arrays. *Wind Struct* 2008;11(4):275e89.
- Kanda M, Moriizumi T. Momentum and heat transfer over urban-like surfaces. *Bound-Layer Meteor* 2009;131(3):385e401.
- Kanda M. Large-eddy simulations on the effects of surface geometry of building arrays on turbulent organized structures. *Bound-layer Meteor* 2006; 18(1):151e68.
- Kim JJ, Baik JJ. A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG $k\epsilon$ turbulence model. *Atmos Environ* 2004;38(19):3039e48.
- Lien FS, Yee E. Numerical modeling of the turbulent flow developing within and over a 3-D building array, part I: a high-resolution Reynolds-averaged Navier-Stokes approach. *Bound-layer Meteor* 2004;112(3):427e66.
- Pascheke F, Barlow JF, Robins A. Wind-tunnel modelling of dispersion from a scalar area source in urban-like roughness. *Bound-Layer Meteor* 2008; 126(1):103e24.
- Xie ZT, Coceal O, Castro IP. Large-eddy simulation of flows over random urban-like obstacles. *Bound-Layer Meteor* 2008;129(1):1e23.
- Yim SHL, Fung JCH, Lau AKH, Kot SC. Air ventilation impacts of the “wall effect” resulting from the alignment of high-rise buildings. *Atmos Environ* 2009;43(32):4982e94.
- Zaki SA, Hagishima A, Tanimoto J, Ikegaya N. Aerodynamic parameters of urban building arrays with random geometries. *Bound-Layer Meteor* 2011; 138:99e120.
- B. Blocken, Y. Tominaga, T. Stathopoulos, CFD simulation of micro-scale pollutant dispersion in the built environment, *Building and Environment*. 64 (2013) 225–230

Sitographies

- Arthus-Bertrand, Y. 2014. *Ville de Ghardaïa dans la vallée du M'Zab, Algérie* [Online]. Available:
http://www.yannarthusbertrand2.org/index.php?option=com_datsogallery&Itemid=27&func=detail&catid=15&id=422&p=9&l=1680 [Accessed November, 27, 2014].
- Google. 2015. *Ghardaïa*, *Vue sur le Street Canyon* [Online]. Available:
<https://www.google.com/maps/@32.4864978,3.6734418,183m/data=!3m1!1e3>
[Accessed 03 Aout 2015].

Livres de référence

- Benyoucef, B. *Le M'zab, Espace & Societe*.
- Benyoucef, B. 2010. *Le M'Zab parcours millénaire*, Alger.
- Djaadi, R., Eldjoun, K., Guerras, S., Hadj, S. B. & Meski, A. 1996. *Ghardaia entre permanence et mutation*. mémoire de fin d'étude pour Architect d'état, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture ENSA ex EPAU, Alger.
- Pavard, C. *Agerie. lumieres du m'zab*. Editions delroisse ed. France.
- Ravereau, A. 1973. *le M'ZAB une leçon d'architecture, Sindbad*, Paris.
- Ravereau, A., Baudouï, R., Potié, P., Cussey, Y. & Perraudin, R. L. 2003. *L'atelier du désert*. Parenthèses. ed. Marseille, France.
- Roche, M. & Mammeri, M. 1970 *Le M'ZAB Architecture Ibadite En Algérie*, France.
- Simon, J., G 1983. *La Vallée du M'ZAB L'Archipel des FÉROÉ*, Louvain la Neuve, Belgique

CHAPITRE V:

LA VILLE DE M'ZAB :

Processus de développement, Caractéristiques morphologiques,....etc.

« Je vous comprends d'admirer l'homme qui a travaillé au Mzab avec ses propres mains. Il a lutté contre les matériaux, les contingences, avec sa culture. C'était un duel avec la matière, et lorsqu'il a résolu son problème : il avait créé la beauté. »¹

(1) Hassan Fathy – Architecte Egyptien

Introduction :

Ce chapitre présente la ville traditionnelle de M'Zab, un célèbre patrimoine mondial, en mettant en exergue son paysage, sa structure sociale, sa nature particulière riche d'une typologie qui a séduit les pionniers de l'architecture.

Cette partie d'étude aborde l'organisation spatiale des ksour Mozabites, leur mode constructif et leur processus du développement surtout pendant les deux phases historiques, phase du repli et d'autarcie aussi la phase d'ouverture et de développement de l'espace M'Zabien. Donc le Ksar de Ghardaïa est ensuite abordé explicitement en présentant son organisation sociale et spatiale, ses ruelles, ses oasis de palmeraies et leurs relations étroites avec le confort thermique, en particulier en présentant les défis et les menaces de la vie contemporaine de la région sur le plan urbanistique.

À la deuxième section du chapitre, le Canyon urbain sujet de notre recherche, est identifié par son processus de développement, sa typologie, sa vocation, ses activités, ses vélocités du vent et par rapport aux rues qui le croisent perpendiculairement.

V.1. La ville traditionnelle de la vallée de M'zab

En berbère, Ghardaïa « Tagherdayt », désigne la région du M'zab, au Maroc et en Libye en revanche, signifie un endroit cultivé et mis en valeur grâce à une *segua* venant de l'oued (**Pavard**). *Y. CONSTANT* donne la définition du mot maghrébin « Agherm/ksour » qui signifie un espace fortifié dans le Sahara accroché dans les hauteurs rocailleuses, une ligne de rempart comportant des tours qui servent de soutènements et de postes de contrôle à la fois (**Fig. V.1/2**). Cette muraille représente la limite du bâti de son environnement, le bâti à l'intérieur est compact et assure un microclimat humide et vivable (**Djaadi et al., 1996**).

Les habitants de la région de Ghardaïa s'appellent « Les Ibadites », ils sont satisfaits de reconduire la formule pendant neuf siècles dans son entière rigueur selon une démarche d'esprit exceptionnelle (Ravereau, 1973).

Benyoucef (2010), a qualifié la typologie des M'Zab « *comme des fondations qui résultent d'un acte volontaire, elles n'ont rien de semblable avec les hameaux déjà existants ni avec l'organisation et le mode de vie des populations agropastorales déjà sur place. C'est une forme à laquelle ont été associés des acquis socioculturels par rapport à une situation géographique particulière. L'apport socioculturel est un processus physiologique de perception, selon lequel toute situation concrète, dans l'espace et dans le temps, est transmise à l'homme à travers ses sens sous forme d'informations, ces informations sont ensuite codifiées, structurées et traduites en signes et symboles (objet de la sémiologie) grâce aux systèmes de conception et de représentation et provoquent ensuite des sensations et un effet physiologique, ces acquis influencent l'image abstraite de l'homme et la matérialise sous la forme de situation géographique. L'acte d'appropriation recourt à la fois aux contenus et formes, c'est le rapport au lieu et à la forme du lieu, le lieu s'insère dans l'univers de l'homme et selon un processus fort complexe d'interaction animé par les mémoires et qui traduit l'histoire et la mémoire collective* ».

Le M'Zab se trouve dans le Sahara septentrional à **600km** au sud d'Alger, il constitue le passage unique de la route nationale (**RN1**) qui relie la capitale à Tamanrasset (extrême Sud). Ghardaïa dispose d'un grand Oued qui la traverse la ville du côté Ouest au côté Est et qui s'étend sur **4000** hectares (**Djaadi et al., 1996**). Au rythme de ce cours d'eau, la vallée du M'Zab s'urbanisait, au long de ces cours sinueux et entre l'amont et l'aval que sont disséminées cinq cités du M'Zab (**Benyoucef, 2010**), des pentapolis jalonnent la vallée afin de se protéger des crues mais aussi des agressions (**Djaadi et al., 1996**).



Fig. V.1. la ville de Ghardaïa avant la période coloniale (Ravereau et al., 2003).



Fig. V.2. vue aérienne du Ksar de Ghardaïa (Arthus-Bertrand, 2014).

V.1.1. Parcours de la cité à travers l'histoire

Les ksour sont considérés comme des agglomérations fortifiées s'étalant le long de l'axe de l'oued du M'Zab, avec une distance de **2 Km** entre les deux extrémités, sauf le Ksar d'El Atteuf qui se trouve à une distance de **6 Km** loin du ksar le plus proche Bounoura du côté Sud/Est (**Tableau. V.1**).

En l'espace de cinquante années, les cinq villes ont été bâties successivement dans des conditions très particulières, c'est ce qui différencie la ville du M'Zab des autres villes de l'époque, par sa constitution, elle possédait déjà toute son organisation précise (**Roche and Mammeri, 1970**). Il ya près de mille ans, depuis sa création, la vallée du M'Zab a été urbanisée, elle ressemble toujours à la structure initiale (**Roche and Mammeri, 1970**).

Tableau. V.1. Les Ksours de Mzab (**Mapcarta, 2017, Djaadi et al., 1996, Benyoucef**)

Ordre par date de création	Ksar	Date de création/Distance en Km	
1	Tadjnint (El Atteuf)	Le 1 ^{er} Ksar, à 1012	à 6 Km loin de Bounoura Altitude de 500 m
2	At Bounour (Bounoura)	est crée en 1046	2 Km de distance entre eux
3	Taghardait (Ghardaïa)	à partir de 1053	
4	At Mlichet (Melika)	créé en 1124	
5	At Isdjen (Béni Isguen)	édifié en 1347	
6	Guerara	en 1630	
7	Berriane	en 1630	à une distance de 40 Km , Altitude de 547m
8	Tafilelt	est lancé en 1997	à 6.4 Km du Ksar de Ghardaïa.

V.1.2. Nature et paysage de Ghardaïa

L'ensemble du territoire géomorphologique de la région de Ghardaïa est situé sur un plateau rocheux constitué de calcaires durs, reposant sur des marnes et des argiles, un vaste champ de pierres donc couvre le territoire de la ville, d'une couleur brune et noire.

Selon **Benyoucef (2010)**, la nature et le paysage de la ville de Ghardaïa se distinguent comme suit

- a. Le sol constitué de dolomies, à structure cristalline, présente à sa surface des fragments de grès quartzeux, noir grisâtre.
- b. Les sables alluviaux et éoliens constituent les lits des oueds, au-dessous desquels affleurent des calcaires dolomitiques sub-cristallins, gris blanchâtres, des calcaires marneux, des grès subordonnés et de l'argile verdâtre.
- c. Le paysage de la chebka est très avare en végétation, à l'exception de quelques palmeraies qui entourent les villes. (**Benyoucef, 2010**)

Le climat est très chaud en général, la température fluctue de **36.8°C** à **46°C**, il est caractérisé par une très faible précipitation, estimé en moyennes annuelles entre **50** à **60mm** (**Benyoucef, 2010**).

V.1.3. Principe d'organisation spatiale

L'ensemble des pentapoles sont positionnés sur des pitons rocheux, d'où la ville modèle de Mzab se composait géométriquement des espaces harmonieux,

- 1- Des champs des Oasis ;
- 2- Un cimetière ;
- 3- Des Agherm (habitats) enclos.

V.1.4. Processus de développement

V.1.4.a. Période d'autarcie et de repli

C'est l'ère des Ibadites qui commence initialement par l'isolement et l'autarcie (**Fig. V.3**), la ville a vécu en autarcie depuis sa création en **1012** jusqu'à **1830** ; ce phénomène est lié à des raisons de sécurité et de protection ainsi qu'à la nature du relief défavorable et non encourageante au développement et à l'ouverture. De ce fait **Benyoucef** souligne « *le contact se réduit à quelques échanges avec les populations nomades environnantes* ». De ce fait, cette région a été obligée de vivre en repli sur elle-même pour une certaine période.

Les fortifications ont un concept particulier, le chercheur **Benyoucef (2010)** a souligné « *Contrairement à ce que nous avons tendance à penser, le ksar ne disposait pas de mur d'enceinte, les murs extérieurs des dernières maisons exerçaient l'effet d'un rempart* ».



Fig. V.3. Le Ksar de Ghardaïa à la période précoloniale (**Djaadi et al., 1996**).

V.1.4.b. Période d'ouverture et développement

Après **1830**, la région des Mzab s'ouvre au monde extérieur à des fins économiques suite à une stabilité sécuritaire et politiques dans la région, cette date est marquante par le début de développement et de constructions, en plus, l'expansion urbanistique majeure date de l'indépendance, encouragée par le pouvoir politique dont la volonté a été de procéder à un développement réel des villes algériennes (**Fig. V.4/5**).

Benyoucef stipule qu' « une fois leurs villes et institutions consolidées, leurs forces réunies, les Ibadites décidèrent de sortir du repli, de s'ouvrir à l'extérieur et développer leur économie » ; « le commerce devint l'espoir du M'zab et la condition de son développement » ; « Ghardaïa devint très vite un marché local de grande importance et le M'zab fut intégré dans les grands flux Sahariens qui devaient désormais le traverser et furent de lui une plaque tournante entre le Nord et le Sud ».

Selon **Djaadi et al** « Avec le colonialisme français, des changements sont apparus au niveau de l'urbanisme, dans le but de nécessité de contrôle, de sécurité et de gestion, la ville laisse réaliser des voies routières qui suivent le tracé historique aux abords de l'oued, en conséquence, des équipements publics et des habitations voient le jour ».

Djaadi indique qu'à l'époque contemporaine « l'urbanisation des villes du Sahara représentait pour l'état algérien indépendant, un moyen qui permettait de rétablir l'équilibre territorial entre le Nord et le Sud pour renforcer le maillage territorial en vue d'un meilleur contrôle du territoire et d'une base arrière pour l'exploitation des ressources minières du pétrole et du gaz, ces richesses qui constituent la base financière du développement. Selon cette vision urbanistique, la vallée du M'Zab occupera une place importante et accédera rapidement au rang de centre régional par sa position médiane dans la géographie de l'Algérie, elle est la porte de Sahara par sa proximité des champs d'extractions du Gaz de Hassi R'mel et d'importantes activités commerciales qui s'y déroulent » (**Djaadi et al., 1996**).



Fig. V.4. Le Ksar de Ghardaïa en 1953 - pendant la période Coloniale
(Djaadi et al., 1996).



Fig. V.5. Photo satellitaire du Ksar de Ghardaïa - Actuelle 2015 (Google map, 2015).

V.2. Le site objet d'étude

V.2.a. Structure sociale et spatiale

La famille agit très fortement sur la dynamique de la ville et sa structure, à travers les différents mouvements (d'arrivée, d'établissement ou de départ), le quartier constitue la traduction spatiale de la famille, il reflète son image, sa position sociale et son statut (Benyoucef, 2010).

Selon Benyoucef (2010), le Ksar de Ghardaïa est l'un des cinq Ksour, le Ksar est glorifié par le nom du cheikh Ammi Said, il intègre deux tribus semi-nomades les Beni Marzoug et les M'dabih (**tribus semi nomade**), ces derniers étaient localisés dans des quartiers bien délimités, implantés dans la périphérie du Ksar, successivement à l'Est et au Nord-ouest. L'Achira joue donc un rôle essentiel dans la genèse du Ksar (Benyoucef, 2010).

V.2.b. Organisation spatiale

Dans leur organisation spatiale, les villes sont bâties autour de la mosquée, ce qui leur donne une structure générale plus au moins concentrique (Simon, 1983). La forme générale du ksar est circulaire, intégrée sur une éminence d'où la forme du tracé radioconcentrique. En d'autres termes, l'espace est construit selon le principe de « **HALGA** », c'est-à-dire que le principe d'organisation spatiale consistait à commencer la construction par la mosquée d'abord au point culminant de la colline, puis au fur et à mesure, les Mozabites édifiaient leurs maison (Benyoucef).

Selon le système de symbolisme, l'espace est organisé et structuré en plusieurs catégories de Couples en opposition (Tableau. V.2), notamment en :

Tableau. V.2. L'organisation spatiale du ksar de Ghardaïa en couples d'opposition.

espace intime	la mosquée	espace public	le Marché
espace sacré/ religieux		espace profane	
centre de la cité			
espace en haut		espace en bas	
point d'articulation majeure			

V.2.c. Les parcours

Les parcours sont composés selon deux concepts typologiques :

- des parcours circulaires qui suivent le rythme des courbes de niveaux empruntent les rebords du plateau et délimitent une hiérarchie d'anneaux.
- des parcours radiaux qui descendent en rayon de haut en bas.

Les rues sont plus étroites dans la partie haute (avec une largeur variant entre **2** et **3 m** au max), alors que dans la partie basse, on enregistre parfois des largeurs supérieures (allant jusqu'à **5m**). La couverture partielle de certains passages permet, outre l'extension à l'étage des maisons, un effet climatique.

V.2.d. Les palmeraies et le confort thermique

Entres ces cinq Ksour, il y avait des oasis, leurs champs de palmeraie étaient un lieu de subsistance qui favorisait la fraîcheur. Une étude en Californie a démontré que l'existence des arbres proches des maisons pendant les chaleurs extrêmes peut réduire la consommation d'énergie pour le refroidissement de **30 %** (Akbari et al., 1997) et en terme de valeurs, de **5°C** à **10 °C** au moins du stress thermique, c'est à cause de l'existence des palmeraies (bencheikh and Rchid, 2012).

V.2.e. Défis et menaces actuelles

Selon Bouchair (2004), l'espace Ksourien de la ville de Ghardaïa est menacé par de nombreux défis à cause du développement anarchique des constructions, en conséquence, certains résultats sont présentés comme suit;

- L'écosystème actuel de la ville de M'ZAB évolue rapidement et connaît de grands défis, avec une accélération sans précédent de l'urbanisation au détriment de l'environnement des oasis.
- L'urbanisation récente dans la vallée de M'ZAB a augmenté illicitement.
- Une typologie urbanistique nouvelle qui se distingue par le déclin de la forme urbaine traditionnelle et ces valeurs architecturales vernaculaires.

V.3. Le Canyon urbain

V.3.1. Processus de développement

Le Canyon urbain, objet du contexte d'étude, n'a été envisagé qu'après la période coloniale (Djaadi et al., 1996), donc le processus de développement a commencé par la projection d'une voie périphérique autour du Ksar de Ghardaïa pour des raisons de contrôle et de sécurité, depuis cette période, la deuxième paroi du Canyon urbain a commencé à se créer (Fig. V.6).

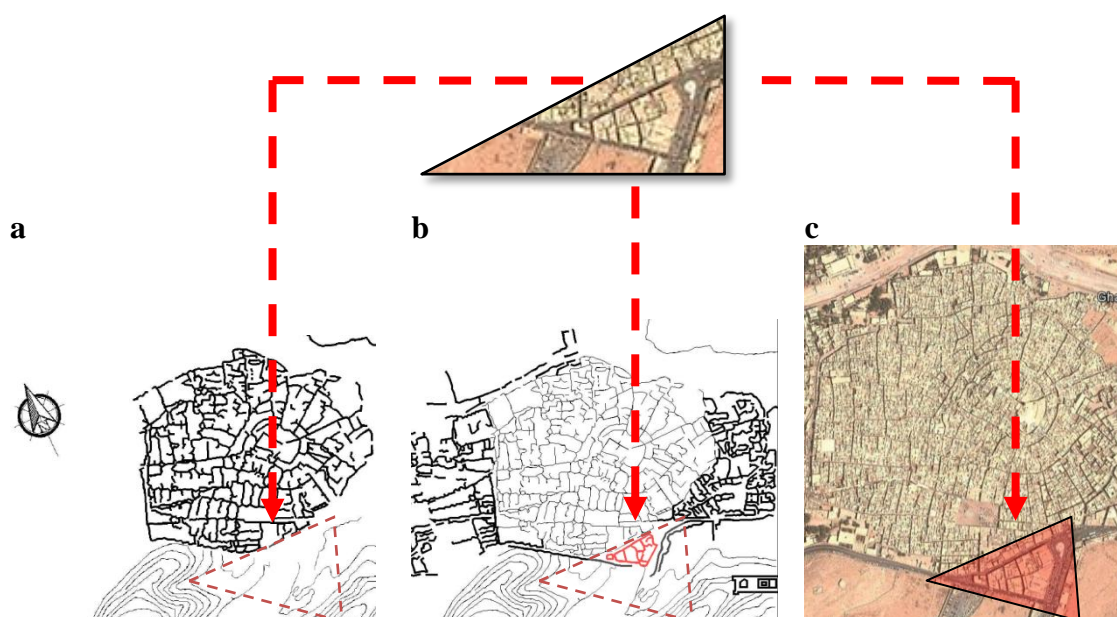


Fig. V.6. Processus de la création du Canyon (a) le Canyon n'existait pas avant (Djaadi et al., 1996) , (b) Après l'arrivée des collons, ils ont délimité le Ksar par des routes à des fins de contrôle et de sécurité, donc c'est le début de constitution de la deuxième paroi du Canyon (Djaadi et al., 1996), (c) période actuelle, la route est devenue une artère importante de la ville, un axe commercial et une voie de circulation « *Un Canyon Urbain* » (Google, 2015).

V.3.2. Typologie de la rue Canyon

La typologie urbanistique du Canyon urbain est dotée d'une typologie non-rectiligne, d'une longueur de **138.64m**, pourvue de deux petites placettes aux deux finalités. Les gabarits des bâtiments qui le composent, sont de l'ordre de **R+1** avec une hauteur globale de **7m** de part et d'autre (**Fig. V.7**).

L'orientation du Canyon s'identifie par une orientation de **61°** en amont (par rapport au Nord), ensuite une déviation de **92°** au niveau du dernier îlot à l'aval, sa largeur est variable de **7,9m** à **5,2m**, correspondant respectivement à **0,88** en amont et **1,34** en aval de rapports de prospect (**H/W**).

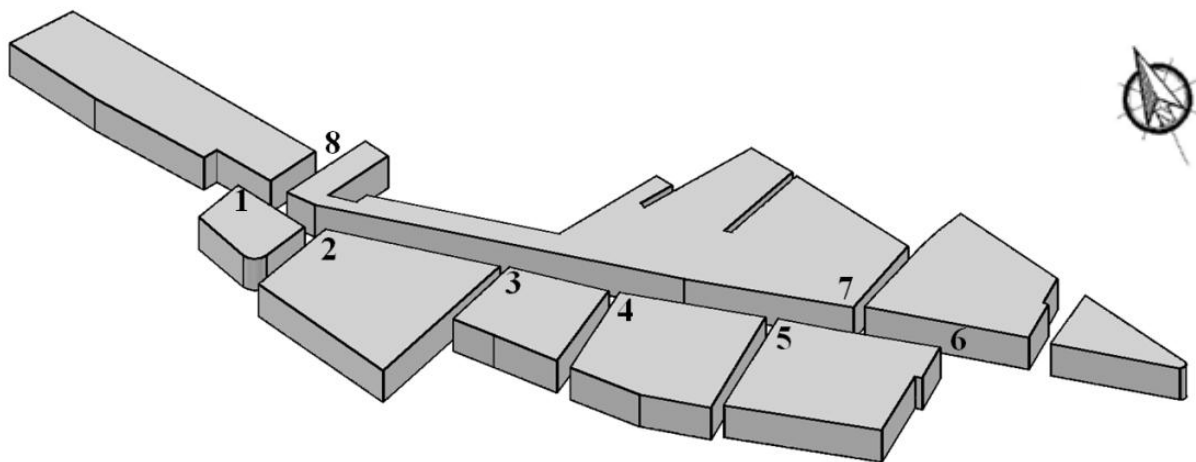


Fig. V.7. Schéma du Canyon urbain (**Auteur**).

V.3.3. Vocation du Canyon urbain

Le Canyon urbain a une réputation économique d'envergure nationale, grâce à l'existence de différents types de commerces, de gros ou de détails, parmi lesquelles on trouve ; la vente de tissus, vente de vêtements, vente d'objets de décor, droguerie, quincaillerie...etc.

Toutefois, le Canyon est considéré comme une rue étroite, pour exercer plusieurs activités humaines, synchronisées à la circulation mécanique variée, alors qu'il a une largeur moyenne limitée de **5,2m** à **7,9m**, donc cette surface n'offre pas un espace suffisant pour les piétons, pour l'activité du commerce et pour la circulation mécanique (**Fig. V.8. (a/b)**).

a



b



Fig. V.8. (a/b) Plusieurs activités commerciales et modes mécanique variés sur une surface non suffisante, pour les piétons ou pour la circulation mécanique (**Auteur**).

V.3.4. Mobilité urbaine aux fluctuations journalières

La circulation dans le rue Canyon est en sens unique, elle comporte tous types de motorisations (camions, voitures, motocycles...etc.). Donc, cette mobilité est variable par rapport au degré de la concentration en CO₂ (natures des motorisations), elle est aussi variable en flux par rapport à la circulation journalière (Cf. **chapitre VII**. Activités humaine par rapport aux irradiations solaires dans le canyon), en conséquence la mobilité urbaine est organisée comme suit :

- le Canyon urbain a une forte circulation pendant la période matinale et l'après midi (à partir de **17h**), à cause de la relation entre le stress thermique et les activités humaines, étant donné que les activités humaines sont en relation directe avec les radiations solaires et le confort extérieur. Donc les activités dans le Canyon sont en relation avec le microclimat.
- le Canyon est déserté complètement et les activités et mouvements humains s'arrêtent, surtout pendant les heures au pic thermique maximal où le soleil est presque à la verticale (Azimut solaire maximal, à **81°**) par rapport à l'axe du Canyon urbain (pas d'ombre suffisant pour se protéger).

V.3.5. Vélocités du vent

Les chapitres précédents ont fait l'objet d'une identification théorique des écoulements d'air urbains par rapport à un Canyon urbain ainsi qu'une identification de l'écoulement de l'air au

niveau de couche de la canopée urbaine (UCL) et au niveau de la couche limite urbaine (UBL) pour une ville. Ces éléments nous permettent de présenter et d'étudier l'écoulement de l'air au niveau du Canyon urbain de Ghardaïa d'une façon méthodologique et scientifique.

V.3.5.a. Vitesse du vent Nord-est

Ce canyon urbain subit des écoulements d'air de direction **Nord-est** pendant l'été, il s'agit des vents importants (direction de vent adoptée dans notre recherche), puisque ils exercent un effet modérateur du stress thermique, et aplanit les taux à variations maximales (**Fig. V.9**).

Donc les vents dans le Canyon urbain sont considérés comme des vents parallèles, d'après les expériences faites dans les laboratoires en soufflerie, l'écoulement d'air parallèle au dessus du toit développe une canalisation et une recirculation de l'air sur la longueur du canyon (**Balogun et al., 2010, Dobre et al., 2005**), et un écoulement en spirale (**Dobre et al., 2005, Vardoulakis et al., 2003**).

V.3.5.b. Vitesse du vent Sud-est

Les vents du **Sud-est** sont des vents qui soufflent pendant les mois de mars, avril et mai, ils **sont négligeables** dans notre cas d'étude puisqu'ils soufflent en période de basse température et ont la capacité de dégager la pollution par leur vitesse importante estimée à **16 m/s** et parfois plus (**Benyoucef, 2010**), en plus, cette vitesse de vent est supérieure à **11 m/s**, seuil de la disparition de l'îlot de chaleur urbain **ONERC (2010) (Fig. V.9) (Cf. Chapitre II. L'atmosphère urbaine et ICU)**. Les vents du **Sud-est** ont une direction oblique par rapport à l'axe du Canyon urbain c'est-à-dire un écoulement de vent oblique aussi au dessus du toit. D'après les recherches scientifiques, l'écoulement oblique est la composition linéaire entre des vents parallèles et des vents perpendiculaires (**Dobre et al., 2005**), donc, d'après leurs expériences faites ainsi sur des modèles réduits en soufflerie, l'écoulement des vents obliques développe une combinaison d'interactions complexes entre de flux canalisés, recirculation hélicoïdaux, flux en bifurcations et tourbillons de coins (**Balogun et al., 2010, Dobre et al., 2005**).

Une autre hypothèse souligne que l'écoulement du vent perpendiculaire développe en amont du canyon une couche de cisaillement répandue sur le toit du bâtiment avec une formation d'un ou de plusieurs tourbillons de recirculation dans le canyon et d'une autre formation simultanée d'écoulement de vent perpendiculaire au-dessus du toit (**Balogun et al., 2010, Dobre et al., 2005**). Il est également indiqué que l'écoulement du vent perpendiculaire favorise encore la formation des tourbillons dans les deux sens droit et gauche avec un

soufflage de tourbillons ascendants (Upwind) le long de la façade chaude et de tourbillons descendants (downward) le long d'une façade opposée (Georgakis and Santamouris, 2006).

V.3.5.c. Vitesse du vent Sud

Ces vents sont forts, chauds et secs de direction Sud. Pendant l'été, le stress thermique peut dépasser largement le seuil 45°C (Cf. chapitre. VII. Effet thermique du vent selon sa nature) (Fig. V.9).

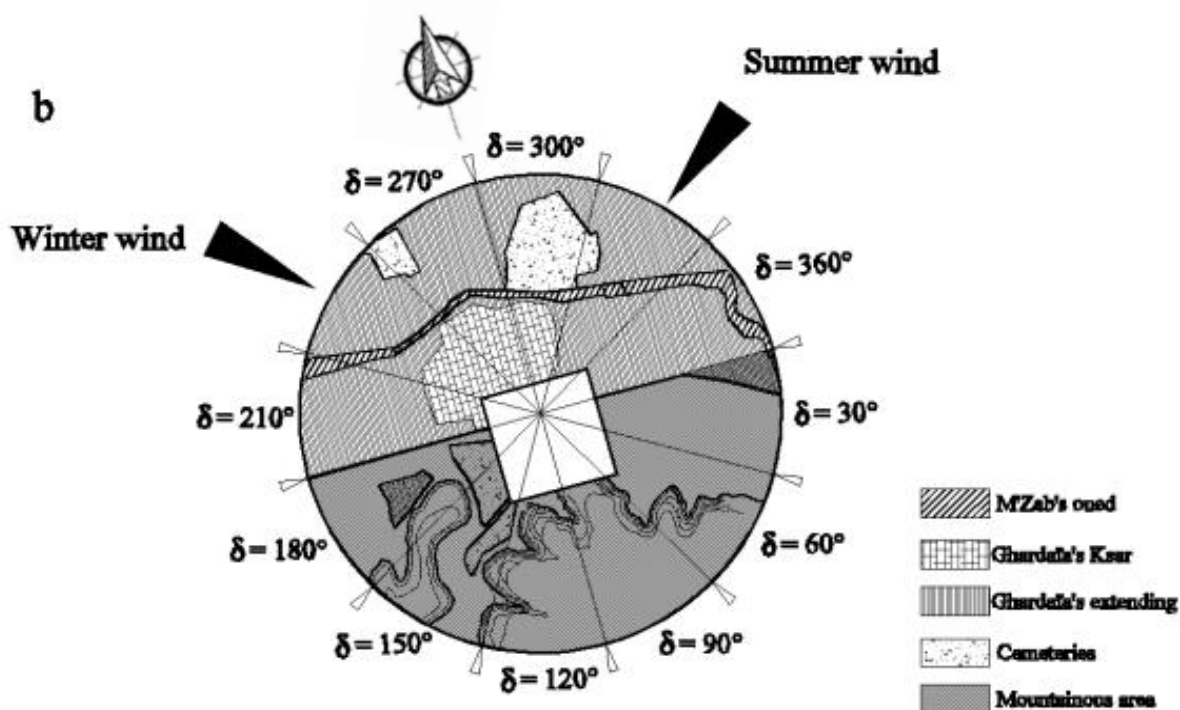


Fig. V.9. L'environnement à 2 km montre ; des vents d'hiver ralentis par le Ksar (le Ksar sur une éminence), et des vents d'Été ralentis par l'extension urbaine sous l'effet de la rugosité (Auteur).

V.3.6. Rugosité urbaine « roughness effect »

L'abaissement de la vitesse de l'air se produit sous l'effet de la morphologie urbaine, aussi sous l'effet des morphologies naturelles tels que, les montagnes...etc. (Cf. **chapitre. II.** Effet de rugosité « Roughness effect »).

Le Canyon urbain est entouré donc d'une chaîne montagneuse au côté sud, il est limité au côté nord par le Ksar sur une éminence et à l'Est par des morphologies urbaines (extensions urbaines) (**Fig. IV.9/10**).

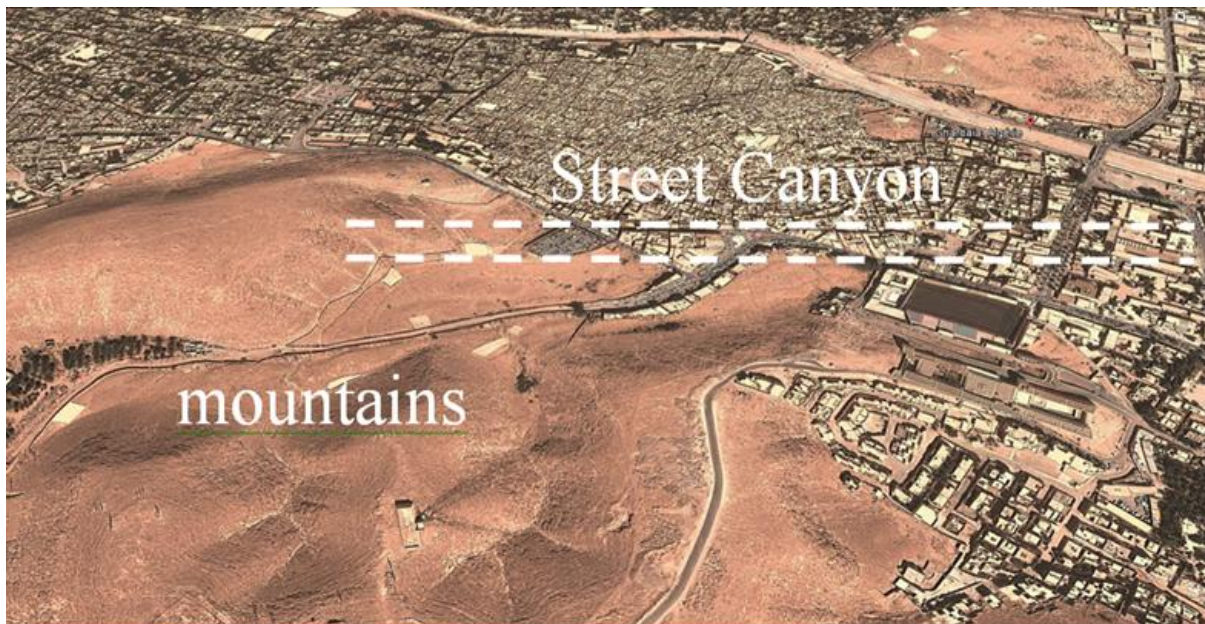


Fig. V.10. Le Canyon est entouré par des montagnes du côté Sud, l'ancien Ksar du côté Nord
(Google map, 2015).

V.3.7. Les rues perpendiculaires par rapport au canyon urbain

Les ruelles disposées perpendiculairement par rapport au canyon urbain ont des largeurs variables (**Fig. V.11/12, Tableau. V.3**) allant de **1.68m** jusqu'à **7.9m**, qui correspondent respectivement à des rapports de prospects de **4.16** et de **0.88**. Elles sont en tout huit ruelles disposées de façon non-uniforme, elles ont une concentration globale dans la zone centrale du canyon. Elles sont dénuées de toutes sources de pollution (d'origine de circulation mécanique) et sont destinées qu'aux piétons, en conséquence, l'aéraulique de l'air généré a pour cause des

effets combinatoires entre ses formes géométriques, ses matériaux de constructions utilisés ainsi que ses dispositions par rapport à la topographie existantes.

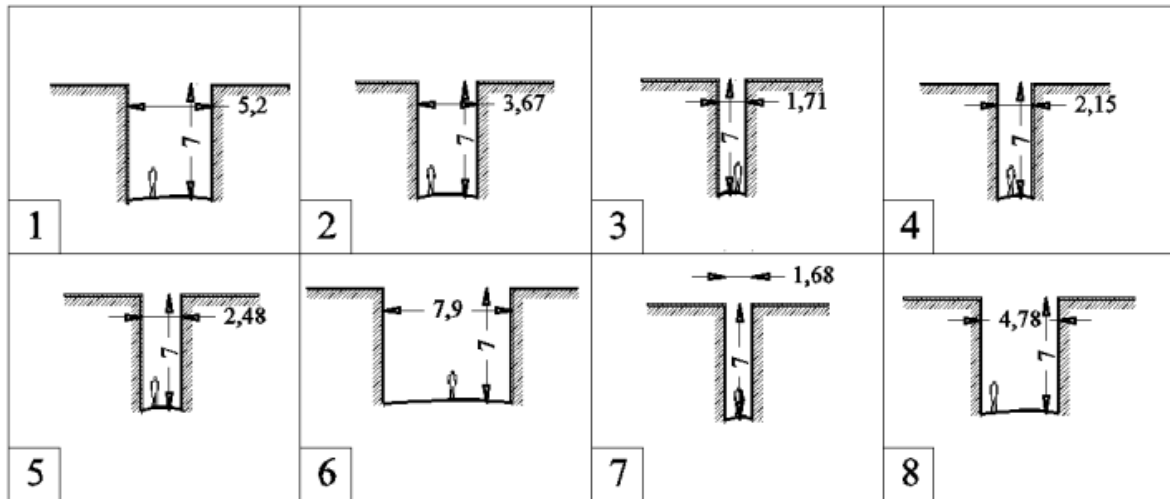


Fig. V.11. Prospect de chaque ruelle (cf. **Tableau. V.2.**) du Canyon Street (**Auteur**).



Fig. V.12. Ruelle (N°7) perpendiculaire au Canyon (cf. **ruelle n° 2. Tableau. V.2.**)(**Auteur**).

Tableau. V.3. Caractéristiques de chaque rue (Auteur).

Points (Cf. Fig. V.7)	Milieu de la voie			Caractéristiques de la voie			Nature de surface des murs		Occultation et Ombrage		Valeur du CO ₂ simulé (ppm) sur la géométrie réelle
	X	Y	Z	w	l	h	nature	Couleurs	Oui/Non	matière	
1	181	192.1	1.5	5.2	138.64	7	Surface rugueuse	jaune	Non	/	1087
2	201.91	190.02	1.5	3.67	11.59	7	//	jaune	Non	/	685.5
3	235.06	205.9	1.5	1.71	19.19	7	//	jaune	S.C	Tissue	<300
4	254.83	214.5	1.5	2.15	23.84	7	//	jaune	Oui	Cannes	<300
5	281.14	229.14	1.5	2.48	29.05	7	//	jaune	Oui	Cannes	<300
6	302.42	245	1.5	7.9	138.64	7	//	jaune	Non	/	373.5
7	289.97	242.87	1.5	1.68	21.79	7	//	rose	S.C	Bâti	<300
8	187.91	194.59	1.5	4.78	12.31	7	//	jaune	Non	/	<300

Conclusion :

Dans ce chapitre, notre travail de recherche a été consacré à l'étude de la structure spatiale et de la nature spécifique de la ville globale de Ghardaïa. Actuellement, la ville de Ghardaïa, et particulièrement le Ksar de Ghardaïa est menacé par les exigences de la vie actuelle, concernant l'activité humaine et la typologie d'habitation...etc. Le ksar est en face des défis récents, telle que: Le déclin de la forme urbaine traditionnelle et des valeurs architecturales vernaculaires à cause des habitations nouvellement construites illicitement.

La deuxième section du chapitre a été consacrée à l'analyse du Canyon urbain, en conséquence une étude a été faite sur plusieurs aspects, pour pouvoir les utiliser dans les chapitres suivants.

Rappelant que, le Canyon urbain souffre de beaucoup de problèmes tels que : une mobilité mécanique importante et diverse qui engendre la pollution; des activités humaines multiples ; le Canyon est exposé complètement aux irradiations solaires sans ombres suffisants pour une activité humaine surtout pendant les heures du stress thermique.

On note que la pollution atmosphérique est la plus importante et la plus récente difficulté puisqu'elle participe à l'augmentation de l'effet de la chaleur urbaine (ICU) par effet de serre, en plus, elle est nocive pour la santé humaine et pouvant être préjudiciable au patrimoine du Ksar de Ghardaïa.

Dans les chapitres suivants, nous essayerons, par des méthodologies scientifiques d'estimer cette pollution à l'aide d'instruments adéquats. Nous tenterons, à l'aide de la simulation par CFD en 3D, d'évaluer dans un premier temps l'effet de la forme urbaine sur les écoulements aérauliques et sur la dispersion des polluants, ensuite et le plus important est de proposer des configurations géométriques alternatives afin d'optimiser la qualité de l'air dans le Canyon urbain.

References

Revues scientifiques

- Akbari, H., Kurn, D. M., Bretz, S. E. & Hanford, J. W. 1997. Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and Buildings*, 25, 139-148.
- Balogun, A., Tomlin, A., Wood, C., Barlow, J., Belcher, S., Smalley, R., Lingard, J. N., Arnold, S., Dobre, A., Robins, A., Martin, D. & Shallcross, D. 2010. In-Street Wind Direction Variability in the Vicinity of a Busy Intersection in Central London. *Boundary-Layer Meteorology*, 136, 489-513.
- Bencheikh, H. & Rchid, A. 2012. The Effects of Green Spaces (Palme Trees) on the Microclimate in Arides Zones, Case Study: Ghardaia, Algeria. *Energy Procedia*, 18, 10-20.
- Dobre, A., Arnold, S. J., Smalley, R. J., Boddy, J. W. D., Barlow, J. F., Tomlin, A. S. & Belcher, S. E. 2005. Flow field measurements in the proximity of an urban intersection in London, UK. *Atmospheric Environment*, 39, 4647-4657.
- Georgakis, C. & Santamouris, M. 2006. Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes. *Energy and Buildings*, 38, 367-376.

Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K. & Gonzalez-Flesca, N. 2003. Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37, 155-182.

Sitographies

Arthus-Bertrand, Y. 2014. *Ville de Ghardaïa dans la vallée du M'Zab, Algérie* [Online]. Available:

http://www.yannarthusbertrand2.org/index.php?option=com_datagallery&Itemid=27&func=detail&catid=15&id=422&p=9&l=1680 [Accessed November, 27, 2014.

Google. 2015. *Ghardaïa*, *Vue sur le Street Canyon* [Online]. Available: <https://www.google.com/maps/@32.4864978,3.6734418,183m/data=!3m1!1e3> [Accessed 03 Aout 2015.

Mémoire et thèses

Djaadi, R., Eldjoun, K., Guerras, S., Hadj, S. B. & Meski, A. 1996. *Ghardaïa entre permanence et mutation*. mémoire de fin d'étude pour Architect d'état, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture ENSA ex EPAU, Alger.

Livres de référence

Benyoucef, B. *Le M'zab, Espace & Societe*.

Benyoucef, B. 2010. *Le M'Zab parcours millénaire*, Alger

Mapcarta, 2017, <https://mapcarta.com/17336726>, page consulté le 8 Septembre 2017.

Pavard, C. *Agerie. lumieres du m'zab*. Editions delroisse ed. France.

Ravereau, A. 1973. *le M'ZAB une leçon d'architecture*, Sindbad, Paris.

Ravereau, A., Baudouï, R., Potié, P., Cussey, Y. & Perraudin, R. L. 2003. *L'atelier du désert*. Parenthèses. ed. Marseille, France.

Roche, M. & Mammeri, M. 1970 *Le M'ZAB Architecture Ibadite En Algérie*, France.

Simon, J., G 1983. *La Vallée du M'ZAB L'Archipel des FÉROÉ*, Louvain la Neuve, Belgique.

CHAPITRE VI :

METHODOLOGIE DE MESURE ET DE SIMULATION PAR CFD

« On ne peut se passer d'une méthode pour se mettre en quête de la vérité des choses »¹

« Il n'y a pas une méthode unique pour étudier les choses »²

(1) René Descartes / Discours de la méthode.

(2) De Aristote.

Introduction :

Ce chapitre est consacré à la méthodologie d'approche, il contient deux grandes parties. La première est une description des conditions climatiques et de la pollution existante sur le site d'investigation. Cette description a été faite en fonction des résultats des campagnes de mesures. Ensuite une série de simulations ont été entreprises dans l'objectif d'évaluer l'effet de la géométrie urbaine sur les conditions thermo-aérauliques urbaines. Donc, pour la première nous allons présenter les prises de mesures des conditions microclimatiques et le taux du CO₂ au niveau du canyon urbain, qui sont à la fois utilisés comme un moyen expérimental d'identification du contexte urbain et utile pour l'étude de la modélisation numérique. Ensuite pour la deuxième phase, nous allons proposer des optimisations par simulations numériques, en utilisant un model Ansys-Cfx. Ces simulations nous permettront de proposer des solutions alternatives aux problèmes constatés.

VI.1. Les méthodes adoptées pour l'étude de l'aéraulique de l'air dans le milieu urbain
Les mesures à l'échelle réelle, réduite et la CFD

Les études de constat de l'écoulement de l'air dans le milieu urbain proviennent de trois méthodologies, il s'agit des campagnes de mesures ; sur site (INSITU), en soufflerie atmosphérique et la modélisation numérique. Certaines études, qui nécessitent plus de précision ou de validation, combinent deux démarches au même temps.

VI.1.1. Les mesures sur site

L'étude de mesures au niveau du site d'intervention a l'avantage que l'étude de la complexité entière est prise en compte, d'où l'influence de tous les immeubles et obstacles est incluse. Les premières campagnes de mesures se sont déroulées dans les années **70**, en Amérique du nord (à Vancouver) par un groupe de chercheurs composés essentiellement de **Oke, T. R (1977)**.

Les inconvénients d'une telle démarche sont: (1) elle est couteuse, nécessitant le déploiement de moyens de mesures adéquats pour chaque phénomène micro-météorologique ; (2) elle est limitée à un certain nombre de points ; (3) la période des essais est assez longue pour avoir une lecture précise ; (4) elle implique aussi une faible maîtrise (ou non maîtrise) de la couche limite urbaine (**UBL**) (qui est au-dessus des toits) (**Van Hooff et al, 2013**).

VI.1.2. Les mesures en laboratoire

On les appelle aussi les mesures sur des modèles réduits ou les essais en soufflerie (Wind tunnel), ces mesures ont l'avantage d'un contrôle très élevé de la couche limite urbaine (**UBL**) au-dessus des toits, l'inconvénient en revanche, consiste à ce que le contrôle de cette couche est parfois non conforme à la couche **UBL** réelle. Pour certains cas, la projection est non précise ou incompatible. L'autre inconvénient, comme pour la méthode des mesures réelle, est que cette méthode donne des résultats limités sur certains points de mesures ([Van Hooff et al, 2013](#)).

VI.1.3. La modélisation numérique

La **CFD** en revanche, donne une lecture globale sur l'ensemble du site (ou un canyon urbain), la **CFD** contrôle un domaine de calcul qui se compose à la fois ; de la couche de la canopée urbaine (**UCL**) et de la couche limite urbaine (**ABL** ou **UBL**). D'autres chercheurs indiquent que la **CFD** contrôle un domaine qui se compose d'une sous-couche de rugosité et une autre sous-couche inertielle. Mais pratiquement, avec le progrès scientifique la **CFD** peut contrôler une altitude de **500 m** avec un degré de précision très élevé. Cet outil permet à des études paramétriques, pour évaluer d'autres conceptions alternatives, en particulier lorsque ces différentes configurations sont incluses dans un même domaine et une même grille de calcul. En plus, cet outil est considéré comme moyen rapide et économique, l'application de la **CFD** a promu une maîtrise parfaite de : l'aéraulique de l'air; qualité de l'air; pollution diffusée; confort thermique; confort du vent; effets de façades; effets de toits; effets de pavages et effet de la végétation ou les surfaces d'eau ([Van Hooff et al, 2013](#)).

