



Université d'Oran 2
Faculté des sciences de la Terre et de l'Univers

THESE

Pour l'obtention du diplôme de Doctorat de 3^{ème} cycle « L.M.D »

En Sciences de la Terre

Spécialité : Climatologie, Ressources en Eau et Environnement

**Approche de l'impact et de l'adaptation au changement climatique
en milieu urbain :
Cas de l'espace urbain d'Oran**

Présentée par :
BELHORMA Hayat

Devant le jury composé de :

HASSANI Moulay Idriss	Université d'Oran 2	Professeur	Président
CHACHOUA Mustapha	Université d'Oran 2	MCA	Rapporteur
KACEMI Malika	USTO -MB Oran	Professeur	Examinatrice
SETTI M'hamed	USTHB Alger	Professeur	Examineur
MENHOUDJ Sayah	Université d'Oran 2	MCA	Examineur

Année 2024-2025

Remerciements

Tout d'abord, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné la santé, la volonté, le courage et la force pour pouvoir réaliser ce travail, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

*J'adresse mes sincères remerciements à mon directeur de thèse : **Mr. CHACHOUA Mustapha** pour m'avoir tout simplement permis de réaliser cette thèse de doctorat. Par sa présence, sa patience et ses idées toujours innovantes, ses soutiens toujours bienveillants et ses nombreux conseils durant toutes ces années pour franchir toutes les étapes de cette présente étude. Merci beaucoup pour son dynamisme, sa rigueur et ses remarques qui ne manquent jamais son but. J'en suis reconnaissante parce qu'il est toujours cru en ma recherche et il est su la valoriser. Il m'a encouragé à présenter mon travail dans de nombreux colloques et séminaires, et à participer dans plusieurs formations, ce qui m'a permis de rencontrer et d'échanger avec un grand nombre de chercheurs en Algérie et à l'étranger.*

*J'exprime toute ma reconnaissance à **Mr. HASSANI Moulay Idriss**, professeur à l'université d'Oran 2 pour avoir bien voulu accepter de présider le jury de cette thèse de doctorat. Que **Mme.***

KACEMI Malika, professeur à l'université Usto-Oran, Que Mr.SETTI M'hamed, professeur à l'université USTHB-Alger, Que Mr. MENHOUDJ Sayah, maître de conférences à l'université d'Oran 2, trouvent ici l'expression de mes sincères remerciements d'avoir accepté d'évaluer mon travail et d'être membre de mon jury de thèse.

*Je tiens également à remercier **Pr. Jun Peng** avec qui j'ai réalisé mon premier stage dans leur laboratoire au sein de l'université Bedfordshire à Royaume Unis sur la simulation numérique. Je ne compte pas le nombre de rencontre et d'échange que j'ai eu au sein de leur laboratoire d'accueil. Il a donné une dimension appliquée à mon travail. Tous les membres de leur laboratoire méritent mes remerciements, ces personnes sans qui ce stage aurait été différent, bref ce qui fait de cette expérience :(un très bon souvenir... 😊)*

*Je remercie évidemment **Mr.Zouggari Zakaria**, maitre de conférences à l'université Saad Dahleb –Blida pour son aide plus que précieuse.*

*Mes remerciements vont à **Pr. Bouzit Mohamed** avec qui j'ai réalisé la validation du modèle numérique et **Mr. Seddiki Akram** qui m'a permis d'effectuer mes calculs numériques au niveau de leur centre de recherche.*

*Mes remerciements sincères et profonds à **mon Papa, ma Maman, mes Sœurs et Frères** qui m'ont toujours poussé à continuer mes études. Leur présence, ainsi que leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours, ont fortement contribué à ma réussite et à être ce que je suis actuellement. Il me nécessiterait trop de ligne pour écrire tout ce que je leurs dois donc je dirais simplement : merci.*

Enfin, je poursuis mes remerciements à tous les professeurs tout au long de mon parcours, l'équipe administrative, les doctorants, docteurs, ingénieurs et à tous ce qui ont contribué de loin ou près à cette thèse.