Méthodes adoptées

Du fait que notre site d'intervention se distingue par un environnement géométrique complexe ainsi qu'une topographie urbaine complexe, la mission de l'évaluation de l'impact de la morphologie urbaine sur l'aéraulique de l'air pour un Canyon urbain est encore très difficile, ce qui nécessite d'activer deux méthodologies pour une étude combinatoire d'analyse et d'évaluation. Le choix de cette étude permet d'utiliser à la fois la méthodologie de mesure sur terrain avec la méthodologie de la simulation par **CFD** en **3D**.

VI.2. Ligne directrice de la méthodologie

Dans notre cas d'étude, l'intérêt majeur est de développer un outil performant d'évaluation et d'optimisation. Pour la première partie alors, nous allons effectuer une campagne de mesures

au niveau du Canyon urbain, donc une méthode de mesure sur site pour collecter le maximum des informations sur les aspects microclimatiques du canyon urbain, afin de visualiser les distinctions entre le canyon et l'environnement extérieur (en dehors de la ville) mesurés par l'Office National Météorologique (ONM) (**Fig.V.1**).

Une deuxième partie suit la démarche de la modélisation numérique, elle peut nous servir comme un outil d'analyse approfondie du comportement de la dispersion du polluant dans le Canyon urbain, ceci en diagnostiquant le problème qui se pose entre la dualité de la morphologie urbaine et l'aéraulique de l'air (**Fig. V.1**).

Le deuxième intérêt de la modélisation numérique, c'est de proposer des solutions alternatives par d'autres configurations géométriques afin de favoriser l'écoulement d'air et de dégager au maximum la pollution tout en préservant le patrimoine architectural des Mozabites, cela par des restructurations urbaines et des modifications minimales.

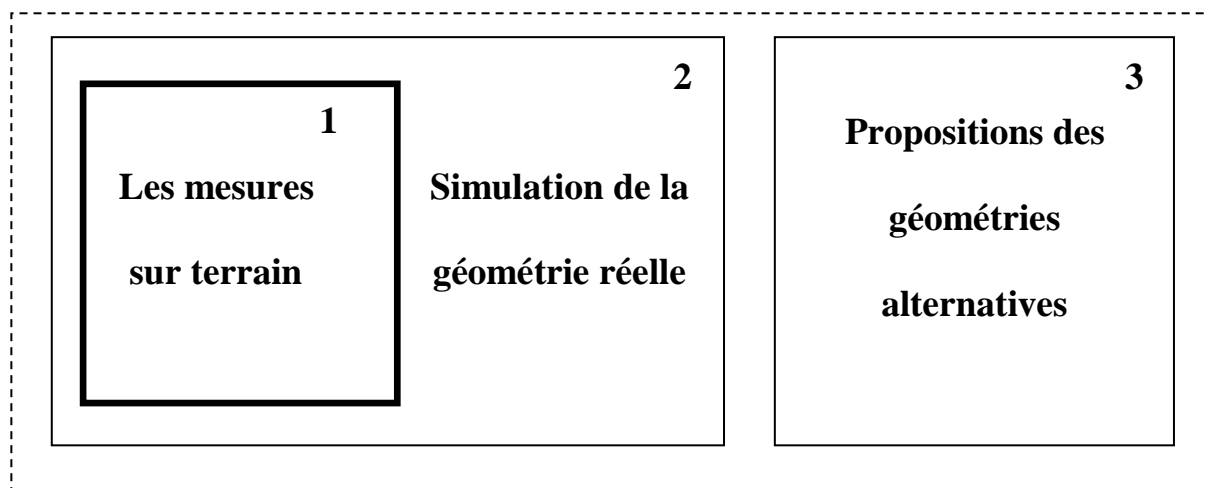


Fig. VI.1. Principe de la méthodologie choisie.

VI.3. Les mesures sur terrain

VI.3.1. Echelle d'intervention

La morphologie urbaine du Ksar de Ghardaïa est caractérisée par sa complexité multiple, par un tissu urbain intégré dans une topographie difficile d'où un lieu de culte qui s'élève, par proéminence, de **20m** au dessus de la pointe de la colline. La géométrie des ruelles (rues

étroites et en lacet) est parfois circulaire en parallèle avec les courbes de niveaux, d'autres ont la formes radiales sur la pente naturelle de la colline. Encore la disposition étagée des constructions sur la topographie du ksar donne un cachet unique au ksar de Ghardaïa. Ces dispositions particulières influencent directement l'écoulement d'air à l'intérieur de la morphologie urbaine du ksar et imposent un régime spécifique d'écoulement d'air à l'échelle du ksar, ainsi chaque îlot, qui compose l'entité morphologique urbaine globale, impose son propre régime d'aéroulque d'air.

VI.3.2. Présentation du site et précautions des mesures

Ce canyon se trouve dans la limite sud du Ksar de Ghardaïa, sur lequel, il est vu comme la seule liaison mécanique entre deux fragments (de la ville de Ghardaïa), il a été créé à l'époque coloniale, il est considéré comme le prolongement du site historique de Ghardaïa.

Dans notre étude sur les conditions micro-météorologique du canyon urbain, nous ne nous intéressons pas seulement aux mesures acquises par la station météorologique située à **20 km** en dehors de la ville, car elles sont à l'échelle « **mésoscale** ». Pour cette raison, nous allons prendre des mesures au niveau de notre site d'intervention, à l'échelle (**micro-scale**), c'est-à-dire l'échelle du canyon urbain. Autrement dit, la station météorologique apporte des informations globales ($>10\text{km}^2$), même si ces mesures sont exactes et approfondies, elles sont considérées comme des informations du territoire de la Wilaya de Ghardaïa (**Fig. VI.2**).

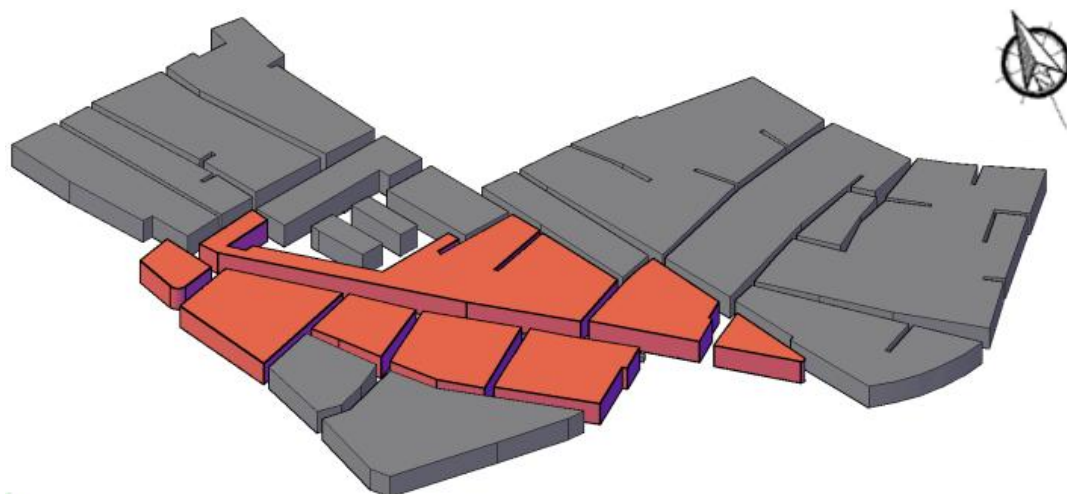


Fig. VI.2. Le Canyon d'étude dans son environnement.

VI.3.3. Protocole de mesure

Le canyon urbain choisi, qui représente notre site d'intervention, a un comportement d'écoulement de vent complexe, résultant de l'interaction entre l'aéraulique d'air et le tissu morphologique du Ksar de Ghardaïa ; de leur incidence face aux éléments architecturaux saillants (auvents, balcons,...etc.) et perturbé également par le passage des véhicules (voitures, camions) et motos. Pour appréhender cette complexité de l'aéraulique de l'air à l'intérieur de ce Canyon urbain, il est tout a fait logique de réaliser plusieurs tâches importants, en commençant d'abord par une:

- Collecte de mesures sur le Canyon urbain, sur ces particularités micro-météorologiques, ses qualités d'ambiance extérieure, ceci par des mesures de températures, humidités, CO₂, vitesses du vent, intensités sonore et éclairements, au niveau de trois zones de repères sur l'axe médian du canyon. Ces repères sont respectivement ; l'amont, le milieu et l'aval du Canyon urbain.
- Ensuite, une étape de comparaison des mesures collectées dans le Canyon avec les mesures de l'ONM (prise à **20Km**) située en dehors de la ville de Ghardaïa

VI.3.4. Choix des stations de mesures dans le canyon urbain

- La forme géométrique du canyon est irrégulière, se prolonge sur une longueur non-rectiligne, elle a une déviation exactement au niveau de sa finalité, cette irrégularité particulière fait partie de l'aspect global typologique du site vernaculaire et irrégulier, celle du ksar de Ghardaïa.
- Le ratio (**H/L**) pour le Canyon urbain, n'était pas établi par un module équivalent en rapport avec sa longueur, on observe une concentration des rues perpendiculaires au niveau de la zone centrale du canyon.

En s'appuyant sur ces spécificités morphologiques, nous avons opté pour un schéma de mesure qui caractérise les conditions thermiques, aérauliques et celles de la pollution, en amont au milieu et en aval du canyon, parce que chaque zone diffère des autres par des aspects morphologiques urbains, donc la disposition de chacune est placée selon une volonté stratégique.

VI.3.5. Déroulement des campagnes de mesures

L'objectif principal de ces campagnes de mesures menées pendant une période extrêmement chaude est d'avoir une lecture globale sur le comportement des ambiances extérieures du Canyon urbain durant cette période microclimatique extrêmement difficile, surtout en réaction aux concentrations de l'air en CO₂. Nous avons choisi le mois de juillet pour établir ces campagnes de mesures puisqu'il est considéré par l'**ONM** comme le mois le plus chaud de l'année (non seulement pour la ville de Ghardaïa, mais aussi pour toute la région sud de l'Algérie). La durée déterminée, pour l'établissement de ces mesures, est de deux jours (le **5 et 6 juillet 2013**), leurs prises ont été effectuées chaque heure, dès le petit matin à partir de **6H** jusqu'à le soir à **19H**, nous les avons considéré suffisantes pour avoir un échantillon sur le microclimat du Canyon urbain.

Le déroulement des campagnes de mesures exige une application sur les trois zones (**A, B et C**) simultanément et par un ordre d'usage de chaque instrument de prise. Cette démarche pose de difficultés énormes, un laps de temps ne suffit pas pour exécuter plusieurs tâches et mesurer plusieurs paramètres en une seule fois et pour trois zones prolongées sur une longueur de **139m**, on a décidé donc de faire des campagnes de mesures selon un ordre de succession (**Méthode du parcours urbain**) ; pour l'utilisation de chaque instrument, et pour le relevé à chaque zone.

VI.3.5.a. Méthode du parcours urbain

Cette méthodologie sert à appliquer des campagnes de mesures ponctuelles à travers le parcours urbain, une manière de faire un relevé de mesures convenable à des variations climatiques d'une zone selon sa morphologie et sa typologie urbaine. Cette méthode requiert un déplacement d'une zone à une autre en faisant des relevés pendant un laps de temps très court.

VI.3.5.b. Choix des stations de mesures

Le champ d'intervention est limité au niveau du canyon urbain, les relevés de mesures s'effectuent au niveau de trois zones **A, B et C (Fig. VI.3)**. Ces zones conjuguent des particularités typologiques urbaines, où elles se positionnent: en amont, au milieu et en aval du canyon, c'est la raison même de notre choix pour l'ensemble des campagnes de mesure. En outre, nos mesures se procèdent approximativement sur une ligne virtuelle en parallèle avec l'axe médian du canyon à une hauteur moyenne de **1,5m** entre le passage des flux

mécaniques de différents gabarits et motorisations (motocycles, voitures, camions et des bus). Toutes les mesures ont été effectuées durant deux jours, le **5 et 6 juillet 2013**, de **6h** et **19h** avec un intervalle d'une heure, entre chaque deux prises de mesure.

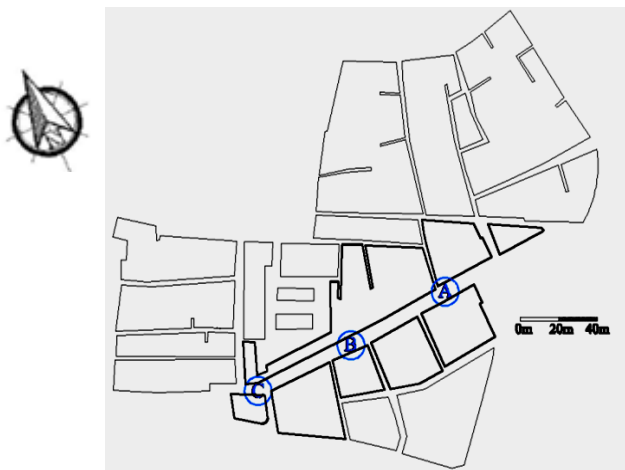


Fig. VI.3. Positionnement des stations de mesure dans le cas d'étude (**A, B** et **C**)

VI.3.5.c. Les paramètres météorologiques mesurés

Les paramètres climatiques mesurés dans le canyon ont pour objectif, de définir le contexte urbain d'une part et de contribuer à la deuxième section de notre recherche, donc la quasi majorité de ces données est utile pour l'expérimentation.

Ces paramètres mesurés manuellement, pour chaque heure sont en l'occurrence:

- Taux du CO₂ en [ppm].
- Températures en [°C].
- Humidités en [%].
- Vitesses du vent [m/s].
- Eclairage en [Lux].
- Intensité sonore [DB].

VI.3.5.d. Instruments de mesure et caractéristiques

Les instruments de mesures à l'échelle réelle (Moniteur de CO₂, Anémomètre,...etc.)

Les instruments déployés sont portables, ce qui sert à des relevés de mesures en discontinuité tout le long du/ canyon, à une hauteur constante de **1.5m**, hauteur supposée comme une hauteur standard d'un individu. Le déroulement de toutes les mesures s'effectue sous l'ombre,

ce qui permet à l'instrument de mesure d'être aussi sous l'ombre, il s'agit donc de l'ombre des constructions (du Canyon urbain) ou d'origine humaine (le releveur tourne le dos au soleil au moment des prises de mesures).

Les instruments de mesures déployés et leurs grandeurs seront présentés comme suit:

Moniteur de qualité de l'air [CO₂] « CEM, DT-802 »

L'instrument de mesure du CO₂ utilise la technique « sensing method : NDIR (non-dispersive infrared) CO₂ sensor », (Fig. VI.4). Cet appareil « CEM, DT-802 », peut mesurer la fluctuation du CO₂, allant de 0 jusqu'à 9999 ppm de CO₂ (Partie Par Million [ppm]), avec une résolution de 1 ppm et une précision de ± 5%.

Il faut rappeler, que la norme internationale du CO₂ (NBN EN 13779) classifié la qualité de l'air selon la concentration du CO₂ en quatre :

- Qualité d'Air Excellente avec une concentration du CO₂ inférieur à 400 ppm
- Qualité d'Air Moyenne avec une concentration du CO₂ entre 400~600 ppm
- Qualité d'Air Acceptable avec une concentration du CO₂ entre 600~1000 ppm
- Qualité d'Air faible avec une concentration du CO₂ supérieur à 1000 ppm.

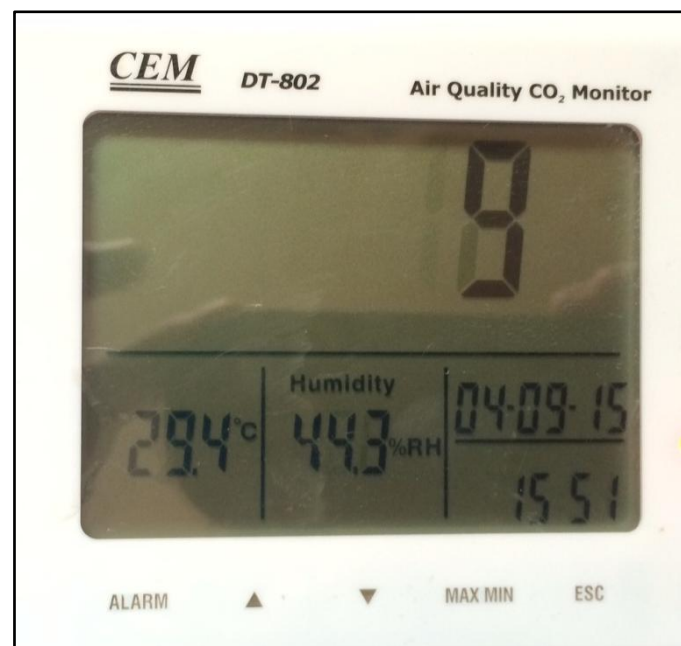


Fig.VI.4. Appareil « CEM, DT-802 » de mesure du CO₂, de température et d'humidité.

Anémomètre pour le relevé de la température « *Velleman, DVM8020* »

Selon les procédés et conditions initiales, les variations de températures sont mesurées par le même instrument de mesure du CO_2 « *Velleman, DVM8020* ». Ces températures sont mesurées parfois sous le soleil. Cet instrument a des plages de mesure allant de -10°C jusqu'à $+50^\circ\text{C}$ avec une résolution de $0,1^\circ\text{C}$ (**Fig. VI.5, Tableau. VI.1**).

Ces prises de mesure sont essentielles pour analyser l'intensité du stress thermique au Canyon urbain. Ces variations sont aussi importantes dans la phase de la simulation, la moyenne température (qui reflète la réalité du microclimat du Canyon urbain) sera introduite dans le model d'Ansys-Cfx pour présenter l'état de fait par la simulation.

Anémomètre pour le relevé de l'humidité relative « *Velleman, DVM8020* »

Les mesures de l'humidité sont effectuées par le même instrument de mesure du CO_2 « *Velleman, DVM8020* », il peut mesurer 0.1% jusqu'à 90% RH avec une résolution de 0.1% RH et une précision de $\pm 5\%$. Parfois ces mesures sont effectuées à l'ombre de l'utilisateur ou à l'ombre des murs (**Fig. VI.5, Tableau. VI.1**).

Anémomètre pour le relevé de vitesse du vent « *Velleman, DVM8020* »

Les mesures au niveau du Canyon sont effectuées par un Anémomètre « *Velleman, DVM8020* », qui a des plages de mesure allant de 0.4 jusqu'à 20m/s , avec une résolution de $0,1\text{ m/s}$ (**Fig. VI.5, Tableau. VI.1**). Les vitesses de vent en m/s sont mesurées chaque heure de **6h** à **19h**, pendant deux jours les **5** et le **6 juillet 2013**. L'analyse de ces vents sert à une lecture scientifique de l'écoulement du vent dans le canyon. Nous allons comparer ensuite ces vitesses des vents au niveau du Canyon par rapport à celles mesurées par ONM, à l'extérieur de la ville. Ces données (qui reflète aussi la réalité de la vitesse moyenne du vent dans le Canyon urbain) seront introduites dans le model de simulation par CFD en 3D pour présenter l'état de fait par la simulation.



Fig.VI.5. Un Anémomètre « *Velleman, DVM8020* ».

Un luxmètre « *Velleman, DVM1300* »

L'éclairement est mesuré par le luxmètre « *Velleman, DVM1300* » en unité du Lux. Cet instrument a un photo-détecteur de photodiode en silicium avec un filtre et une plage de mesure allant de **0.1** jusqu'à **50000** Lux et une précision de $\pm 5\%$, voir la figure (**Fig. VI.6, Tableau. VI.1**).

Le but de mesures de l'éclairement est d'avoir des informations additionnelles avec les informations du stress thermique, parce que le comportement du ciel influence les irradiances solaires, ainsi les activités humaines. Pendant la prise de mesures, les cieux étaient clairs, sans nuages durant les jours de l'expérience, nous précisons que les mesures ont été prises parfois sous le soleil.



Fig.VI.6. un luxmètre « Velleman, DVM1300 ».

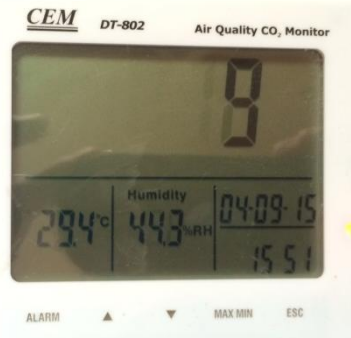



Un sonomètre « CEM, DT-815 »

Un sonomètre « CEM, DT-815 » qui relève de l'intensité sonore ayant un « Standard applied de 61672-1 CLASS2 » avec une précision de $\pm 1.4 \text{ dB}$ et une plage de mesure allant de 31.5 HZ jusqu'à 8 KHZ (Fig. VI.7, Tableau. VI.1). Le but de mesure de l'intensité sonore au Canyon urbain consiste à définir le contexte d'intervention et à pouvoir estimer le degré du confort par rapport aux autres mesures étant donné que la qualité auditive a une influence sur les ambiances extérieures de notre Canyon.



Fig.VI.7. un sonomètre « CEM, DT-815 »

Tableau. VI.1. Récapitulatif du protocole de mesure menée dans le canyon urbain

Vecteur climatique mesuré	Type de capteur	remarque	Vue sur l'appareil de mesure
Taux de pollution en CO ₂ [ppm]	Instrument de mesure du CO ₂	Mesure la concentration du Gaz du CO ₂ dans l'air extérieur du canyon	
Température en (°C)	Anémomètre pour capter la température	Mesure la température de l'air	
Humidité en (%)	Anémomètre pour capter l'humidité	Mesure la l'humidité de l'air	
Vitesse du vent (m/s)	Anémomètre pour capter vitesse du vent	Mesure la vitesse moyenne de la turbulence	
Eclairment (lux)	Un luxmètre	Mesure l'éclairment du ciel et donne une lecture globale sur le canyon	
Intensité sonore (dB)	Un sonomètre	Mesure l'intensité sonore donne une vision générale sur la qualité de l'ambiance extérieure	

Problème rencontrés

Beaucoup de difficultés apparaissent au fur et à mesure de prises des mesures, nous retenons ce qui est lié à :

L'instrumentation

- La présence du vent au niveau canyon, surtout à la hauteur du captage, joue un effet de modérateur du stress thermique.

La durée du parcours

- Le relevé de tous les paramètres microclimatiques et d'ambiances extérieures au canyon au niveau de trois zones de captages (**A**, **B** et **C**) prolongées de **139m** sur la longueur du canyon urbain pose un problème de précision et de respect de l'intervalle du temps horaire entre chaque deux captages de mesures.

Complexité de mesures

- le passage des voitures et de la circulation mécanique fluctuent la vitesse du vent au niveau du canyon urbain ce qui perturbe la mission de prise de mesures, ces relevés deviennent aussi très compliqués et extrêmement difficile à maîtriser.

Conditions du ciel durant les mesures

Selon le tableau (VI.2), l'état général du ciel est clair, durant les jours du relevés de mesures pendant le 5/6 juillet 2013.

Tableau. VI.2. Conditions de l'état du ciel durant les campagnes de mesures.

Date	Condition de ciel
5 juillet 2013	
6H à 10H	Ciel clair, partiellement couvert de nuage
10H à 19H	Ciel clair et dégagé
6 juillet 2013	
6H à 19H	Ciel clair et dégagé

Conditions d'écoulement du vent durant les mesures

Selon le tableau (VI.3), durant les jours du relevés de mesures pendant le 5/6 juillet 2013, l'écoulement du vent à l'intérieur du Canyon urbain est faible, par contre à l'extérieur de la ville, les écoulements ont de forte vélocités (ONM).

Tableau. VI.3. Conditions d'écoulement du vent durant les campagnes de mesures (ONM).

Date	Conditions aérauliques du site	
	Vélocité	Remarque
5 juillet 2013		
Mesurés à l'intérieur du canyon	0.5 à 2 m/s	Faible vélocité
Mesurés (par l'ONM) à l'extérieur de la ville	2.2 à 4.7 m/s	Forte vélocité
6 juillet 2013		
Mesurés à l'intérieur du canyon	0.4 à 1.8 m/s	Faible vélocité
Mesurés à l'extérieur de la ville	2 à 4.4 m/s	Forte vélocité

Intérêt de la démarche de mesures à l'échelle réelle

Ces instruments de mesures utilisés ont pour objectif, de recueillir un maximum d'informations sur les conditions environnementales du Canyon urbain, ces informations sur les ambiances extérieures et sur le microclimat sont essentielles pour l'identification du contexte d'intervention et sont utiles pour donner une lecture globale et une vision générale sur le site. Par ailleurs, ces données sont utiles pour le modèle de simulation Ansys-Cfx, pour établir les conditions existantes ainsi que le schéma général de la dispersion du polluant du CO₂ à travers le Canyon et sont très importantes pour pouvoir proposer des reconfigurations optimisées permettant de générer un environnement adéquat et sain.

VI.4. La simulation par CFD :

VI.4.1. L'appel de la CFD pour les recherches environnementales

Le développement technologique en informatique et en CFD au cours ces dernières années a permis la prédiction et l'évaluation du microclimat autour des bâtiments pendant la phase de la conception et pour la phase d'optimisation d'un site déjà réalisé. Dans cette partie de l'étude, la CFD est utilisée parce qu'elle est considérée actuellement comme un outil scientifique performant permettant de résoudre et d'étudier les enjeux environnementaux, donc elle est exploitée pour avoir une lecture générale sur la dispersion du polluant provenant de la circulation mécanique le long de Canyon. Dans cette section de travail, nous allons simuler le site réel et les sites proposés comme étant des configurations géométriques alternatives. Toujours, par l'outil de simulation par CFD en 3D, nous allons quantifier les avantages et les inconvénients de chaque configuration géométrique, surtout entre les valeurs de CO₂ mesuré et CO₂ simulé au niveau des stations de repère **A**, **B** et **C**.

VI.4.2. Restructurations urbaines visant à résoudre le problème

Nous avons proposés deux solutions architecturales pour atténuer le taux de CO₂ enregistré dans le canyon (**Fig. VI.8**), ces solutions touchent principalement ; La densité de surface; Volume construit; Prospect; Distance entre bâtiment; Hauteur moyenne des bâtiments. Ce choix d'aspects n'est pas aléatoire, il s'agit d'un résultat d'une recherche sur une méthode dite « **méthode statistique** », qui a fait l'objet de trois publications scientifiques, procédées par l'université de Nottingham de la Malaisie (**Edussuriya et al, 2014**).

Selon le schéma représentatif de méthode d'analyse statistique (**Fig. VI.9**), nous avons utilisé cinq aspects architecturaux sur neuf autres, soit un pourcentage de **55%** sur l'ensemble des aspects les plus connus qui influencent la qualité de l'air dans un canyon urbain. Après la projection de cette méthode sur notre cas d'étude, nous avons proposé deux configurations géométriques qui représentent les solutions aux problèmes constatés au niveau de la géométrie réelles et qui sont considérées comme des solutions alternatives.

- La **première proposition** donc, touche les aspects suivants ; La densité de surface; Volume construit; Prospect; Distance entre bâtiment (**Fig. VI.8.b**).
- Par contre la **deuxième proposition** touche; Volume construit; Prospect; Hauteur moyenne des bâtiments (**Fig. VI.8.c**).

La simulation par CFD en 3D de ces deux propositions géométriques alternatives essaye de prendre en charge la réalité entière du contexte urbain avec ses aspects microclimatiques. D'après les littératures scientifiques, de nombreuses recherches dans le domaine environnementales en milieu urbain n'indiquent pas la situation réelle de l'écoulement de l'air par rapport à une configuration géométrique, elles sont loin de la présentation réaliste, car les flux urbains réels dépendent de la configuration géométrique réelle et sont évidemment plus complexes. La quasi majorité de ces recherches donc sont limitées à l'étude des systèmes idéalisés (**Chan et al., 2003**) en employant des géométries très simples (**Chan et al., 2002**). Toutefois, ces morphologies cubiques isolées et idéales ne peuvent pas capturer les phénomènes réels du site, tels que les effets de rugosité (**Chan et al., 2003**).

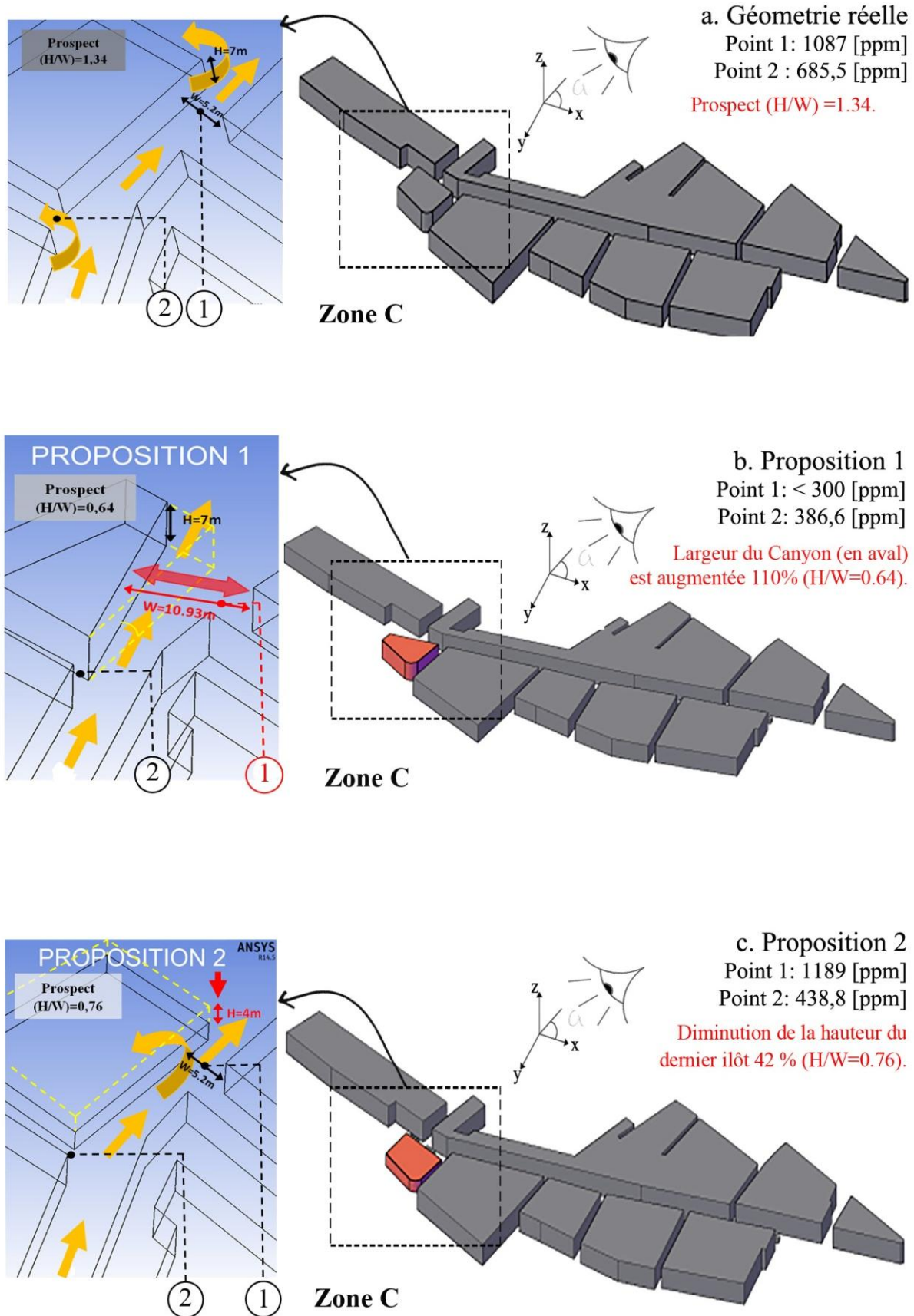


Fig. VI.8 ; a) Configuration géométrique et formelle du cas d'étude ; b) Reconfiguration optimisée 1; c) Reconfiguration optimisée 2.

VI.4.3. Application de la Théorie « d'Edussuriya et al »

Cette **méthode d'analyse statistique** est proposée par les chercheurs **Edussuriya et al (2014)**, elle est abordée d'une façon détaillée dans le chapitre (Cf. **chapitre. III. 1.4.** Configurations urbaine et l'écoulement du vent) (**Fig. VI.9**).

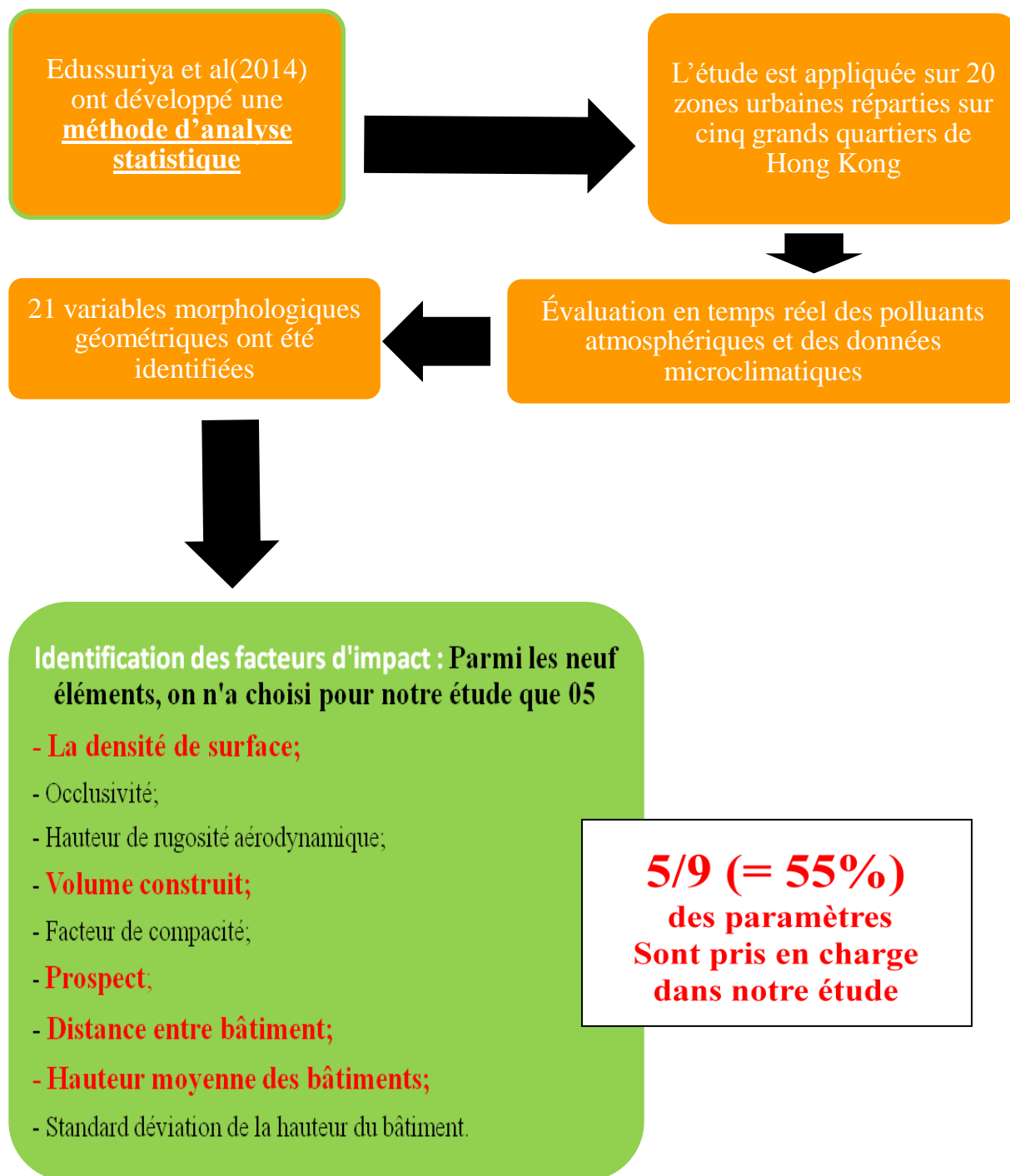


Fig. VI.9. Identification des facteurs d'impact sur l'écoulement d'air pour une rue Canyon [55% de l'ensemble d'éléments sont pris en charge] (**Edussuriya et al 2014**).

VI.4.4. Les guides pratiques du CFD existants

D'après [Franke et al \(2010\)](#), il existe de nombreuses méthodes d'usage du CFD pour simuler un domaine météorologique, elles se différencient selon leurs échelles, leurs intérêts ainsi que leurs démarches de solution, nous allons citer quelques guides préconisés par [Franke et al \(2010\)](#) :

- a. Pour des applications générales du CFD : l'ERCOFTAK est le meilleur guide pratique et complet, mais les problèmes particuliers météorologiques à petite échelle ne sont pas pris en compte.
- b. QNET-CFD est destiné pour résoudre les problèmes d'ingénierie du vent.
- c. Le travail de [Tominaga Y & al \(2008\)](#) est un guide Japonais, permettant de prédire le vent autour des bâtiments pour les piétons.
- d. Le travail de [Franke et al \(2004\)](#) est un guide Européen sur l'impact du vent et les tempêtes sur les villes et l'environnement bâti « COST-European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research, action C14 ».
- e. Le travail de [Pankus \(2000\)](#) est un guide Allemand, sa méthode consiste à évaluer et à valider des modèles pour l'écoulement de l'air autour des bâtiments.

Un guide pratique pour une simulation en CFD devrait avoir une ligne directrice structurée par des étapes successives. Il faut rappeler que chaque guide se diffère d'un autre, et que dans le cas général une validation des résultats est nécessaire. Autrement dit, les résultats de la CFD devraient être comparés aux mesures expérimentales.

VI.4.5. Méthode paramétrique pour déterminer le niveau de la concentration du CO₂ au Canyon

Les niveaux de pollution atmosphérique du CO₂ provenant de la circulation routière dans un canyon urbain sont habituellement mesurés en utilisant soit la méthode du parcours d'un véhicule par kilomètres (Vehicle Kilometers Traveled/**VKT**) soit la méthode du parcours d'un véhicule par des miles (Vehicle Miles Traveled/**VMT**), ces niveaux associent évidemment les facteurs de combustion et le flux de trafic ([Vardoulakis et al., 2003](#)).

Il est important de prévenir qu'il n'y ait pas d'activités industrielles autour de la ville (Ksar de la ville de Ghardaïa), qui expulsent du CO₂ dans l'atmosphère, la seule source donc de cette pollution est le transport.

Concernant notre cas d'étude, nous avons unifié les sources de pollution dans le Canyon, par une unité linéaire, composée de **18** voitures identiques prolongées sur la longueur du canyon urbain (**Fig. VI.10/11**), avec une distance équivalente à **5m**, (le vide entre les voitures) entre deux éléments émetteurs, chacun propulse un taux de **140 gCO₂ /km** et l'ensemble se déplace avec une vitesse constante de **40 km/h** (**Tableau. VI.4**).

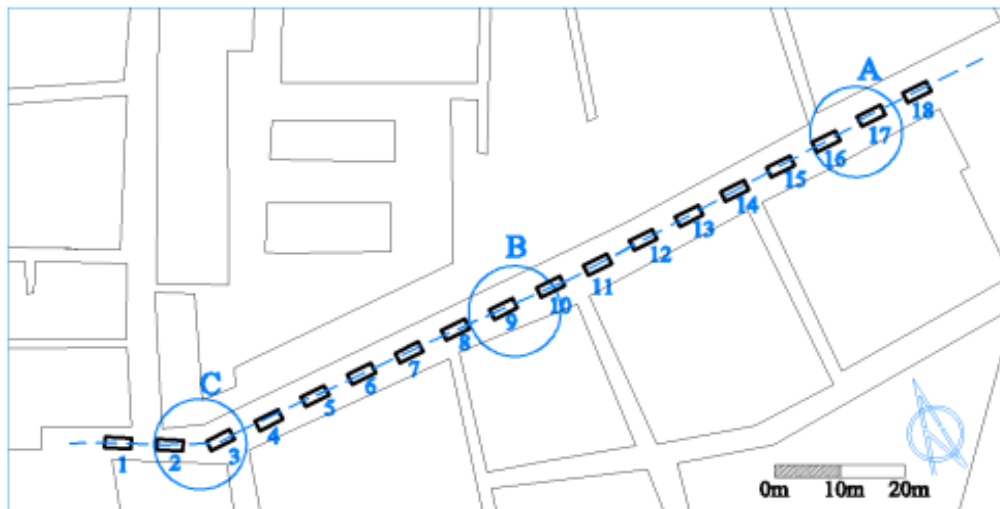


Fig. VI.10. Les positions de chaque zone de mesure (A, B et C) avec les dix huit (18) voitures.

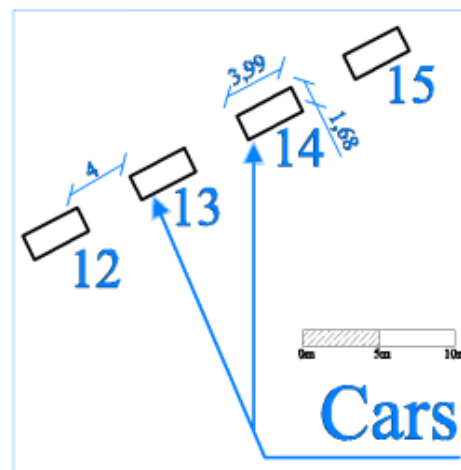


Fig. VI.11. Protocole de simulation: répartition des véhicules.

Tableau. VI.4. Caractéristiques des voitures modèles (EEA, 2012, Neufert, 1999).

Total sources	27.9 g ^ s-1
Dimension d'une voiture (X, Y, Z) m	1.68m x 3.99m x 1.42m
distance entre les voitures	5 m
Vitesse moyenne des voitures	40 km .h ⁻¹
Dégagement du CO2/voiture	140 gCO2 /km
Nombre de voitures	18

VI.4.6. Modèle de simulation et degré de complexité

Nous avons décidé pour notre recherche de simplifier la démarche de la simulation, tout d'abord par la prise en compte d'une température iso-thermique de **38°C** pour l'ensemble du domaine de calcul, ainsi que par l'unification des sources polluantes à travers notre canyon urbain. Ce principe de simplification est fréquent pour les recherches scientifiques en souffleries et les simulations en CFD (Chen et al, 2002. Chang et al, 2003. Kim et al, 2004. Lien et al, 2004. Coceal et al, 2006. Kanda et al, 2006. Sabatino et al, 2007. Bady et al, 2008. Jiang et al, 2008. Pascheke et al, 2008. Xie et al, 2008. Hagishima et al, 2009. Hang et al, 2009. Kanda et al, 2009. Yim et al, 2009. Buccolieri et al, 2010. Boppana et al, 2010. Hang et al, 2010. Gu et al, 2011. Hang et al, 2011. Zaki et al, 2011)

VI.4.7. Représentation mathématique du phénomène

Les équations de bases qui régissent notre étude de simulation concernent essentiellement les équations de conservation à résoudre par le code CFX, il s'agit donc de :

Conservation de la masse (continuité)

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (\text{Equ. VI.1})$$

Conservation de la quantité du mouvement

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\left(\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_i}\right) + \rho g_i + F_i \quad (\text{Equ. VI.2})$$

Conservation des espèces scalaires

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (C u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \quad (\text{Equ. VI.3})$$

Conservation des espèces scalaires

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (C u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{v_t}{\sigma} \frac{\partial C}{\partial x_j} \right) \quad (\text{Equ. VI.4})$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (\text{Equ. VI.5})$$

Al-Khalidy (2015) précise que « ρ est la masse volumique, \mathbf{u} est la vitesse, \mathbf{P} est la pression statique, $\rho \mathbf{g}$ et \mathbf{F} représentent respectivement le gravitationnel du corps et les forces externes du corps, $\boldsymbol{\tau}_{ij}$ est le tenseur des contraintes, \mathbf{C} est la concentration de polluants ν est la viscosité cinématique et \mathbf{S} représente la source de chaleur volumétrique. Le tenseur de Reynolds souligné dans les équations 2 est modélisé en utilisant le modèle $-\varepsilon$. Le transport d'équations suivant est utilisé pour calculer les termes \mathbf{k} et ε » (**Al-Khalidy, 2015**):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_h + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (\text{Equ. VI.6})$$

Al-Khalidy (2015) précise encore que « G_k est la génération de l'énergie cinétique turbulente due au gradient de vitesse moyenne, G_b est la génération de l'énergie cinétique turbulente due à la flottabilité, Y_M est la contribution de la fluctuant dilatation en turbulence compressible pour le taux de dissipation globale, μ_t est le viscosité turbulente, $G_{1\varepsilon}$, $G_{2\varepsilon}$ et $G_{3\varepsilon}$ sont constants, σ_k et σ_ε sont les Prandtl turbulent Numéro, S_k et S_ε sont définis par l'utilisateur comme terme source. Constantes de modèle sont détaillés dans Launder B. et Spalding D (1972) » (**Al-Khalidy, 2015**).

VI.4.8. Représentation de la géométrie (étape de modelage)

C'est une étape nécessaire pour la CFD, il s'agit de faire introduire le model géométrique et de préciser ses configurations. L'outil Workbench-CFD est utilisé pour construire la géométrie du domaine de calcul et des bâtiments. Selon **Franke (2010)** la configuration géométrie c'est la zone qui devrait être reproduite avec autant de détails que possible, pour cette raison l'augmentation du nombre de grilles dans cette zone est nécessaire pour détecter les détails. Pour cela, la conception urbanistique doit contenir toutes les informations disponibles concernant la végétation, la topographie et les matériaux de traitement des surfaces .e.g, les routes, l'herbe ou le sable, parce que ces informations ont un impact important sur l'écoulement du vent et sur la simulation (**Franke et al., 2010**).

Selon **Tominaga**, les bâtiments de la région à évaluer devraient être clairement modélisés, en d'autres termes, au moins un bloc (de bâtiment) supplémentaire dans chaque direction autour de la région d'évaluation devrait être clairement reproduit. Il est recommandé d'utiliser des géométries simplifiées ou de définir la longueur de rugosité Z_o autour la région cible, depuis le bord extérieur des blocs de rues supplémentaires jusqu'à la frontière du domaine de calcul (**Tominaga et al., 2008**). Par contre **Franke (2010)** suggère que la zone cible devrait avoir un niveau de détail important sans mentionner la résolution (**Franke et al., 2010**).

VI.4.9. Modèle numérique

L'écoulement de l'air dans le Canyon urbain est turbulent. Le modèle que nous avons adopté pour la résolution des équations est le **k- ϵ** (**Franke et al., 2010**). Ce modèle a été choisi parmi d'autres parce qu'il peut estimer la couche limite de l'atmosphère de façon plus précise (**Hargreaves and Wright, 2007**), (**Fig. VI.12/13**).

VI.4.10. Le domaine de calcul

Le domaine de calculs peut être défini par des dimensions et des aspects particuliers. Selon **Franke (2010)** la taille du domaine de calcul, sa limite verticale, latérale et la direction d'écoulement dépendent essentiellement de la zone à représenter et des conditions aux limites à utiliser (**Franke et al., 2010**). Selon **TOMINAGA**, la limite du domaine de calcul latérale et la limite supérieure doivent être réglés **5H** ou plus, d'où le « **H** » est la hauteur du bâtiment le plus haut (**Tominaga et al., 2008**). Cependant, selon **Franke (2006)** les limites latérales recommandées sont de l'ordre de **2.3W** (**W** est la largeur de la zone de construction) et les limites de sortie de l'écoulement sont de l'ordre de **15H_{max}**, d'où le **H_{max}** est la hauteur du bâtiment le plus haut.

Cette étude, concernant la dispersion du polluant du CO_2 , touche l'ensemble du domaine, d'où l'origine du système de coordonnées situé au coin inférieur gauche du domaine. Donc, nous avons opté pour le Canyon urbain, un domaine de calcul qui a les dimensions suivantes : **500m** dans les sens de **x** et **y** et une dimension de **300m** suivant la direction **z**.

Le régime dans le domaine du calcul est stationnaire, avec une énergie thermique prise comme une radiation thermique « **un transfert discret** ». La vitesse du vent dans le domaine du calcul est fixée à **1,5m/s**, la température du domaine est la température ambiante et elle est considérée comme stable et égale à **311K**. Les calculs ont été effectués avec un poste de

travail « Dell OptiPlex 7010 workstation » contenant « Quad-core Intel Core i7-3770 3.40 GHZ processors » et « 8 GB Fully Buffered DDR3 memory ».

VI.4.11. Choix des conditions aux limites du domaine

Selon [Franke \(2006\)](#), les conditions aux limites représentent l'influence de l'environnement du domaine sur les calculs, elles déterminent la solution à l'intérieur, mais souvent ces conditions aux limites ne sont pas complètement connues, par conséquent, les limites du domaine de calcul doivent être suffisamment loin de la région d'intérêt afin de ne pas influencer la solution avec des conditions aux limites approximatives (**Fig. VI.12/13**).

La partie la plus importante du modèle numérique est le rapprochement de la couche limite atmosphérique (**ABL**). Les caractéristiques de la couche limite définissent les conditions aux limites utilisées par le modèle. Ces limites du domaine sont l'entrée, la sortie, la droite, la gauche, le sol et la limite supérieure. Les variables requises sont la vitesse et la concentration des polluants.

- a. **Conditions aux limites d'entrée « Inlet » :**
- b. **Conditions aux limites du haut « Top » :**
- c. **Conditions aux limites latérales « gauche et droite » :** Dans « CFD commercial codes », la symétrie en conditions aux limites est normalement utilisée dans les limites latérales lorsque la direction du flux est parallèle, une distance minimale est exigée toujours entre la limite et la zone d'intérêt.
- d. **Conditions aux limites de sortie « Outlet » :**

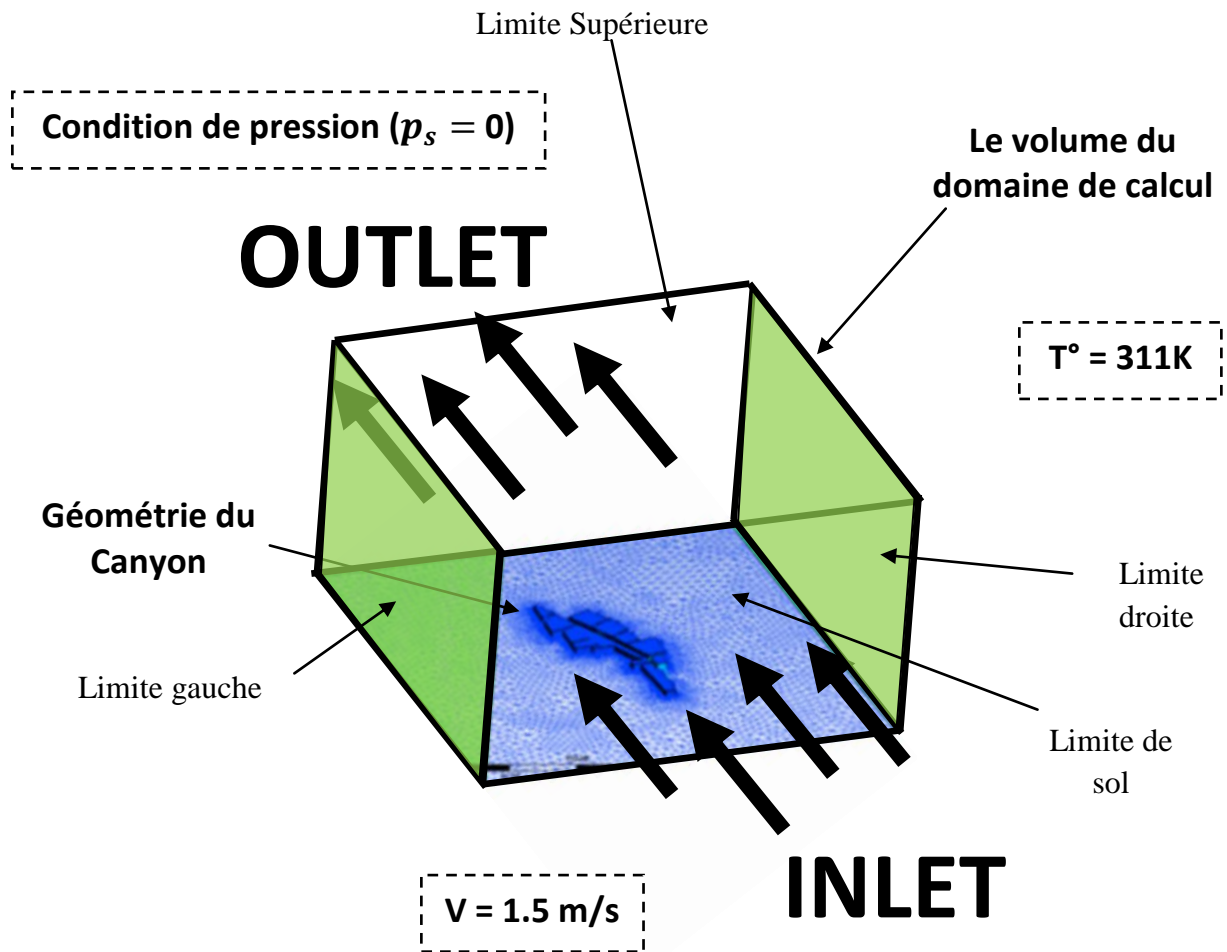


Fig. VI.12. Domaine de Calcul et conditions limites schématisées

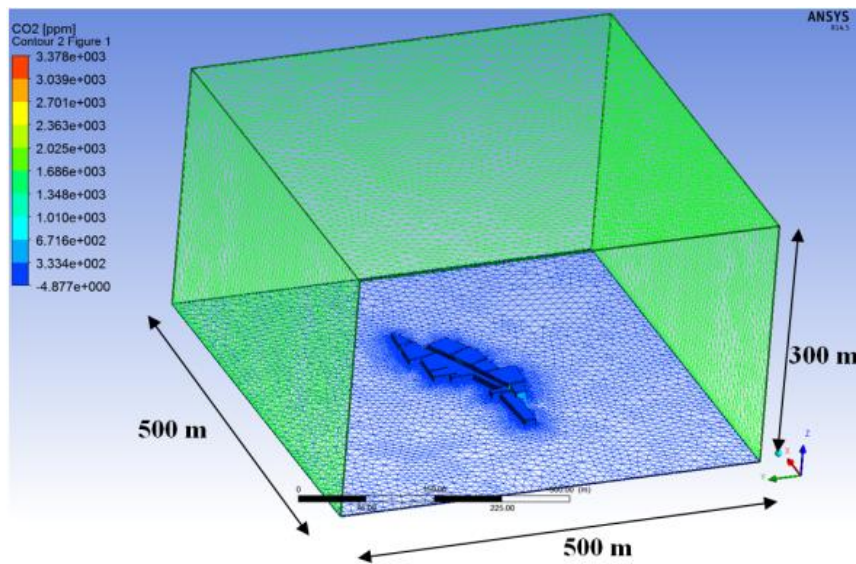


Fig. VI.13. Domaine de Calcul avec la configuration du Canyon urbain.

VI.4.12. Choix de la grille de calcul « Computational Grid » :

Pour la grille de calcul, il est d'abord nécessaire de définir la méthode de discrétisation qui doit être utilisée pour les équations de base. En général les calculs sont limités et étroitement liés à la méthode des Volumes finis, car cela est largement utilisé dans les codes de CFD commerciaux et les micro-échelles pouvant accueillir des modèles météorologiques.

Selon [Franke \(2010\)](#), les résultats des calculs dépendent spécifiquement de la résolution de la grille. Cette résolution doit être fine au niveau de la cible de recherche afin de capturer les phénomènes physiques importants comme les tourbillons. En outre, la grille ne devrait pas être trop inégale (étirement/compression), le rapport de dilatation entre deux cellules consécutives devrait être généralement inférieur à 1,3 ([Franke et al., 2010](#), [Tominaga et al., 2008](#)).

VI.4.13. Résolution de la grille pour des bâtiments complexes :

Selon [Tominaga \(2008\)](#), la résolution minimum de la grille devrait être fixée à environ 1/10 de l'échelle du bâtiment (environ 0,5-5,0m). Pour le cas de notre étude, la résolution utilisée est de 5,0m. Les grilles doivent être disposées de telle sorte que la hauteur d'évaluation soit dans l'intervalle de (1.5 - 5.0m, au-dessus du sol) ([Fig. VI.14/15](#)) ([Tominaga et al., 2008](#)).

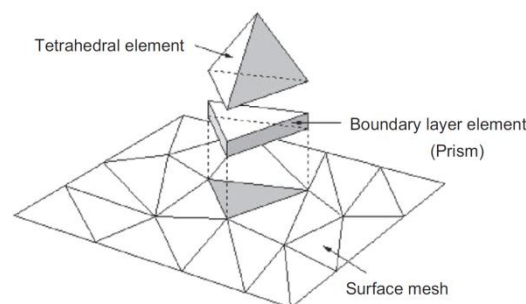


Fig. VI.14. Disposition des éléments de la grille près de la surface solide en maillage non structuré ([Tominaga et al., 2008](#)).

VI.4.14. Etude de la grille du domaine de calcul:

Selon [Franke \(2010\)](#), le résultat ne doit pas changer de manière significative avec des systèmes de grilles différentes. Aussi, il est recommandé que la sensibilité des résultats sur la résolution de maillage devrait être testée ([Franke et al., 2010](#)).

Une opération d'optimisation du nombre d'éléments de la grille est choisie pour le calcul du CFD. Cependant, cette opération est effectuée sur un point défini pour différents cas de géométries. Pour cela, nous avons appliqué une méthode **d'augmentation du nombre d'éléments** pour les calculs du CFD, (**Tableau. VI.5**). Trois cas d'étude de maillage sont testés. Nous avons mesuré pour chaque cas « le CO₂ libéré » dans l'air sur un point déterminé. Le résultat indique un écart entre les trois géométries, qui ne dépasse pas **0,5%**. Donc, nous retenons le premier cas d'étude comme maillage optimal pour le reste des simulations.

Tableau. VI.5. Etude de grille « Mesh study ».

	1^{ème} Cas	2^{ème} Cas	3^{ème} Cas
Nombres d'élément de la grille	1 410 659	1 806 920	2 019 379
Point choisi [<i>ppm</i>]: X, Y, Z (181, 192.1, 1.5) m	1189 ppm	1183 ppm	1193 ppm
Nombres d'itérations	97	177	110
PRÉCISION DE RÉSULTAT		0.5 %	0.3 %

VI.4.15. Génération du maillage « Mesh generation »

La solution d'écoulement d'air dans le domaine de calcul est obtenue par une méthode numérique de volumes finis. Le domaine de calcul de l'écoulement de l'air est discrétisé en volumes finis d'éléments en tétraèdres et des prismes dans la couche «wall layer» (**1 416 076** éléments). L'outil Workbench-CFD est utilisé afin de générer le maillage non structuré « unstructured mesh ».

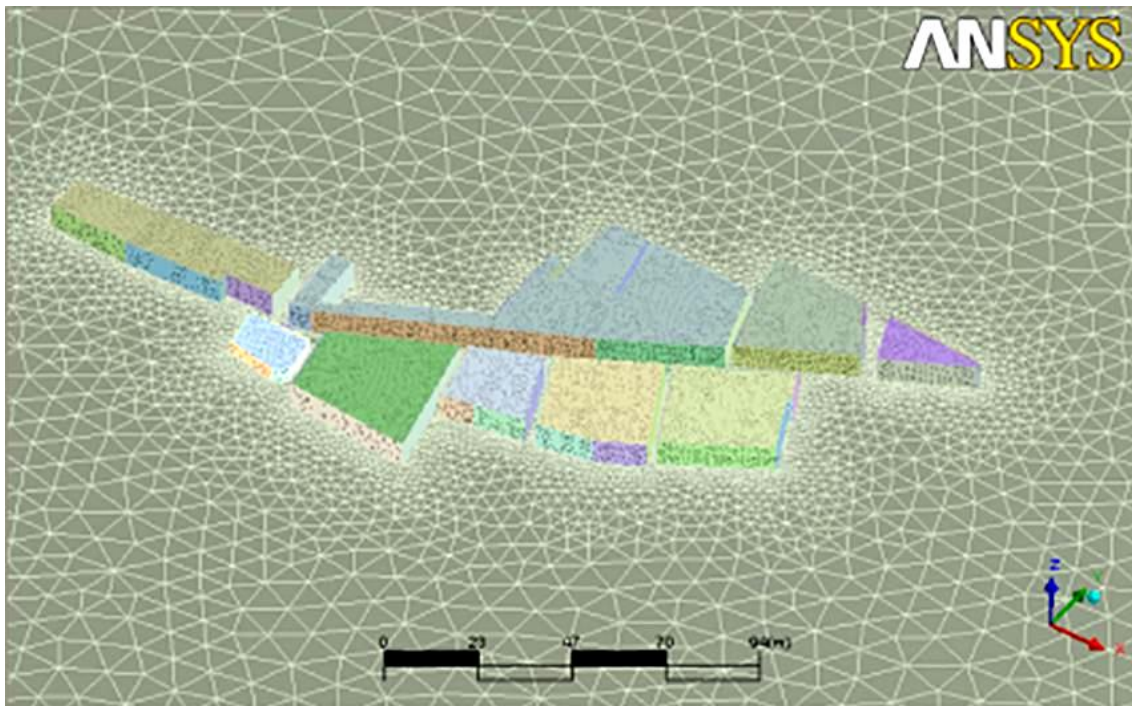


Fig. VI.15. Grille du domaine du calcul, estimé à **1.4** million d'éléments – **géométrie actuelle**

VI.4.16. Démarche du modèle « d'Ansys »

VI.4.16.a. Ansys, un modèle reconnu dans la mécanique de fluide

Ansys est créée par l'entreprise « **Ansys, Inc** », dont le siège est à Canonsburg en Pennsylvanie (États-Unis), elle est spécialisée en simulation numérique. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des volumes finis afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. L'entreprise possède de nombreuses filiales à travers le monde, notamment en Europe et en Asie, elle est souvent considérée comme une référence dans le domaine de la modélisation de fluide, Ansys-Cfx, récemment exploitée pour des études environnementales, a été choisi parmi d'autres logiciels puisque ce modèle utilise des méthodes mathématiques complexes favorables à des calculs précis de la couche limite urbaine (UBL) (Ansys, 2011).

VI.4.16.b. Ansys, un modèle exploité dans le domaine environnementale

Il est l'outil principal de nombreux chercheurs à travers le monde, notamment : **Van Hooff T, Bert Blocken** (Cf. **Chapitre IV.** Pollution urbaine et simulation par CFD), **Ted Stathopoulosb, Bert Blocken, , Jan Carmeliet, S.A. Silvester, I.S. Lowndes, D.M.**

Hargreaves, Konstantinos E. Kakosimos, Marc J. Assael, John S. Lioumbas, Anthimos S. Spiridis.

Aussi, il est exploité par de nombreux laboratoires de recherches et des universités:

- Building Physics and Systems, **Technische Universiteit Eindhoven Netherlands**.
- Department of Building, Civil and Environmental Engineering, **Concordia University, Canada**.
- Laboratory of Building Physics, Department of Civil Engineering, **Katholieke Universiteit Leuven, Belgium**.
- Process and Environmental Research Division, Faculty of Engineering, University of Nottingham, **Nottingham, UK**.
- Thermophysical Properties Laboratory, Department of Chemical Engineering, Aristotle University of Thessaloniki, **Thessaloniki, Greece**.

VI.4.17. Protocole de simulation

Des étapes ont été établies après consultation de plusieurs guides (**Fig. VI.16**). Ces étapes permettent d'accomplir la CFD du Canyon urbain de Ghardaïa, il s'agit donc d'une phase préparatoire avant l'établissement de la CFD. Cependant, la phase précédente est une opération de modelage de la configuration géométrique faite avec le logiciel Workbench-CFD. Nous citons à présent, les étapes générales du modèle Ansys-Cfx :

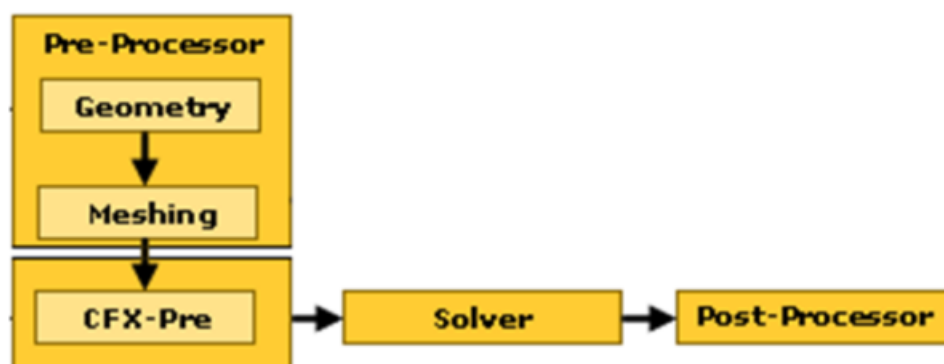


Fig. VI.16. Étapes générales du model ANSYS-CFX.

Etapes de la simulation en CFD (ANSYS-CFX) du Canyon urbain de Ghardaïa

- **Etape 1 : Création d'une variable supplémentaire « Create an Additional Variable »**

Pour commencer, créer une variable supplémentaire « Additional Variable » la nommer « **smoke** », et remplir les différentes cases comme indiqué ci-dessous (**Fig. VI.17**), ensuite définir le type de variable par : **volumétrique** et lui affecter l'unité de **[Kg/m³]**.

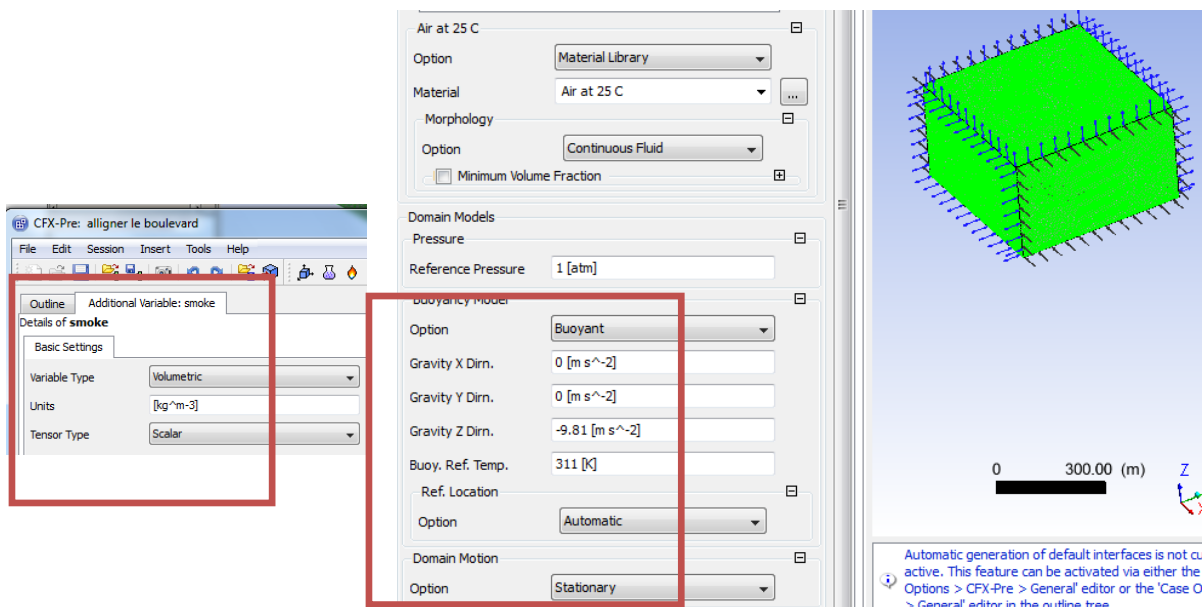


Fig. VI.17. Création d'une variable supplémentaire.

- **Etape 2 : Définir le domaine**

Pour définir le domaine, il convient de remplir les cases comme indiqué ci-dessous (**Fig. VI.18**).

- Suivant l'onglet : **Basic settings** surtout dans le sens de la gravité suivant l'axe : [**z = -9.81m/s**], la température initiale dynamique est : **311K** et le domaine suivant l'option : **stationnaire**.
- Suivant l'onglet : **Fluid models**, définir surtout : le type de transfert de chaleur par : « **Thermal Energy** », l'option de la turbulence par : « **k-Epsilon** », l'option de la radiation thermique par : « **Discrete Transfer** », et remplir enfin l'option de la « **Kinematic Diffusivity** » comme suit : **1.0E-05[m²/s]**.

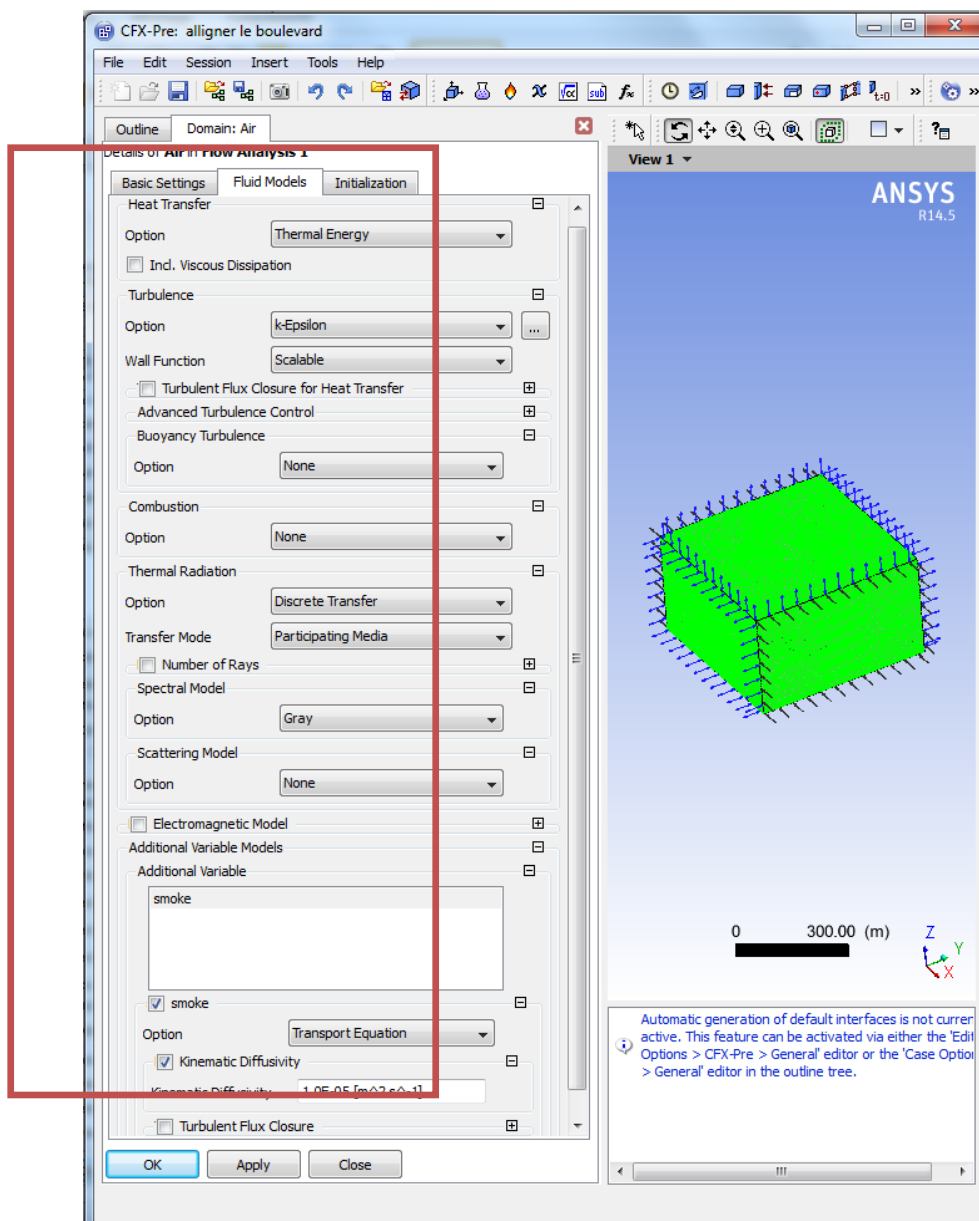


Fig. VI.18. Définir le domaine.

- **Etape 3 : Création d'un sous domaine**

Un sous-domaine doit être créé afin de définir les sources de pollution. Nous avons sélectionné donc les dix-huit voitures qui représentent les sous-domaines créés sous le logiciel Workbench-Cfx.

En suite, nous allons à l'onglet Sources (Fig. VI.19), cocher la case **smoke** tout en sélectionnant l'option : **Total Source**. Enfin la valeur de : **27.9 kg/m³** dans « **Total source** » parce qu'elle représente le total de pollution des dix-huit voitures.

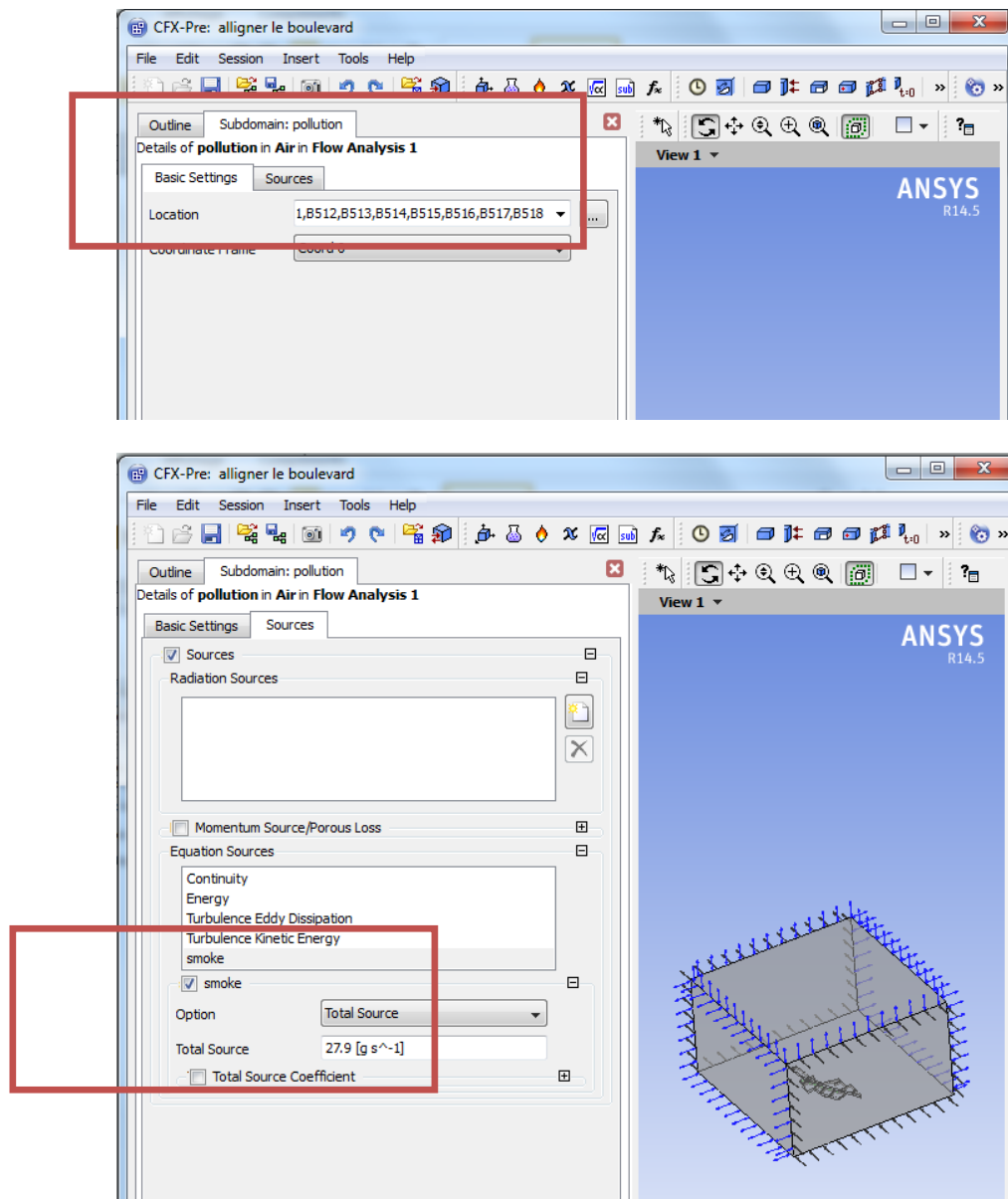


Fig. VI.19. Création d'un sous domaine.

- **Etape 4 : Création des conditions au limite « Create Boundary Condition »**

L'étape suivante consiste à créer des conditions aux limites du problème.

- a) condition de limite d'entrée « **inlet boundary condition** », en donnant le nom **in**, tout en remplissant les cases comme suit : les cases importantes sont (Fig. VI.20) : d'abord

la vitesse du vent estimé à **1.5m/s**, ensuite la température statique qui correspond à **311K**.

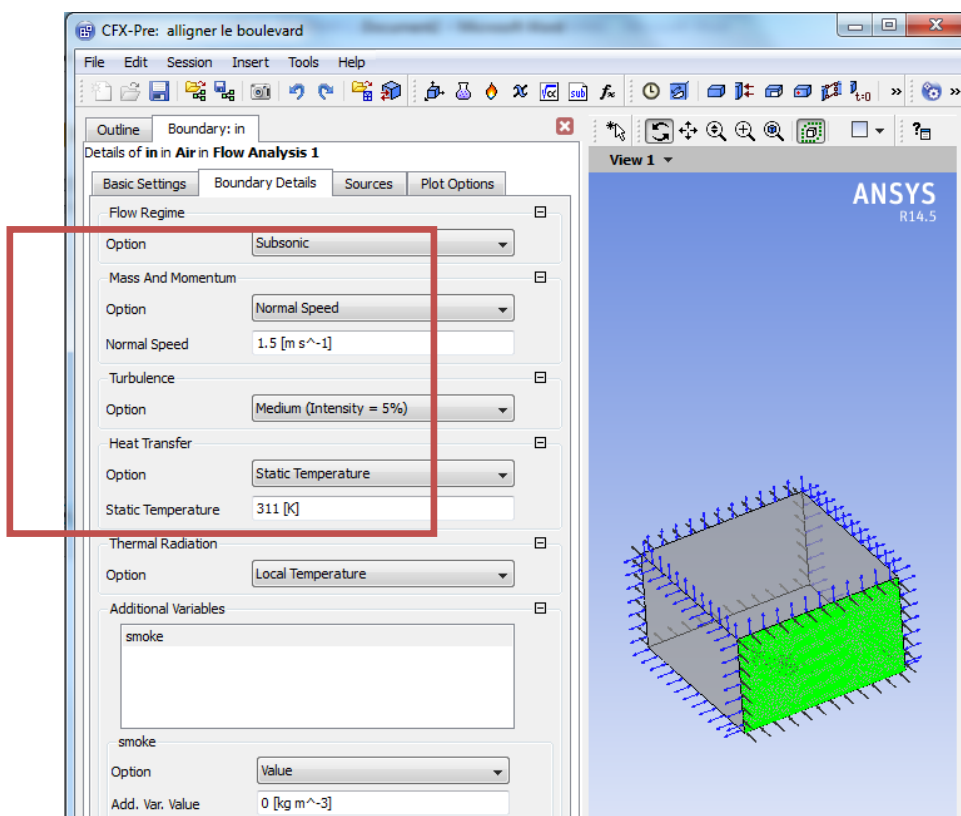
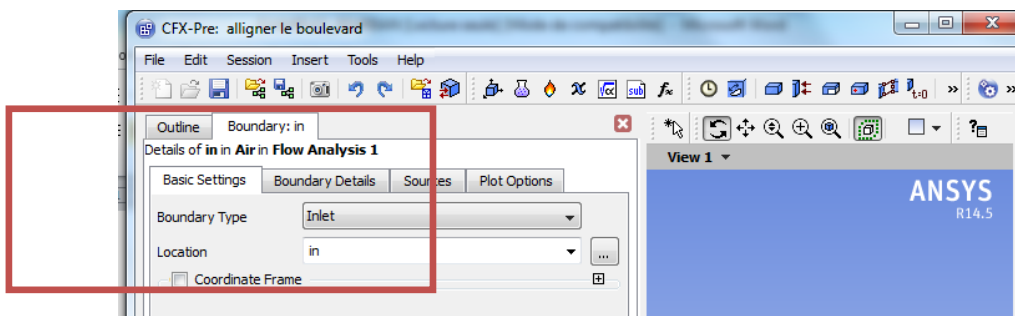


Fig. VI.20. Condition de limite d'entrée.

b) condition limite de sortie « **Outlet boundary condition** » (Fig. VI.21) :

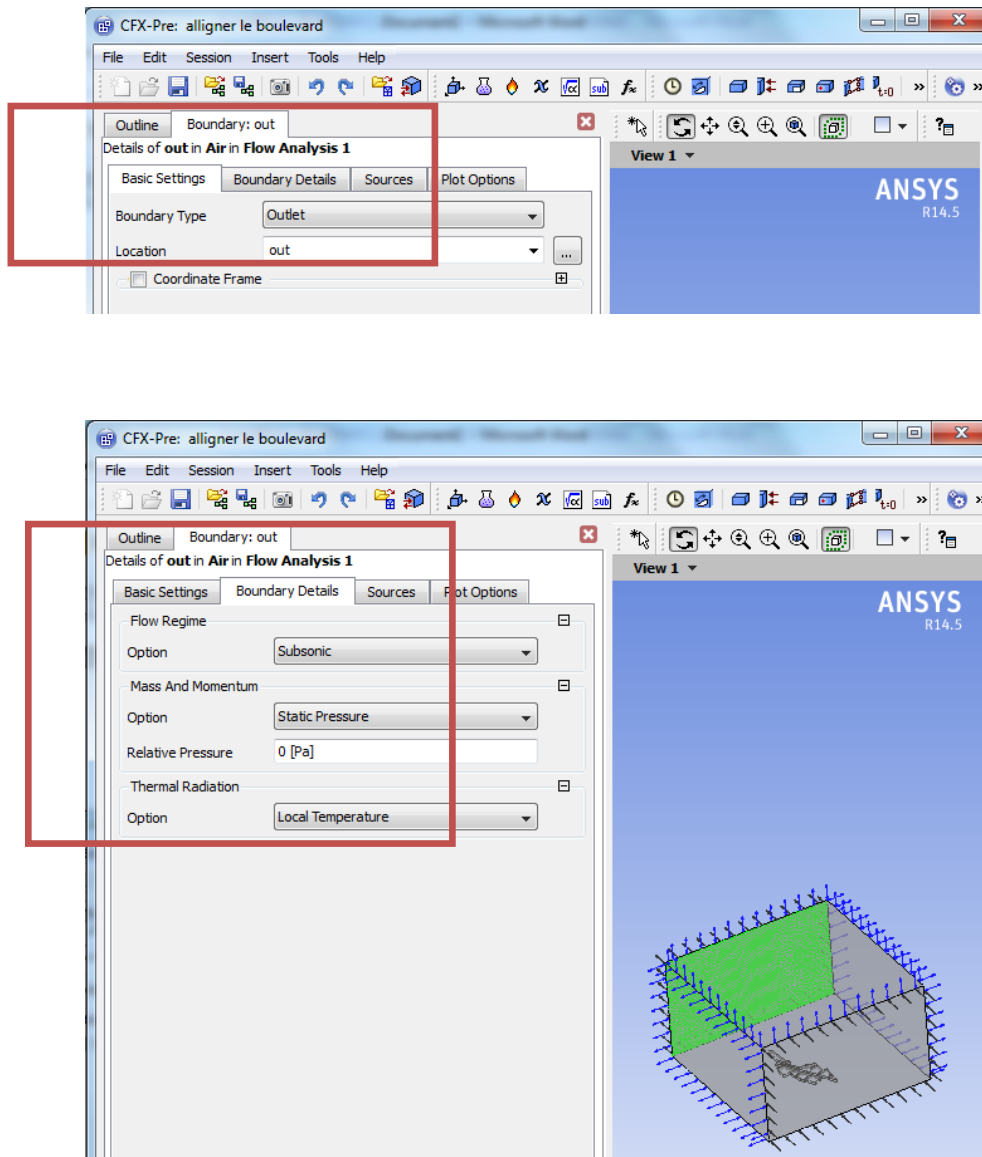


Fig. VI.21. Condition de limite de sortie.

- c) Condition Limite Ouvert : « **Opening boundary condition** » : l'essentiel (Fig. VI.22), est que la température à la limite ouvert doit être fixé à : **311K**

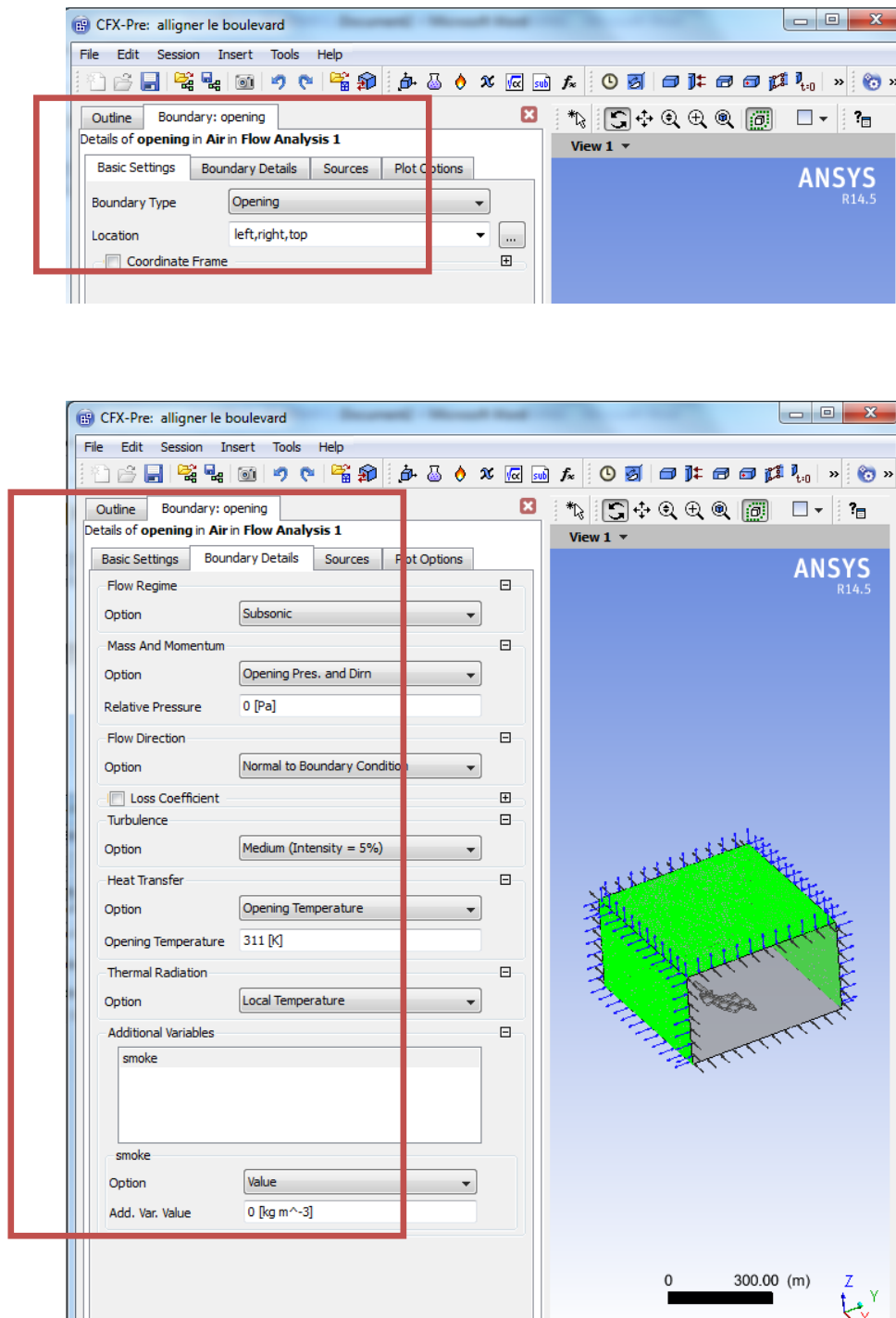


Fig. VI.22. Condition de limite ouvert « Opening boundary condition ».

- **Etape 5 : Création des valeurs initiales**

L'étape suivante consiste à créer les valeurs initiales, à introduire des données dans les cases comme indiqué dans la figure ci-dessous (**Fig. VI.23**), en remplissant particulièrement la case [**Turbulence Eddy Dissipation**] tout en sélectionnant l'option : automatique.

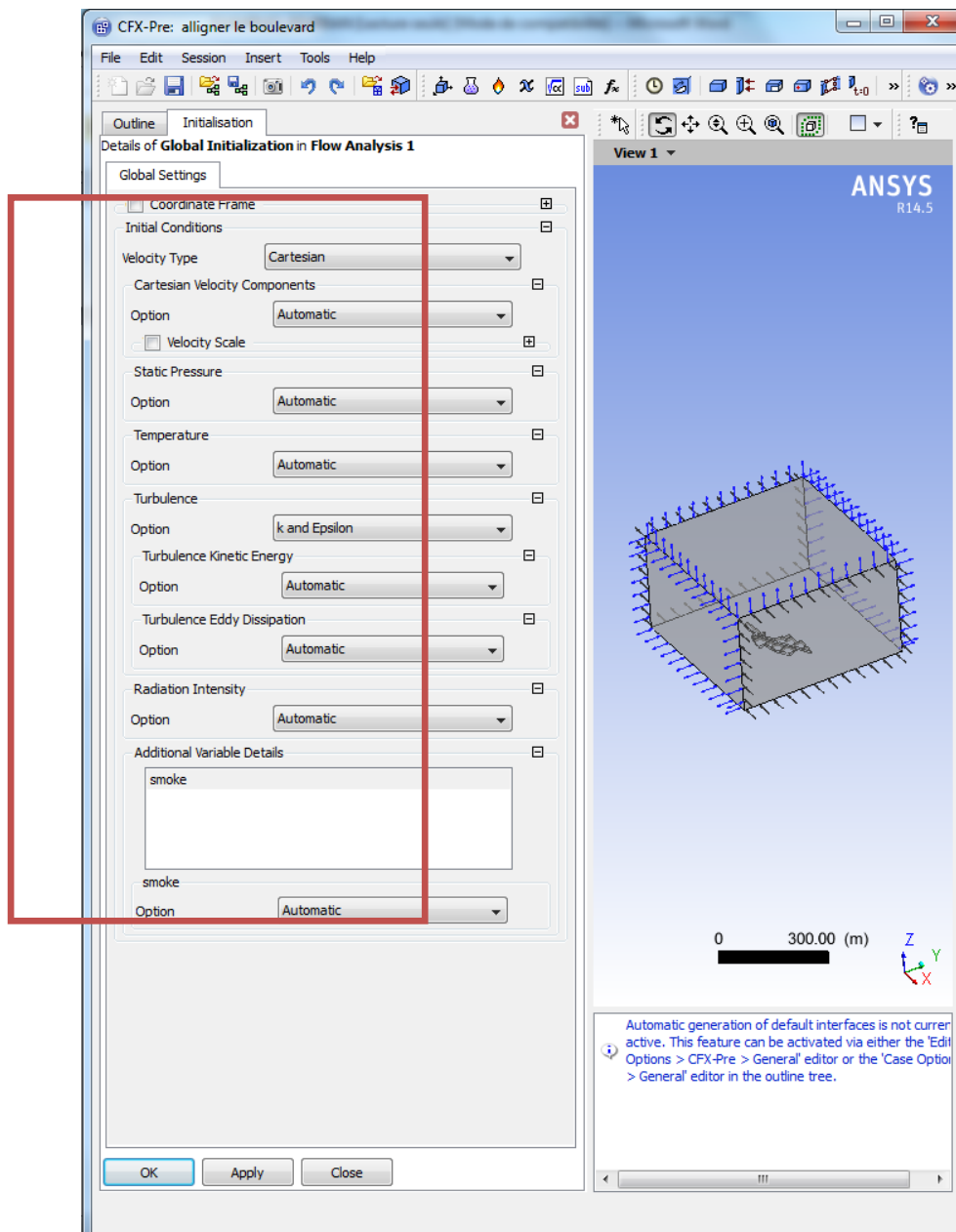


Fig. VI.23. Création des valeurs initiales.

- **Etape 6 : Critères de contrôle de solveur**

Dans cette étape le contrôle de convergence doit être limité à une valeur minimale d'itération et une valeur maximale d'itération en mettant par exemple les mêmes valeurs (**Fig. VI.24**).

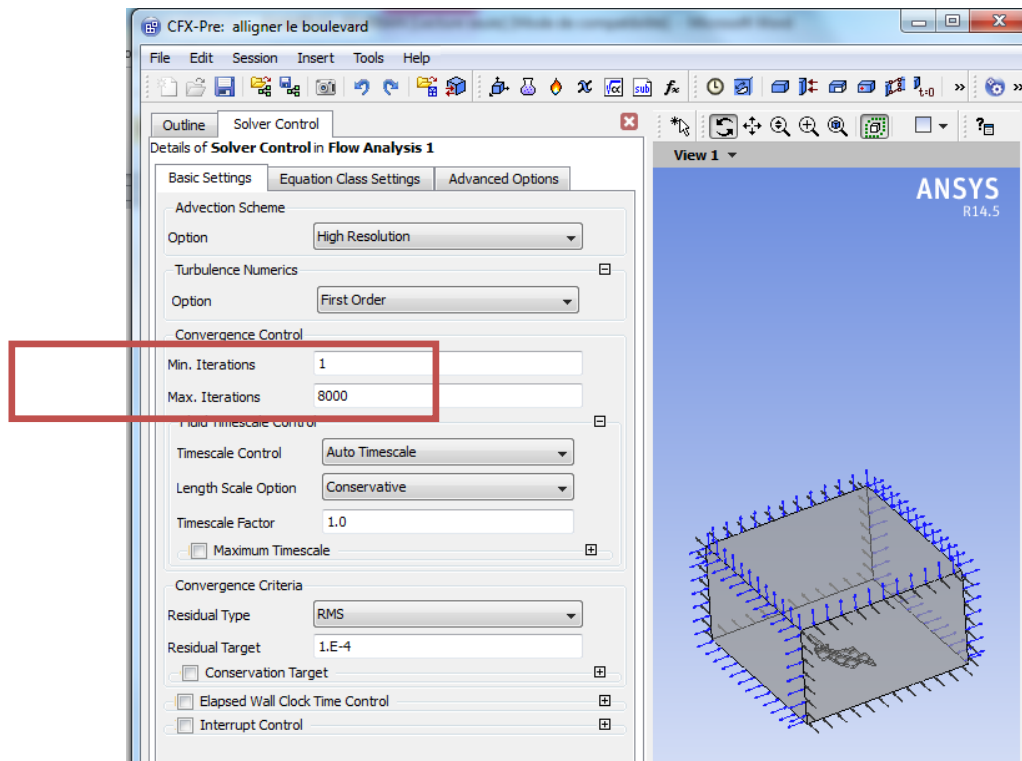


Fig. VI.24. Critères de contrôle de solveur

VI.4.18. Convergences des variables

Après une certaine durée de temps de calculs, tous les variables convergent vers la valeur définie préalablement, qui est la valeur 10^{-4} . A ce stade, les calculs s'arrêtent automatiquement. De ce fait, il faut confirmer que la solution ne change pas avec les calculs, aussi il faut voir que les variables requises sont : la vitesse et la concentration des polluants (**Fig. VI.25**).