Dans l'espoir de n'avoir oublié personne,

à Toutes et à Tous mes sincères remerciements ...

Hayat BELHORMA

Résumé

Le changement climatique et l'urbanisation rapide sont deux éléments qui favorisent l'apparition du phénomène d'îlot de chaleur urbain à l'échelle de la ville. Pendant les dernières décennies de multiples études ont été réalisées sur l'îlot de chaleur urbain.

Cette étude se concentre sur la simulation numérique pour prédire l'îlot de chaleur urbain et comment la nouvelle forme urbaine influe sur le microclimat. Nous nous intéressons également à la façon dont la ventilation naturelle contribue à réduire l'effet de l'ICU et à améliorer le confort de l'environnement.

La simulation a été effectuée sur le mois le plus chaud de l'été. La température de l'air, la vitesse du vent et le transfert de chaleur ont été simulés en utilisant l'outil CFD. Cette étude montre comment la géométrie urbaine du canyon est un élément crucial que les urbanistes peuvent prendre en compte pour réduire l'ICU dans un climat méditerranéen.

Mots clés :

Algérie - Oran - Changement Climatique – Microclimat - Espace Urbain - Climat Urbain - Ilot de chaleur urbain - Gaz à effet de serre (GES) - Atténuation - Adaptation - CFD.

Abstract

Climate change and rapid urbanization are two elements that favor the appearance of the urban heat island phenomenon at the city scale. During the last decades numerous studies focused on the Urban Heat Island.

This study focuses on numerical simulation to predict the urban heat island and how the new buildings affect on the microclimate. We are also interested on how natural ventilation contributes to reducing the effect of UHI and improving a comfort environment.

The simulation was performed on the hottest month in summer .The mean air temperature, wind speed and heat transfer have been simulated using CFD tool. This study shows how urban geometry for the canyon are crucial elements that urban planners may take into account to reduce the UHI in a mediterranean climate.

Keywords :

Algeria - Oran - Climate Change - Microclimate - Urban Space - Urban Climate - Urban Heat Island Effect - Green house Gas(GHG) - Mitigation - Adaptation - CFD.

المخلص

يعتبر التغير المناخي والتوسع الحضري السريع عنصرين رئيسيين يسهمان في ظهور ظاهرة الجزيرة الحرارية الحضرية على مستوى المدينة. على مدى العقود الماضية، تم إجراء العديد من الدراسات حول هذه الظاهرة.

تركز هذه الدراسة على المحاكاة الرقمية لتوقع الجزيرة الحرارية الحضرية وكيفية تأثير الشكل الحضري الجديد على المناخ المحلي. كما نولي اهتمامًا أيضًا لدور التهوية الطبيعية في تقليل تأثير الجزيرة الحرارية الحضرية وتحسين الراحة البيئية.

تم تنفيذ المحاكاة في أكثر شهور الصيف حرارة. تم محاكاة درجة حرارة الهواء، وسرعة الرياح، وانتقال

الحرارة باستخدام أداة محاكاة ديناميكيات الموائع الحسابية.

تظهر هذه الدراسة كيف أن الهندسة الحضرية للواديان (أو الأودية الحضرية) تعتبر عنصرًا حاسمًا يمكن أن يأخذها المخططون الحضريون في الحسبان لتقليل تأثير الجزيرة الحرارية الحضرية في مناخ البحر الأبيض المتوسط.

الكلمات المفتاحية:

الجزائر - وهران - التغير المناخي - المناخ المحلي - الفضاء الحضري - المناخ الحضري - الجزيرة الحرارية الحضرية
التخفيف - التكيف - ديناميكيات الموائع الحسابية - الغازات الدفيئة.

Liste des acronymes

ICU: Ilot de chaleur urbain .