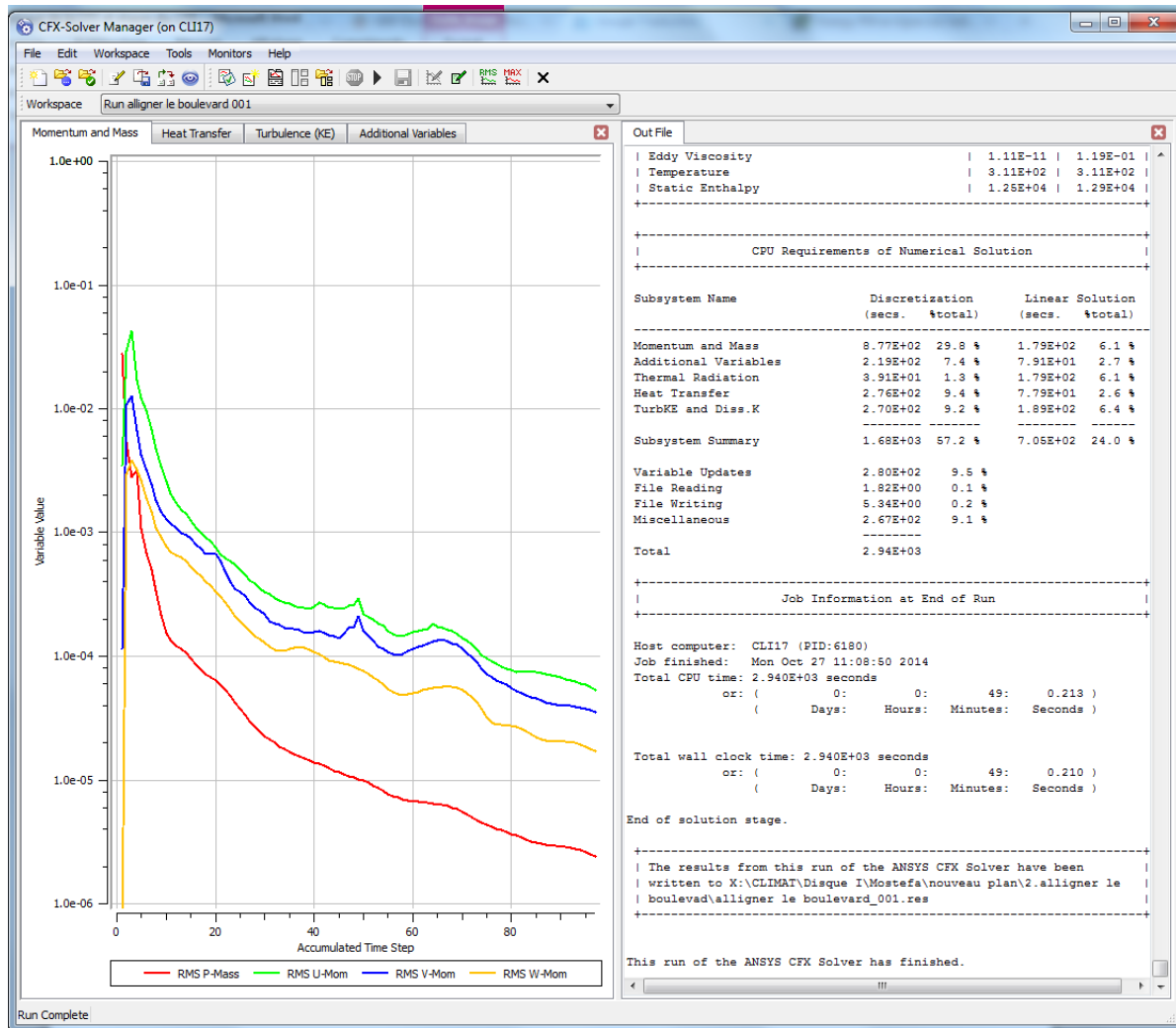


Fig. VI.25. Convergences des variables.

Intérêt de la méthodologie (expérimentale et partie CFD)

Dans l'étape précédente, nous avons présenté les différents instruments, qui ont permis de mieux caractériser le site choisi, le procédé consiste en une campagne de prise de mesures des différents paramètres microclimatique et d'ambiances extérieures, surtout la quantité du CO₂ qui règne dans le canyon urbain choisi. **Cette section de travail**, représente la deuxième méthodologie adoptée, elle concerne la mise en préparation du modèle CFD par l'usage de toutes les données utiles mesurées du canyon urbain afin de compléter le processus de la simulation. Dans le prochain chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus par les simulations tout en les comparant avec les mesures expérimentales.

Conclusion

La qualité d'intégration, aspect très particulier du ksar de Ghardaïa et de l'ensemble des pentapoles, est citée par de nombreux architectes et spécialistes. De plus, cette particularité d'intégration est une étude profonde qui combine plusieurs aspects, entre autres ; l'intégration parfaite au site topographique ; Insertion parfaite de la forme urbaine au paysage social, culturel et historique des Mozabites, **Benyoucef (2010)**, indique à propos de Ghardaïa que « *le lieu s'insère dans l'univers de l'homme et selon un processus fort complexe d'intégration, animé par les expériences collectives et individuelles ; le lieu, à force de voir s'y accumuler des événements finit par mémoriser et traduire l'histoire et la mémoire collectives* ».

Il est supposé que notre canyon a une aéraulique d'air et un écoulement de vent particulier à cause de nombreux facteurs, en l'occurrence, l'influence de la morphologie urbaine du Ksar, la conception étagée de la ville ainsi que la forme naturelle du terrain, aussi ce canyon est supposé être pollué en CO₂ parce qu'il connaît une activité humaine et commerciale très élevée.

La méthodologie adoptée a consisté d'abord à faire une série de campagnes de mesures sur tous les paramètres du microclimat et d'ambiances extérieures dans le but de recueillir au maximum, toutes les informations qui touchent notre site d'intervention.

La première méthodologie donc a été utilisée afin de prendre des mesures au niveau du Canyon urbain. Ces prises de mesures concernent la température, la vitesse du vent, l'éclairement et essentiellement le taux du CO₂ au niveau du Canyon urbain qui a été également relevé. Selon la norme **NBN EN13779** en matière de qualification du taux de CO₂ à l'urbain (**EEA, 2012**), la qualité de l'air dans le Canyon est faible, elle est classée comme une qualité d'air moyenne.

Pour cette raison **une deuxième démarche** a été déployée afin d'améliorer la qualité de l'air du Canyon urbain, cette partie alors, a consisté à exploiter les informations des mesures réelles afin de les utiliser ensuite dans le model de simulation en **CFD (3D)**. Cette modélisation nous a permit de visualiser en 3D le comportement de la dispersion du polluant **CO₂** à travers tous le parcours du canyon.

Les méthodologies modèles de **Franke et al (2010)** et de **Tominaga et al (2008)** ont été présentées afin de s'inspirer de leurs démarches, et de déployer ainsi une méthodologie de simulation par CFD en 3D spécifique pour notre cas d'étude.

La démarche de simulation par CFD en 3D adoptée pour l'étude de l'aérodynamique d'air au niveau du Canyon urbain de la ville de Ghardaïa a été présentée d'une manière détaillée, les étapes du modèle d'Ansys-Cfx pour le modelage et pour la simulation ont été également présentés.

La dernière partie de la méthodologie a été le sujet d'une restructuration urbaine minimale sur le Canyon urbain du Ksar de Ghardaïa, afin de répondre aux besoins contemporains des M'zab tout en conservant au maximum leurs patrimoine bâti, à travers cette problématique scientifique, la simulation par CFD en 3D a été exploitée et appliquée afin d'évaluer des configurations géométriques nouvelles et meilleures, l'objectif est de mieux optimiser la qualité de l'air dans le Canyon par des morphologie urbaines restructurées.

D'après les littératures scientifiques, qui confirment l'effet de la configuration urbaine sur l'écoulement d'air, des améliorations ont été proposées dans ce sens (**Proposition 1** et **Proposition 2**) avec l'utilisation du modèle Ansys-Cfx, de ce fait, le recours à la simulation a été une nécessité pour pouvoir proposer des solutions alternatives et de faire des optimisations.

References

Revues scientifiques

Edussuriya, P., Chan, A. & Malvin, A. 2014. Urban morphology and air quality in dense residential environments: correlations between morphological parameters and air pollution at street-level. *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 9, No. 1, 64 – 80.

EEA 2012. Monitoring CO₂ emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2012. European Environment Agency ed. Copenhagen K, Denmark.

Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H. & Carissimo, B. 2010. Best Practice Guideline For The Cfd Simulation Of Flows In The Urban Environment. *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*. Chapel Hill, North Carolina, USA.

- Hargreaves, D. M. & Wright, N. G. 2007. On the use of the k- model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 95, 355-369.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M. & Shirasawa, T. 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 1749-1761.
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K. & Gonzalez-Flesca, N. 2003. Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37, 155-182.

Sitographies

- Al-Khalidy, N. 2015. *Computational Fluid Dynamics Simulation of Turbulent Flows and Pollutant Dispersion Around Groups of Buildings* [Online]. Available: http://www.cham.co.uk/puc/puc_melbourne/papers/Paper1_Neihad.pdf [Accessed September, 6, 2015].
- Ansys, 2011. www.ansys.com [archive] (page consulté, le 8 avril 2011).

Livres de référence

- Neufert, E. 1999. *Les éléments de projets de constructions*, Paris.

CHAPITRE VII :

MICROCLIMAT DU KSAR DE GHARDAÏA ET DU CANYON URBAIN

*« Two main parameters to define a microclimate within a certain area are temperature and humidity. A source of a drop in temperature and/or humidity can be attributed to different sources or influences. Often microclimate is shaped by a **conglomerate of different influences** and is a subject of microscale meteorology » 1*

(1) Thomas bedford franklin (2013). *Climates in miniature: a study of micro-climate and environment*. Literary licensing, llc.

VII.1. Description du microclimat de ksar de Ghardaïa

VII.1.1. Introduction

Il est bien connu que la dispersion des polluants et la concentration de CO₂ dans un environnement urbain dépendent de conditions météorologiques, telles que: la température, la vitesse du vent et le rayonnement solaire....etc. (Aidaoui et al, 2014).

Le but de ce chapitre est de comprendre l'influence de la morphologie urbaine sur le microclimat et sur le confort thermique dans le ksar de Ghardaïa. Ce patrimoine qu'existait depuis des siècles, était considéré toujours comme une ville bien adaptée à son climat. Le Ksar est connu par sa forme compacte, cette disposition structurelle complexe modifie le microclimat à l'intérieur de la ville et le différencie par rapport à son environnement extérieur. Dans ce chapitre, tout d'abord, nous allons rechercher dans la littérature scientifique les différentes études et recherches qui ont été entrepris sur le ksar de Ghardaïa ou sur la région des M'zab pour identifier son microclimat (notamment les travaux de recherche de Kitous S (2012)). Dans la deuxième partie, nous allons présenter notre expérience d'analyse du microclimat sur la composante urbaine du Ksar de Ghardaïa, qui est le canyon urbain.

L'essentiel de notre étude s'effectue principalement sur ce canyon urbain qui a une grande importance vu sa mobilité humaine et son activité commerciale, cela par l'approche scientifique qui consiste à comparer nos résultats avec d'autres résultats émanant d'expériences faites par l'Office Nationale de Météorologie (ONM).

VII.1.2. Le climat général de Ghardaïa

VII.1.2.a. Profil des températures

La figure (Fig. VII.1) montre que le début du mois de juillet est considéré comme la période la plus chaude de l'année dans la région, les valeurs de températures pour ce mois collectées par l'ONM sur la région durant les années 2010, 2011 et 2012 sont comprises entre 29°C et 41°C. Les valeurs moyennes maximales de température de l'air pendant le jour dépassent les 40°C durant l'après midi aux environs de 15h, représentant le pic de la période d'insolation (Fig. VII.2).

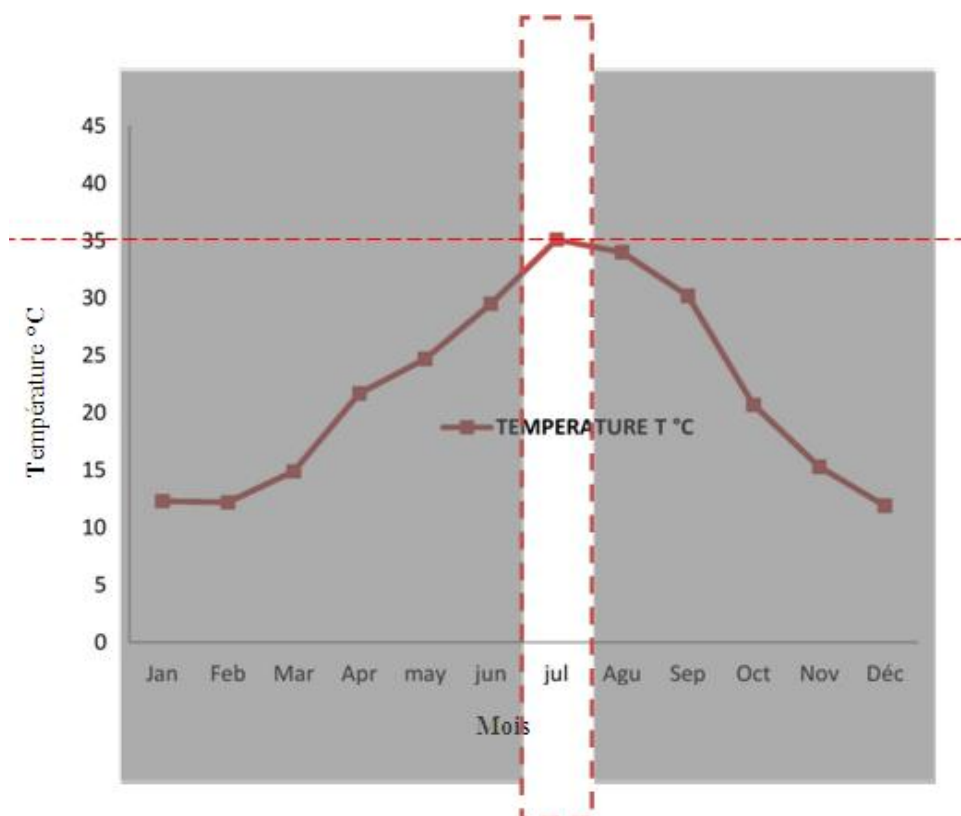


Fig. VII.1. Profil mensuel de la température de l'air. Le mois de Juillet étant le mois le plus chaud de l'année (ONM, 2012)

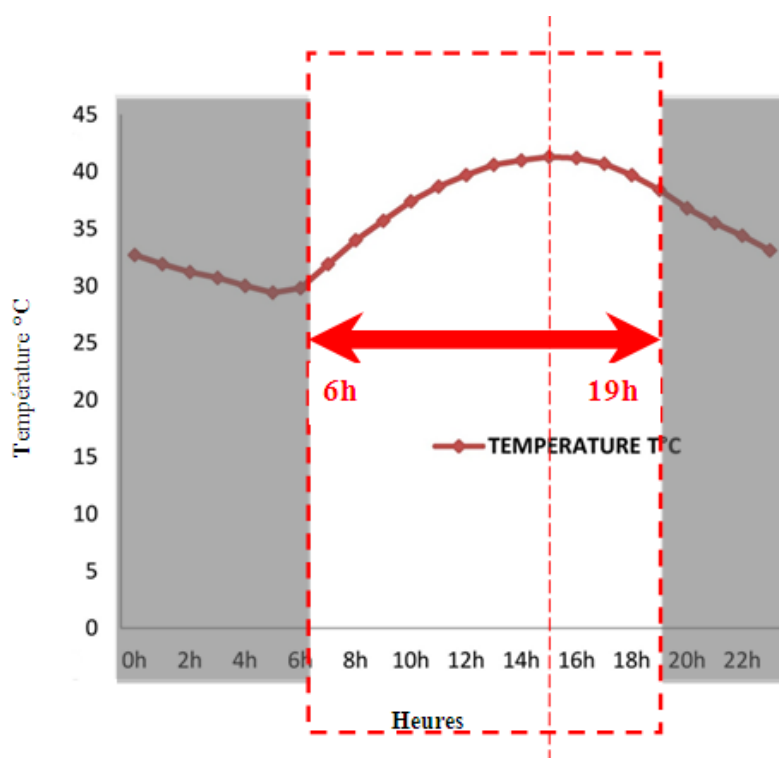


Fig. VII.2. Profil journalier de la température de l'air, T°C dépasse les 40°C durant l'après midi aux environs de 15h (ONM, 2012).

VII.1.2.b. Humidité relative

L'étude thermique de l'air se confirme après l'étude de la concentration de l'air en humidité. La ville de Ghardaïa est située dans une région de climat sec, dans le Sahara septentrional africain au centre du plus grand désert au monde, entre l'Afrique du Nord méditerranéenne, l'Afrique subsaharienne, l'océan Atlantique et la mer Rouge, couvrant plus de 8 millions de km² et recevant moins de **100mm** par an en pluviométrie (Iarousse, 2015).

Ghardaïa a un climat chaud et sec, cette nature influence considérablement l'intensité de l'îlot de chaleur urbain et le confort thermique de l'air. Les concentrations en humidité relative dans la région pendant le mois de juillet (2010-2012) sont les plus bas de l'année, les valeurs sont de l'ordre de **16%** à **31%**, ces valeurs d'humidité relative de l'air n'offrent pas le confort thermique escompté (Fig. VII.3).

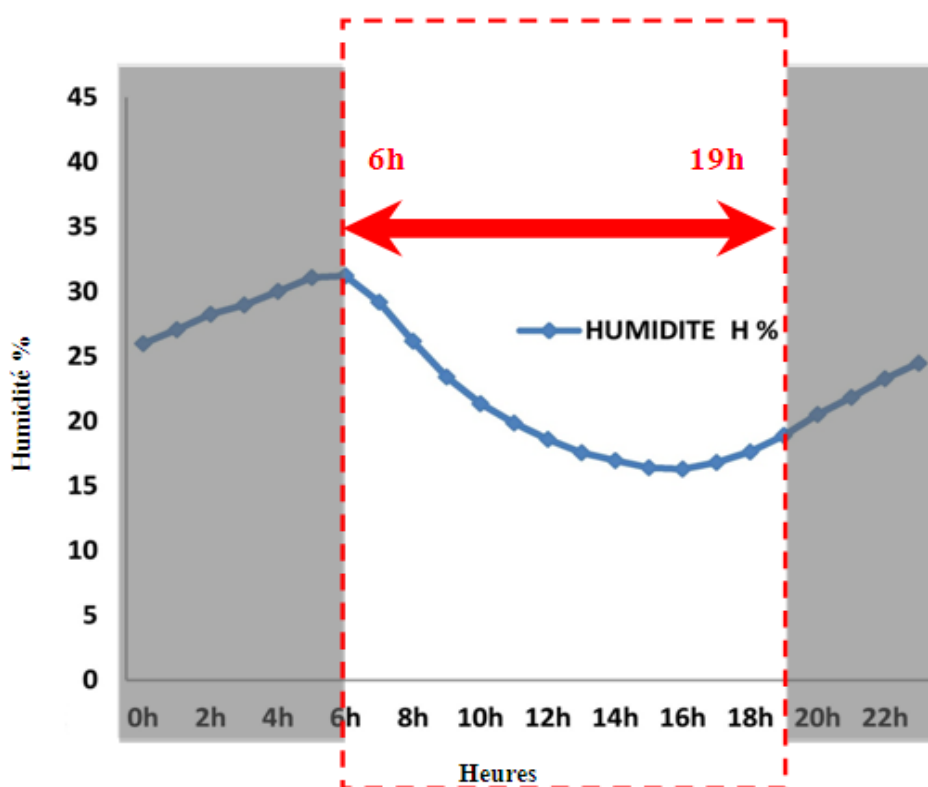


Fig. VII.3. Profil journalier de l'humidité relative de l'air, H% variée de 16% à 31% (ONM, 2012).

VII.1.2.c. Vitesse et nature des vents

Selon Dr. Benyoucef, la région de Ghardaïa subit des vents de différentes directions suivant les saisons, au même temps ces vents sont variables en matière de vitesse et en matière d'apport thermique, nous avons donc :

- Les vents qui soufflent de la direction Nord-Ouest durant l'hiver, sont des vents froids et relativement humides.
- Les vents en provenance du Nord-est durant l'été, ont une vitesse forte accompagnée d'une chaleur élevée.

La région de Ghardaïa subit des vents violents (**16m/s** et plus) qui soufflent à environ **20** jours par an à partir du **Sud-est** en particulier durant Mars, Avril et Mai (**Benyoucef, 2010**).

VII.1.3. Analyse climatique du Ksar de Ghardaïa, étude faite par **Kitous S (2012)**

Un groupe de chercheurs de l'Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme (EPAU), a mené une étude sur la ville de Ghardaïa et sur son Ksar, cette étude peut mettre en évidence l'effet de la morphologie urbaine et la topographie sur l'environnement thermique global du ksar de Ghardaïa et sur les conditions de confort qui en découlent.

VII.1.3.1. Conditions climatiques au-dessus des toits

Selon des mesures effectuées en aout **2006** Aux différents versants du ksar de Ghardaïa. Premièrement, la radiation solaire globale horizontale est similaire en hiver comme en été, l'intensité de l'énergie globale peut atteindre les valeurs **690** à **750 W/m²** en hiver et **895** à **910 W/m²** en été (**Kitous S, 2012**). Deuxièmement, la température de l'air au-dessus du toit a été variée entre **22°C** et **42°C** avec des amplitudes journalières de l'ordre de **10°C**. En hiver, par contre la température au dessus du toit fluctue entre **4** et **19,5°C** avec des amplitudes journalières de **10°C** à **15°C**.

Troisièmement, **l'effet de la topographie** du site influence la température de l'air et de la surface, par rapport aux degrés d'expositions des versants à la direction du vent et à l'angle d'incidence au soleil. Ces dispositions déterminent les conditions thermiques dans un site urbain (**Kitous S, 2012**) :

- L'orientation des versants influence l'ensoleillement sur les rues. **En hiver**, sous les conditions des vents forts et froids soufflant de l'ouest, les rues du versant nord sont moins exposées au rayonnement solaire direct, le versant nord est considéré comme une zone d'accélération du vent (vitesse moyenne **5.50 m/s**), il enregistre des températures les plus fraîche de Ksar (**Tmax 13.3°C**). Par contre les rues sous le vent du versant sud (vitesse moyenne **1.50 m/s**) sont soumises aux radiations

solaires et enregistrent des températures de l'air et de surface les plus élevées (T_{max} $15.6^{\circ}C$).

- L'exposition au vent des versants nord et sud influence l'intensité de la température au niveau des toits, le vent agit donc sur les températures de l'air et sur les surfaces des rues face au vent. Selon des mesures effectuées en aout **2006** sur Ksar de Ghardaïa, on peut remarquer un écart de température de $2^{\circ}C$ pendant les heures les plus chaudes de la journée entre le versant nord, lorsque ce versant face au vent présente une vitesse d'air moyenne de **3m/s** contre la vitesse moyenne de **2m/s** au niveau du versant sous le vent.

VII.1.3.2. Caractéristiques microclimatique

VII.1.3.2.a. Le rayonnement solaire

Par effet de pente

Durant l'hiver, sur le versant nord du Ksar de Ghardaïa, les rues de prospect **3** reçoivent plus de **24%** de rayonnement solaire incident que captent les rues du versant sud à cause de l'angle solaire. Pendant l'été, en raison de la hauteur du soleil, l'effet d'orientation est négligeable. L'énergie globale reçue dans les deux versants est identiques et relativement importante (**Fig. VII.4**).

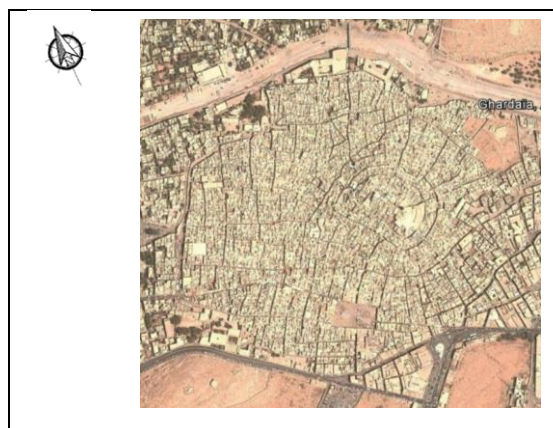


Fig. VII.4. Photo satellitaire du Ksar de Ghardaïa ([Google map, 2015](#))

Par effet du prospect (H/W)

Pendant l'été, le soleil haut sur l'horizon permet une pénétration maximale du rayonnement solaire même pour les rues les plus étroites ([Arnfield, 1990](#)), donc les rues de prospect de **3** reçoivent **70%** d'énergie globale de plus que celle reçue sur le toit. Pendant l'hiver l'orientation du versant et le profil de la rue influence le rayonnement solaire incident.

VII.1.3.2.b. Température de l'air

Les aspects géométriques d'une rue et leur orientation peuvent réduire ou amplifier les températures selon sa latitude ([Arnfield, 1990](#)). Cependant, les apports radiatifs dans les rues canyons dans le ksar de Ghardaïa sont fortement imprégnés des conditions au-dessus des toits et dépendent essentiellement de l'exposition des versants par rapport au soleil, plus exactement par ; l'orientation des rues par rapport au soleil, la géométrie des rues et les matériaux de construction utilisés.

Ces effets géométriques des rues sont le résultat de l'interaction de deux phénomènes thermiques pour une morphologie urbaine, qui sont la répartition des zones ombrées/ensoleillées et du champ radiatif solaire et thermique qui en découlent.

Effet de la topographie du site sur la température de l'air

En été, en absence du vent, la température de l'air dans le ksar est relativement homogène indépendamment de l'orientation des versants, du profil de la rue et de son orientation, en raison des caractéristiques géométriques solaires (hauteur maximale du soleil : 81°). En l'occurrence, avec la présence du vent d'une vitesse de 1.6 m/s (au moment où le versant sous le vent n'excède pas 0.9 m/s) sur le versant face au vent (nord) la température est réduite de 1.5 à 2°C . Au cours de la nuit en revanche, avec une vitesse moyenne de 3 m/s sur le versant nord, la température est réduite jusqu'à 2.8°C .

En hiver par contre, en raison du faible altitude solaire, les températures pour les deux versants Nord/Sud (**Ubac/Adret**) sont fortement contrastées. Pendant cette période, le versant nord du ksar subit du vent froid de direction Nord et de direction ouest et profite d'énergie globale moins trois fois que le versant sud, donc ces dispositions baissent les températures de 1 à 2°C par rapport au versant sud.

Effet thermique du vent selon sa nature

La température de l'air baisse avec l'augmentation de la vitesse du vent ([Guyot, 1997](#)). Cette théorie est visible dans le Ksar de Ghardaïa pendant le soufflage du vent frais durant l'hiver et l'été.

En été, selon des mesures effectuées sur le Ksar de Ghardaïa, la diminution de la température s'effectue seulement sous la nature du vent, c'est ainsi qu'en période de sirocco (vent fort, chauds et secs de direction Sud) avec une vitesse faible du vent de 0.88 m/s , le stress thermique peut atteindre la valeur de 45°C . Par contre, la direction du vent Est offre une température plus fraîche (de -4.5°C) pendant les heures les plus chaudes sous une vitesse faible de 0.93 m/s .

En hiver, les vents froids de direction Ouest sont à l'origine d'un important refroidissement.

Effet de la morphologie urbaine

Par effet d'orientation

Pendant l'été et sous les conditions des vents faibles, la différence entre les rues d'orientation Est-ouest et Nord-sud induits présente un écart de 0.5°C à 1°C seulement à cause de l'angle de l'altitude solaire d'été (forte angle) et la forte compacité des rues qui favorisent l'effet du piégeage radiatif ([Meir et al., 1995](#), [Grundström et al., 2003](#), [Ali-Toudert et al., 2004](#)).

Pendant l'hiver, la forte compacité des rues et l'angle de l'altitude solaire d'hiver (faible angle), les rues sont pratiquement à l'ombre, toute la journée quelque soit leurs orientations.

Par effet du prospect (H/W)

En été, l'interaction entre la géométrie des rues et la température de l'air devient plus complexe, l'écart de température entre les différentes rues canyons au cours de la journée n'est pas significatif. D'après les essais appliqués sur les différentes rues du Ksar de Ghardaïa, l'évolution de la température commence à partir de **6H** avec des températures entre **29- 29.5°C** pour atteindre des températures maximales **38-38. 5°C** aux environs de **15H**. Au-delà, la température de l'air décroît graduellement jusqu'à le petit matin (**6H**). Une étude comparative entre une rue profonde (de prospect **H/W =5.5**) et l'esplanade du marché (espace ouvert et dégagé **H/W= 0.11-0.21**) donne un écart de température de **1.5°C** aux environs de **15H**. **En hiver**, l'écart est moins significatif, il donne des valeurs de **1.5°C** à **2°C** entre une rue profonde et la place du marché.

Par effet du passage couvert.

Pendant la journée, la différence d'énergie globale entre les surfaces des rues dégagées et les passages couverts crée une turbulence croissante induite par les surfaces radiées (Nunez et Oke, 1977), l'écart de température peut atteindre les valeurs de **2.8°C** à **15H**.

VII.1.3.2.c. La température de surface

Le comportement de la température des surfaces par rapport à l'écoulement de l'air est fluctuant au cours de la journée, les taux sont en concordance au petit matin et à la nuit, par contre au milieu de la journée l'écart s'amplifie, ces variations sont indépendantes de l'orientation des versants, mais elles peuvent se corrélérer avec les variations géométriques.

En été, en termes de valeurs, en raison de la faible altitude solaire du petit matin, les températures des surfaces peuvent atteindre les valeurs de **30** à **39°C** avec un écart de **2°C** entre une façade exposée et une façade à l'ombre. Au milieu de la journée avec une altitude solaire maximale de **81°C**, les températures de sol peuvent atteindre les valeurs de **54°C** (Arnfield, 1990).

En hiver, avec le faible altitude solaire et la compacité des rues, les températures de surface mur et sol fluctuent en moyenne entre **10** et **18 °C**, l'écart de températures est différent d'une rue canyon à une autre selon son orientation et selon sa géométrie.

VII.1.3.2.c.1. Effet de la topographie sur la température des surfaces

Entre le versant nord et le versant sud, l'écart de température de surface fluctue entre les valeurs de **2°C** à **4°C**, lorsque les températures de mur et de sol sont de l'ordre de **16** à **18 °C**

sur le versant Sud, elles avoisinent les valeurs de 14°C sur le versant Nord. Il est important de signaler que l'effet de la température de l'air et la température des surfaces sont influencés par les vents dominants.

VII.1.3.2.c.2. Effet de la morphologie urbaine sur la température des surfaces

Effet de l'orientation des rues

L'étude comparative basée sur des mesures sur terrain indique que les orientations E/O et NE/SO sont plus exposées au surchauffe pendant le pic de chaleur de l'été (à 15H) (Arnfiel, 1990, Prearlmutter et al, 1999/2006/2007, Bourbia et awbi, 2004).

Au début de la journée et à la fin de la journée, le comportement de surchauffe est beaucoup plus présent dans les rues d'orientation Est/Ouest que dans les rues d'orientation Nord/Sud (Meir et al., 1995). A 15H, pendant la période l'été (le surchauffe), les canyons d'orientation Est/Ouest atteignent les valeurs maximales de 52-54°C. Tandis que dans les rues d'orientation Nord/Sud et NO/SE les températures de surfaces n'excèdent pas le seuil de 42°C. Pratiquement, les surfaces horizontales d'orientation Nord/Sud reçoivent que 17% de rayonnement solaire, en revanche, les surfaces horizontales d'orientation Est/ouest reçoivent des taux de rayonnement de valeurs de 60%. En ce qui concerne les températures de surfaces, il s'est avéré que pendant l'été les murs dans les rues d'orientation Est/Ouest sont de 2 à 4°C supérieurs à celle des rues Nord/Sud, en hiver, l'effet d'orientation est cependant moins marqué.

Effet du prospect H/W

En été, vue l'importante de l'altitude solaire, une étude comparative à été faite pour deux Canyons d'orientation NE/SO, le premier est considéré comme profond (H/W= 5.5), par contre l'autre large (H/W=2.9), l'écart de température de surface des murs et des sols enregistré entre ces deux rues, est de l'ordre 3°C et 10°C. D'une manière globale, l'intensité dépend de l'orientation des rues, aussi de l'altitude solaire (important durant l'été), cette altitude solaire favorise une radiation directe sur la rue d'orientation Est/Ouest même les plus compactes (Arnfiel, 1990, Grundström et al, 2003, Bourbia et awbi, 2004, Ali-Toudert et al, 2005, Prearlmutter et al, 2006).

En hiver, avec le faible altitude solaire l'amplitude des températures de surface (mur/sol) diminue avec l'augmentation du rapport de prospect (H/W) (Arnfield, 1990).

Effet du passage couvert

En hiver, selon une étude comparative appliquée sur Ksar de Ghardaïa entre un passage découvert et un passage couvert, le résultat présente un écart de 5°C.

En été en revanche, les contrastes thermiques sont beaucoup plus importants et confirment des écarts d'intensités thermiques maximales des murs et des sols pour des valeurs respectifs de l'ordre **14°C** et de **20°C**.

VII.1.3.2.d. Température moyenne radiante

Est un taux composé par plusieurs paramètres représentés dans la formule suivante :

$$T_{mrt} = [(1.10 * 10^8 V_a^{0.6}) / \epsilon D^{0.4} * (Tg - Ta) + (Tg + 273)^4]^{(1/4)} - 273 \quad (\text{Equ.VII.1})$$

D'où : $T_{mrt} = \text{°C}$

V_a = Vitesse d'air (m/s)

D : Diamètre du globe (0.15m)

ϵ : Emissivité (0.95)

Tg : Température globe (°C)

Ta : Température d'air (°C)

Selon une étude comparative entre plusieurs points de mesures, ce taux peut fluctuer au cours de la journée entre **36°C** et **52°C**, avec un écart qui varie entre **7.5°C** et **12.5°C** selon la géométrie de la rue et son orientation.

L'effet de la topographie du site sur la température moyenne radiante est identique à celui observé sur les températures de l'air et de surface.

L'effet de la morphologie urbaine sur la température moyenne radiante. Concernant l'effet de l'orientation des rues, selon des mesures effectuées sur terrain, l'orientation des rues Canyons N/S et NO/SE les protège mieux contre la température moyenne radiante, elle enregistre une valeur ($T_{mrt} = 46\text{°C}$) au environ de midi. L'orientation E/O et NE/SO en revanche, enregistre des valeurs maximales de l'ordre de **48°C - 50°C** aux environs de **15H**.

Pour **effet du prospect (H/W)** sur la température moyenne radiante, comme pour la température de l'air et la température des surfaces, des expériences ont été faites sur deux rues de canyon avec deux prospects, l'une est profonde (H/W= **5.5**), l'autre est plus large avec un prospect (H/W= **2.9**), l'écart thermique est estimé maximal à **15H**, avec une magnitude entre

10°C à 14°C, donc le piéton est moins exposé aux radiations solaires seulement dans les rues canyon profondes de grand prospect.

L'effet du passage couvert donne un avantage pour des températures moyennes radiantées très basses de l'ordre de 5°C à 14°C, moins qu'aux espaces découverts ou la place du marché, ces valeurs ont une intensité maximale fluctuante pendant la journée de 29°C à 52°C. Les résultats soulignent l'avantage des passages couverts qui servent de protection horizontale pour le confort des piétons.

VII.1.3.2.e. Confort thermique dans les rues de ksar

La thermique physiologique équivalente **PET** est un indice thermique en fonction de la température de l'air T_a (°C), la pression de vapeur V_p (Pa), la vitesse d'air V (m/s) et la température moyenne de rayonnement T_{mrt} (°C), cet indice est mesuré par une équipe de chercheurs pendant le mois de **Juin 2003**, il est mesuré au milieu d'un canyon urbain à une hauteur de **1.5m**.

Pendant la nuit et au petit matin, des similitudes entre les différents points de mesures sont observées, le **PET** calculé est de **27.5 à 31.9 °C**, les écarts d'une rue à une autre sont de magnitude très faible. [*le PET théorique de la zone de confort est supposée à 33°C (Ahmed, 2003)*], pour tous les points de mesures des rues indépendamment de leurs géométries et orientations. Pour la période de midi et à **15H** en revanche, le **PET** a largement dépassé la zone du confort, il est d'ordre de **37.5°C à 45°C** respectivement. Cet indice de **PET** est corrélé avec l'indice du T_{mrt} qui fluctue selon la géométrie d'une rue canyon et de son orientation.

Effet de la topographie du site sur le confort thermique

Pendant l'été, l'altitude solaire est presque à la verticale (**81°**) ce qui rend l'effet de topographie presque nul.

Effet de la morphologie urbaine sur le confort thermique

Par effet d'orientation des rues, l'orientation N/S et NO/SE favorise une activité de mobilité humaine mieux que les autres orientations (Prearlmutter et al, 1999, Bourbia et awbi, 2004, Ali-Toudert et al, 2005, Prearlmutter et al, 2006, Prearlmutter et al, 2007), grâce à l'effet d'ombrage assuré par les deux parois des rues canyons pendant le matin et l'après midi, sauf à midi, en raison de l'angle maximale de l'altitude solaire.

Par effet de prospect (H/W), une étude comparative entre deux rues canyon de prospect différent, l'une a un rapport (H/W= 5.5) l'autre a (H/W= 2.9), le PET calculé pour les deux cas donne avantage à la rue avec (H/W=5.5), cette rue offre plus d'ombrage pour les piétons et offre des niveaux bas de stress thermique de 5°C à 8°C.

Par effet du passage couvert : l'indice du PET calculé dans le passage couvert est de l'ordre 28°C à 35°C le long du cycle journalier, 14°C d'écart de température est enregistré entre un passage couvert et un passage découvert. Ces valeurs sont toujours liées étroitement aux géométries des rues et à leurs orientations. Il est bien noté que parfois le stress thermique peut être amplifié ou réduit dans les passages couverts selon les conditions de ventilation des rues canyons (Prearlmutter et al, 1999, Grundström et al, 2003, Bourbia et awbi, 2004, Ali-Toudert et al, 2005, Prearlmutter et al, 2006, Prearlmutter et al, 2007).

Effet de la ventilation urbaine sur le confort thermique

Le vent augmente la sensation du confort thermique et joue un rôle de refroidissement et de réduction du stress thermique au niveau des rues canyons. Des expériences de mesures prouvent l'intérêt du vent, mais par des différents degrés selon l'emplacement : radié ou non (Prearlmutter et al, 1999/2006, 2007, Ali-Toudert et al, 2005).

VII.1.4. Intérêt de l'étude globale de microclimat de Ghardaïa

L'étude initiale et générale sur le microclimat de la ville de Ghardaïa a indiqué une influence apparente de la température de l'air et d'humidité de la région sur le niveau du confort thermique, spécialement pendant le mois de juillet (mois le plus chaud de l'année, selon les mesures de l'ONM), avec ses températures moyennes maximales qui dépassent les 40°C, et ses humidités relatives moyennes les plus basses de l'année avec 17% en moyenne. Ces taux exceptionnels réduisent d'une manière substantielle le confort thermique escompté.

L'étude suivante est une présentation du travail du chercheur Kitous. S (2012), cette recherche approfondie a consisté en une étude combinatoire entre le microclimat du Ksar de Ghardaïa avec sa morphologie urbaine spécifique, elle a permis de mettre en évidence l'effet de la topographie du site, l'effet de la morphologie urbaine et l'effet thermique du vent sur l'aérodynamique de l'air, on y distingue principalement les points suivants :

- **Effet de la topographie**

L'exposition des versants topographiques par rapport aux radiations solaires et par rapport à l'aéroulque de l'air détermine les conditions du confort thermique dans les rues canyons du Ksar de Ghardaïa.

- L'exposition des versants par rapport aux radiations solaires détermine les niveaux d'ensoleillement des Canyons urbain. **En hiver** avec une faible altitude solaire, le versant nord est moins exposé aux radiations solaires. Pour le versant sud en revanche, les rues Canyons sont mieux exposées.
- L'exposition des versants par rapport aux vents dominant détermine les niveaux des températures de l'air à l'intérieur des rues Canyons. Les vents froids de direction Ouest et Est diminuent le stress thermique, les vents de direction Sud (vents chaud/Sirocco) accentuent le stress thermique.

- **Effet de la morphologie urbaine.**

Dans une morphologie urbaine, l'effet de la géométrie d'une rue, son orientation et passages couverts peuvent modifier le confort thermique d'une manière considérable :

Effet de géométrie d'une rue : De nombreux chercheurs tel que : [Eliasson et al \(1996\)](#), [Ali-Toudert et al \(2004\)](#), ont indiqué que la température de surface est plus importante que la température de l'air parce que la température de surface interagit avec les radiations solaires, elle accentue ou aplanit les températures de l'air par rapport à l'exposition des surfaces au soleil. Donc, augmenter le prospect (**H/W**) et mettre les rues à l'ombre est une bonne pratique contre toutes expositions aux radiations solaires.

Effet de l'orientation des rues : Les **orientations** des rues Canyons aux directions : N/S et NO/SE sont plus favorables que les orientations E/O et NE/SO parce que : **En été** : Elles permettent un meilleur ombrage des surfaces des rues Canyon surtout pendant les heures de faible altitude solaire. Cet effet d'ombrage est accentué si le rapport de prospect (**H/W**) est augmenté. **En hiver** en revanche: Ces orientations permettent une meilleure pénétration solaire dans les rues Canyons aux environs de midi.

Effet des passages couverts: les protections horizontales offrent pendant les stress thermiques des températures (de **PET**) allant de **28°C** à **35°C**, valeurs proches du seuil du confort thermique supposé à **33°C**.

- **Effet thermique du vent.**

L'effet du vent améliore ou au contraire aggrave le stress thermique selon la saison et selon la nature du vent : **En hiver**, les vents d'origine Ouest, ont un effet important de refroidissement de l'air ; **En été** en revanche, les vents sont généralement de directions Est et N/E, ils sont considérés comme des vents frais qui permettent de réduire l'inconfort thermique. En période de Sirocco (direction Sud) en revanche, l'inconfort est amplifié.

Il faut souligner, qu'à partir des résultats présentés ci-dessus, le confort thermique est mieux contrôlé :

- En favorisant l'effet d'ombrage par une bonne géométrie urbaine compacte avec un rapport de prospect (**H/W**) important.
- En augmentant l'effet de la ventilation et la protection solaire par une bonne orientation des rues Canyons aux vents et par rapport aux radiations solaires.

VII.2. Microclimat et ambiance extérieur dans le canyon urbain

VII.2.a. Microclimat du Canyon urbain

Ce Canyon urbain est étudié dans sa globalité, en abordant plusieurs domaines pour le bien présenter, à savoir : la qualité de l'air en CO₂, le confort thermique de l'air, l'humidité relative moyenne de l'air, l'éclairement moyen et la vitesse du vent, parce que l'étude de la concentration l'air en CO₂ dans un environnement urbain dépend de l'étude des conditions météorologiques (Aidaoui et al, 2014).

VII.2.b. Intensité de la température de l'air au niveau du Canyon urbain

Les données de mesures réelles dans le Canyon urbain sont comparées à celles des données de mesures faites par l'ONM (Office National Météorologique) en dehors de la ville, les données enregistrées concernant les températures moyennes au niveau du Canyon urbain en corrélation aux amplitudes maximales d'apports solaire durant les 5-6/7/2013, étaient de 26°C à 36°C (Fig. VII.5/6) (MNO, 2012). Pour identifier les niveaux maximums d'intensité de l'îlot de chaleur urbain dans le Canyon urbain, l'étude comparative entre les valeurs mesurées au milieu du Canyon urbain et les valeurs en dehors de la ville de l'agence MNO donne les résultats suivants :

- Les valeurs sont considérés similaires au petit matin avant **6h** pour le **5 juillet (Fig. VII.5/6)**. Pour le **6 juillet** en revanche, des écarts de **4°C** sont enregistrés sous les mêmes conditions précédentes;
- Au milieu de journée à partir de **9H**, la magnitude du stress thermique est au niveau maximal (**Fig. VII.5/6**). L'écart devient significatif avec une forte fluctuation et des différences importantes et maximales estimées à **+5°C** à **15h**. L'augmentation de la chaleur en dehors de la ville (au niveau de station ONM) avec un écart visible concernant les taux de températures au niveau du Canyon urbain se justifie par, d'un côté, que les jours des essais ont été considérés comme des jours de fraîcheurs (malgré le mois juillet, qui est le plus chaud de l'année), d'un autre côté, les comparaisons ne sont pas d'une même année (les valeurs de l'ONM sont pour les années 2010-2012, par contre les mesures au niveau du Canyon urbain ont été faite durant l'année 2013) (**Fig. VII.5/6**).

Généralement le ksar de Ghardaïa doit offrir un niveau de confort thermique optimal pendant l'été par sa morphologie urbaine spécifique (orientations des rues, effet de prospect et effet de passage couvert) quelques-soit la topographie du site, cependant la morphologie urbaine actuelle du Canyon urbain avec une telle topographie favorises le phénomène de piégeage des radiations solaires, ce phénomène est fréquent dans le Ksour de Ghardaïa ([Meir et al., 1995](#), [Grundström et al., 2003](#), [Ali-Toudert et al., 2004](#)).

- A la fin du cycle journalier et pendant la nuit, la magnitude de la température de l'air au centre du canyon urbain suit de près celui des températures de l'air à la station météorologique en dehors de la ville,
- La fluctuation de la température de l'air du canyon se juxtapose avec celui des températures de l'air de la station ONM d'une manière tardive. Cela est lié directement aux phénomènes de la Chaleur Sensible Q_H et de la Chaleur de Stockage ΔQ_S (Cf. **Chap. II**. Les sources énergétiques urbaines).