H: Hauteur moyenne des bâtiments.

W: Largeur du canyon.

L: Longueur du canyon.

(H/W): Rapport d'aspect.

$\Delta T(u-r)$: Différence de température entre les milieux "urbains" et "ruraux".

Q*: Rayonnement net toutes ondes .

QF: Dégagement de chaleur par combustion .

QH: Densité de flux thermique sensible turbulent .

QE: Densité de flux thermique latent turbulent.

ΔQS : Stockage de chaleur net.

ΔQA : Advection de chaleur nette.

BES: Bilan énergétique de surface.

CLU: Couche limite urbaine.

CFD: Dynamique des fluides computationnelle.

EBM: Modèle du bilan énergétique.

Data Analys: Analyse des données.

Remote Sensing: Télédétection thermique.

CLA: Couche limite atmosphérique.

TA: Température de l'air.

VV: Vitesse du vent.

HR: Humidity de l'air.

FL: Flux de chaleur.

Pa: Pression atmosphérique.

RS: Rayonnement solaire.

RR: Précipitation.

TS: Température de surface.

CAO: Conception Assistée par ordinateur.

MDF: Méthode des différences finies.

MVF: Méthode des volumes finis.

MEF: Méthode des éléments finis.

RANS: «Reynolds Averaged Navier Stokes» ou «Navier-Stokes Moyennée par Reynolds» .

LES: «Large Eddy Simulation» ou «Simulation des grandes turbulences».

DNS : «Direct Numerical Simulation» ou «Simulation Numérique Directe» .

EVM: «Eddy-viscosity models» ou «Modèle de viscosité».

NLEVM: «Non-lineareddy-viscosity models» ou «Modèle de viscosité non linéaire».

DSM: «Differential stress models» ou «Modèles de contrainte différentielle».

\mathbf{v}_z : Vecteur du vent moyen à tout niveau z en dessous du niveau du vent géostrophique.

τ_z : Stress de cisaillement.

ρ : Densité atmosphérique.

GES: gaz à effet de serre.

Glossaire

Adaptation : démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences.

Albédo : est la part des rayonnements solaires qui sont renvoyés vers l'atmosphère.

Anthropocène:est une nouvelle époque géologique qui se caractérise par l'avènement de l'homme comme principale force de changement sur Terre. Le début de l'ère de l'anthropocène correspond à la Révolution Industrielle.

Anthropos : signifie homme, coïncide avec l'invention de la machine à vapeur en 1784.

Atténuation : réduction des émissions de GES afin de limiter le réchauffement climatique.

Canopée urbaine : est une couche qui correspond à la hauteur moyenne des bâtiments qui font obstacle à l'écoulement de l'air dans le milieu urbain, elle correspond à l'échelle microclimatique.

Emissivité : est l'aptitude d'un matériau à absorber puis à réémettre de l'énergie par rayonnement.

Forçage : est défini comme une perturbation externe du système climatique qui a une influence sur son bilan énergétique.

Hot Spot : peut être déterminé lorsque le climat d'une région est essentiellement vulnérable au changement climatique global.

Perturbation anthropique : un changement du climat causé par l'homme qui aura des répercussions dangereuses sur le système climatique.

Résilience : est la capacité d'un système à revenir à son état initial après avoir été perturbé.

Réfectivité : est une mesure de la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement.

Rugosité : on désigne par rugosité les aspérités et les creux d'une surface mesurés par rapport à la surface moyenne assimilée localement à un plan.

Stratification thermique : est la formation de couches (strates) de température différentes.

Turbulence : désigne des mouvements aléatoires de l'air se superposant au mouvement moyen.

Vent géostrophique : se définit comme le vent qui résulterait de l'équilibre géostrophique entre la force de Coriolis et la force du gradient de pression atmosphérique agissant sur une parcelle d'air. Ce vent soufflerait parallèlement aux isobares dans l'atmosphère.