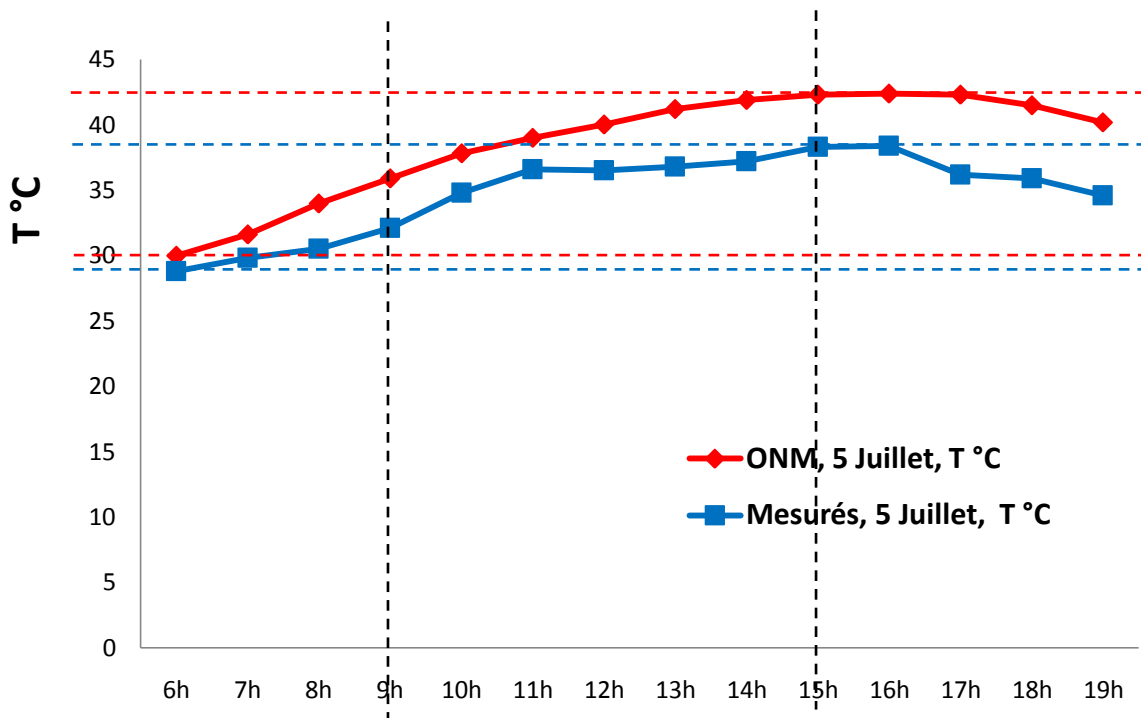


Fig. VII.5. Profil des températures mesurées le 5 **Juillet** ; dans le Canyon (Auteur), à la station ONM (MNO, 2012).

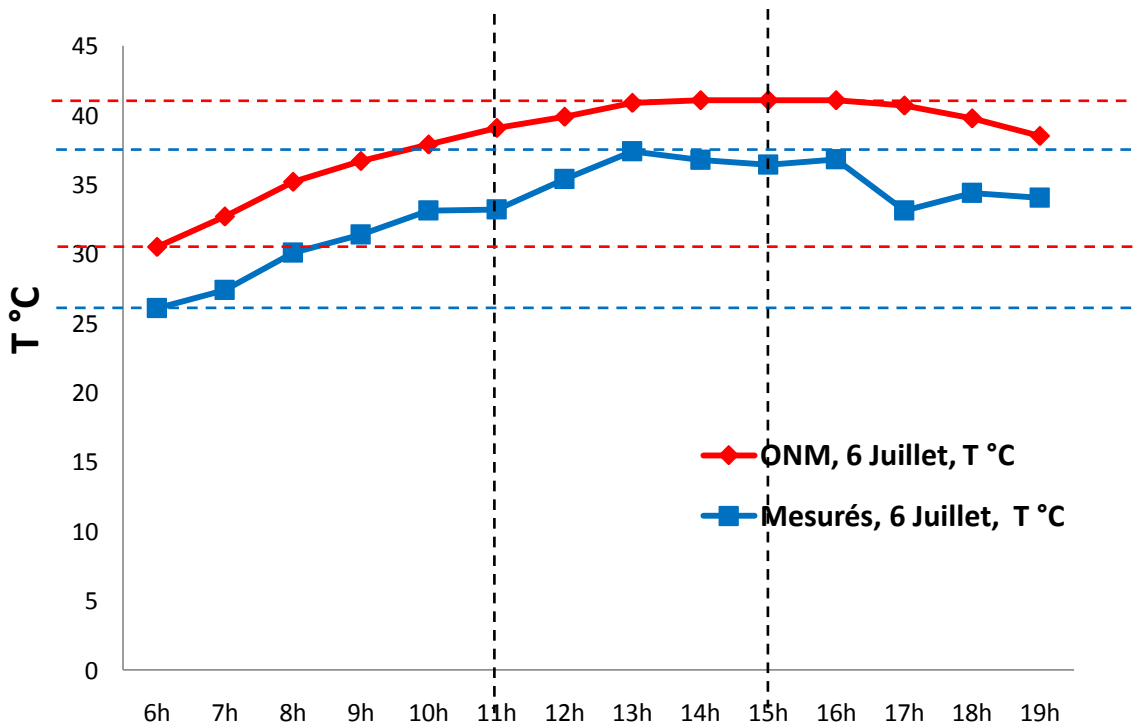


Fig. VII.6. Profil des températures mesurées le 6 **Juillet** ; dans le Canyon (Auteur), à la station ONM (MNO, 2012)

VII.2.c. Activités humaines par rapport aux radiations solaires dans le canyon

Durant les jours d'expériences, la mobilité et l'activité humaine dans le Canyon urbain s'engourdissent au milieu de journée de la période **12h** jusqu'à **16h** parce qu'il est exposé de façon complète aux radiations solaires sans ombre suffisante pour n'importe quelle pratique ou activité humaines, étant donné que l'altitude solaire dans cette période est presque à la verticale (**81°**), cette altitude solaire est justifiée par la position géographique de Ghardaïa (**32°29' N- 3°40' E**).

En pratique, c'est la tâche solaire **T** qui influe directement sur les activités, son absence au petit matin de **7h** à **12h** et l'après midi de **17h** à **20h** favorise les activités et les mouvements humains (**Fig. VII.7-9**), les mesures de l'éclairement moyen faites au niveau du Canyon urbain durant les 5, 6/7/2013 corroborent cela, les mesures démontrent ainsi une augmentation de l'apport lumineux d'une manière considérable en commençant par les moyennes : **977,8 Lux** à **6h** au petit matin, **63350 Lux** à **13h** et **1655,83 Lux** à **19h**.

L'absence de la tâche solaire au niveau du Canyon urbain à la fin de journée permet aux activités et aux mouvements humains de reprendre leur cours (**Fig. VII.7-9**). L'orientation de direction E/O, concernant le Canyon urbain, influence considérablement l'effet de l'éblouissement, sur lequel s'appuie le confort visuel, donc même que les valeurs de l'éclairement sont estimés élevés, cette orientation présente la configuration optimum par rapport aux autres orientations ([Kitous et al, 2012](#))

En outre, l'axe médian du Canyon urbain est orienté vers la direction E/O, il est exposé aux radiations solaires maximales de midi de **12H** à **17H**. D'après les expériences faites sur le Ksar de Ghardaïa par le groupe de chercheurs [Kitous et al \(2012\)](#) qui démontre que l'orientation E/O est moins favorable par rapport aux autres orientations, leurs expériences sur la température de l'air, la température de surface, la température moyenne radiante et le confort thermique dans les rues du Ksar de Ghardaïa décrites ainsi que les radiations solaires provoquées par l'orientation E/O réduisent d'une manière substantielle le confort thermique au niveau du canyon urbain ([Kitous. S, 2012](#)).

Ces résultats se rapprochent de ceux obtenus par [Ali-Toudert \(2005\)](#) qui démontrent des niveaux très élevés du stress thermiques aux environs de midi, sur l'ensemble de toutes les rues du Ksar de Beni-Izguen ([Ali-Toudert, 2005](#)).



Fig. VII.7. Le Canyon au 6 juillet 2013 à 9h, l'interaction entre l'absence des radiations solaires **T** et les activités humaines au matin de 7h à 12h



Fig. VII.8. Photo du Canyon le 6 juillet 2013 prise à 15h, toutes les activités humaines s'engourdissent à midi pendant l'été pour ce canyon urbain d'orientation E/O.



Fig. VII.9. Le Canyon urbain au 6 juillet 2013 à 19h, les activités humaines reprennent après l'absence des radiations solaires, en après midi de 17H à 20H.

VII.2.d. Humidité relative particulière du climat du Canyon urbain

Pour une étude complète de la température de l'air du Canyon urbain, l'étude de la thermique de l'air doit être complétée par l'étude l'humidité relative de l'air. L'étude comparative par heure entre les variations de l'humidité relative en juillet collectées par l'ONM et les mesures de l'humidité relative au niveau du Canyon urbain pendant le 5 Juillet 2013, donnent les résultats suivants :

- A 6H, au petit matin, tel qu'il est présenté sur la figure (Fig. VII. 10), la magnitude de l'humidité relative, pour la région de Ghardaïa ou pour le Canyon urbain, commence par le taux de 32%.
- de 6H à 8H, qui correspondent à des températures basses allant de 29 à 32°C (zone de confort supposée à 33°C par Arnfield (2003)), les taux d'humidité relative correspondants sont au niveau maximal, ils sont de l'ordre de 32,1 jusqu'à 36,9 %. En

plus, l'étude comparative entre le milieu du Canyon et celui en dehors de la ville montre une différence de +10% (Fig. VII.10).

- de 10h à 13h, l'amplitude de l'humidité relative fluctue sous la barre de 30%, pour les deux zones cibles (le Canyon urbain et la station ONM à 20Km)
- A 15h, une chute brusque de -4.9% d'humidité relative au niveau de l'axe du Canyon urbain a été constatée aussi une chute de température au niveau de la station ONM (Fig.VII. 10).
- Enfin, il y a eu un retour vers la similitude des valeurs selon les graphes des deux zones, suite aux chutes de la température de l'air à la fin de journée (Fig.VII. 10).

La figure (VII.11) montre visiblement un écart important d'humidité relative de +12.5%, entre les mesures au niveau du Canyon urbain et les mesures collectées par l'ONM, dès le petit matin (à partir de 6h pour le 6 Juillet), cette différence est justifiée par une chute de température avant le petit matin (avant 6H) du 6 juillet, la température de l'air a chuté de -3°C (si on la compare avec celle du 5 Juillet).

Une différence du taux d'humidité entre le milieu urbain et la campagne a été bien observée. Cela est lié directement au phénomène de la Chaleur Latente Q_E (Cf. Chap. II. les sources énergétiques urbaines).

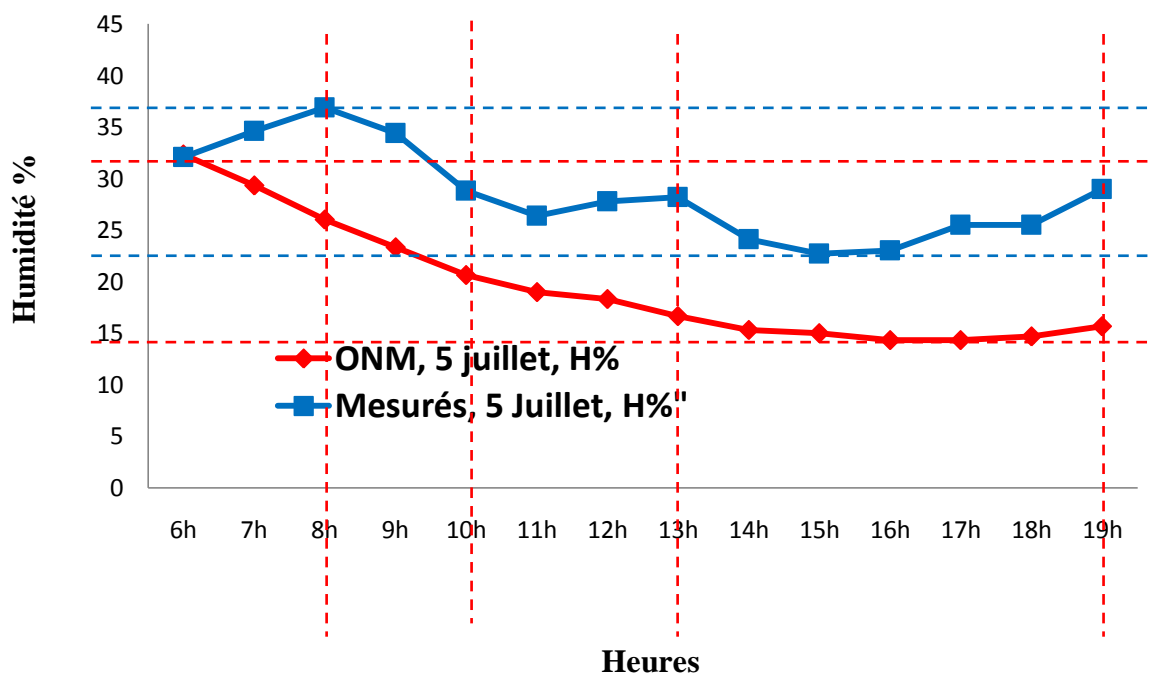


Fig. VII.10. Humidités relatives des deux zones (Canyon urbain / station ONM) pour le 5 Juillet (Auteur, MNO, 2012).

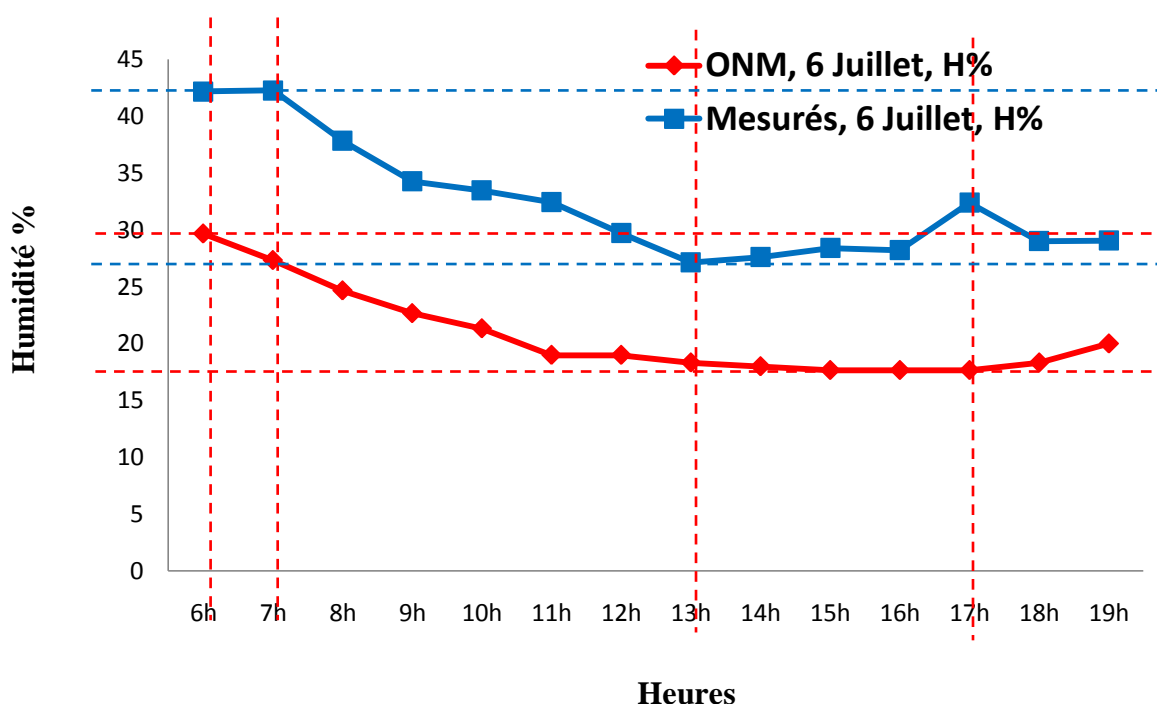


Fig. VII.11. Humidités relatives des deux zones (Canyon urbain / station ONM) pour le **6 Juillet** (Auteur, MNO, 2012).

VII.2.e. Mesures sur la qualité de l'air en CO₂

Les mesures de la qualité de l'air en concentration de CO₂ au niveau de l'axe médian du Canyon urbain pendant le **5-6/7/2013** donnent des valeurs moyennes comprises entre l'intervalle de **500 à 700 [ppm]**. Ces valeurs sont acceptables pour une qualité d'air moyenne, comme il est indiqué par la norme en vigueur de l'Agence Européenne de l'Environnement (EEA, 2012), (Fig. VII.12). Il faut rappeler que les directives de la norme du CO₂ NBN EN 13779 en vigueur identifient quatre niveaux de la concentration de l'air en CO₂, à savoir ; Une qualité d'air excellente, pour le niveau du CO₂ inférieur à **400 [ppm]**; Une qualité d'air moyenne, pour un CO₂ entre **400~600 [ppm]** ; Une qualité d'air acceptable, avec du CO₂ entre **600~1000 [ppm]** et une qualité d'air faible, avec un CO₂ supérieur à **1000 [ppm]**. Ces taux mesurés du CO₂ au niveau du Canyon urbain polluent le microclimat et débordent les niveaux conventionnels du confort thermique. On remarque des oscillations visibles de la courbe de mesure du CO₂ (Fig.VII.12) selon différentes périodes de la journée, cela s'explique par rapport au degré de mobilité mécanique par des différentes heures (Fig. VII.13) [A l'aide de la simulation par CFD, l'étude de la concentration et la dispersion du polluant au niveau des trois stations A, B & C, sera développé d'une manière détaillé dans la deuxième partie de cette étude. Cf. *Tableau. VIII.2*]. En plus, la rue Canyon crée un environnement sonore nuisible parce qu'elle est située au cœur d'un lieu public très fréquenté, elle a une forte

circulation mécanique bruyante, les zones mesurées dans le canyon dévoilent des moyennes fluctuantes allant de **50 à 70 dB**, ces taux qualifient donc l'environnement urbain du Canyon comme un milieu sonore inconfortable.

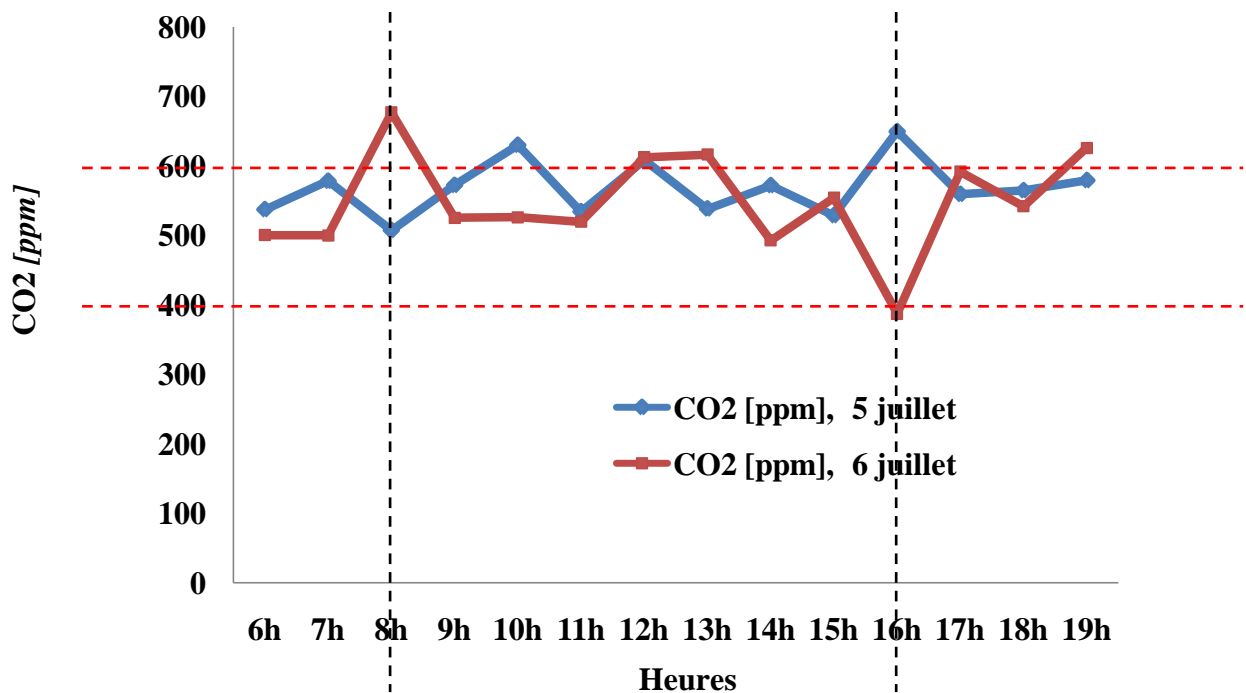


Fig.VII.12.Valeurs du CO₂ mesurées dans la rue Canyon pendant les 5 et 6 juillet 2013

(Auteur).



Fig. VII.13. Photos du Canyon, démontrent la diversité des motorisations et gabarits des véhicules qui circulent.

VII.2.f. Mesures de la vitesse du vent au niveau du Canyon urbain

La vitesse du vent durant les jours de mesures le **5-6/7/2013** était fluctuante soit au niveau du Canyon urbain, soit au niveau de la station ONM qui représente la région de Ghardaïa (c'est-à-dire à **20Km** en dehors de la ville). Au niveau de l'axe médian du Canyon urbain, le vent était de direction Est, la vitesse moyenne était entre **1 et 1,5 (m/s)**. En dehors de la ville en revanche, selon les données de mesures de l'ONM, les fluctuations de la vitesse du vent étaient plutôt importantes, allant de **2m/s** jusqu'à **5,2m/s pour le 05 juillet** (de **2m/s à 5.8 m/s** pour le **06 juillet**). Cet écart est estimé à plus **50%** de différence (**Fig. VII.14-15**). Cet intervalle est dû essentiellement à la rugosité du paysage urbain (*Cf. Fig.III. Effet de rugosité « Roughness effect »*). Réellement, ce Canyon urbain est entouré des obstacles depuis deux directions géographiques, qui sont ; La typologie urbaine hautement dense (prospect important **H/W>5**, et rues profondes) sur un relief accidenté du côté Nord et du côté Nord-Est ; et une chaîne montagneuse du côté Sud-Est. Ces obstacles réduisent les vitesses de l'écoulement de l'air et participent considérablement à l'effet de rugosité « roughness effects ». **Selon Georgakis & Santamouris (2006)** l'écoulement de l'air peut être réduit de **68%** jusqu'à **82%** pour certains cas, dans un Canyon urbain sous l'effet de rugosité.

Il faut rappeler que l'écoulement d'air, qui part d'un milieu naturel en passant d'un milieu à un autre pour arriver enfin à un milieu urbain, se ralentit sous l'effet de rugosité à cause de :

1. Des obstacles naturels

- Tel que la topographie qui a une influence considérable sur la rugosité, donc il est important de définir l'orientation de la topographie par rapport à la direction de l'écoulement d'air, et au même temps, de définir son degré d'inclinaison.
- La couverture végétale : la densité et la hauteur des arbres influencent aussi considérablement la rugosité.

2. les constructions humaines.

- Les constructions urbaines ont aussi leurs effets de rugosité, selon **Oke (2004)** le degré de rugosité de notre Canyon a la valeur de 7 [*Cf. Tableau. III.6. urbain développé intensément, hautement dense avec 2 – 5 niveaux, bâtiments attachés ou très rapprochés. (Paysage imperméable)*]. cet effet a fait l'objet de nombreuses recherches scientifiques telles que (*Cf. Fig. III. 9, Tableau. III.6*) : la relation de **Charnock (WMO, 2008)**. Et la classification de **Davenport (1960)** adaptée par **Wieringa (1980B). (WMO, 2008)**.

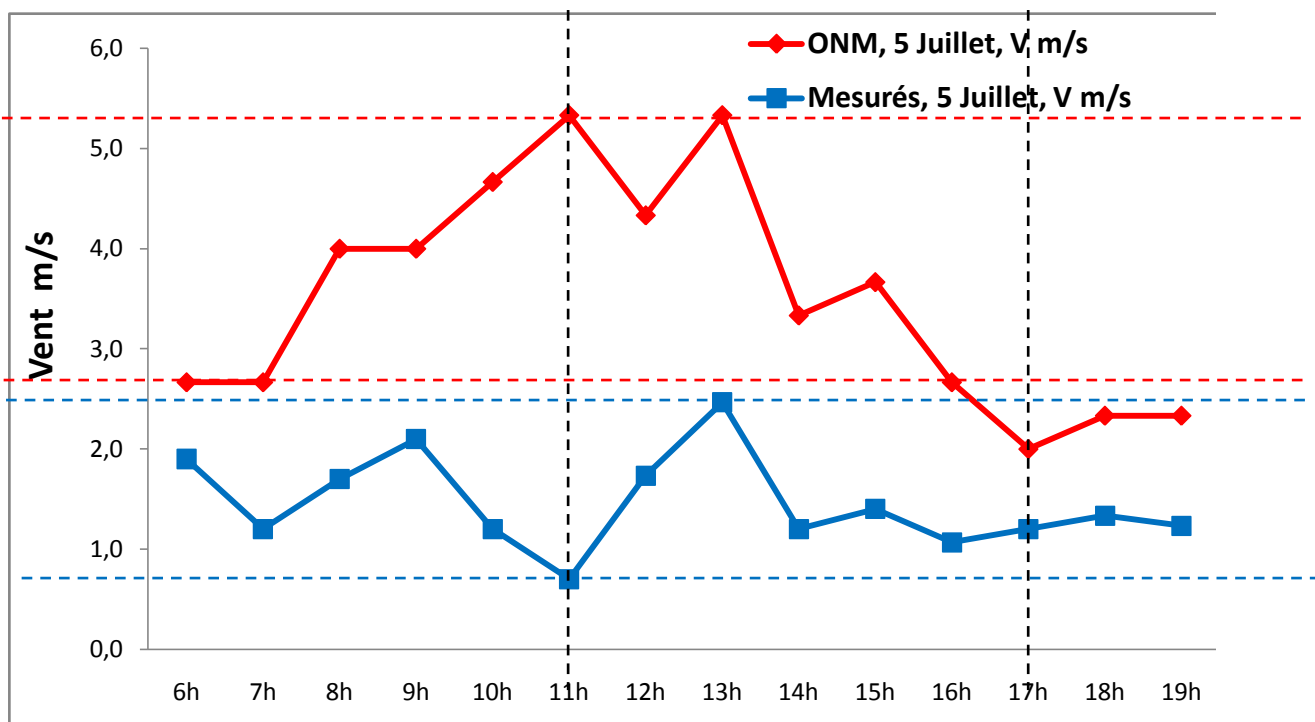


Fig.VII.14. Profil des vitesses de l'air, stations de mesure/station ONM, le 5 juillet 2013
(Auteur, MNO, 2012).

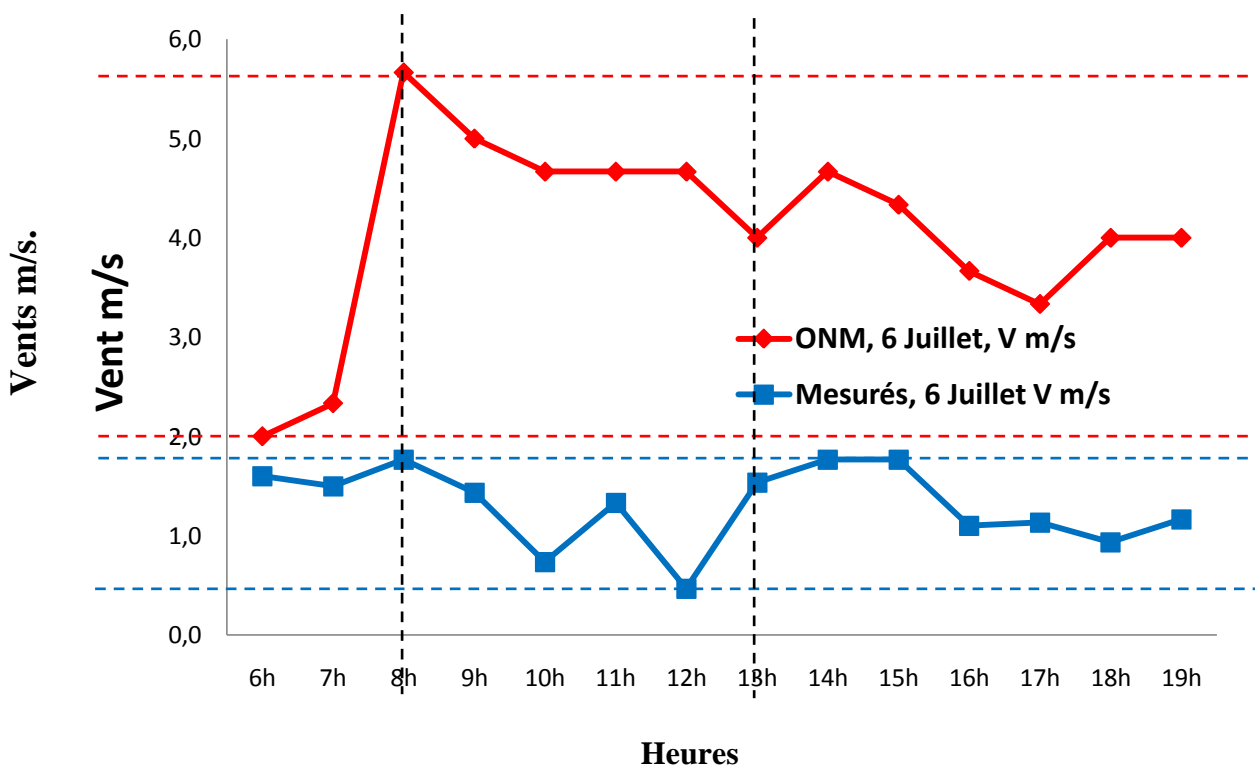


Fig.VII.15. Profil des vitesses de l'air, stations de mesure/station ONM, le 6 juillet 2013
(Auteur, MNO, 2012).

VII.2.g. Intérêt de l'étude microclimatique du canyon urbain:

Les résultats de l'étude du microclimat et d'ambiance extérieure dans le canyon urbain, sont comme suit :

Des différences importantes ont été remarquées entre les mesures faites au niveau du Canyon urbain et celles de la station météorologique (située à **20Km** en dehors de la ville), ces écarts sont estimés, comme suit;

- Pour les températures de l'air (**C°**), des différences jusqu'à **+4°C** d'intensité, mesurées pendant la période du stress maximal, à environ **15H**,
- Les écarts pour l'humidité (**H %**), sont estimés de **+12.5%** de **différence**, au petit matin (**à 6H**).

Les écarts de températures de l'air et d'humidités entre le Canyon et la station (**ONM**) sont dus aux différences respectives du rayonnement global (**Q***) de la canopée urbaine et de la station météorologique (Cf. **Chapitre.2**. les sources énergétiques urbaines)

- Des fluctuations de la vitesse du vent (**m/s**) allant jusqu'à **3,7 m/s** d'écart entre le canyon et la station ONM, sont estimés à plus **50%** de différence, cet intervalle est dû essentiellement à la rugosité du paysage urbain.
- L'étude des prises de mesure du **CO₂ (ppm)** a relevé des taux moyens en matière de qualité d'air selon la réglementation en vigueur **CO2 NBN EN 13779 (EEA, 2012)**.

VII.3. Conclusion

Le microclimat global du Ksar de Ghardaïa a révélé d'abord, un microclimat qui se distingue pendant le mois de juillet, par une forte chaleur combiné par une humidité basse, ces taux sont considérés comme exceptionnels, réduisant alors d'une manière substantielle le confort thermique escompté.

L'étude de combinatoire entre la morphologie urbaine et le microclimat du Ksar, faite par le chercheur **Kitous. S (2012)** [sujet de thèse de doctorat, en collaboration avec l'EPAU/Alger] sur le Ksar de Ghardaïa, elle a classifié trois domaines d'effets qui ont leurs grandes influences sur le microclimat :

1. Effet de la topographie

- En hiver, le versant nord est moins exposé aux **radiations solaires** pour le versant sud en revanche, les rues Canyons sont plus exposées.
- **Les vents** froids de direction Ouest et Est diminuent le stress thermique (pour le versant Nord), les vents de direction Sud en revanche, accentuent le stress thermique

2. Effet de la morphologie urbaine.

- Les effets de la géométrie d'une rue, l'effet de son orientation et les effets des passages couverts, etc., ont chacun son degré d'influence sur le confort thermique, ce qui explique les effets de la morphologie urbaine qui influence considérablement le confort thermique.

3. Effet thermique du d'écoulement d'air.

- L'effet de l'écoulement d'air aplanit ou au contraire aggrave la courbe du stress thermique, selon la saison et selon la nature de l'écoulement: **En hiver**, les vents froids arrivent du côté Ouest ; **En été**, des vents frais, leurs origines sont du côté Est et N/E, en période de Sirocco en revanche, l'inconfort est amplifié, par les vents chauds arrivant du Sud.

Les mesures à l'échelle réelle de la rue Canyon (INSITU) : le microclimat au niveau du Canyon urbain du Ksar de Ghardaïa est spécifique et se distingue des autres morphologies urbaines par les éléments suivants:

- Un taux de CO₂ élevé sur le long du Canyon au niveau des rois stations (sera développé dans la partie de simulation par CFD en 3D.Cf. **Tableau. VIII.2**);
- Une intensité thermique élevée avec humidité faible (Intensités fluctuantes) ;
- Vitesse faible ;
- Mobilité mécanique très intense et fluctuante (variable en type de motorisations et à travers la journée) ;
- Exposition humaine au soleil sans occultation.

Les résultats mentionnés ci-dessus décrivent un microclimat inconfortable nécessitant alors une analyse approfondie par une étude analytique de l'effet de la morphologie urbaine.

Le chapitre suivant est consacré à une analyse formelle et géométrique du Canyon en utilisant la **simulation par CFD (en 3D)** en vue d'une optimisation du microclimat et de la qualité de l'air, cette analyse permet d'introduire les données microclimatiques dans le modèle d'origine et propose ainsi des solutions géométriques.

References.**Revues scientifiques**

- Ahmed, K.S., 2003. Comfort in urban spaces : defining the boundaries of outdoor thermal comfort for the tropical urban environments. *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 103-110.
- Aidaoui L, Triantafyllou AG, Azzi A, Garas SK. Elevated stacks' pollutants' dispersion and its contributions to photochemical smog formation in a heavily industrialized area, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8(2014) 213-27.
- Ali-Toudert, F., Ddjenane, M., Bensalem, R., Mayer, H., Outdoor thermal comfort in the old desert city of beni-Isguen, Algeria. 2004. *Climate Research*, Vol. 28, pp. 243-256.
- Arnfield, A. 1990. Street design and urban canyon solar access. *Energy and building*. Vol. 14, pp. 183-200.
- Arnfield, A. J. 1990. Canyon geometry, the urban fabric and nocturnal cooling : a simulation approach. *Physical Geography*. Vol. 11 (3), pp. 220-239.
- Bourbia, F. and Awbi, H. B., 2004. Building clauster and shading in urban canyon for hot dry climate Part 1: Air surface temperature measurements. *Renewable Energy*, Vol. 29, pp, 249-262.
- Bourbia, F. and Awbi, H. B., 2004. Building clauster and shading in urban canyon for hot dry climate Part 2: Shading simulation. *Renewable Energy*, Vol. 29, pp, 249-262.
- Eliasson, I., 1996, Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmospheric Environment*, Vol. 30 (3), pp. 379-392.
- Grundström, K., Johansson, E., Mraisi, M., Ouahrani, D., 2003. Climat et urbanisme – la relation entre confort thermique et la forme du cadre bâti. Rapport 8. *Housing Development and Management*. Lund University.
- Gu, Z.-L., Zhang, Y.-W., Cheng, Y. & Lee, S.-C. 2011. Effect of uneven building layout on air flow and pollutant dispersion in non-uniform street canyons. *Building and Environment*, 46, 2657-2665.
- Meir, I. A., Pearlmutter, D., Etzon, Y., 1995. On the microclimatic behavior of two semi-enclosed attached courtyards in a hot dry region. *Building and Environment*, Vol. 30 (4), pp. 563-572.

- Nunez, M. and Oke, T. R., 1977. The energy balance of an urban canyon. *Journal of applied Meteorology*, Vol. 16, pp. 11-19.
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K. & Gonzalez-Flesca, N. 2003. Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37, 155-182.
- Pearlmutter, D., Bearliner, P., Shaviv, E., 2007. Integrated modeling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyon. *Building an Environment*. Vol. 42, pp 2396-2409.
- Pearlmutter, D., Bearliner, P., Shaviv, E., 2006. Physical modeling of pedestrian energy exchange within the urban canopy. *Building an Environment*. Vol. 41, pp 783-795.
- Pearlmutter, D., Bitan,, A., Bearliner, P., 1999. Microlimatic analysis of « compact » in an arid zone. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 4143-4150.

Sitographies

- Larousse. 2015. *Situation de Ghardaïa dans le Sahara septentrional* [Online]. Available: http://www.larousse.fr/encyclopedie/autre-region/le_Sahara/142022 [Accessed 9 Aout 2015].

Livres de référence

- Benyoucef, B. 2010. *Le M'Zab parcours millénaire*, Alger.
- Oke, T. R. 1990. *Boundary Layer Climates Second edition*, London.

Divers

- EEA 2012. Monitoring CO2 emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2012. European Environment Agency ed. Copenhagen K, Denmark.
- ONM 2012. meteorological data of 2010, 2011, 2012. *Meteorology National Office, GHARDAÏA Unit*.
- WMO 2008. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, CH-1211 Geneva 2, Switzerland.

CHAPITRE VIII:

ETUDE D'OPTIMISATION DE LA QUALITE D'AIR DANS LE CANYON URBAIN

« Mon devoir à moi, ma recherche, c'est d'essayer de mettre cet homme d'aujourd'hui hors du malheur, hors de la catastrophe ; de le mettre dans le bonheur, dans la joie quotidienne, dans l'harmonie. Il s'agira tout particulièrement de rétablir ou d'établir l'harmonie entre l'homme et son milieu »¹

(1) Le Corbusier, *l'architecture pour émouvoir*. Jean JENGER. Edition Gallimard Arts, 2004, p 96.

VIII.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, l'étude micro-météorologique a été abordée, l'analyse de prises de mesures de la concentration des taux du CO₂ relevé dans la rue Canyon confirme des seuils insatisfaisants de la qualité d'air selon la réglementation internationale en vigueur **CO₂ NBN EN 13779 (EEA, 2012)**.

Ce chapitre présente une étude d'optimisation de la forme urbaine, après le constat d'excès de concentration de pollution dans le Canyon urbain du Ksar de Ghardaïa, la solution consiste à intervenir en changeant la géométrie urbaine actuelle et en faisant des restructurations architecturales pour ensuite proposer des alternatives visant à influencer la qualité de l'air, à améliorer l'environnement urbain et à limiter la dissipation de cette pollution.

La simulation par CFD est utilisée comme un outil performant et récent, pour changer le microclimat au niveau de la rue Canyon et apporter une qualité d'air optimale.

VIII.2. Etude d'optimisation de la qualité de l'air dans le Canyon urbain

VIII.2.1. Intérêts de la simulation par CFD pour cette étude

L'étude micro-météorologique montre que ce Canyon urbain souffre de la pollution de l'air et de l'exposition excessive au rayonnement solaire. À ce stade, la simulation par **CFD** peut être utilisée pour faire une lecture générale de la dispersion du polluant généré par la circulation mécanique (comme source principale) le long de Canyon. Par ailleurs, les solutions scientifiques sont souhaitables pour éradiquer tout problème d'accumulation de pollution de façon substantielle.

Des optimisations peuvent être suggérées par des propositions géométriques, en procédant principalement à une analyse approfondie de ces conceptions, aussi pour une analyse plus affinée, une comparaison est aussi effectuée, mais cette fois-ci entre les valeurs des propositions mesurées et celles des valeurs simulés (Mesurés par les instruments/Simulés par CFD) au niveau des trois stations **A, B** et **C** prolongées le long de la rue Canyon (**Fig.VIII.1**).

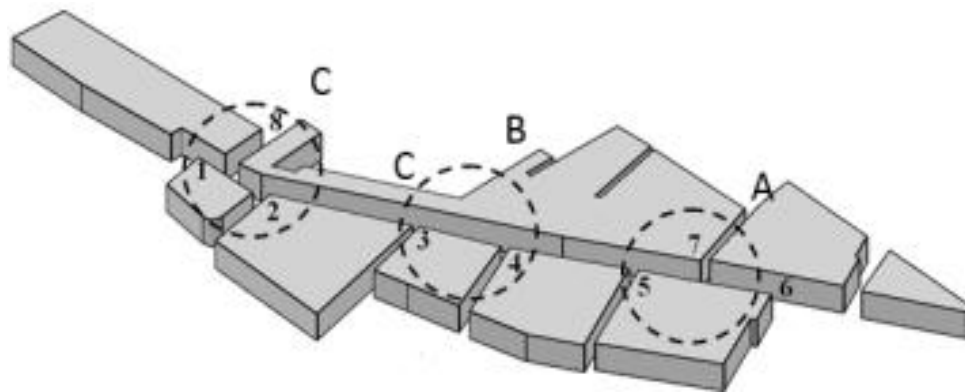


Fig. VIII.1. Stations de mesures (A, B, C, 1 et 2) dans le Canyon urbain.

VIII.2.2. Protocole de simulation des trois géométries

VIII.2.2.a. Protocole de simulation de la géométrie réelle

Tout d'abord, le Canyon urbain actuel est doté d'une typologie non-rectiligne, il s'identifie par une orientation de 61° en amont, une déviation de 92° au niveau du dernier îlot en aval de la rue Canyon, Il est de **138.64m** de longueur et d'une largeur variable de **7,9m** à **5,2m** correspondant respectivement à un prospect (H/W) variable de **0,88** en amont et **1,34** en aval. Ce Canyon est considéré comme régulier du fait du de son prospect qui s'approche de la valeur de 1 (Tableau. VIII.3. Fig. VIII.1-4) (Vardoulakis et al., 2003). Pour ce cas d'étude, ce canyon urbain est intégré dans une pente ascendante de **3%** parallèlement à la direction de l'écoulement d'air des vents de l'Est de l'Eté. Il faut rappeler que l'aéroulque de l'air de la direction **Sud-est** qui concernent les mois de Mars, Avril et Mai a été négligée dans notre étude puisque leurs écoulements se déroulant en période de basse température sont capables de dégager la pollution par leur vitesse importante estimée à **16 m/s** ou plus (Benyoucef, 2010).

La simulation de la géométrie réelle par CFD se caractérise par maillage de **1416076** d'éléments, en formes géométriques multiples, composées des tétraèdres, pyramides et des prismes (Tableau. VIII.1, Fig. VIII.1-4).

La modélisation numérique et la simulation en CFD exigent une résolution identique de meshing des configurations géométriques (objets de comparaison). Dans notre recherche, le tableau (Tableau. VIII.1) ci-dessus démontre un usage presque similaire d'éléments de maillage (Tétraèdres, Pyramide et Prismes) du domaine de calculs entre les trois géométries (la géométrie réelle et les deux propositions 1, 2).

Tableau. VIII.1. Maillage et domaine. (a) Cas Réel, (b) Modèle 1, (c) Modèle 2.

Formes des mailles	1416076	1411235	1410659
Tétraèdres	1197828	1192855	1195155
Pyramides	4386	4188	4368
Prismes	213862	214192	211136
	(a)	(b)	(c)

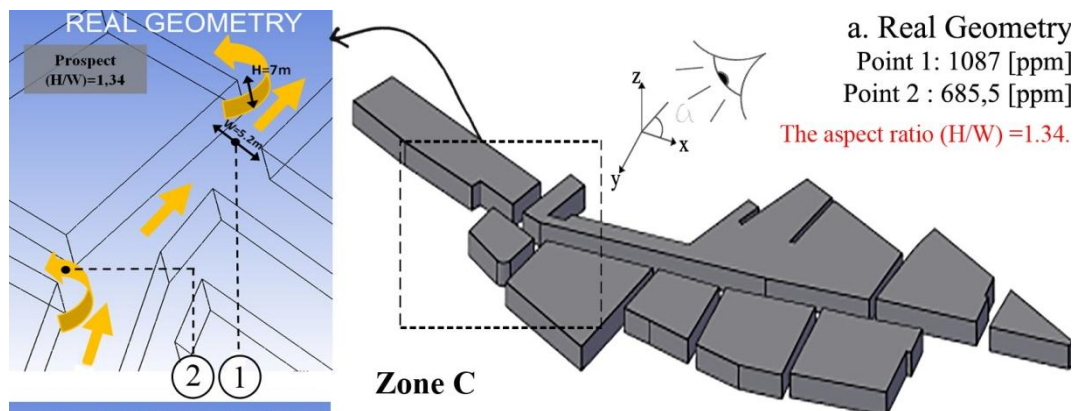


Fig. VIII.2. Caractéristiques du Canyon urbain - géométrie réelle.

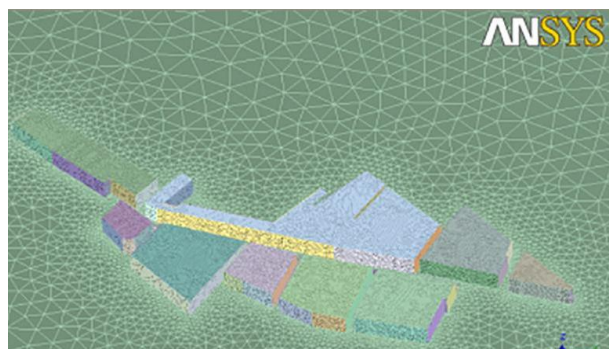


Fig. VIII.3. Grille du domaine de calcul estimé à 1.4 million d'éléments – géométrie actuelle

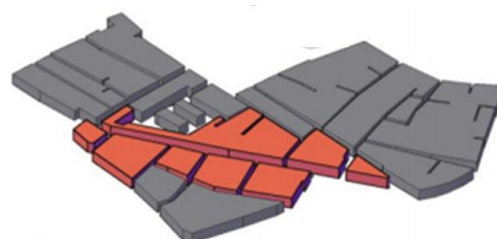


Fig. VIII.4. Le contexte typologique urbain de la rue Canyon – géométrie actuelle

VIII.2.2.b. Protocole de simulation de la Modélisation 1

Promouvoir une ventilation convenable dans le canyon urbain pendant l'été conduit à la dissipation de la pollution de l'air constatée. Nous nous intéressons particulièrement dans notre cas d'étude aux écoulements parallèles à l'axe du canyon (**Fig. VIII.5/6**). L'objectif est donc de faire accentuer la vitesse du vent parallèle en intervenant à une restructuration urbanistique minimale au niveau du dernier îlot de l'aval du canyon. Le **Modèle 1** fait partie de deux alternatives géométriques qui ont été proposées. Cette proposition a les mêmes caractéristiques géométriques comme la géométrie réelle, mais elle a une exception particulière, le rapport du prospect (**H/W**) est réduit à **0.64** à l'aval du Canyon [ce qui

correspond à une augmentation de **110%** de largeur de la rue Canyon], en revanche le rapport de prospect au niveau de la géométrie réelle était ($H/W = 1,34$) (Fig. VIII.5/6). La simulation de la géométrie du **Modèle 1** par CFD en 3D se caractérise par maillage de **1411235** d'éléments, en formes géométriques multiples, composés des tétraèdres, pyramides et des prismes (Tableau. VIII.1, Fig. VIII.5/6).

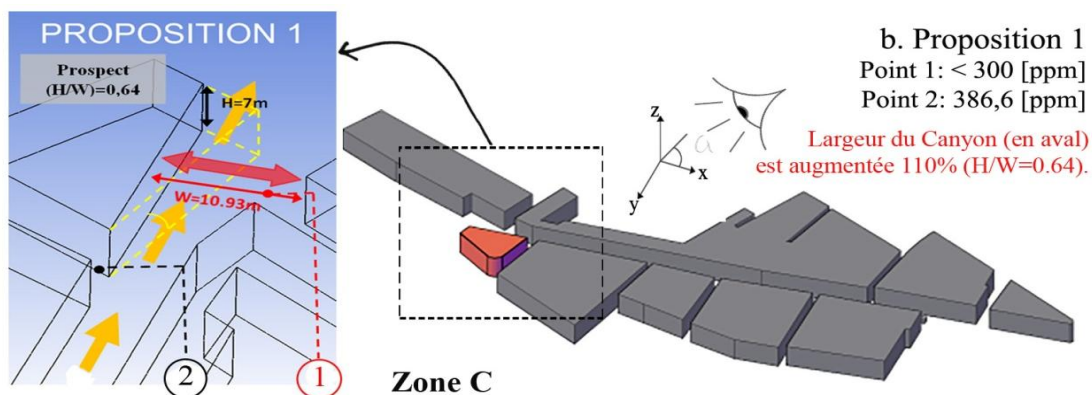


Fig. VIII.5. Schéma du Canyon urbain – **Modèle 1**: Alignement le dernier îlot.