Vent synoptique : le vent est dit de type synoptique quand il souffle des hautes vers les basses pressions, soit d'un anticyclone vers les dépressions.

Viscosité turbulente : désigne une quantité utilisée pour décrire la dissipation turbulente.

Vulnérabilité ou sensibilité : exprime le niveau d'effet prévisible d'un phénomène naturel (un aléa) sur des enjeux (les sociétés humaines et leurs activités).

Remerciements.....	i
Résumé	iv
Liste des acronymes	vi
Glossaire	v
Tables des matières	x
INTRODUCTION GÉNÉRALE	2
Chapitre I : Généralités sur les changements climatiques: passés, observés et projetés	
I.1 Introduction.....	8
I.2 Contexte historique du climat	9
I.3 Fonctionnement du système climatique	10
I.4 Notion du climat et du changement climatique	11
I.4.1 Changement climatique à l'échelle globale	13
I.4.1.1 Causes du changement climatique	13
I.4.1.2 Modifications passées de la concentration en gaz à effet de serre	16
I.4.2 Scénarios climatiques	17
I.4.2.1 Scénarios SRES	18
I.4.2.2 Scénarios socio-économique RCP	19
I.4.2.3 Comparaison entre les scénarios RCP et SRES	21
I.4.2.4 Scénarios SSP (Shared Socio-economic Pathways).....	21
I.4.3 Changement climatique observé dans le système climatique	22
I.5 Projections du changement climatique au cours du 21e siècle.....	25
I.5.1 Réchauffement global.....	25
I.5.1.1 Evolution de la température de l'air	26
I.5.1.2 Evolution des températures extrêmes	28
I.5.2 Modèles régionaux et saisonniers de réchauffement de la surface	30

I.6 Changements climatiques en méditerranée	31
I.6.1 Climat méditerranéen	31
I.6.2 Caractéristiques et évolution du climat méditerranéen	31
I.6.3 Evolution de la température en méditerranée	32
I.7 Changements climatiques en Afrique du Nord	34
Conclusion	35
Chapitre II : Interaction entre le microclimat et la morphologie urbaine	
II.1 Introduction	38
II.2 Changement climatique et l'urbanisation	38
II.3 Notion de la ville	41
II.3.1 Ville et changement climatique	42
II.4 Notion du climat urbain	43
II.5 Echelles climatiques	43
II.4.1 Echelle globale	43
II.4.2 Echelle régionale ou méso échelle	43
II.4.3 Echelle locale	43
II.4.4 Echelle microclimatique	44
II.5 Etude du microclimat : Relation entre climat local et ville	44
II.5.1 Morphologie urbaine	46
II.5.1.1 Forme urbaine	47
II.5.1.2 Canyon urbain	48
II.5.2 Aspects de Géométrie et d'Orientation	50
II.6 Climat des canyons urbains	50
II.6.1 Structure verticale de l'atmosphère urbaine	50
II.6.2 Distribution de la température dans les canyons urbains	52
II.6.3 Distribution de vent dans l'environnement urbain	53
II.6.3.1 Structure verticale du vent dans les zones urbaines	53

II.6.4 Configuration de l'écoulement du vent dans le canyon de la rue	55
II.6.4.1 Vent perpendiculaire à l'axe du canyon	55
II.6.4.2 Vent parallèle à l'axe du canyon	60
II.6.4.3 Différents types d'effet du vent autour des bâtiments	60
II.7 Effet du rayonnement solaire	61
Conclusion	62

Chapitre III : Revue de littérature sur les îlots de chaleur urbains

III.1 Introduction	64
III.2 Contexte historique	65
III.2.1 Phénomène d'îlot de chaleur urbain	65
III.2.2 Intensité d'îlot de chaleur urbain	67
III.2.3 Facteurs affectant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain	68
III.2.4 Bilan énergétique des surfaces urbaines	70
III.2.5 Différents types d'îlot de chaleur urbain	71
III.2.5.1 Ilot de chaleur de surface	71
III.2.5.2 Ilot de chaleur atmosphérique	71
III.3 Ilot de chaleur urbain selon les différentes échelles urbaines	72
III.4 Causes d'îlot de chaleur urbain	74
III.5 Processus de formation d'îlot de chaleur urbain	75
III.6 Ilot de chaleur urbain et le changement climatique	75
III.7 Stratégies d'atténuation d'îlot de chaleur urbain	76
III.8 Approches de la détermination et de mesure de l'îlot de chaleur urbain	79
III.8.1 Approches observationnelles	80
III.8.1.1 Télédétection thermique	80
III.8.1.2 Modélisation à petite échelle	81
III.8.1.3 Mesures sur le terrain	81
III.8.2 Approches par simulations	81

III.8.2.1 Modèle du bilan énergétique (EBM).....	82
III.8.2.2 Dynamique des fluides computationnelle (CFD).....	82
III.9 Rétrospective des travaux liés aux îlots de chaleurs urbains	82
Conclusion	98

**Chapitre IV:CFD :Outil d'adaptation des milieux urbains au changement
climatique**

IV.1Introduction	100
IV.2 Histoire de l'adaptation	101
IV.2.1Evolution des définitions du terme adaptation	101
IV.3 Problématique d'adaptation au changement climatique dans les villes	103
IV.4 Mesures et outils d'adaptation et atténuation des îlots de chaleur urbain	104
IV.5 CFD : Outil de conception de la ville durable et climatiquement confortable	106
IV.5.1 Histoire du CFD	106
IV.5.2 Domaines d'applications du CFD et ses objectifs	108
IV.6 Etapes des modèles CFD	109
IV.6.1 Création de la géométrie	109
IV.6.2 Génération de grille (maillage).....	110
IV.6.3 Définition des modèles	110
IV.6.4 Définition des propriétés physiques du fluide	111
IV.6.5 Définition des conditions aux limites et initiales	111
IV.6.6 Résolution numérique	112
IV.6.7 Analyse des résultats -Post-traitement	112
IV.7 Fondements mathématiques du CFD	114
IV.7.1 Equation de Conservation de la masse	114
IV.7.2 Equation de conservation de la quantité de mouvement	115
IV.7.3 Equation de conservation de l'énergie	116
IV.8 Méthodes de discrétisation	117

IV.8.1 Méthodes des différences finies (MDF)	117
IV.8.2 Méthodes des volumes finis (MVF)	117
IV.8.3 Méthode des éléments finis (MEF).....	118
IV.9 Classification des modèles turbulents	118
IV.9.1 Approche RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes).....	121
IV.9.2 Approche LES (Large Eddy Simulation).....	122
IV.9.3 Approche Direct Numerical Simulation (DNS)	123
IV.10 Comparaison entre les différents modèles de turbulence	126
IV .11 Application du CFD dans le domaine de l'urbanisme	127
Conclusion	128

**ChapitreV: Prédiction de l'îlot de chaleur urbain dans une ville
méditerranéenne: cas de la ville d'Oran**

V.1 Introduction	130
V.2 Présentation des îlots de chaleur urbain en méditerranéen	130
V.2.1 Notion des villes méditerranéennes	130
V.2.3 Exemple des études sur l'îlot de chaleur en méditerranéen	131
V.3 Présentation de la ville d'Oran	132
V.3.1 Contexte géographique de la ville d'Oran	132
V.3.2 Climat d'Oran	134
V.3.3 Evolution de température moyenne	134
V.3.4 Analyse des journées de forte chaleur à Oran	134
V.3.5 Simulations du climat d'Oran	136
V.4 Analyse urbaine :l'approche typo-morphologique	139
V.4.1 Evolution de population et morphologie urbaine de la ville d'Oran	139
V.4.2 Analyse typo-morphologique après 1962	143
V .4.2.1 Zones d'Habitat Urbain Nouvelles (ZHUN)	143
V.4.2.2 Centre ville d'Oran	144