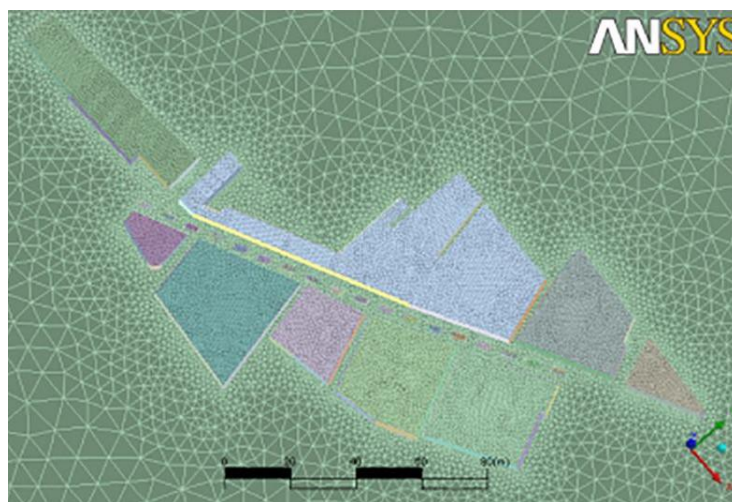


Fig. VIII.6. Grille du domaine de calcul estimée à 1.4 million d'éléments – **Modèle 1**.

VIII.2.2.c. Protocole de simulation de la modélisation 2

La **Modélisation 2** fait partie de deux propositions géométriques envisagées dans le but de dégager la pollution constatée au niveau du Canyon urbain. Le **Modèle 2** pour le Canyon urbain avait les mêmes caractéristiques de la géométrie réelle, sauf que le rapport du prospect (H/W) a diminué de **0.76** pour le dernier îlot [qui correspond à une diminution de **42%** de la hauteur d'un côté pour le dernier îlot], en revanche le rapport de prospect au niveau de la géométrie réelle était ($H/W = 1,34$) (Fig. VIII.7/8). La simulation de la géométrie du **Modèle 2** par CFD se caractérise par maillage de **1410659** d'éléments, en formes géométriques

multiples, composés des tétraèdres, pyramides et des prismes (Tableau. VIII.1, Fig. VIII.7/8).

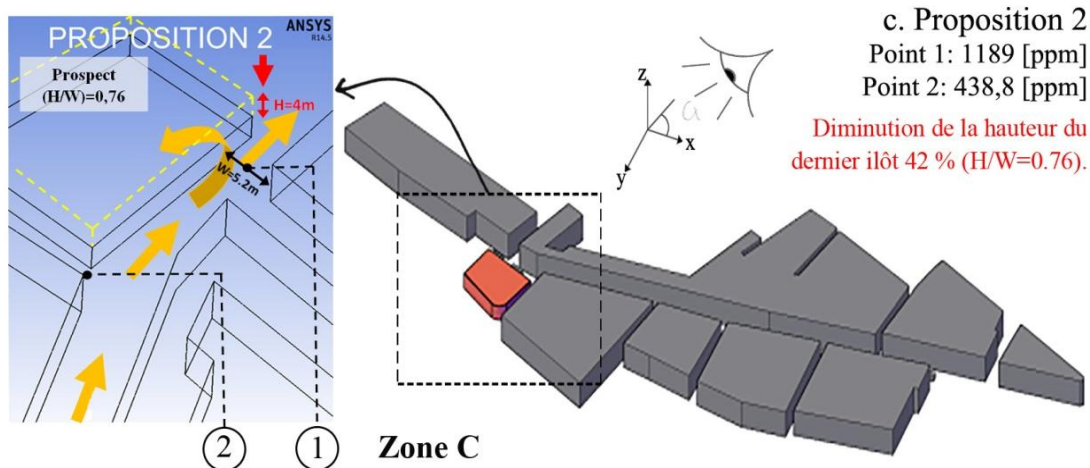


Fig. VIII.7. Schéma du Canyon urbain – **Modèle 2**: Hauteur diminué du dernier îlot.

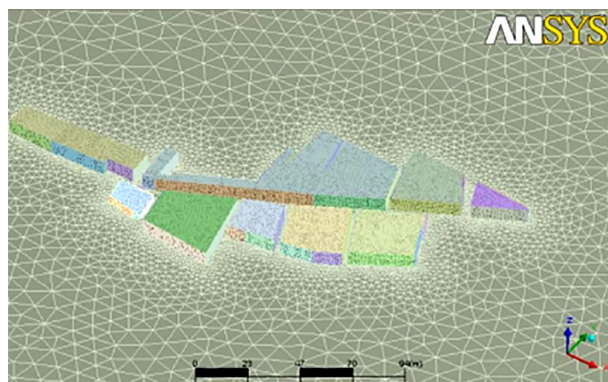


Fig. VIII.8. Grille du domaine du calcul estimée à 1.4 million d'éléments – **Modèle 2**.

VIII.2.3. Résultats et discussions de simulations des trois géométries

L'approche d'analyse de la simulation de l'aérodynamique de l'air et leur impact sur les trois géométries (pour la géométrie réelle, sur le **Modèle 1** et **Modèle 2**) confirment que le **Modèle 1** apporte plus d'avantages liés à la dissipation du CO₂ constaté. Une amélioration concrétisée par l'accentuation de l'écoulement d'air parallèle, cette optimisation n'est relevée qu'après une restructuration du dernier îlot en alignant le Canyon urbain en aval pour la première proposition (Fig. VIII.1-9).

Moins performant que le **Modèle 1**, le **Modèle 2** en revanche, présente aussi l'avantage de dissiper la pollution grâce à sa conception asymétrique entre les hauteurs des bâtiments (Uneven Building Layout) conduisant selon Gu et al (2011) à des écoulements basculants, une convergence du flux d'air, une divergence horizontale et de grands échanges à l'échelle de

masse d'air à l'intérieur de la canopée urbaine avec la couche au-dessus des canyons urbains (Gu et al., 2011).

VIII.3. Résultats de simulation pour les trois stations repère

VIII.3.1. Division de l'étude en trois stations

Le Canyon urbain à une longueur de 139 m, d'où l'aéroulque de l'air et la concentration du CO₂ diffère d'un point à un autre, surtout au niveau de l'entrée du Canyon, au milieu ou à la sortie. Pour appréhender la complexité globale qui se déroule sur la longueur du Canyon urbain, il est préférable de diviser notre analyse en trois stations distinctes suivant l'écoulement de l'air, il s'agit successivement de : une station d'analyse à l'amont du Canyon, une autre station au milieu et une dernière station à l'aval de la rue Canyon (Fig. VIII.9.a-c).

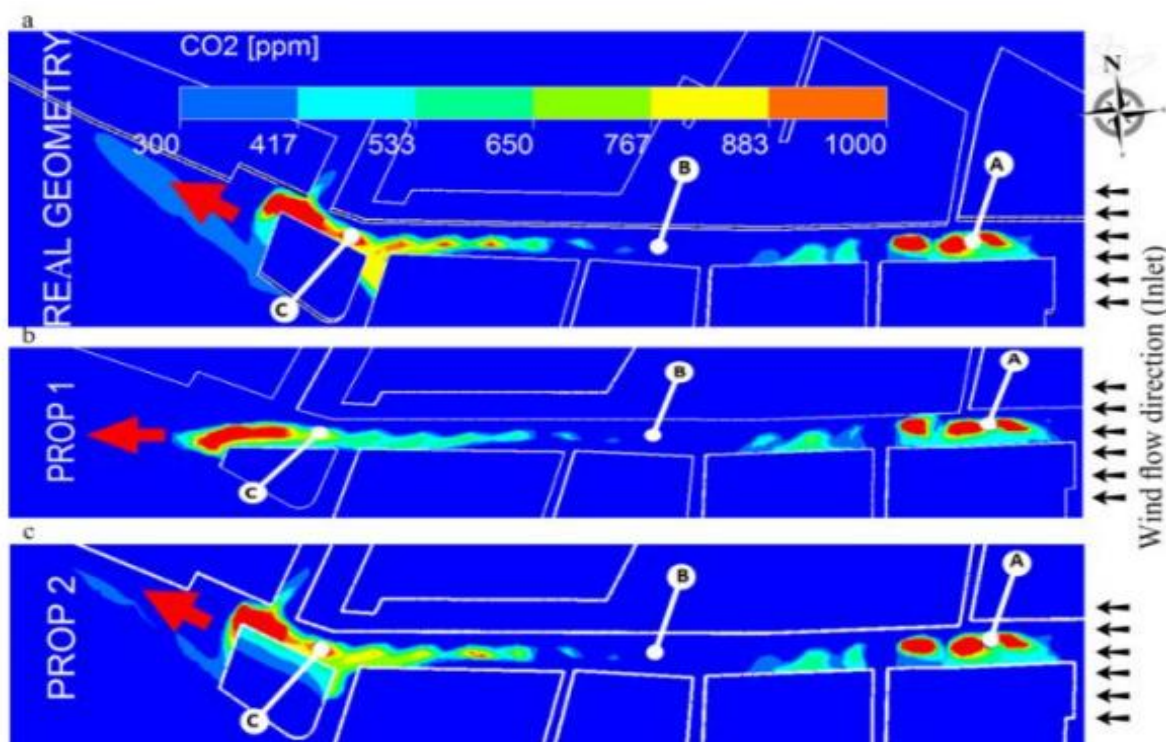


Fig. VIII.9. Profil global des concentrations de CO₂ [ppm] le long de la rue canyon des trois géométries, montrant une dispersion non-uniforme.

- Station A** Concentrations du polluant sont presque identiques, en [ppm] (a) 369.81 pour la **géométrie réelle**, (b) **Modèle 1** : le CO₂ est à 455.42, (c) 386.39 en pour la **Modèle 2**.
- Station B** CO₂ pour les trois **géométries** est <300 [ppm], valeurs estimées très avantageuses pour une qualité d'air excellente à cause de la discontinuité du Canyon.
- Station C** Valeurs en [ppm] (a) le CO₂ à l'actuelle Canyon est de 608.68, (b) **Modèle 1** : peut apporter une amélioration considérable de 46% par rapport à la géométrie réelle, (c) **Modèle 2** en revanche, peut contribuer à une amélioration de 36%.

VIII.3.2. Résultats de simulation pour la station A

Tableau. VIII.2. Résultats et valeurs des concentrations en CO₂ dans les trois stations A, B et C (mesurés et simulés)

(X, Y, Z) m	CO2 mesurés [ppm]	Valeurs du CO2 simulé [ppm]		
		Actuel Géométrie A.G	Prop1	Prop2
A 295.2, 241.5, 1.5	576	369.81	455.42	386.39
B 246, 215, 1.5	800	<300	<300	<300
C 196.1, 191.5, 1.5	573	608.68	407.68	578.08

La station A (Fig. VIII.10) est située en amont du Canyon. La simulation de la dispersion du CO₂ dans cette station donne les résultats de **369,81, 455,42 et 386,39 ppm** qui correspondent respectivement à la **géométrie réelle, modèle 1** et au **modèle 2**. Ces valeurs sont presque identiques avec des différences minimales entre la géométrie réelle et les deux modèles (Tableau. VIII.2.).

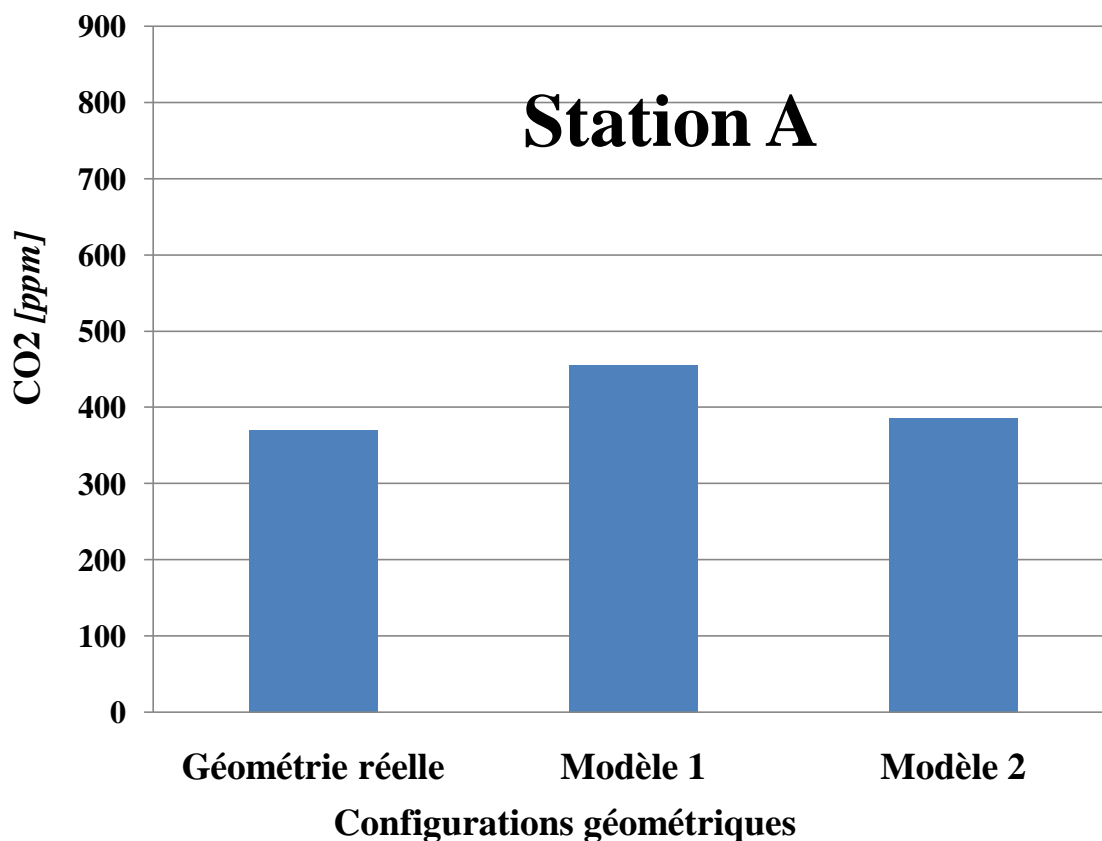


Fig. VIII.10. Concentrations du CO₂ simulé par CFD des trois géométries dans la station A.

VIII.3.3. Résultats de simulation pour la station B

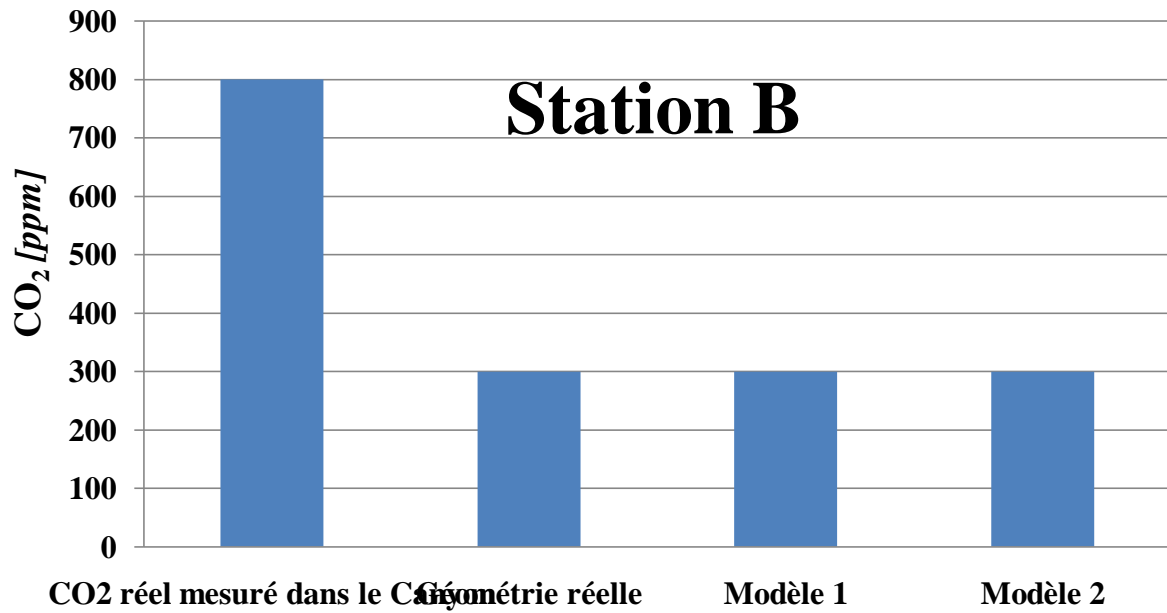
La **station B** (Fig. VIII.11/12) est située au milieu de la rue Canyon, Cette station offre pour les trois configurations géométriques des concentrations presque similaires en CO₂. Cependant, ces valeurs sont inférieures par rapport à celles enregistrées au niveau de la **station A**. La discontinuité du boulevard provoque une dispersion et un dégagement de la pollution à travers les ruelles perpendiculaires au Canyon urbain.

Selon la littérature scientifique, un taux de pollution atmosphérique faible peut être perçu au niveau des intersections de rues et ruelles. En effet au niveau des croisements :

1. La circulation du vent est assurée puis basculée entre les différentes rues;
2. Favorisent une combinaison complexe de flux canalisés bifurqués;
3. Influencent également la vitesse du vent et la répartition des concentrations de polluants et génèrent plus de tourbillons pour une meilleure dispersion;
4. Fournissent une zone de basse pression et de puissants mécanismes de dispersion;
5. Développent aussi des tourbillons intermittents.

Des mesures prises dans des points spécifiques de la **station B** (point aléatoirement choisi), révèle des valeurs contradictoires suite à une étude comparative entre la simulation en CFD et les mesures sur terrain (IN-SITU), la mesure sur site du CO₂ est de **800 ppm** (Tableau. VIII.2), la simulation sur les trois géométries en revanche ne dépasse pas les **300 ppm**.

L'étude comparative montre un écart important entre les valeurs mesurées dans le Canyon et les valeurs simulées par CFD ($\Delta d > 500$ ppm). Selon les littératures scientifiques, cette différence entre les simulations et les mesures réelles est fréquentée (Assimakopoulos et al, 2006). Cette différence peut être due uniquement à la mise en place des occultations temporaires par les commerçants au niveau des ruelles perpendiculaires, ces occultations sont des matériaux légers (e.g. la canne naturelle ou le tissu). Cette protection contre les rayons de soleil réduit considérablement le dégagement du CO₂ à travers ces ruelles perpendiculaires du Canyon (Fig. VIII.11/12).



Configurations architecturales

Fig. VIII.11. Concentrations du CO₂ [mesuré / simulé] pour les trois géométries dans la station B

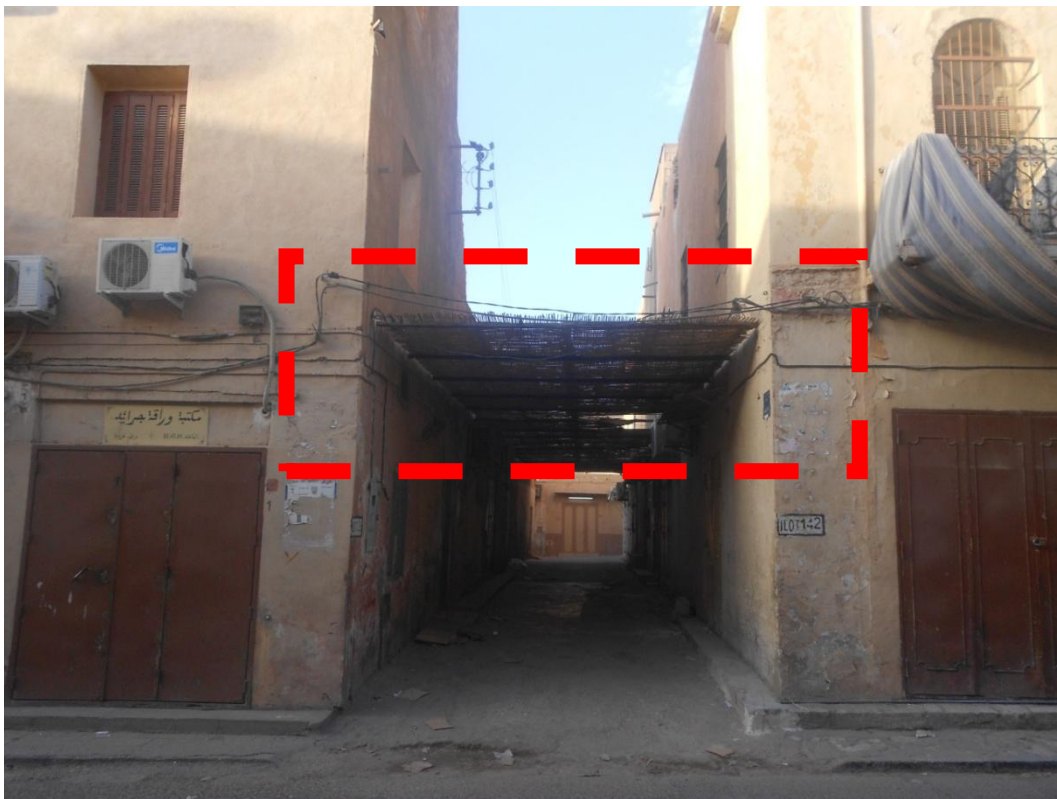


Fig. VIII.12. Ruelle perpendiculaire au Canyon (Cf. Fig. V.6. Ruelle perpendiculaire au Canyon), est couverte par des matériaux légers, cette pratique ralentit la ventilation et le dégagement de la pollution expulsée par les voitures.

VIII.3.4. Résultats de simulation pour la station C

Station C est située en aval du Canyon urbain, d'où une concentration complexe de CO₂ est apparue, il est clair sur les figures (**Fig. VIII.13**) que le **Modèle 1** peut apporter une dispersion et un dégagement considérable du CO₂, l'optimisation est estimée à **46%** par rapport à la géométrie réelle. Cette performance est à l'origine de l'écoulement accentué du vent parallèle, il s'agit donc de l'alignement du dernier îlot en réduisant le rapport de prospect (**H/W**) à **0,64** [était **1,34** pour la géométrie réelle]. Le **Modèle 2** en revanche, est moins efficace que le **Modèle 1** (**Fig. VIII.13**). Toutefois, elle a apporté une amélioration de **36%** par rapport à la géométrie réelle avec un rapport de prospect faible de **0.76** (**Tableau. VIII.2**).

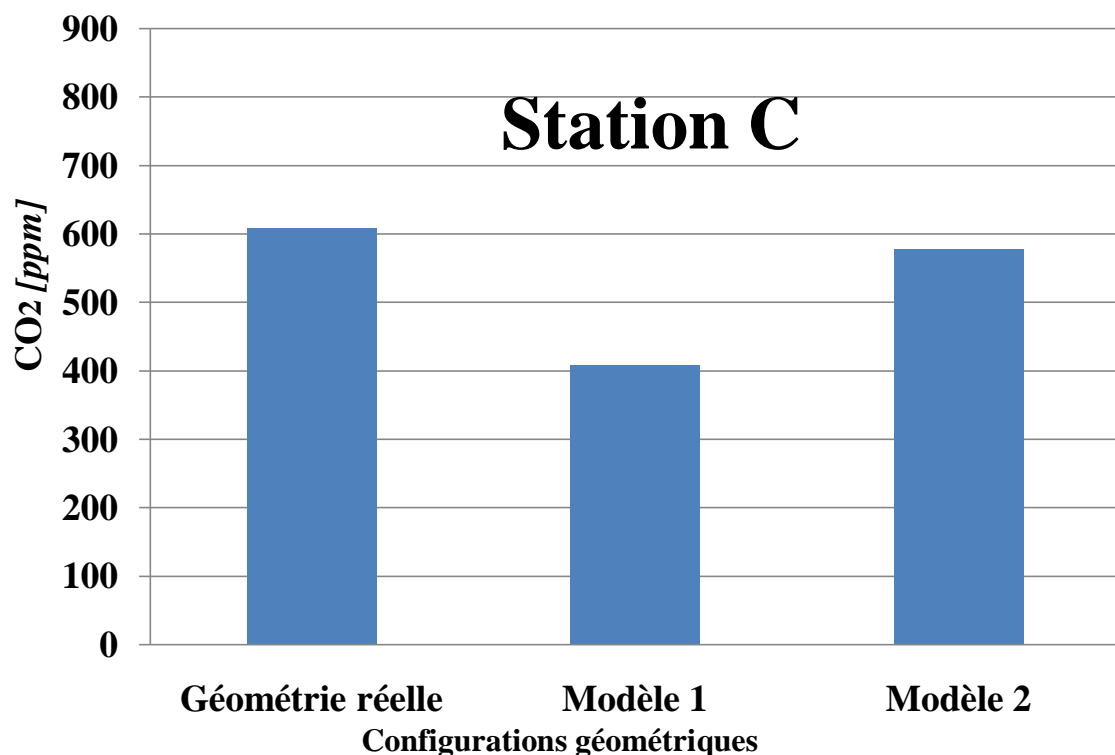


Fig. VIII.13. Concentrations du CO₂ simulé par CFD pour les trois géométries dans la station C.

VIII.3.5. Intérêt de l'étude des trois stations

Les résultats de la simulation confirment la complexité du phénomène et les fluctuations dans les valeurs et les concentrations. En conséquence, la lecture générale de la dispersion du CO₂ révèle des concentrations non-uniformes pour les trois géométries sur la longueur du canyon, Les principaux résultats sont entre autres:

- **La station A** : les valeurs de concentrations en CO₂ sont presque identiques avec une différence minimale [369, 455 & 386 ppm qui correspond respectivement à la géométrie réelle, à la Proposition 1 et Proposition 2].
- **La station B** : Un dégagement de la pollution grâce à la discontinuité du canyon [< 300 ppm pour les trois géométries].

Il faut préciser que les stations A et B présentent un comportement de dispersion de CO₂ presque identique pour les trois géométries.

- **La station C** en revanche, a des comportements de dispersion variable qui nécessite une analyse approfondie suite à l'existence de plusieurs contraintes, comme la déviation en aval de la rue Canyon et les configurations architecturales non-uniformes pour les trois géométries dans cette station.

VIII.4. Analyse approfondie de la station C

VIII.4.1. Division de la station C en deux points de repères

Pour mieux estimer un degré d'optimisation de la qualité de l'air en conséquence à des restructurations architecturales et urbanistiques, cette étape de recherche concerne la **station C** en aval de la rue Canyon, qui nécessite une analyse approfondie à cause de l'existence de plusieurs contraintes dans cette station, entre-autre un contournement autour du dernier îlot et des configurations architecturales non-uniformes pour les trois géométries. Ces aspects particuliers provoquent des comportements de dispersion variable et des turbulences de l'écoulement de l'air.

VIII.4.2. Résultats de simulation au point 1 - Station C

Le **Point 1** est situé à la fin de la rue Canyon (**Fig. VIII.14/15**), à une hauteur de 1,5 m. Après simulation, ce point présente un CO₂ > 1000 ppm, taux considérablement élevé sous la conception de la géométrie réelle et le **Modèle 2** (**Tableau. VIII.3/4**). Pour le **Modèle 1** en revanche, le CO₂ est estimé à moins de **300 ppm**, cette optimisation de la qualité de l'air est toujours liée au rapport de prospect (**H/W**) réduit à **0,64** [a été **1,34** pour la géométrie réelle].

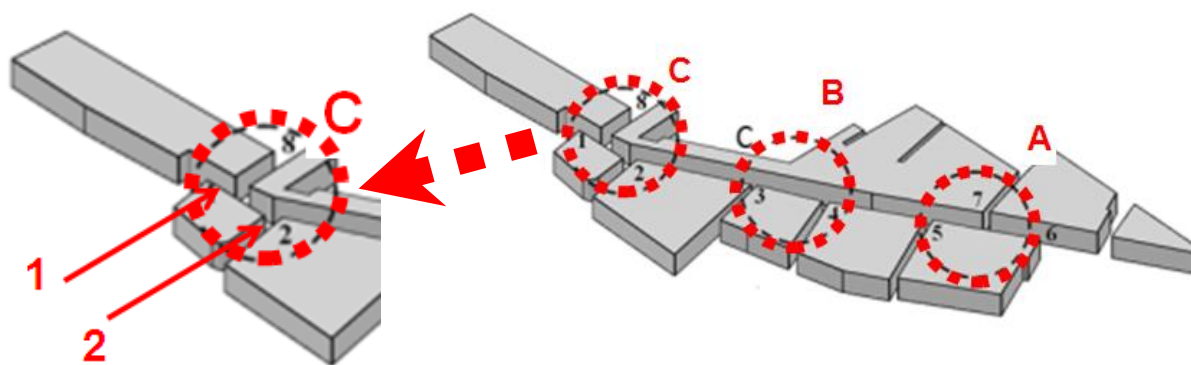


Fig. VIII.14. (À gauche) Les points 1 et 2 de la station C. (À droite) Positions des stations [A, B et C], et les points en amont pour chaque rue.

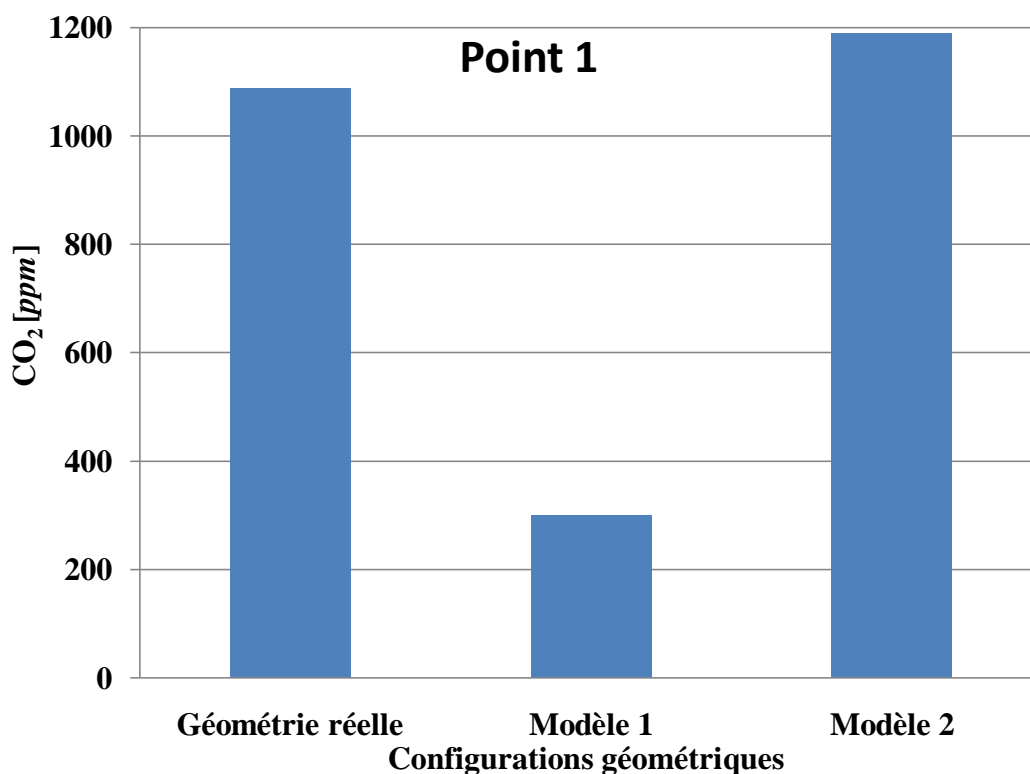


Fig. VIII.15. Concentrations du CO₂ simulé par CFD des trois géométries au point 1

Tableau. VIII.3. Caractéristiques générales de chaque rue. (Cf. Fig. VIII.14).

Points Fig.14(g)	En (m). Prospects et longueurs des voies			Caractéristiques des voies			Valeurs du CO2 simulé [ppm]			(x, y, z) m		
	W	L	H	Nature des parois	Couleurs des parois	Occultation/Ombrage	Géométrie actuelle	Modèle 1	Modèle 2			
1	Géométrie actuelle	5.2	138.64	7	rugueuse	Non	1087	-	-	181, 192.1, 1.5		
	Modèle 1	10.93	138.64	7			<300	-				
	Modèle 2	5.2	138.64	4			-	1189				
	2	3.67	11.59	7			Jaune	Oui	685.5	368.6	438.8	201.91, 190.02, 1.5
	3	1.71	19.19	7					254.83, 205.9, 1.5			
	4	2.15	23.84	7					<300	<300	<300	281.14, 214.5, 1.5
	5	2.48	29.05	7					Non			302.42, 229.14, 1.5
	6	7.9	138.64	7			Rose	Non	373.5	396.5	352.92	302.42, 245, 1.5
7	1.68	21.79	7	289.97, 242.87, 1.5								
8	4.78	12.31	7	jaune	Oui	<300			<300	<300	187.91, 194.59, 1.5	

Tableau. VIII.4. Concentrations du CO₂ au point 1 et Caractéristiques des rues.

Points	Prospect	Caractéristiques des ruelles			Valeurs des CO ₂ simulés [ppm]		
	H/W	Nature	Couleurs	Occult	G.R*	Prop1	Prop2
	G.R*	1.34			1087	-	-
1	Prop1	0.64	bleu	jaune	-	<300	-
	Prop2	0.76	jaune	jaune	-	-	1189

G.R : Géométrie réelle ; Prop1 : Modèle1 ; Prop2 : Modèle2.

VIII.4.3. Résultats de simulation au point 2 - Station C

Au Point 2, qui se positionne à l'amont d'une rue, qui est perpendiculaire au Canyon urbain (Fig. VIII.16), le CO₂ varie entre 685,5 et 438,8 [ppm] sous la conception respective de la géométrie réelle et Modèle 2 tandis que ce CO₂ est inférieur à 400 ppm sous la conception du Modèle 1, cette concentration prouve que le Modèle 1 optimise le microclimat par le dégagement du CO₂ d'une manière efficace sous l'effet de l'augmentation de l'écoulement d'air parallèle (Tableau. VIII.3/5).

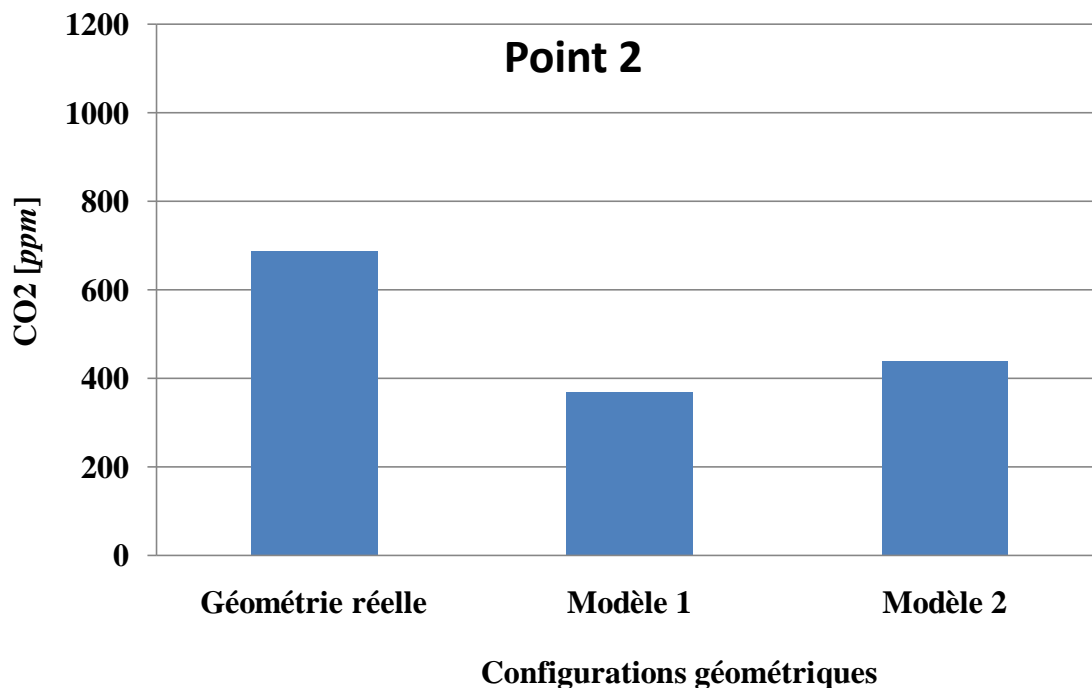


Fig. VIII.16. Concentrations du CO₂ simulé par CFD des trois géométries au point 2.

Tableau. VIII.5. Concentrations du CO₂ au point 2 et Caractéristiques des rues.

Points	Prospect	Caractéristiques des ruelles			Valeurs des CO ₂ simulés [ppm]		
	H/W	Nature	Couleurs	Occult	G.R*	Prop1	Prop2
2	1.9				685.5	368.6	438.8

G.R : Géométrie réelle ; Prop1 : Modèle1 ; Prop2 : Modèle2.

VIII.4.4. Intérêt de l'étude détaillée de la station C

L'étude affinée de la simulation en concentration de CO₂ pour la station C des trois géométries, confirme un comportement de dispersion étendu et complexe. En désassemblant cette problématique, l'analyse combinatoire entre ces points composants 1 & 2, prouve une complexité profonde et une turbulence variable de la dispersion du polluant dans le Canyon urbain,

Le **point 1** situé au dernier point de la rue Canyon, donne un avantage pour la géométrie du **Modèle 1**, parce qu'elle optimise mieux le microclimat dans la rue Canyon et la qualité de l'air à l'intérieur, La concentration du CO₂ dans cette configuration est estimée à moins de **300[ppm]**. Pour la **géométrie réelle** et le **Modèle 2** en revanche, le CO₂ est au maximum avec des taux de concentration qui dépasse **> 1000 [ppm]**.

Au **Point 2**, qui se positionne à l'amont d'une rue perpendiculaire au Canyon. L'analyse de la concentration du CO₂ sur ce point donne un avantage pour la géométrie du **Modèle 1** estimée à moins de **400 [ppm]**. La **géométrie réelle** et le **Modèle 2** en revanche, présentent des taux largement supérieurs à ceux présentés par le **Modèle 1**.

VIII.5. Comportements de dispersion complexe en CO₂ à la station C

Un écart de concentration en CO₂ s'est enregistré entre les points de la « **station C** », ceci s'est expliqué par le contournement de l'écoulement de l'air autour du dernier îlot, à cause de la déviation de l'axe médian en aval du Canyon urbain, par conséquent le dernier îlot peut réagir comme étant « *un bâtiment isolé en face d'un écoulement d'air* ».

Sur la base des études du chercheur **Oke, T. R (1990)**, un bâtiment isolé en face d'un écoulement d'air va créer (**Fig. VIII.17**):

- une pression relativement élevée, générée par la poussée du vent en face de l'îlot.
- une zone de pression maximale au niveau de la face centrale supérieure de l'îlot.
- des zones de basse pression aux bords de la façade face au vent « Windward face ».

Une autre expérience du chercheur **Oke, T. R. (1990)** confirme que la perturbation produite par l'écoulement du vent en face d'un îlot crée aussi une zone de cavité qui se caractérise par une double circulation de tourbillon au niveau du sol, intégrant aussi des zones d'aspiration des parois latérales, le tout sous la configuration générale d'aérodynamique d'air de fer à cheval (**Oke, 1990**) (**Fig. VIII.18**).

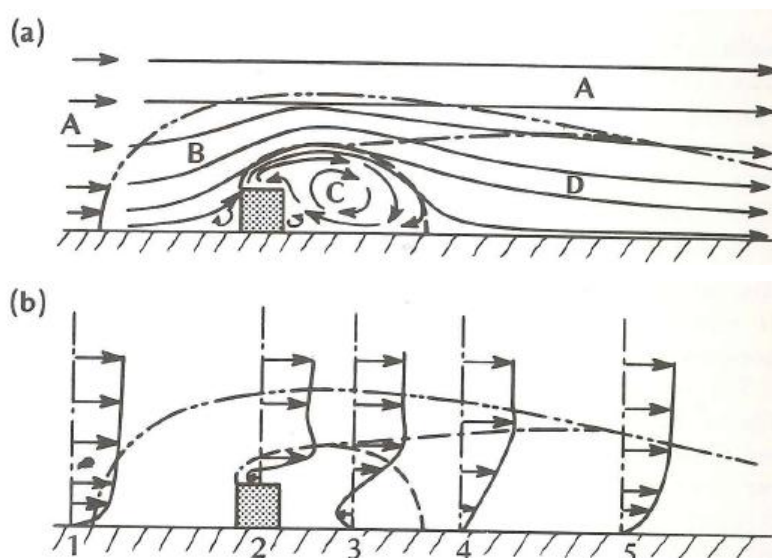


Fig. VIII.17. Comportement d'écoulement d'air autour d'un bâtiment isolé, vues latérales
(a) Lignes de courant de l'aérodynamique d'air et les zones d'écoulement, **(b)** Profils de la
 vitesse d'air et zone d'écoulement pour un bâtiment isolé orienté vers le flux d'air.

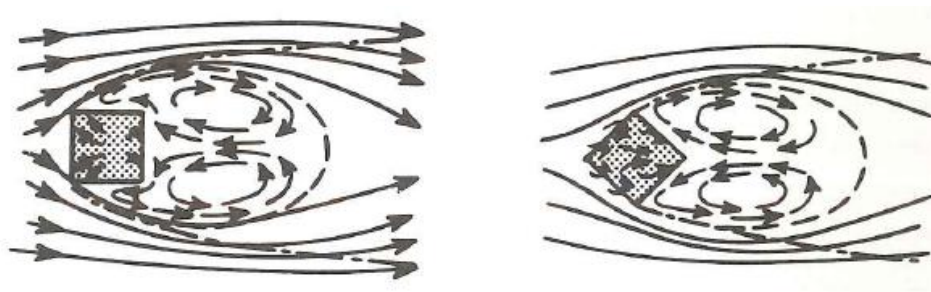


Fig. VIII.18. Vue en plan des lignes pour courant d'aérodynamique d'air, de deux orientations de
 bâtiments en face aux écoulements d'air (**Oke, 1990**).

VIII.6. La station C et la simulation par CFD en 3D de la pollution

VIII.6.1. la configuration du Canyon (à la station C) influence son environnement

Le constat précédent démontre un cumul de la pollution au niveau du dernier îlot du Canyon urbain pour la configuration géométrique réelle ainsi que pour les deux modèles proposés, toutefois cette concentration en CO₂ reste fluctuante et variable entre les trois configurations de chaque point. L'analyse dans la section suivante permet d'étudier chaque configuration géométrique en corrélation avec son comportement d'écoulement d'air, cela par le biais d'un moyen performant qui est la simulation par CFD (en 3D), l'analyse des résultats est présentée comme suit :

VIII.6.2. Simulation de la pollution pour la géométrie actuelle (par CFD /3D)

La géométrie réelle crée un Vortex turbulent (*tV*) qui affecte toutes les faces de l'environnement immédiat en CO₂, même l'îlot opposé est touché par la turbulence de la pollution, réfléchi par les faces des bâtiments (*Pf*) opposés (**Fig. VIII.19**) (**Tableau. VIII.6**).

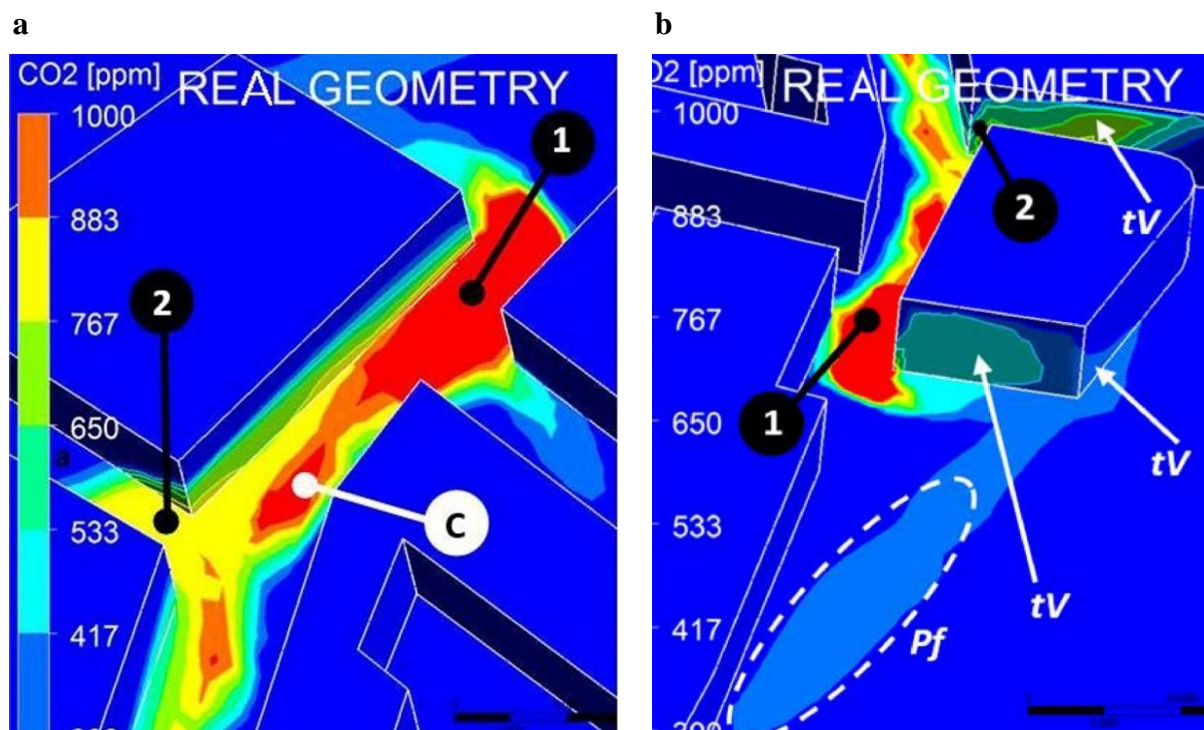


Fig. VIII.19. Simulation en 3D de la dispersion du CO₂ [ppm] au Canyon urbain. l'actuelle géométrie du Canyon crée des vortex turbulents (*tV*) qui affectent toutes les faces, même celle qui sont en faces (*Pf*). Vues dans le Canyon urbain (a) Vue au Canyon sur la station C, en parallèle au sens de l'écoulement d'air, (b) Vue au sens inverse.

Tableau. VIII.6. Résultat de simulation en 3D de la géométrie réelle.

Points repères	Taux du CO ₂
Point 1	1087 [ppm],
Point 2	685.5 [ppm],

VIII.6.3. Simulation de la pollution pour le modèle 1 (par CFD /3D)

Le **Modèle 1** promut une qualité d'air optimale dans la rue Canyon, cette amélioration est estimée à **46%** par rapport à la géométrie réelle, de ce fait elle favorise l'écoulement parallèle (Vent de l'été de direction N/E), en conséquence la pollution reste seulement au niveau de l'axe du Canyon (**Fig.VII.20, Tableau. VIII.7**).