V.5 Description du cas d'étude :Nouveau pole urbain d'Oran (Ahmed Zabana)	145
V.5.1 Situation géographique	145
V.5.2 Composantes du système géographique	147
V.5.3 Choix de l'îlot urbain	147
V.6 Présentation des simulations de microclimat urbain	149
V.6.1 Validation du modèle	149
V.6.2 Domaine de calcul et grille de cas d'étude	150
V.6.3 Conditions aux limites	152
V.6.4 Paramètres de calcul	154
V.7 Analyse et interprétation des résultats	155
V.7.1 Distribution de la température de l'air	156
V.7.2 Distribution de la vitesse du vent	157
V.7.3 Influence du transfert thermique	163
Conclusion	166
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	169
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	172
Liste des figures	181
Liste des tableaux	186
Liste des cartes	187

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

Le changement climatique, causé principalement par les activités humaines constitue l'un des défis majeurs de la communauté scientifique au XXI^e siècle. Selon le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), les activités humaines ont déjà provoqué un réchauffement moyen global d'environ 1,1°C par rapport aux niveaux préindustriels, et ce phénomène est prévu de se poursuivre au cours des prochaines décennies, avec des conséquences de plus en plus marquées (GIEC, 2021). Ce phénomène, amplifié par les émissions de gaz à effet de serre (GES), engendre des répercussions très significatifs sur le système climatique tels que la montée du niveau de la mer, l'intensification des phénomènes météorologiques extrêmes tels que (vagues de chaleur, sécheresses, inondations, cyclones tropicaux et tempêtes), ainsi que des impacts environnementaux et socio-économiques profonds.

En effet, parmi les nombreux effets du changement climatique, l'îlot de chaleur urbain (ICU) représente un défi de plus en plus préoccupant, particulièrement dans les grandes agglomérations où se concentrent une grande part de la population mondiale. Ce phénomène, qui se caractérise par des températures élevées dans les zones urbaines comparées aux zones rurales environnantes, est exacerbé par le changement climatique et amplifié par l'urbanisation croissante (Oke, 1987 ; Voogt et Oke, 2003).

Les villes méditerranéennes, comme Oran en Algérie, sont particulièrement vulnérables aux effets du réchauffement climatique. Elles connaissent une urbanisation rapide liée à des conditions climatiques déjà chaudes, rendant le phénomène des îlots de chaleur urbains encore plus prononcé.

La morphologie urbaine, en particulier la forme urbaine, la disposition des bâtiments et des rues, la densité et la composition des surfaces urbaines, jouent un rôle déterminant dans la formation et l'intensification des ICU.

Les paramètres microclimatiques locaux, tels que la température de l'air, l'humidité, et la circulation de l'air, interagissent directement avec ces facteurs morphologiques pour créer des microclimats urbains plus ou moins vulnérables à la chaleur (Santamouris, 2015; Grimmond et al., 2010).

Il est donc impératif de comprendre ces interactions pour pouvoir construire une planification urbaine adaptée, qui tient compte de ces paramètres, peut réduire l'impact des ICU et favoriser une meilleure adaptation des villes aux défis du changement climatique (Santamouris et al., 2015).

Cette thèse se concentre sur l'étude de l'impact de la morphologie urbaine sur la formation des îlots de chaleur urbains et l'évaluation de ces phénomènes à travers des simulations numériques. Plus spécifiquement, elle cherche à explorer comment la configuration des villes influe sur les conditions microclimatiques locales et comment ces connaissances peuvent être utilisées pour concevoir des villes plus résilientes face aux défis climatiques à venir.