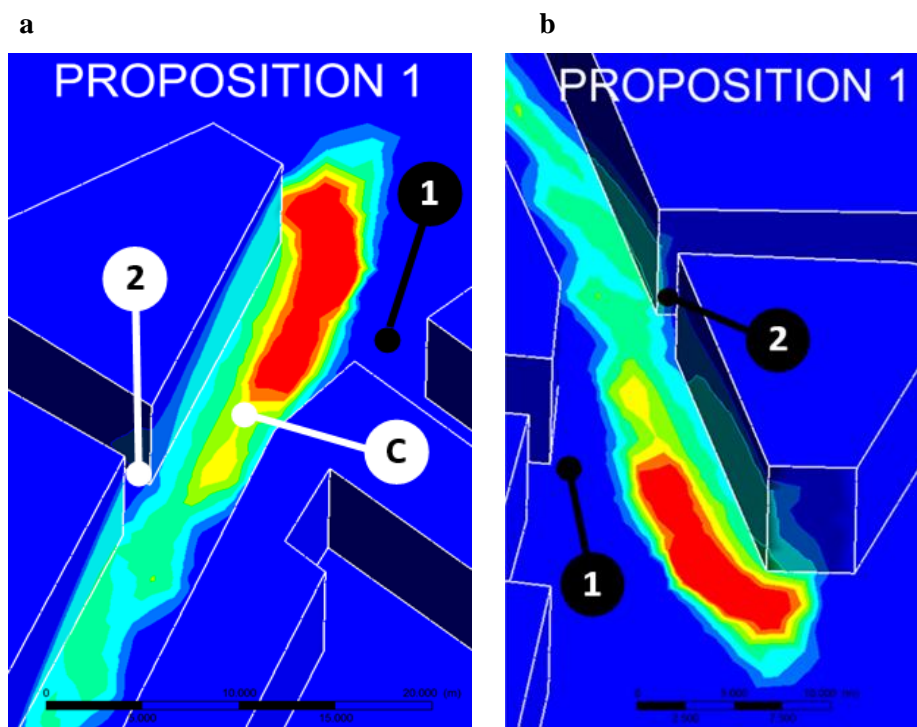


Fig. VIII.20. Simulation par CFD en 3D de la dispersion du CO₂ [ppm] au Canyon urbain. Le **Modèle 1** apporte une qualité d'air optimisé (mieux de **46 %** que la géométrie actuelle).

Vues dans le Canyon urbain **(a)** Vue au Canyon sur la station C, en parallèle au sens de l'écoulement d'air, **(b)** Vue au sens opposé.

Tableau. VIII.7. Résultat de simulation en 3D du **Modèle 1**.

Points repères	Taux du CO ₂
Point 1	<300 [ppm]
Point 2	368.6 [ppm]

VIII.6.4. Simulation de la pollution pour le modèle 2 (par CFD /3D)

La **Modèle 2** crée encore du Vortex turbulent (Tv), qui pourtant affecte peu de faces de l'environnement immédiat en CO₂. Toutefois, l'îlot de face est moins touché à cause de la faible hauteur du bâtiment responsable de la turbulence (est moins dominant en hauteur). Néanmoins, cette proposition peut également apporter une qualité d'air optimale par rapport à la géométrie réelle d'environ **36%**. Formellement le **Modèle 2** permet de dégager la pollution à travers le toit avec une grande performance, ceci sous l'effet de turbulence ou de la concentration en CO₂ (Pr) qui se bascule à travers les toits du dernier bâtiment de la **station C**, à cause de la faible hauteur de celui du bâtiment du dernier îlot par rapport à son état initial (Prospect $[H/W]=0.76$) (Fig.VII.21, Tableau. VIII.8).

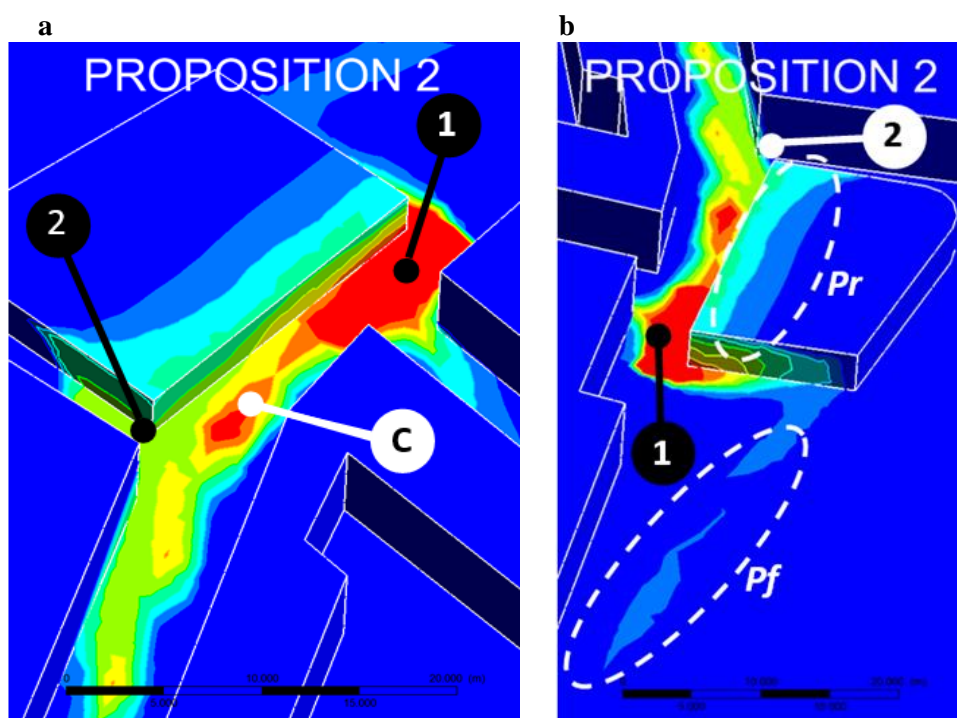


Fig. VIII.21. Simulation par **CFD** en **3D** de la dispersion du CO₂ [ppm] au Canyon urbain: La configuration urbaine du **Modèle 2** permet une meilleure ventilation de la rue et augmente le taux de dissipation de la pollution (de **36%**) à cause de la hauteur faible du dernier bâtiment (Prospect $[H/W]=0.76$).

Tableau. VIII.8. Résultat de simulation en 3D du **Modèle 2**.

Points repères	Taux du CO ₂
Point 1	1189 [ppm]
Point 2	438.8 [ppm]

VIII.6.5. Intérêt de la simulation par CFD en 3D de la pollution sur la station C & son environnement (pour les trois géométries)

Dans ce travail de recherche, la simulation par **CFD (en 3D)** de la station C, nous a aidée à analyser le comportement général de la dispersion de polluant en CO₂ à travers toute la longueur du Canyon urbain. Les principaux résultats correspondant aux configurations géométriques proposées sont :

- Pour la **géométrie réelle**, un Vortex turbulent (*tV*) a affecté tout l'environnement immédiat en CO₂, même l'îlot de l'autre rive était touché par cette turbulence du taux de pollution.
- Le **Modèle 1** a favorisé l'optimisation de la qualité de l'air dans la rue Canyon, à **46%** par rapport à la géométrie réelle, sa configuration géométrique promouvait l'écoulement parallèle, en conséquence la pollution était restée seulement au niveau de l'axe du Canyon.
- Le **Modèle 2** a favorisé la création d'un Vortex turbulent (*Tv*), il pouvait apporter une optimisation de **36%** tandis que le plus important était que cette proposition permettrait de dégager le CO₂ à travers le toit (*Pr*) [du dernier bâtiment], sous l'effet du basculement à cause de la faible hauteur de ce bâtiment (rapport de prospect faible, **H/W = 0.76**). Cette configuration géométrique est de loin meilleure que la précédente.

VIII.7. Conclusion

A travers ce chapitre, il est clair que la démarche scientifique adoptée est la simulation par **CFD (en 3D)**, il s'agit d'abord d'une méthodologie expérimentale qui a pour objectif d'optimiser la qualité de l'air au microclimat du Canyon urbain. L'analyse des différentes étapes de simulations en 3D des trois configurations géométriques, présente des fluctuations en concentrations de CO₂ et des dispersions du polluant non-uniformes pour les trois géométries sur la longueur du Canyon urbain.

Nous avons adopté une méthode de division du cas d'étude en plusieurs secteurs pour pouvoir appréhender le comportement de la dispersion du polluant, et le mettre en cause par une étude combinatoire entre l'impact de la morphologie urbaine et les conditions d'écoulement d'air à l'intérieur de la rue Canyon.

La station A : les concentrations en CO₂ pour les trois géométries sont de l'ordre : 369, 455 et 386 [ppm] qui correspondent respectivement à la géométrie réelle, Modèle 1 et Modèle 2.

La station B : les concentrations en CO₂ pour les trois géométries sont inférieures à 300 [ppm], ces valeurs avantageuses sont acquises grâce à la discontinuité du canyon et de l'existence de typologie intermittente qui divise le Canyon urbain en segments. Ces morphologies urbaines ont un impact considérable sur l'aéroulque de l'air, parce qu'elles :

1. Favorisent la circulation du vent et le basculent entre les différentes rues;
2. Favorisent une combinaison complexe de flux canalisés bifurqués;
3. Influencent également la vélocité du vent et la répartition des concentrations de polluants et génèrent plus de tourbillons pour une meilleure dispersion;
4. Fournissent une zone de basse pression et des puissants mécanismes de dispersion;
5. Développent aussi des tourbillons intermittents.

Il est important de préciser, que les **stations A & B** présentent des taux de concentration de CO₂ presque identique pour les trois configurations géométriques.

Au niveau de la **station C** existe de nombreuses contraintes morphologiques, celles d'une déviation à l'aval du Canyon et aussi des configurations architecturales non-uniformes. Cette **station** n'a pas réagi comme les deux stations précédentes, en revanche, elle a eu des comportements de dispersion variable et a confirmé un comportement complexe de dispersion. Il est donc indispensable d'approfondir l'analyse sur cette **station (C)**.

L'usage de l'outil de la simulation par CFD (**en 3D**) nous a permis de saisir instantanément le comportement général de la dispersion à travers toute la longueur du Canyon urbain, surtout pour cette station. Le résultat global nous permet de conclure que la morphologie urbaine et les variations géométriques influencent considérablement la dispersion du polluant dans le Canyon urbain, on peut citer les impacts visibles sur les trois géométries de cette station (C), qui sont entre autres :

- Pour la **géométrie réelle**, un Vortex turbulent (**tV**) a été créé, il a affecté tout l'environnement immédiat en CO₂, même l'îlot de l'autre rive a été touché par cette turbulence de pollution, il a été réfléchi ainsi aux faces des bâtiments (**Pf**) opposés.

- Le **Modèle 1** a favorisé un degré élevé de la qualité de l'air dans la rue Canyon, à **46%** par rapport à la géométrie réelle, sa configuration géométrique a promu l'écoulement parallèle, en conséquence la pollution a persisté seulement à la zone de l'axe du Canyon.
- Et Le **Modèle 2** conduisait à la création d'un Vortex turbulent (Tv), qui a apporté une optimisation de **36%**. Tandis que le plus important, c'est que le **Modèle 2** a permis de dégager le CO_2 à travers le toit (Pr) du bâtiment du dernier îlot par effet de basculement (à cause de son faible rapport de prospect, $H/W=0.76$).

En désassemblant cette complexité du problème de dispersion de polluant, l'étude analytique des points **1 & 2**, composants de la **station C**, a aussi confirmé une complexité profonde de turbulence et de fluctuation de concentration du polluant sur les trois configurations géométriques, donc:

- Le **point 1**, situé au dernier point de la rue Canyon, a donné avantage au **Modèle 1** par rapport à la **géométrie réelle** et au **Modèle 2** parce que le taux du CO_2 a été au dessous de **300[ppm]** pour la première configuration, les deux autres en revanche, ont dépassé les **1000[ppm]**.
- Le **point 2**, qui se positionne à l'amont d'une rue perpendiculaire au Canyon, a octroyé aussi un avantage pour la configuration du **Modèle 1** par rapport à la **géométrie réelle** et au **Modèle 2**, parce que le taux du CO_2 a été au dessous de **400[ppm]** pour la première configuration, par contre les deux autres ont, encore une fois, largement dépassé le taux de celle présentée par la première proposition.

References.**Revue scientifique**

- Ahmed, K.S., 2003. Comfort in urban spaces : defining the boundaries of outdoor thermal comfort for the tropical urban environments. *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 103-110.
- Aidaoui L, Triantafyllou AG, Azzi A, Garas SK. Elevated stacks' pollutants' dispersion and its contributions to photochemical smog formation in a heavily industrialized area, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8(2014) 213-27.
- Ali-Toudert, F., Ddjenane, M., Bensalem, R., Mayer, H., Outdoor thermal comfort in the old desert city of beni-Isguen, Algeria. 2004. *Climate Research*, Vol. 28, pp. 243-256.
- Arnfield, A. 1990. Street design and urban canyon solar access. *Energy and building*. Vol. 14, pp. 183-200.
- Arnfield, A. J. 1990. Canyon geometry, the urban fabric and nocturnal cooling : a simulation approach. *Physical Geography*. Vol. 11 (3), pp. 220-239.
- Assimakopoulos, V. D., Georgakis, C. & Santamouris, M. 2006. Experimental validation of a computational fluid dynamics code to predict the wind speed in street canyons for passive cooling purposes. *Solar Energy*, 80, 423-434.
- Bourbia, F. and Awbi, H. B., 2004. Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate Part 1: Air surface temperature measurements. *Renewable Energy*, Vol. 29, pp, 249-262.
- Bourbia, F. and Awbi, H. B., 2004. Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate Part 2: Shading simulation. *Renewable Energy*, Vol. 29, pp, 249-262.
- Grundström, K., Johansson, E., Mraisi, M., Ouahrani, D., 2003. Climat et urbanisme – la relation entre confort thermique et la forme du cadre bâti. Rapport 8. *Housing Development and Management*. Lund University.
- Gu, Z.-L., Zhang, Y.-W., Cheng, Y. & Lee, S.-C. 2011. Effect of uneven building layout on air flow and pollutant dispersion in non-uniform street canyons. *Building and Environment*, 46, 2657-2665.
- Meir, I. A., Pearlmutter, D., Etzon, Y., 1995. On the microclimatic behavior of two semi-enclosed attached courtyards in a hot dry region. *Building and Environment*, Vol. 30 (4), pp. 563-572.

- Nunez, M. and Oke, T. R., 1977. The energy balance of an urban canyon. *Journal of applied Meteorology*, Vol. 16, pp. 11-19.
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K. & Gonzalez-Flesca, N. 2003. Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37, 155-182.
- Pearlmutter, D., Bearliner, P., Shaviv, E., 2007. Integrated modeling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyon. *Building an Environment*. Vol. 42, pp 2396-2409.
- Pearlmutter, D., Bearliner, P., Shaviv, E., 2006. Physical modeling of pedestrian energy exchange within the urban canopy. *Building an Environment*. Vol. 41, pp 783-795.
- Pearlmutter, D., Bitan,, A., Bearliner, P., 1999. Microlimatic analysis of « compact » in an arid zone. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 4143-4150.

Sitographies

- Larousse. 2015. *Situation de Ghardaïa dans le Sahara septentrional* [Online]. Available: http://www.larousse.fr/encyclopedie/autre-region/le_Sahara/142022 [Accessed 9 Aout 2015].

Livres de référence

- Benyoucef, B. 2010. *Le M'Zab parcours millénaire*, Alger.
- Oke, T. R. 1990. *Boundary Layer Climates Second edition*, London.

Divers

- EEA 2012. Monitoring CO2 emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2012. European Environment Agency ed. Copenhagen K, Denmark.
- ONM 2012. meteorological data of 2010, 2011, 2012. *Meteorology National Office, GHARDAÏA Unit*.
- WMO 2008. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, CH-1211 Geneva 2, Switzerland.

CHAPITRE IV:

CONCLUSION GÉNÉRALE

BILAN DE NOTRE RECHERCHE, LIMITES DE RECHERCHE, PERSPECTIVES ET
INTÉRÊT DE LA DÉMARCHE

IX.1. Bilan de notre recherche

Ce travail de recherche traite l'étude de l'impact des morphologies urbaines sur l'écoulement d'air pour un tissu vernaculaire complexe; pour ce faire, nous avons choisi le cas d'étude dans la cité de Ghardaïa qui représente la vallée ibadite qui est une région saharienne classée patrimoine mondial de l'humanité. Dans ce désert inhospitalier, les Mozabites ont su s'adapter à la spécificité géographique, climatique et atmosphérique de leur ville. Ils ont construit des Ksour en parfaite adéquation avec l'atmosphère et en complète harmonie avec la nature.

Nous proposons, en guise de conclusion, une relecture transversale de notre étude. Dans la première phase de l'analyse bibliographique, nous avons évoqué l'impact important des sources énergétiques d'une ville et l'intensité de l'îlot de chaleur urbaine (ICU) sur les mouvements convectifs de l'aéroulque d'air au niveau de la canopée urbaine et le Canyon urbain

Dans le chapitre 2, l'interaction entre l'aéroulque de l'air et la conception morphologique urbaine d'un Canyon a révélé une influence importante de certains éléments sur l'écoulement d'air, qui sont; les configurations non régulières des toits ; les conceptions urbaines des villes ; les morphologies urbaines non-uniformes et les sections intermittentes.

Toujours dans le même chapitre, la recherche de [Edussuriya et al \(2014\)](#) a révélé le rôle prépondérant d'une **méthode d'analyse statistique** afin de limiter le champ étendu des éléments morphologiques qui influent sur l'écoulement d'air, en ayant désigné par leurs méthodes, seulement neuf éléments qui ont été considérés comme les plus influents.

Pour compléter la recherche, dans le chapitre suivant, **16** recherches scientifiques ont été traités, représentant l'état de l'art du domaine « **Pollution urbaine et simulation par CFD** », ces exemples sont tirés des études génériques ou des études de cas d'une configuration géométrique particulière, l'outil primaire de ces recherches a été la simulation par **CFD** en **2D** ou **3D**.

L'étude de cette thèse a nécessité deux phases d'intervention, une phase de mesure in situ et une phase de simulation. Plusieurs paramètres microclimatiques ont été mesurés tels que le

taux du CO₂ en [ppm], la température en [°C], l'humidité en [%], la vitesse du vent [m/s], l'éclairement en [Lux] et l'intensité sonore [DB], ces paramètres ont été analysés au niveau du Canyon urbain de la ville de Ghardaïa et ont été comparés aux données de la station météorologique (ONM à 20km en dehors de Ghardaïa). Les premiers résultats obtenus ont révélé **un microclimat inconfortable** et **un environnement pollué** ainsi qu'un **milieu sonore nuisible**.

Les résultats des mesures in situ ont été incorporés dans un modèle de simulation de **CFD** (en **3D**). De cette façon, nous avons pu analyser le comportement global du polluant sur la longueur du Canyon urbain.

Les résultats de simulation du modèle d'origine (par **Ansys-Cfx**) se sont révélés précis et compatibles avec les résultats des mesures réelles pour la majorité des cas, en revanche, les nouveaux résultats obtenus par simulation pour les configurations géométriques alternatives, ont révélés des différences importantes de dispersion du polluant dans la **Station C** (en aval du Canyon) pour les trois configurations géométriques ; **géométrie réelle** et **Modèle 1 & 2**.

- pour la **géométrie réelle** : les simulations ont décrit un effet de cumul de la pollution seulement en aval, cet effet est dû à la déviation du Canyon à la zone final, des vortex turbulents (**tV**) ont été créés et ont affecté tout l'environnement immédiat en CO₂, même l'îlot opposé a été touché par cette turbulence de pollution (**Pf**).
- pour le **Modèle 1**, qui a favorisé d'abord la qualité de l'air dans la rue Canyon, avec une amélioration de **46%** par rapport à la géométrie réelle, sa configuration géométrique a promu l'écoulement parallèle, en conséquence la pollution a persisté seulement à la zone de l'axe médian du Canyon.
- en revanche, le **Modèle 2**, dont le rapport de prospect a aussi diminué comme pour le **Modèle 1**, a octroyé une optimisation estimée à **36%**. D'après l'analyse, la pollution a été cumulée au dernier îlot (même chose pour la **géométrie réelle**) et surtout au niveau du toit sous l'effet des vortex turbulent (**tV**) qui ont été développés en aval du Canyon urbain tout en basculant la pollution cumulée à travers le toit.

L'objectif principal de la projection de **Modélisation 1&2** était de réduire la pollution de l'air dans le Canyon urbain. La méthodologie adoptée vise à répondre aux besoins contemporains des habitants du Ksar de Ghardaïa et à réduire, au même temps, au maximum la restructuration sur leur patrimoine bâti. En conséquence, nous avons pu analyser des configurations morphologiques urbaines multiples sur le microclimat urbain et sur la qualité

de l'écoulement de l'air dans un Canyon urbain en particulier pour le cas de l'îlot traditionnel complexe du Ksar de Ghardaïa.

IX.2. Limites de recherches et perspectives

Toutefois, Cette étude présente certaines limites (**Figure. IX.1**) :

- En raison de la diversité de motorisation et de **l'absence des statistiques réelles** sur la circulation routière à Ghardaïa et dans le Canyon urbain, un modèle simplifié composé de voitures standards et identiques à éjection similaire en CO₂ (évalué à **140gCO₂/km/voiture**) (**EEA, 2012**) a été adopté, ces voitures ont été réparties selon une distance similaire tout au long de la rue et ont été considérées dès lors comme des sources régulières linéaires.
Cette première lacune d'étude, n'a pas empêché la démarche globale qui vise à comparer des configurations géométriques entre elles, quelle-que soit la concentration du CO₂ et à évaluer l'impact des autres paramètres sur l'écoulement d'air sur un Canyon urbain.
- Dans ce travail de simulation, le transfert de chaleur est limité à une « **température statique** » de **38°C** dans l'ensemble du domaine de calcul, par contre la température est différente à chaque point du domaine de calcul de la CFD. Si ces températures ont été mesurées et ont été introduites ainsi dans le modèle d'Ansys-Cfx, les résultats seraient plus probants.
- Il est important de signaler, qu'au niveau des ruelles perpendiculaires du Canyon urbain, des commerçants utilisent temporairement des occultations horizontales par les matériaux légers (e.g. en tissu), servant comme éléments de protection contre les irradiances solaires ce qui perturbe la ventilation du Canyon et la validation des valeurs mesurées par rapport aux résultats de la CFD. Un écart considérable a été donc observé entre les valeurs mesurées et celles simulées au niveau de la **station B**.
- Par ailleurs, le canyon urbain a des particularités que nous n'avons pas pu introduire dans le modèle d'Ansys-Cfx, par manque d'informations et de temps, puisque chaque façade est différente d'une autre par sa rugosité, sa couleur et ses compositions en ouvertures (dimensions et matériaux). Ces données auraient pu avoir un impact conséquent sur les résultats de la simulation si elles ont été introduites.

- La stratégie urbaine pour réduire le taux de circulation mécanique et favoriser le transport en commun représente une alternative permettant d'éradiquer ce problème, son utilisation permet de diminuer la concentration de la pollution dans les rues Canyon.
- Promouvoir pour des futures recherches, dans le cadre d'un processus additionnel pour la simulation en **CFD**, les effets des réactions chimiques et les effets aérodynamiques des arbres et autres caractéristiques végétales (**Figure. IX.2**).
- Favoriser aussi, à des études combinatoires qui touchent à la fois l'espace extérieur et l'espace intérieur.

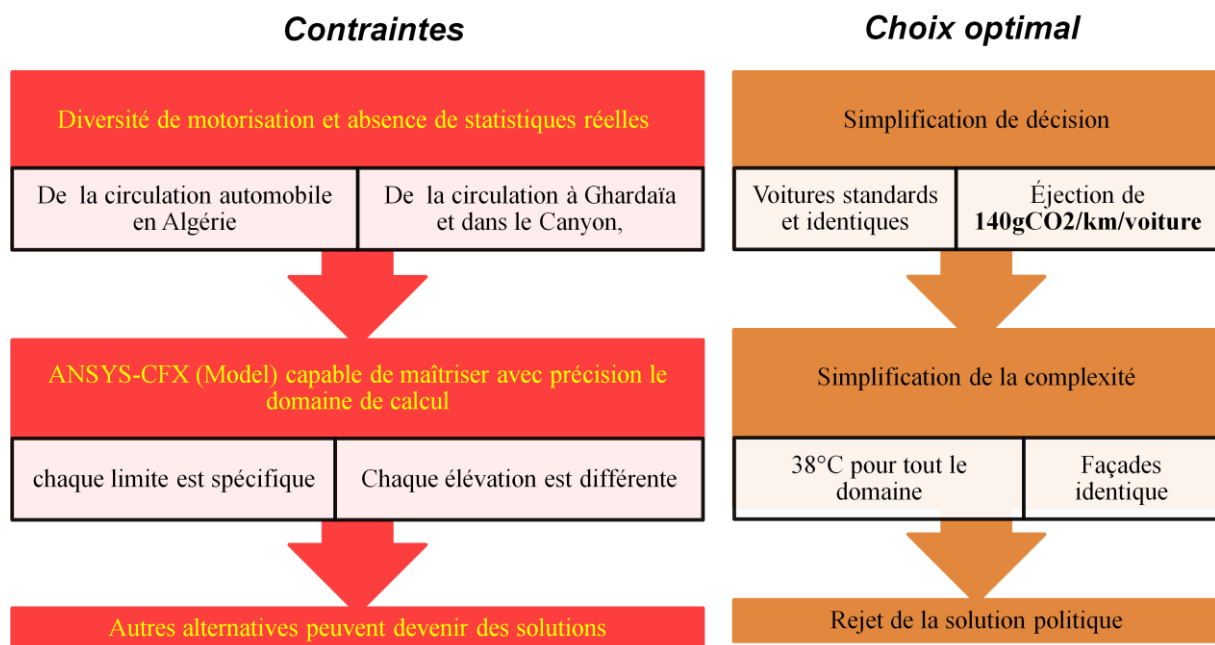


Figure. IX.1. Démarche de la recherche, limites et paramètres adoptés

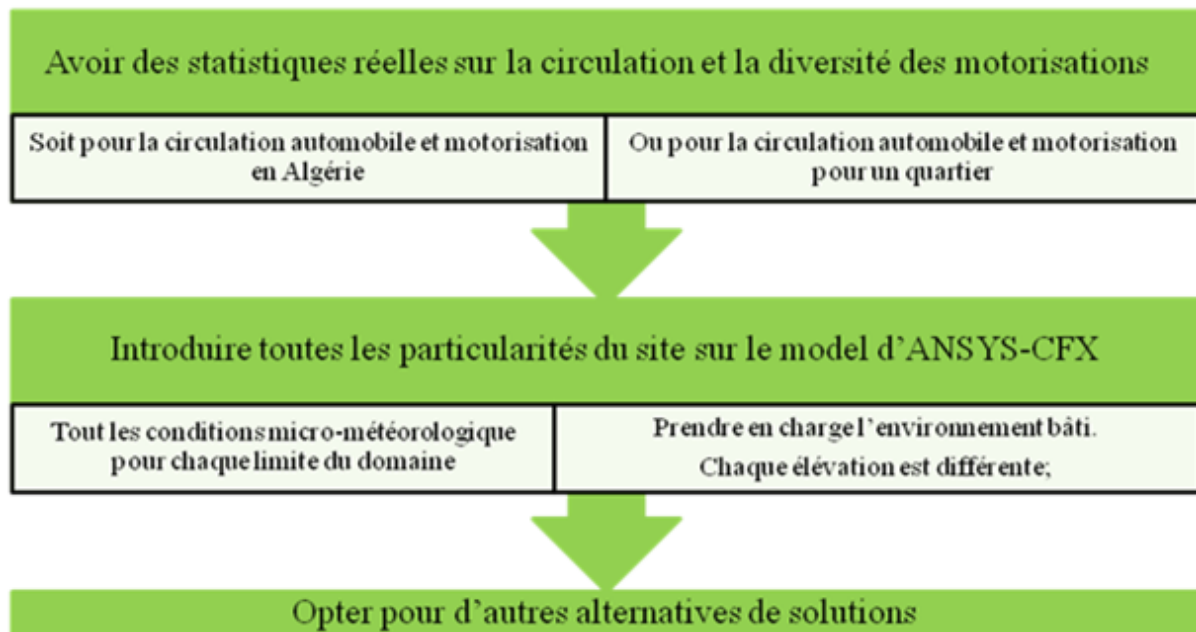


Figure. IX.2. Future recherche.

IX.3. Intérêt de la démarche

Le développement des outils d'aide à la décision sont les méthodes les plus prometteuses pour les années à venir. Le domaine de la simulation par CFD fait partie de ces méthodes, actuellement la CFD fait l'objet de débats et de recherches dans la communauté des chercheurs, architectes, aménageurs et urbanistes puisque cette méthodologie de pointe de simulation (**2D/3D/Etat statique/Etat dynamique**) peut être intégrée dans un projet, soit dans la phase de conception ou dans la phase d'optimisation d'un cas réel (**Figure. IX.3**).

La méthodologie adoptée permettrait d'envisager des formes plus complexes pour des morphologies urbaines différentes afin de mieux identifier et comprendre les effets des configurations géométriques.

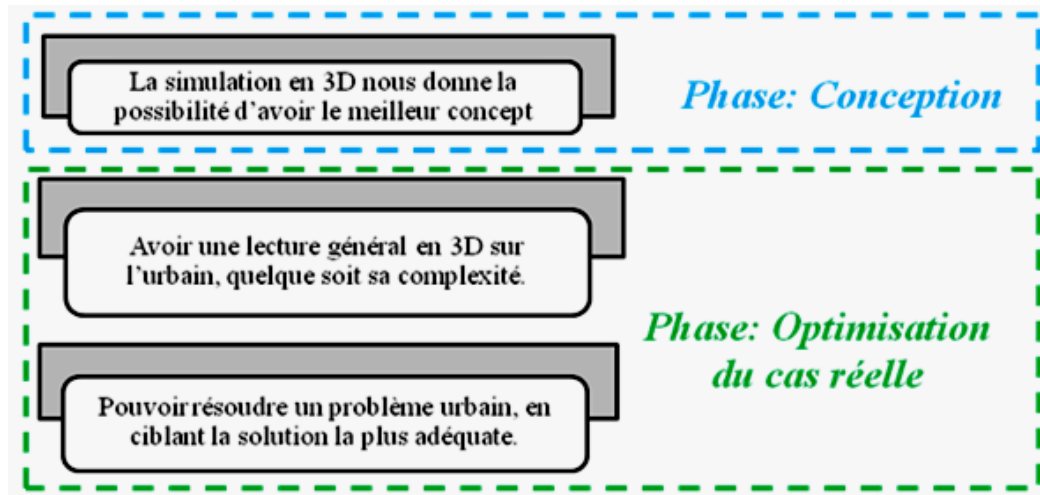


Figure. IX.3. Intérêt de la démarche

References

Revues scientifiques

- Assimakopoulos, V. D., Georgakis, C. & Santamouris, M. 2006. Experimental validation of a computational fluid dynamics code to predict the wind speed in street canyons for passive cooling purposes. *Solar Energy*, 80, 423-434.
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K. & Gonzalez-Flesca, N. 2003. Modelling air quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37, 155-182.

Divers

- EEA 2012. Monitoring CO₂ emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2012. European Environment Agency ed. Copenhagen K, Denmark.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Revues scientifiques

- Ahmed, K.S., 2003. Comfort in urban spaces : defining the boundaries of outdoor thermal comfort for the tropical urban environments. *Energy and Buildings*, Vol. 35, pp. 103-110.
- Ali-Toudert, F., Ddjenane, M., Bensalem, R., Mayer, H., Outdoor thermal comfort in the old desert city of beni-Isguen, Algeria. 2004. *Climate Research*, Vol. 28, pp. 243-256.
- Aidaoui L, Triantafyllou AG, Azzi A, Garas SK. Elevated stacks' pollutants' dispersion and its contributions to photochemical smog formation in a heavily industrialized area, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 8(2014) 213-27.
- Akbari, H., Kurn, D. M., Bretz, S. E. & Hanford, J. W. 1997. Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and Buildings*, 25, 139-148.
- Akbari, H., Pomerantz, M. & Taha, H. 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70, 295-310.
- Ali-Toudert, F. & Mayer, H. 2006. Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate. *Building and Environment*, 41, 94-108.
- Ali-Toudert, F., Djenane, M., Bensalem, R. & Mayer, H. 2005. Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria. *Climate Research*, 243-256.
- Arnfield, A. 1990. Street design and urban canyon solar access. *Energy and building*. Vol. 14, pp. 183-200.
- Arnfield, A. J. 1990. Canyon geometry, the urban fabric and nocturnal cooling : a simulation approach. *Physical Geography*. Vol. 11 (3), pp. 220-239.
- Assimakopoulos, V. D., Georgakis, C. & Santamouris, M. 2006. Experimental validation of a computational fluid dynamics code to predict the wind speed in street canyons for passive cooling purposes. *Solar Energy*, 80, 423-434.

- Balogun, A., Tomlin, A., Wood, C., Barlow, J., Belcher, S., Smalley, R., Lingard, J. N., Arnold, S., Dobre, A., Robins, A., Martin, D. & Shallcross, D. 2010. In-Street Wind Direction Variability in the Vicinity of a Busy Intersection in Central London. *Boundary-Layer Meteorology*, 136, 489-513.
- Bencheikh, H. & Rchid, A. 2012. The Effects of Green Spaces (Palme Trees) on the Microclimate in Arides Zones, Case Study: Ghardaia, Algeria. *Energy Procedia*, 18, 10-20.
- Blocken, B., Tominaga, Y., Stathopoulos, T. 2013. CFD simulation of micro-scale pollutant dispersion in the built environment. *Building and Environment (Virtual Special Issue)*. 64, 225–230.
- Bouchair, A., 2004, Decline of urban ecosystem of Mzab valley, *Building and Environment*, 39,719-32.
- Bourbia, F. and Awbi, H. B., 2004. Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate Part 1: Air surface temperature measurements. *Renewable Energy*, Vol. 29, pp, 249-262.
- Bourbia, F. and Awbi, H. B., 2004. Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate Part 2: Shading simulation. *Renewable Energy*, Vol. 29, pp, 249-262.
- Carpentieri, M., Robins, A. & Baldi, S. 2009. Three-Dimensional Mapping of Air Flow at an Urban Canyon Intersection. *Boundary-Layer Meteorology*, 133, 277-296.
- Chan, A. T., Au, W. T. W. & So, E. S. P. 2003. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality—part II: multiple canopies and canyons. *Atmospheric Environment*, 37, 2761-2772.
- Chan, A. T., So, E. S. P. & Samad, S. C. 2001. Strategic guidelines for street canyon geometry to achieve sustainable street air quality. *Atmospheric Environment*, 35, 4089-4098.
- Chan, T. L., Dong, G., Leung, C. W., Cheung, C. S. & Hung, W. T. 2002. Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon. *Atmospheric Environment*, 36, 861-872.

- Dobre, A., Arnold, S. J., Smalley, R. J., Boddy, J. W. D., Barlow, J. F., Tomlin, A. S. & Belcher, S. E. 2005. Flow field measurements in the proximity of an urban intersection in London, UK. *Atmospheric Environment*, 39, 4647-4657.
- Edussuriya, P., Chan, A. & Malvin, A. 2014. Urban morphology and air quality in dense residential environments: correlations between morphological parameters and air pollution at street-level. *Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 9, No. 1, 64 - 80.
- Edussuriya, P., Chan, A. & Ye, A. 2011. Urban morphology and air quality in dense residential environments in Hong Kong. Part I: District-level analysis. *Atmospheric Environment*, 45, 4789-4803.
- Eliasson, I., 1996, Urban nocturnal temperatures, street geometry and land use. *Atmospheric Environment*, Vol. 30 (3), pp. 379-392.
- Georgakis, C. & Santamouris, M. 2006. Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes. *Energy and Buildings*, 38, 367-376.
- Grundström, K., Johansson, E., Mraisi, M., Ouahrani, D., 2003. Climat et urbanisme – la relation entre confort thermique et la forme du cadre bâti. Rapport 8. Housing Development and Management. Lund University.
- Gu, Z.-L., Zhang, Y.-W., Cheng, Y. & Lee, S.-C. 2011. Effect of uneven building layout on air flow and pollutant dispersion in non-uniform street canyons. *Building and Environment*, 46, 2657-2665.
- Gyr, A., Rys, F.-S., Mestayer, P. & Anquetin, S. 1995. *Climatology of Cities. Diffusion and Transport of Pollutants in Atmospheric Mesoscale Flow Fields*. Springer Netherlands.
- Hunter, L. J., Johnson, G. T. & Watson, I. D. 1992. An investigation of three-dimensional characteristics of flow regimes within the urban canyon. *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere*, 26, 425-432.

- Kastner-Klein, P., Berkowicz, R. & Britter, R. 2004. The influence of street architecture on flow and dispersion in street canyons. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 87, 121-131.
- Lee, D. S., Pitari, G., Grewe, V., Gierens, K., Penner, J. E., Petzold, A., Prather, M. J., Schumann, U., Bais, A., Berntsen, T., Iachetti, D., Lim, L. L. & Sausen, R. 2010. Transport impacts on atmosphere and climate: Aviation. *Atmospheric Environment*, 44, 4678-4734.
- Louka, P., Belcher, S. E. & Harrison, R. G. 2000. Coupling between air flow in streets and the well-developed boundary layer aloft. *Atmospheric Environment*, 34, 2613-2621.
- Meir, I. A., Pearlmutter, D., Etzon, Y., 1995. On the microclimatic behavior of two semi-enclosed attached courtyards in a hot dry region. *Building and Environment*, Vol. 30 (4), pp. 563-572.
- Metz, B., Davidson, O. R., Bosch, P. R., Dave, R. & Meyer, L. A. 2007. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Cambridge University Press ed. United Kingdom and New York NY USA.
- Nicholson, S. E. 1975. A pollution model for street-level air. *Atmospheric Environment* (1967), 9, 19-31.
- Nunez, M. and Oke, T. R., 1977. The energy balance of an urban canyon. *Journal of applied Meteorology*, Vol. 16, pp. 11-19.
- Offerle, B., B. C. S., Grimmond, K., Fortuniak, T., Oke, R. & Klysik, K. 2003. Temporal variability in heat fluxes over a northern european downtown. Fifth International Conference on Urban Climate, ICUC-5, Todz, 1-5 september 2003.
- Oke, T. R. 2004. Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites, International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application, Banff, 25-29 October.
- ONERC 2010. Villes et adaptation au changement climatique. Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique ed. France.

- Pearlmutter, D., Bearliner, P., Shaviv, E., 2007. Integrated modeling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyon. *Building an Environment*. Vol. 42, pp 2396-2409.
- Pearlmutter, D., Bearliner, P., Shaviv, E., 2006. Physical modeling of pedestrian energy exchange within the urban canopy. *Building an Environment*. Vol. 41, pp 783-795.
- Pearlmutter, D., Bitan,, A., Bearliner, P., 1999. Microlimatic analysis of « compact » in an arid zone. *Atmospheric Environment*, Vol. 33, pp. 4143-4150.
- Rotach, M. W. (1999). "On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion." *Atmospheric Environment* 33(24-25), pp. 4001-4008.
- Rouïl, L. 2004. Evaluation et contraintes d'application des modèles de rue. Convention n° 04000087. Laboratoire Central de Surveillance de la Qualité de l'Air, France.
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Koronakis, I., Livada, I. & Asimakopoulos, D. 1999. Thermal and air flow characteristics in a deep pedestrian canyon under hot weather conditions. *Atmospheric Environment*, 33, 4503-4521.
- Schmid, H. P., Cleugh, H. A., Grimmond, C. S. B. & Oke, T. R. 1991. Spatial variability of energy fluxes in suburban terrain. *Boundary-Layer Meteorology*, 54, 249-276.
- So, E. S. P., Chan, A. T. Y. & Wong, A. Y. T. 2005. Large-eddy simulations of wind flow and pollutant dispersion in a street canyon. *Atmospheric Environment*, 39, 3573-3582.
- Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H. L. 2007. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge.
- Soulhac, L., Garbero, V., Salizzoni, P., Mejean, P. & Perkins, R. J. 2009. Flow and dispersion in street intersections. *Atmospheric Environment*, 43, 2981-2996.
- Stoa. 1998. Briefing No. 2: Air traffic and the environment. Directorate General for Research, Division For The Environment, Energy And Research, STOA [Online].
- Vardoulakis, S., Fisher, B. E. A., Pericleous, K. & Gonzalez-Flesca, N. 2003. Modelling air

quality in street canyons: a review. *Atmospheric Environment*, 37, 155-182.

Van Hooff T, Blocken B. CFD evaluation of natural ventilation of indoor environments by the concentration decay method: CO₂ gas dispersion from a semi-enclosed stadium, *Building and Environment*, 61(2013) 1-17.

Xie, X., Huang, Z., Wang, J. & Xie, Z. 2005. The impact of solar radiation and street layout on pollutant dispersion in street canyon. *Building and Environment*, 40, 201-212.

Yip, M., Madl, P., Wiegand, A. & Hofmann, W. 2006. Exposure Assessment of Diesel Bus Emissions. *International Journal of Environmental Research and Public Health* [Online], 3. Available: <http://www.mdpi.com/1660-4601/3/4/309>.

Sitographies

Al-Khalidy, N. 2015. *Computational Fluid Dynamics Simulation of Turbulent Flows and Pollutant Dispersion Around Groups of Buildings* [Online]. Available: http://www.cham.co.uk/puc/puc_melbourne/papers/Paper1_Neihad.pdf [Accessed September, 6, 2015].

Ansys, 2011. www.ansys.com [archive] (page consulté, le 8 avril 2011).

Arthus-Bertrand, Y. 2014. Ville de Ghardaïa dans la vallée du M'Zab, Algérie [Online]. Available: http://www.yannarthusbertrand2.org/index.php?option=com_datagallery&Itemid=27&func=detail&catid=15&id=422&p=9&l=1680, Page consulté le 24 Novembre 2014.

Futura planet, 2017, <http://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-albedo-1023/>. Page consulté le 23 Août 2017.

Google. 2015. Ghardaïa, Vue sur le Street Canyon [Online]. Available: <https://www.google.com/maps/@32.4864978,3.6734418,183m/data=!3m1!1e3> [Accessed 03 Aout 2015]

Larousse. 2015. Situation de Ghardaïa dans le Sahara septentrional [Online]. Available: http://www.larousse.fr/encyclopedie/autre-region/le_Sahara/142022 [Accessed 9 Aout 2015]

Mapcarta, 2017, <https://mapcarta.com/17336726>, page consulté le 8 Septembre 2017.

Santé, 2017, <http://www.sante-environnement.be/spip.php?article1072>, page consulté le 28 Août 2017.

Urban stress, 2017, <https://www.slideshare.net/aldelaitre/iii-urban-stress>. Page consulté le 24 Août 2017

Livres de référence

Benyoucef, B. 2010. Le M'Zab parcours millénaire, Alger

Benyoucef, B. Le M'zab, Espace & Société

Ca, V. T., T, A., Ito & S, A. 1995. Characteristics of wind field in a street canyon. Journal Of Wind Engineering And Industrial Aerodynamics [Online]

Givoni, B. 1998. Climate Considerations in Building and Urban Design. John Wiley & Sons ed. USA.

Pavard, C. Agerie. lumieres du m'zab. Editions Delroisse ed. France

Roche, M. & Mammeri, M. 1970 Le M'ZAB Architecture Ibadite En Algérie, France

Ravereau, A. 1973. le M'ZAB une leçon d'architecture, Sindbad, Paris

Ravereau, A., Baudouï, R., Potié, P., Cussey, Y. & Perraudin, R. L. 2003. L'atelier du désert. Parenthèses. ed. Marseille, France

Oke, T. R. 1990. Boundary Layer Climates Second edition, London

Simon, J., G 1983. La Vallée du M'ZAB L'Archipel des FÉROÉ, Louvain la Neuve, Belgique

Thèses et mémoires

Bozonnet, Emmanuel. 2005. Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments Cas de la rue canyon. Thèse de Doctorat, Université De La Rochelle. France.

Djaadi, R. Eldjoun, K., Guerras, S., Hadj, S. B. & Meski, A. 1996. Ghardaia entre permanence et mutation. mémoire de fin d'étude pour Architect d'état, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture ENSA ex EPAU, Alger

Khaled Athamena. 2012. modelisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. cas des eco-quartiers, Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes, France.

Kitous, S. 2012. Forme urbaine et environnement thermo-aéraulique en climat chaud et sec: Cas du Ksar de Ghardaia dans le sahara algérien, thèse de doctorat. École Polytechnique d'architecture et d'Urbanisme [EPAU]. Algérie

Ringebach, N. 2004. Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg. Thèse de doctorat, université louis pasteur Strasbourg I. France

Divers

ONM 2012. Données météorologiques (2010, 2011 et 2012). Office National Météorologique (ONM), Unité de Ghardaïa.

EEA 2012. Monitoring CO2 emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2012. European Environment Agency ed. Copenhagen K, Denmark.

WMO 2008. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, CH-1211 Geneva 2, Switzerland.

ANNEXES

ANNEXE 1

**DETAILS DE MESURE SUR TERRAIN AU NIVEAU DU
CANYON URBAIN.**

le 5 Juillet 2013

Heure: 6H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm				537,0
	T - C°				28,8
	H - %				32,1
Thermo-Anémomètre	T - C°				28,2
	V - m/s				1,9
Sonomètre	S - dB				54,6
Luxmètre	E - Lux				1026,0

Heure: 7H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm				578,0
	T - C°				29,8
	H - %				34,6
Thermo-Anémomètre	T - C°				29,4
	V - m/s				1,2
Sonomètre	S - dB				564,0
Luxmètre	E - Lux				1922,0

Heure: 8H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm				507,0
	T - C°				30,5
	H - %				36,9
Thermo-Anémomètre	T - C°				29,8
	V - m/s				1,7
Sonomètre	S - dB				51,2
Luxmètre	E - Lux				5300,0

Heure: 9H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm				572,0
	T - C°				32,1
	H - %				34,4
Thermo-Anémomètre	T - C°				31,3
	V - m/s				2,1
Sonomètre	S - dB				58,5
Luxmètre	E - Lux				7720,0

Heure: 10H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm				630,0
	T - C°				34,8
	H - %				28,8
Thermo-Anémomètre	T - C°				32,4
	V - m/s				1,2

Sonomètre S - dB	69,1
Luxmètre E - Lux	7120,0

Heure: 11H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm				534,0
	T - C°				36,6
	H - %				26,4
Thermo-Anémomètre	T - C°				34,3
	V - m/s				0,7
Sonomètre S - dB					65,0
Luxmètre E - Lux					53500,0

Heure: 12H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	553	728	543	608,0
	T - C°				36,5
	H - %				27,8
Thermo-Anémomètre	T - C°	34,1	34,5	34,5	34,4
	V - m/s	1,4	1,9	1,9	1,7
Sonomètre S - dB		69,6	65,1	64,1	66,3
Luxmètre E - Lux		58900	54300	61000	58066,7

Heure: 13H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm				538,0
	T - C°				36,8
	H - %				28,2
Thermo-Anémomètre	T - C°	34,2	34,7	35,2	34,7
	V - m/s	1,5	3,6	2,3	2,5
Sonomètre S - dB					
Luxmètre E - Lux		58900	59600	60400	59633,3

Heure: 14H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	656	527	532	571,7
	T - C°	37,2	37,2	37,3	37,2
	H - %	25,4	23,4	23,4	24,1
Thermo-Anémomètre	T - C°	34,5	34,7	35,1	34,8
	V - m/s	1,3	1,2	1,1	1,2
Sonomètre S - dB		65	46,8	65,1	59,0
Luxmètre E - Lux		56800	59100	58600	58166,7

Heure: 15H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	511	546	528	528,3
	T - C°	37,9	38,4	38,7	38,3
	H - %	23,9	23,4	20,8	22,7
Thermo-Anémomètre	T - C°	34,6	35,1	35,6	35,1
	V - m/s	1,1	1	2,1	1,4
Sonomètre S - dB		58,9	62,4	60,2	60,5
Luxmètre E - Lux		50500	52400	51800	51566,7

Heure: 16H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	576	800	573	649,7
	T - C°	38,1	38,4	38,8	38,4
	H - %	24,5	23,1	21,4	23,0
Thermo-Anémomètre	T - C°	34,4	34,8	35,1	34,8
	V - m/s	1,1	0,7	1,4	1,1
Sonomètre	S - dB	50,3	51,2	55	52,2
Luxmètre	E - Lux				

Heure: 17H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	563	558	556	559,0
	T - C°	35,9	36,2	36,4	36,2
	H - %	24,8	26,4	24,5	25,2
Thermo-Anémomètre	T - C°	33,5	34	34,2	33,9
	V - m/s	1,7	1,2	0,7	1,2
Sonomètre	S - dB	61	57,1	53,5	57,2
Luxmètre	E - Lux	25000	23600	27500	25366,7

Heure: 18H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	540	579	574	564,3
	T - C°	35,8	35,9	36	35,9
	H - %	25,8	25,1	25,7	25,5
Thermo-Anémomètre	T - C°	33,8	34	34,1	34,0
	V - m/s	1,5	1,4	1,1	1,3
Sonomètre	S - dB	64,4	64,5	52,9	60,6
Luxmètre	E - Lux	4560	4750	4230	4513,3

Heure: 19H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	555	638	544	579,0
	T - C°	34,5	34,6	34,7	34,6
	H - %	30,3	29,2	27,6	29,0
Thermo-Anémomètre	T - C°	33,3	33,5	33,6	33,5
	V - m/s	0,7	1,7	1,3	1,2
Sonomètre	S - dB	60,4	65,8	70,5	65,6
Luxmètre	E - Lux	1814	1632	1433	1626,3

le 6 Juillet 2013

Heure: 6H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	513	492	496	500,3
	T - C°	26	26,1	26,2	26,1
	H - %	42,8	41,5	42,2	42,2
Thermo-Anémomètre	T - C°	25,4	25,6	25,7	25,6

	V - m/s	1,3	1,8	1,7	1,6
Sonomètre	S - dB	52,6	50,3	51,5	51,5
Luxmètre	E - Lux	879	960	950	929,7

Heure: 7H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	505	493	501	499,7
	T - C°	27,4	27,4	27,4	27,4
	H - %	42,5	41,6	42,7	42,3
Thermo-Anémomètre	T - C°	27,5	27,4	27,4	27,4
	V - m/s	1,3	1,6	1,6	1,5
Sonomètre	S - dB	68,6	72	66,7	69,1
Luxmètre	E - Lux	3690	3750	3570	3670,0

Heure: 8H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	602	710	718	676,7
	T - C°	29,9	30,1	30,2	30,1
	H - %	38,6	37,9	37	37,8
Thermo-Anémomètre	T - C°	29,7	30	30,4	30,0
	V - m/s	1,2	1,7	2,4	1,8
Sonomètre	S - dB	68,7	66,2	67,5	67,5
Luxmètre	E - Lux	24800	21100	24700	23533,3

Heure: 9H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	480	538	558	525,3
	T - C°	31,5	31,4	31,4	31,4
	H - %	33,9	34	34,9	34,3
Thermo-Anémomètre	T - C°	32	32	32,1	32,0
	V - m/s	1,8	1,6	0,9	1,4
Sonomètre	S - dB	63,5	67,7	62,9	64,7
Luxmètre	E - Lux	32100	35600	35700	34466,7

Heure: 10H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	474	484	620	526,0
	T - C°	33,1	33,1	33,2	33,1
	H - %	33,7	33,5	33,2	33,5
Thermo-Anémomètre	T - C°	33,5	33,6	33,6	33,6
	V - m/s	0,5	1,1	0,6	0,7
Sonomètre	S - dB	65,2	67,4	67,8	66,8
Luxmètre	E - Lux	45300	45700	49300	46766,7

Heure: 11H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	479	489	590	519,3
	T - C°	32,9	33,2	33,5	33,2
	H - %	33	32,5	31,8	32,4
Thermo-Anémomètre	T - C°	31,9	32,1	32,5	32,2
	V - m/s	1,4	0,9	1,7	1,3
Sonomètre	S - dB	61	70	65,5	65,5

		Luxmètre E - Lux	57100	57300	59100	57833,3
Heure: 12H			valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne	
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	498	522	816	612,0	
	T - C°	35,2	35,3	35,7	35,4	
	H - %	29,2	30,7	29,2	29,7	
Thermo-Anémomètre	T - C°	34,5	34,9	35,3	34,9	
	V - m/s	0,4	0,4	0,6	0,5	
Sonomètre	S - dB	67,5	65,4	66,5	66,5	
Luxmètre	E - Lux	65500	66200	62300	64666,7	
Heure: 13H			valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne	
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	573	703	573	616,3	
	T - C°	36,8	37,6	37,8	37,4	
	H - %	27,4	27,9	26,1	27,1	
Thermo-Anémomètre	T - C°	32,6	33,1	33,2	33,0	
	V - m/s	1,1	2,4	1,1	1,5	
Sonomètre	S - dB	63,5	68,3	66,1	66,0	
Luxmètre	E - Lux	67900	68000	65300	67066,7	
Heure: 14H			valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne	
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	490	491	497	492,7	
	T - C°	36,3	36,6	37,5	36,8	
	H - %	29	27,7	26,1	27,6	
Thermo-Anémomètre	T - C°	36,3	36,4	36,9	36,5	
	V - m/s	1,8	2	1,5	1,8	
Sonomètre	S - dB	64,6	69,1	71,3	68,3	
Luxmètre	E - Lux	63900	65200	65000	64700,0	
Heure: 15H			valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne	
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	489	566	607	554,0	
	T - C°	36,3	36,4	36,6	36,4	
	H - %	27	29,4	28,8	28,4	
Thermo-Anémomètre	T - C°	36,3	36,2	35,6	36,0	
	V - m/s	1,6	1,1	2,6	1,8	
Sonomètre	S - dB	63,5	60,4	61,2	61,7	
Luxmètre	E - Lux	57600	55600	58300	57166,7	
Heure: 16H			valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne	
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	510	597	54,3	387,1	
	T - C°	36,6	36,9	37	36,8	
	H - %	29,5	27,7	27,4	28,2	
Thermo-Anémomètre	T - C°	35,2	35,3	35,2	35,2	
	V - m/s	0,5	1,1	1,7	1,1	
Sonomètre	S - dB	48,5	59,9	54	54,1	
Luxmètre	E - Lux	48700	48200	45900	47600,0	

Heure: 17H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	526	607	641	591,3
	T - C°	32,9	33,1	33,4	33,1
	H - %	31,1	32,3	33,8	32,4
Thermo-Anémomètre	T - C°	32,7	32,9	33	32,9
	V - m/s	0,8	1	1,6	1,1
Sonomètre	S - dB	61,4	60,3	59,2	60,3
Luxmètre	E - Lux	40600	39200	36500	38766,7

Heure: 18H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	536	544	545	541,7
	T - C°	34,4	34,4	34,4	34,4
	H - %	27,9	30,3	28,8	29,0
Thermo-Anémomètre	T - C°	33,8	33,9	33,9	33,9
	V - m/s	1,3	0,7	0,8	0,9
Sonomètre	S - dB	73,4	74,1	64,5	70,7
Luxmètre	E - Lux	16300	11900	17100	15100,0

Heure: 19H		valeur			
Instrument		1	2	3	moyenne
Moniteur de qualité de l'air [CO ₂]	CO ₂ - ppm	549	639	689	625,7
	T - C°	34,1	34,1	33,9	34,0
	H - %	28	30,3	28,9	29,1
Thermo-Anémomètre	T - C°	33,7	33,7	33,6	33,7
	V - m/s	1,9	0,9	0,7	1,2
Sonomètre	S - dB	65,1	65,3	62,2	64,2
Luxmètre	E - Lux	1521	1791	1744	1685,3

ANNEXE 2

**PRISES DE VUE PHOTOGRAPHIQUES HORAIRES DU
CANYON, JOURNEES DU 5 ET 6 JUILLET 2013**

5 juillet 2013



6 h / 5 juillet 2013



7 h / 5 juillet 2013



8 h / 5 juillet 2013





9 h / 5 juillet 2013



10 h / 5 juillet 2013



11 h / 5 juillet 2013





12 h / 5 juillet 2013



13 h / 5 juillet 2013



14 h / 5 juillet 2013



15 h / 5 juillet 2013



16 h / 5 juillet 2013



17 h / 5 juillet 2013





18 h / 5 juillet 2013



19 h / 5 juillet 2013



6 juillet 2013



6 h / 6 juillet 2013



7 h / 6 juillet 2013



8 h / 6 juillet 2013





9 h / 6 juillet 2013



10 h / 6 juillet 2013





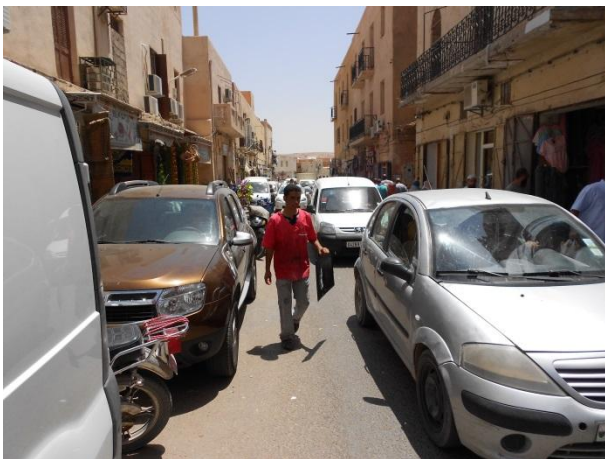
10 h / 6 juillet 2013



11 h / 6 juillet 2013



11 h / 6 juillet 2013



12 h / 6 juillet 2013



13 h / 6 juillet 2013



14 h / 6 juillet 2013



15 h / 6 juillet 2013



16 h / 6 juillet 2013



17 h / 6 juillet 2013



18 h / 6 juillet 2013






19 h / 6 juillet 2013

ANNEXE 3

CARACTERISTIQUES DES APPAREILS DE MESURE

Appareil de mesure du CO2

Vecteur climatique mesuré	Type de capteur	remarque	Vue sur l'appareil de mesure
Taux de pollution en CO ₂ (ppm)	Instrument de mesure du CO ₂	Mesure la concentration du Gaz du CO ₂ dans l'air extérieur du canyon	

Air Quality CO₂ Monitor User Manual


1. Safety
Please thoroughly read this Instruction Manual before using the monitor, and use it by according to the Carbon Dioxide (CO₂) tester specifications:
Environmental Conditions of Usage:
• Relative Humidity < 90%RH (Non-condensation).
• Operation Humidity -5°C-50°C.
• Storage Humidity -10°C-70°C.
Maintenance and Cleaning
• Repair or maintenance should be carried out by professional person, not only by prospectus.
• Wipe the meter regularly with a soft, dry cloth. Do not clean it with solvents or detergent.
Safety Marking:
Comply with European CE safety standards.

2. Function Description
The Carbon Dioxide (CO₂) Monitor is designed for air quality control and health control by measuring Carbon Dioxide (CO₂) level in areas where it needs to be monitored, such as factories, schools, offices, transportation lines and so on. The measured CO₂ value in ppm (parts-per-million) will be displayed on the LCD with three states indication: Good (0 to 800ppm), Normal (800 to 1200ppm), Poor (> 1200ppm).
An acoustic alarm sounds when the CO₂ level is exceeding the defined level.

3. Specifications
Sensing Method: NDIR (non-dispersive infrared) CO₂ sensor
Measurement Range: 0 to 9,999ppm CO₂
Resolution: 1ppm
CO₂ Accuracy: ±75 ppm or ±5% of reading
Temperature Range: 23 to 122°F (-5°C to 50°C)
Resolution: 0.1°C/°F
Temperature Accuracy: ±1°C
Humidity: 0.1 to 90%RH
Resolution: 0.1%RH
Humidity Accuracy: ±5%RH
Display: Date and Time
Max/Min Co₂ value display function
Sampling Interval: 2 seconds
Overload Indication: "OL"
Power Adapter: Input: 110V-220V AC Output: 6.0V DC
Operating environment: -5°C to 50°C (23°F to 122 °F) at < 90 %RH
Storage temperature: -5°C to 50°C (23°F to 122°F) at < 90% RH

4. Names and Functions of Parts

LCD Display




Mechanical Keys

- ON/OFF: Turns on or off the unit.
- HOLD: Freezes the current reading in the display.
- °C/°F: Selects °C or °F
- CLOCK: Press and hold this button for 2 seconds to enter into clock mode. Press it again enter into date or time setting. Touch "▲" or "▼" button on the screen with hand to increase or decrease the value. After finishing setting, touch "ESC" button to exit clock setting code.

Touchpad Button

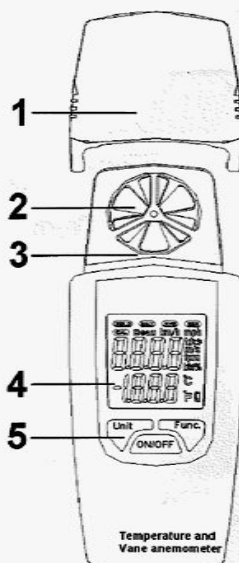
- Alarm Button
Trigger the button once, if "AL" icon shows and flickers on LCD screen, it indicates the measured value exceeds the defined value and the alarm buzzers. Press this button again to exit the buzzer alarm function. Press and hold the button to enter into setting mode.
1. Alarm Value Setting
"AL" button flickers, then enter to alarm value setting mode. Press "▲" button to increase the value, press "▼" button to decrease the value, press "ESC" button to exit the setting mode.
2. "GOOD", "NORMAL" and "POOR" Value Setting
Press "▲" button to increase the value, press "▼" button to decrease the value, press ESC button to exit the setting mode.
- MAX/MIN Button
Trigger the button once, "MAX" icon shows and the Maximum measured value of CO₂, temperature and humidity will be displayed on the screen, Trigger this button again, "MIN" icon shows and the Minimum measured value of CO₂, temperature and humidity will be displayed on the screen. Press ESC button to exit the function.
- ▲ Digital Adjustment Button
Press this button to increase the value, Press "ESC" button to exit the function.
- ▼ Digital Adjustment Button
Press this button to decrease the value, Press ESC to exit the function.
- ESC Button
Press this button will exit the current mode.
- Backlight
Press one of the "ALARM" button, "MAX/MIN" button, "▲" button or "▼" button, the backlight will turn on and it will turn off automatically after 20 seconds of inactivity. Press "ESC" button to exit the function.

Appareil de mesure de température, humidité et vitesse de vents

Vecteur climatique mesuré	Type de capteur	remarque	Vue sur l'appareil de mesure
Température en (°C)	Anémomètre pour capter la température	Mesure la température de l'air	
Humidité en (%)	Anémomètre pour capter l'humidité	Mesure la l'humidité de l'air	
Vitesse du vent (m/s)	Anémomètre pour capter vitesse du vent	Mesure la vitesse moyenne de la turbulence	



DVM8020



1	Sensor cover
2	wind sensor
3	temperature sensor
4	LCD display
5	Function keys

1	beschermop
2	anemometer
3	temperatuursensor
4	lcd-scherm
5	functietoetsen

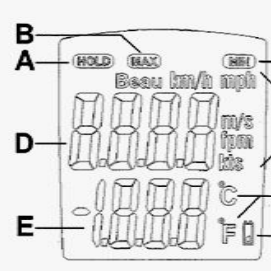
1	capuchon
2	anémomètre
3	capteur thermique
4	afficheur LCD
5	touches de fonction

1	tapa
2	anemómetro
3	sensor de temperatura
4	pantalla LCD
5	teclas de función

1	Schutzkappe
2	Anemometer
3	Temperatursensor
4	LCD-Display
5	Funktionstasten

Temperature and Vane anemometer

DVM8020



A	hold mode
B	max mode
C	min mode
D	speed display
E	temperature display
F	speed unit
G	temperature unit
H	battery indicator

A	HOLD-functie
B	maximale waarde
C	minimale waarde
D	uittezing windsnelheid
E	uittezing temperatuur
F	meesteheid windsnelheid
G	meesteheid temperatuur
H	aanduiding zwakke batterij

A	función retención de lectura (data hold)
B	valor máximo
C	valor mínimo
D	visualización de la velocidad del viento
E	visualización de la temperatura
F	unidad de la velocidad del viento
G	unidad de la temperatura
H	indicador de pila baja

A	fonction de gel d'affichage HOLD
B	valeur maximale
C	valeur minimale
D	affichage température
E	affichage vitesse du vent
F	unité de mesure éolienne
G	unité de mesure thermique
H	indication pile faible

A	Data-Hold-Funktion
B	Höchstwert
C	Mindestwert
D	Anzeige der Windgeschwindigkeit
E	Anzeige der Temperatur
F	Messeinheit der Windgeschwindigkeit
G	Messeinheit der Temperatur
H	Lo-Bat-Anzeige

DVM8020

NOTICE D'EMPLOI

1. Introduction

Aux résidents de l'Union européenne
Des informations environnementales importantes concernant ce produit

Ce symbole sur l'appareil ou l'emballage indique que l'élimination d'un appareil en fin de vie peut polluer l'environnement. Ne pas jeter un appareil électrique ou électronique (et des piles éventuelles) parmi les déchets municipaux non sujets au tri sélectif ; une déchèterie traitera l'appareil en question. Renvoyer les équipements usagés à votre fournisseur ou à un service de recyclage local. Il convient de respecter la réglementation locale relative à la protection de l'environnement.

En cas de questions, contacter les autorités locales pour élimination.

Nous vous remercions de votre achat ! Lire la présente notice attentivement avant la mise en service de l'appareil. Si l'appareil a été endommagé pendant le transport, ne pas l'installer et consulter votre revendeur. La garantie ne s'applique pas aux dommages survenus en négligeant certaines directives de cette notice et votre revendeur déclinera toute responsabilité pour les problèmes et les défauts qui en résultent.

2. Consignes de sécurité

	Garder hors de la portée des enfants et des personnes non autorisées.
	Protéger contre la pluie, l'humidité et les projections d'eau.
	Protéger contre les chocs pendant l'emploi.
	Protéger contre les températures extrêmes et la poussière.
	Il n'y a aucune pièce maintenable par l'utilisateur. Commander des pièces de rechange éventuelles chez votre revendeur.

DVM8020

3. Directives générales

Se reporter à la **garantie de service et de qualité Velleman®** en fin de notice.

- Se familiariser avec le fonctionnement avant l'emploi.
- Toute modification est interdite pour des raisons de sécurité.
- N'utiliser qu'à sa fonction prévue. Un usage impropre annule d'office la garantie.

4. Caractéristiques

- afficheur LCD 4 termes
- extinction automatique
- contenu : coffret de rangement, dragonne, piles, notice d'emploi
- trépied télescopique optionnel (non inclus) : CAMB17


5. Emploi

Se référer aux illustrations en pages 2 et 3 de cette notice.


- Desserrer la vis à l'arrière de l'appareil et retirer le capuchon **[1]**.
- Allumer et éteindre l'appareil avec le bouton **ON/OFF**.
- L'appareil s'éteint automatiquement après ± 20 minutes. Pour désactiver la fonction d'extinction automatique, maintenir enfoncé le bouton **ON/OFF** jusqu'à ce **AP ON** s'affiche. Sélectionner **AP ON** ou **AP OFF** avec **Unit**. Enfoncer **Func.** pour confirmer. Éteindre l'appareil et répéter cette procédure pour réactiver la fonction.
- Maintenir l'appareil perpendiculairement par rapport au vent et de manière à ce que le vent traverse l'anémomètre **[2]** par l'arrière.

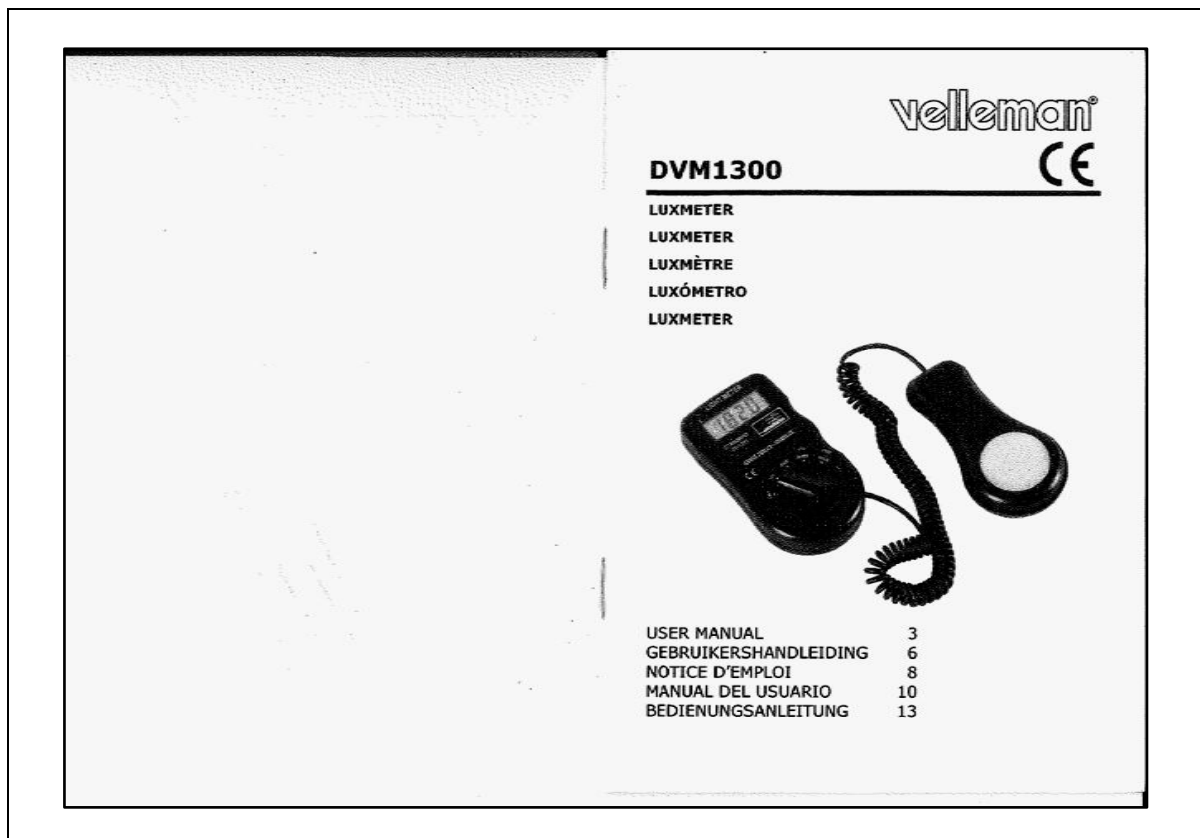
Remarque : Maintenir l'appareil correctement afin d'éviter les mesures erronées.

- Enfoncer le bouton **Unit** à plusieurs reprises pour afficher les unités de mesure éolienne **[F]** :
 → **m/s** > **km/h** > **fpm** > **mph** > **kts** > **Beau**
- Maintenir enfoncé le bouton **Unit** pendant ± 2 secondes pour sélectionner l'unité de mesure thermique **[G]**.
- Enfoncer brièvement le bouton **Func.** pour geler l'affichage **[A]**. Renfoncer le bouton pour revenir au mode de mesure normal.
- Enfoncer le bouton **Func.** pour afficher la valeur de mesure maximale **[B]**. Renfoncer le même bouton pour afficher la valeur de mesure minimale **[C]**.


<p style="text-align: center;">DVM8020</p> <ul style="list-style-type: none"> Afficher la valeur minimale et maintenir enfoncé le bouton Func. Pendant ± 2 secondes pour remettre à zéro les valeurs maximale et minimale. En mode de mesure normale, maintenir enfoncé le bouton Func. pendant ± 2 secondes pour activer/désactiver le rétro-éclairage. Remplacer les piles dès que l'indicateur de piles faibles [H] s'affiche (voir §8). Refermer le capteur avec le capuchon [1] après emploi. <p>6. Conseils d'utilisation</p> <ul style="list-style-type: none"> Ne pas toucher l'anémomètre [2]. Ne pas excéder la plage de mesure de l'appareil. L'afficheur affiche OL lors d'une mesure hors plage. Ne pas utiliser l'appareil dans un milieu humide. Se référer aux spécifications techniques. Monter l'appareil sur un trépied (non inclus) pour effectuer des mesures stables. Ne pas brancher l'appareil après exposition à des variations de température. Afin d'éviter des dommages, attendre jusqu'à ce que l'appareil ait atteint la température ambiante avant de l'utiliser. Retirer les piles après utilisation. <p>7. Entretien</p> <ul style="list-style-type: none"> Nettoyer régulièrement à l'aide d'un chiffon humide non pelucheux. Éviter les alcools et les solvants. Ne pas immerger l'appareil dans un liquide. <p>8. Les piles</p> <ul style="list-style-type: none"> Éteindre l'appareil. Faire glisser le couvercle vers le bas et ouvrir le compartiment des piles. Retirer les piles usagées et les remplacer par trois nouvelles piles R03 de 1,5 V selon les indications de polarité. Refermer le compartiment des piles. <p> Ne pas percer les piles et ne jamais les jeter au feu. Ne pas recharger des piles alcalines. Garder les piles hors de la portée des enfants.</p> <p style="text-align: center;">14 ©Velleman nv</p>	<p style="text-align: center;">DVM8020</p> <p>9. Technical specifications</p> <table border="1"> <tr> <td>afficheur LCD</td> <td>4 dig/its</td> </tr> <tr> <td>paramètres</td> <td>m/s, km/h, fpm, mph, kts (nœuds), Beau(fort), °C, °F</td> </tr> <tr> <td>plage de mesure</td> <td>0,4 ~ 20 m/s (80 ~ 4000 fpm) -10°C ~ +50°C (14°F ~ 122°F)</td> </tr> <tr> <td>résolution</td> <td>0,1 m/s (0,1 fpm) 0,1°C (0,1°F)</td> </tr> <tr> <td>précision</td> <td>$\pm 2\%$ de l'aff. + 0,3 m/s) of $\pm 2\%$ de l'aff. + 60 fpm) $\pm 1^\circ\text{C}$ ($\pm 1,8^\circ\text{F}$)</td> </tr> <tr> <td>fréquence d'échantillonnage</td> <td>2x /s</td> </tr> <tr> <td>température de service</td> <td>-10°C ~ 50°C (14°F ~ 122°F), 0 ~ 80% RH (non condensant)</td> </tr> <tr> <td>température de stockage</td> <td>-20°C ~ 60°C (-4°F ~ 140°F), 0 ~ 80% RH (non condensant)</td> </tr> <tr> <td>alimentation</td> <td>3 piles R03 1,5 V (incl.)</td> </tr> <tr> <td>extinction automatique</td> <td>20 min.</td> </tr> <tr> <td>dimensions</td> <td>127 x 60 x 30 mm</td> </tr> <tr> <td>poids</td> <td>± 180 g</td> </tr> </table> <p>N'employer cet appareil qu'avec des accessoires d'origine. SA Velleman ne sera aucunement responsable de dommages ou lésions survenus à un usage (incorrect) de cet appareil. Pour plus d'information concernant cet article, visitez notre site web www.velleman.eu. Toutes les informations présentées dans cette notice peuvent être modifiées sans notification préalable.</p> <p>© DROITS D'AUTEUR SA Velleman est l'ayant droit des droits d'auteur pour cette notice. Tous droits mondiaux réservés. Toute reproduction, traduction, copie ou diffusion, intégrale ou partielle, du contenu de cette notice par quelque procédé ou sur tout support électronique que se soit est interdite sans l'accord préalable écrit de l'ayant droit.</p> <p style="text-align: center;">15 ©Velleman nv</p>	afficheur LCD	4 dig/its	paramètres	m/s, km/h, fpm, mph, kts (nœuds), Beau(fort), °C, °F	plage de mesure	0,4 ~ 20 m/s (80 ~ 4000 fpm) -10°C ~ +50°C (14°F ~ 122°F)	résolution	0,1 m/s (0,1 fpm) 0,1°C (0,1°F)	précision	$\pm 2\%$ de l'aff. + 0,3 m/s) of $\pm 2\%$ de l'aff. + 60 fpm) $\pm 1^\circ\text{C}$ ($\pm 1,8^\circ\text{F}$)	fréquence d'échantillonnage	2x /s	température de service	-10°C ~ 50°C (14°F ~ 122°F), 0 ~ 80% RH (non condensant)	température de stockage	-20°C ~ 60°C (-4°F ~ 140°F), 0 ~ 80% RH (non condensant)	alimentation	3 piles R03 1,5 V (incl.)	extinction automatique	20 min.	dimensions	127 x 60 x 30 mm	poids	± 180 g
afficheur LCD	4 dig/its																								
paramètres	m/s, km/h, fpm, mph, kts (nœuds), Beau(fort), °C, °F																								
plage de mesure	0,4 ~ 20 m/s (80 ~ 4000 fpm) -10°C ~ +50°C (14°F ~ 122°F)																								
résolution	0,1 m/s (0,1 fpm) 0,1°C (0,1°F)																								
précision	$\pm 2\%$ de l'aff. + 0,3 m/s) of $\pm 2\%$ de l'aff. + 60 fpm) $\pm 1^\circ\text{C}$ ($\pm 1,8^\circ\text{F}$)																								
fréquence d'échantillonnage	2x /s																								
température de service	-10°C ~ 50°C (14°F ~ 122°F), 0 ~ 80% RH (non condensant)																								
température de stockage	-20°C ~ 60°C (-4°F ~ 140°F), 0 ~ 80% RH (non condensant)																								
alimentation	3 piles R03 1,5 V (incl.)																								
extinction automatique	20 min.																								
dimensions	127 x 60 x 30 mm																								
poids	± 180 g																								

Appareil de mesure de l'éclairement

Vecteur climatique mesuré	Type de capteur	remarque	Vue sur l'appareil de mesure
Eclairement (<i>lux</i>)	Un luxmètre	Mesure l'éclairement du ciel et donne une lecture globale sur le canyon	



DVM1300 Rev. 01



1
2
3

relative sensitivity
relatieve gevoeligheid
sensibilité relative
sensibilidad relativa
relative Empfindlichkeit

spectral sensitivity
spectrale gevoeligheid
sensibilité spectrale
sensibilidad espectral
spektrale Empfindlichkeit

80%								V (λ)
60%								
40%								
20%								
0								
	400	500	600	700				


Wavelength (Nm)
Golflengte (Nm)
Longueur d'onde (nm)
Longitud de onda (Nm)
Wellenlänge (Nm)

13.01.2011 2 ©Velleman nv

DVM1300 Rev. 01
USER MANUAL

1. Introduction

To all residents of the European Union
Important environmental information about this product

 This symbol on the device or the package indicates that disposal of the device after its lifecycle could harm the environment. Do not dispose of the unit (or batteries) as unsorted municipal waste; it should be taken to a specialized company for recycling. This device should be returned to your distributor or to a local recycling service. Respect the local environmental rules.

If in doubt, contact your local waste disposal authorities.

Thank you for choosing the Velleman! Please read the manual thoroughly before bringing this device into service. If the device was damaged in transit, don't install or use it and contact your dealer.

For more info concerning this product and the latest version of this manual, please visit our website www.velleman.eu.

2. Features

- 3 1/2-digit LCD display with low-battery indication
- one single operating switch
- light pocket-sized model
- measures luminous intensity from 0.1 to 50,000 lux
- 2000 lux: reading x 10 // 50,000 lux: reading x 100

3. Specifications


Display : 1999 counts & low-battery indication
 Low-Battery Indication : "BAT" is displayed when the battery voltage drops below the operating level
 Measurement Rate : 1.5 readings/sec., nominal
 Storage Temperature : -10 to +60°C / 14 to 140°F with relative humidity < 80%
 Power : 1 x standard A23 battery of 12V
 Dimensions Photo Detector : 115 x 60 x 27mm
 Dimensions Device : 188 x 64.5 x 24.5mm
 Weight : 160g
 Measuring Range : 200, 2000, 20000 lux (reading x 10) and 50000 lux (reading x 100)
 Overrange Indication : "1" is displayed
 Measuring Accuracy : ±5% of rdg + 10 digits (<10000 lux)
 : ±10% of rdg + 10 digits (>10000 lux)
 Precision : ±0.1%/°C
 Photo Detector : 1 silicon photo diode with filter

13.01.2011 3 ©Velleman nv

DVM1300 Rev. 01
NOTICE D'EMPLOI

1. Introduction

Aux résidents de l'Union européenne
Des informations environnementales importantes concernant ce produit

 Ce symbole sur l'appareil ou l'emballage indique que l'élimination d'un appareil en fin de vie peut polluer l'environnement. Ne pas jeter un appareil électrique ou électronique (et des piles éventuelles) parmi les déchets municipaux non sujets au tri sélectif; une déchèterie traitera l'appareil en question. Renvoyer les équipements usagés à votre fournisseur ou à un service de recyclage local. Il convient de respecter la réglementation locale relative à la protection de l'environnement.

En cas de questions, contacter les autorités locales pour élimination.

Nous vous remercions de votre achat ! Lire la présente notice attentivement avant la mise en service de l'appareil. Si l'appareil a été endommagé pendant le transport, ne pas l'installer et consulter votre revendeur.

Pour plus d'information concernant cet article et la dernière version de cette notice, visiter notre site web www.velleman.eu.

2. Caractéristiques

- LCD 3 1/2 digits avec indication pile faible
- Opération avec 1 seul commutateur
- Modèle léger en format de poche
- Mesure des intensités lumineuses de 0.1 à 50000 lux
- 2000 lux : affichage x 10 // 50000 lux : affichage x 100

3. Spécifications

Afficheur : 1999 points et indication pile faible
 Indication pile faible : "BAT" est affiché quand la tension de la pile ne suffit plus pour un usage normal de l'appareil
 Fréquence d'échantillonnage : 1.5 affichages/sec., nominal
 Température de stockage : -10 à +60°C / 14   140°F avec humidité relative < 80%
 Alimentation : 1 x pile standard A23 de 12V
 Dimensions photodétecteur : 115 x 60 x 27mm
 Dimensions appareil : 188 x 64.5 x 24.5mm
 Poids : 160g
 Plage de mesure : 200, 2000, 20000 lux (affichage x 10) et 50000 lux (affichage x 100)
 Indication hors plage : le chiffre "1" est affiché
 Précision de mesure : ±5% de l'affichage + 10 digits (<10000 lux)
 : ±10% de l'affichage + 10 digits (>10000 lux)

13.01.2011 8 ©Velleman nv

DVM1300 Rev. 01

4. Description panneau frontal

1. Afficheur LCD : Afficheur 3 1/2 digits avec indication pile faible ("BAT")
2. Commutateur : (Dès)active l'appareil, sélectionne la fonction et la plage
3. Photodétecteur : photodiode incorporée en silicium, longue vie

5. Emploi

1. Sélectionnez une échelle avec le commutateur et sélectionnez la plage désirable ("lux", "lux x 10" ou "lux x 100").
2. Tenez le photodétecteur à un angle horizontal vis-à-vis de la source à mesurer.
3. Lisez la valeur nominale mesurée sur l'afficheur.
4. Indication hors-plage : le signal est trop fort pour la plage sélectionnée si le LCD n'affiche rien que le chiffre "1".
5. Remettez le photodétecteur après vos mesures.
6. La sensibilité spectrale de cet appareil ressemble très fort à celle décrite par la courbe CIE (Commission internationale sur l'éclairage) que vous trouverez à la page 2.

6. Remplacement de la pile


Remplacez la pile quand le message "BAT" est affiché sur votre LCD. Enlevez les vis au dos de l'appareil, ouvrez le compartiment de la pile et remplacez-la (A23 de 12V). Refermez le compartiment.

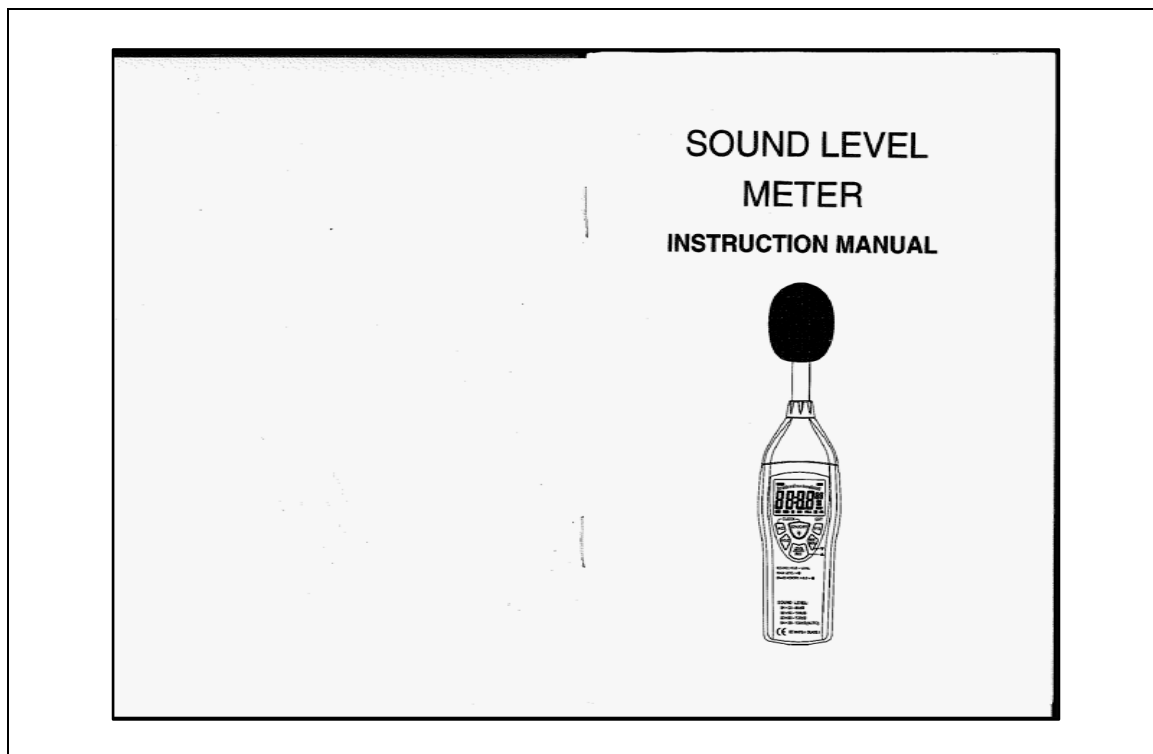
N'employer cet appareil qu'avec des accessoires d'origine. SA Velleman ne sera aucunement responsable de dommages ou lésions survenues à un usage (incorrect) de cet appareil. Toutes les informations présentées dans cette notice peuvent être modifiées sans notification préalable.

  DROITS D'AUTEUR
SA Velleman est l'ayant droit des droits d'auteur pour cette notice. Tous droits mondiaux réservés.
Toute reproduction, traduction, copie ou diffusion, intégrale ou partielle, du contenu de cette notice par quelque procédé ou sur tout support électronique que se soit est interdite sans l'accord préalable écrit de l'ayant droit.

13.01.2011 9 ©Velleman nv

Appareil de mesure du Son

Vecteur climatique mesuré	Type de capteur	remarque	Vue sur l'appareil de mesure
Intensité sonore (dB)	Un sonomètre	Mesure l'intensité sonore donne une vision générale sur la qualité de l'ambiance extérieure	



1. SAFETY INFORMATION

Read the following safety information carefully before attempting to operate or service the meter.
Use the meter only as specified in this manual:

- **Environment conditions**
 - ① Altitude lower than 2000 meters
 - ② Relatively humidity ≤90%RH
 - ③ Operation Ambient 0 - 40°C
- **Maintenance & Clearing**
 - ① Repair or servicing not covered in this manual should be performed by qualified personnel.
 - ② Periodically wipe the case with a dry cloth. Do not use solvents or eradicator on this instrument.
- **Safety symbols**
 - ☑ Comply with EMC

2. FUNCTIONS DESCRIPTION

This Sound Level Meter is designed for noise project; quality control; illness prevention and cure and all kinds of environmental sounds measurement. It is applied to the sounds measurement at factory; school; office; traffic access and household, etc.

- This unit conforms to the IEC61672-1 CLASS2 for Sound Level Meters.
- MAX & MIN measurements
- Over range display
- Under range display
- A & C Weighting
- FAST & SLOW response

3. SPECIFICATION

Standard applied: 61672-1 CLASS2
Accuracy: ±1.4dB
Frequency range: 31.5HZ - 8KHZ
Dynamic range: 50dB
Level ranges:
(01): 30dB-80dB
(02): 50dB-100dB

(03): 80dB-130dB
(04): 30dB-130dB (AUTO)

Frequency weighting: A/C
Time weighting: FAST (125ms), SLOW (1s)
Microphone: 1/2 inch electret condenser microphone
Display: 4 digits LCD display with a resolution of 0.1dB
Display Update: 2 times /sec.
MAX hold: Hold the Maximum reading
MIN hold: Hold the Minimum reading
HOLD: Hold the readings
Alarm function: "OVER" is when input is more than upper limit of range, "UNDER" is when input is less than upper limit of range.
Fast display of analog (20 times/sec)
50 sets
Year, month, day
Hour, minute, second
Power supply : One 9V battery, 006P or NEDA1604 or IEC 6F22.
Power life : At least 30hours
Operation temperature and humidity: 0°C-40°C, 10%RH-90%RH
Storage temperature and temperature: -10°C-+60°C, 10%RH-75%RH
Dimension : 210mm x 55mm x 32 mm
Weight : 230g

4. NAME AND FUNCTIONS

① Windscreen
② LCD:

SYMBOL	FUNCTION
LCD	4 digits for measurement of db
MAX	Maximum hold
MIN	Minimum hold
OVER	Over upper limit of range
UNDER	under minimum limit of range
FAST	Fast response to time weighting
SLOW	Slow response to time weighting
dBA	A-Weighting (response to human sense)
dBC	C-Weighting (response to machine monitor)
88	Range indicate (01 to 04)
REC	Recording data currently
FULL	Memory full
HOLD	Data hold function
EA	Low battery indicate

③ **Power on/off and backlight button**
Press the button one time for on /off of backlight, press the button continuously until the number 3,2,1 showing on the screen and then disappear for power off.

④ **Frequency weighting select button**
A: A-Weighting
C: C-Weighting

⑤ **HOLD button:**
5.1 **Data hold function**
Press button 'HOLD' to freezes the reading in the display and press once more to exit the record.
5.2 **Data zero function**

Press the button continuously before power it on, loosen the button when the display showing 'CL' after the meter power on, which indicates that the data in DATALOGGER has been deleted.

⑥ **Level range and REC functions**
6.1 **Range select button**
Each time you press 'LEVEL' button, the level range will change between 'Lo(01)' level, 'Med(02)' level, 'Hi(03)' level and 'Auto(04)' level in the circular.
6.2 **REC record function (50)**
Press button 'hold' to freeze data firstly, then press 'REC' to hold the data in meter's data-base when the display show REC means operation successful. Press 'hold' again back to measure.
6.3 **Data reading function**
Press button 'REC' continually until the display of symbol "DATA" on screen, enter the model of reading:


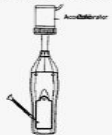


Press "MAX" and "HOLD" button to read data's date and time, and "REC" button to read the next data, Press "FAST" button to exit this model.

⑦ **MAX/MIN button: Maximum and Minimum hold**
Press this button for one time to enter MAX/MIN measurement, "MAX" will appear on LCD, maximum sound level will be captured and held until higher sound level is captured. Press the button again, "MIN" will appear on LCD and minimum sound level will be captured and held until new lower sound level is captured. Press the button one more time to exit MAX/MIN measurement.

⑧ **FAST/SLOW button: time weighting selection**
FAST: Fast sampling measurement, 1 time per 125mS.
SLOW: Slow sampling measurement, 1 time per second.

5. The time chip adjustment

Press "A/C" button and then power it on, when "SET" symbol displays then loosen "A/C", the meter will be under time adjustment mode, at the time the display will

<p>show the date as following DATE---28-08-2007(reading only)</p> <p>Press the 'A/C' second time, the display showing the time as following: Time---16:58:18(reading only)</p> <p>Press the 'A/C' third time, the display showing "minute" adjustment mode as below:</p> <p>Press the 'A/C' fourth time, the display showing "hour" adjustment mode as below:</p> <p>Press the 'SET UP' fifth time, the display showing "date" adjustment mode as below:</p> <p>Press the 'SET UP' for the sixth time, the display showing "month" adjustment mode as below:</p> <p>Press the 'SET UP' seventh time, the display showing "year" adjustment mode as below:</p> <p>Press the 'SET UP' for the eighth time will enter the model of initialization, the display showing as below: The display showing initialization of the time chip. press 'HOLD' to keep the setup; time and date have returned to factory setup. Keeping press the button "STE UP" if not intend to initialize. When the battery is exhausted or replaced, if the time can't be adjusted then please initialize the time chip first.</p> <p style="text-align: center;">6</p>	<div style="text-align: center;">  </div> <p>Methods for each model are as below: Press "level" button to up-adjust the data, and "max/min" button to down-adjust the data, press "hold" button to hold the data setup which you set and exit this model.</p> <p>6. CALIBRATION PROCEDURES</p> <p>① Make the following switch settings: Frequency weighting: A-weighting Time weighting: FAST Level range: (02)/ 50 - 100dB</p> <p>② Insert the microphone housing carefully into the 1/2 inch insertion hole of the calibrator (94dB @ 1kHz).</p> <p>③ Turn on the switch of calibrator and adjust the CALL potentiometer of the unit 94.0dB is displayed.</p> <p>NOTE: All products are well calibrated before shipment. Recommended recalibration cycle: 1 year.</p> <div style="text-align: center;">  </div> <p>7. MEASUREMENT PREPARATION</p> <p>① Remove the battery cover on the back and put in one 9V battery. ② Recover the back cover. ③ When battery voltage drops below the operating voltage or battery aging, this symbol  will appear on LCD. Replace the 9V battery. ④ When the AC adapter is used, insert the plug of the adapter (3.5p) into the DC 9V connector on the side panel.</p> <p style="text-align: center;">7</p>
<p>8. OPERATING PROCEDURE</p> <p>① Power on the meter. ② Press 'LEVEL' button to select desired level, base on 'UNDER' or 'OVER' do not appear on LCD. ③ Select 'dBA' for general noise sound level and 'dBC' for measuring sound level of acoustic material. ④ Select 'FAST' for instant sound and 'SLOW' for average sound level. ⑤ Select 'MAX/MIN' button for measuring maximum and minimum noise level. ⑥ Hold the instrument comfortable in hand or fix on tripod and measure sound level at a distance of 1-1.5 meter.</p> <p>9. NOTICE</p> <p>i. Do not store or operate the instrument at high temperature and high humidity environment.</p> <p>ii. When not in use for long time, please take out the battery to avoid battery liquid leakage and caution on the instrument.</p> <p>iii. When using the instrument in the presence of wind, it is a must to mount the windscreen to not pick up undesirable signals.</p> <p>iv. Keep microphone dry and avoid severe vibration.</p> <div style="text-align: right;">  </div> <p style="text-align: center;">8</p>	