Problématique de la recherche

Les îlots de chaleur urbains (ICU), exacerbés par le changement climatique, représentent un enjeu majeur pour la gestion urbaine des villes méditerranéennes. Ces villes, caractérisées par une forte densité de population et une urbanisation rapide, sont particulièrement sensibles aux phénomènes thermiques liés au réchauffement global. Dans ce cadre, la morphologie urbaine, en modifiant les paramètres microclimatiques locaux, influence directement la formation et l'intensité des îlots de chaleur. La problématique de cette thèse repose sur l'étude des interactions complexes entre la morphologie urbaine et les paramètres climatiques dans le contexte des îlots de chaleur urbains, en particulier dans la ville d'Oran, en Algérie, qui présente des caractéristiques typiques des villes méditerranéennes : un climat chaud, une urbanisation rapide, et des défis liés au changement climatique.

Dans ce contexte, il est essentiel de mieux comprendre comment les différentes composantes de la morphologie urbaine influencent les paramètres climatiques locaux et contribuent à la formation des îlots de chaleur urbains, et d'identifier des stratégies efficaces pour atténuer ce phénomène. La question fondamentale de cette thèse est donc :

Comment les caractéristiques géométriques et morphologiques des villes interagissent-elles avec les conditions climatiques locales pour atténuer la formation des ICU, et quelles solutions peuvent être mises en place pour améliorer la résilience des villes face à ces phénomènes ?

Hypothèses de la recherche

Sur la base de la problématique identifiée, plusieurs hypothèses peuvent être formulées :

1. **Hypothèse 1** : La morphologie urbaine d'Oran (forme urbaine, densité de construction et hauteur des bâtiments) a une influence significative sur la formation et l'intensification des îlots de chaleur urbains.
2. **Hypothèse 2** : L'utilisation de matériaux réfléchissants peuvent réduire l'intensité des îlots de chaleur urbains à Oran, et contribuer ainsi à atténuer les effets du changement climatique sur le microclimat urbain.
3. **Hypothèse 3** : Les stratégies d'adaptation au changement climatique, telles que la ventilation naturelle dans l'espace urbain et la promotion de l'urbanisme durable, sont des leviers efficaces pour rendre les villes méditerranéennes plus résilientes face aux îlots de chaleur urbains.
4. **Hypothèse 4** : Les modèles de simulation numérique basés sur la dynamique des fluides (CFD) permettent d'obtenir des prédictions réalistes des effets des ICU et d'évaluer l'impact des stratégies d'atténuation.

Objectifs de la recherche

Les objectifs principaux de cette thèse sont les suivants :

1. Etudier la relation entre la morphologie urbaine et les paramètres microclimatiques à Oran, en particulier en ce qui concerne la formation et l'intensification des îlots de chaleur urbains.
2. Evaluer l'impact du changement climatique sur l'espace urbain d'Oran, en particulier dans le **nouveau pôle urbain Ahmed Zabana**, qui est en pleine expansion.

3. Utiliser un modèle de **simulation numérique CFD** pour étudier les interactions entre la morphologie urbaine et les paramètres microclimatiques et de prédire le phénomène d'ICU au niveau du **nouveau pôle urbain Ahmed Zabana** .
4. **Proposer des stratégies d'atténuation des îlots de chaleur urbains**, telles que la ventilation naturelle, afin d'adapter la ville d'Oran au changement climatique.

Méthodologie de la recherche

Cette étude repose sur une approche intégrée alliant une revue de littérature approfondie et des simulations numériques. La première étape consiste à explorer les concepts clés liés au changement climatique, à l'îlot de chaleur urbain et à la morphologie urbaine à travers une analyse théorique. Nous procéderons à une synthèse des recherches précédentes pour comprendre les mécanismes sous-jacents au phénomène d'ICU et les différentes méthodes utilisées pour l'évaluer.

Dans un deuxième temps, nous adopterons une approche de **simulation numérique** en utilisant la méthode des **dynamique des fluides computationnelle (CFD)**, couplée avec des modèles de turbulence adaptés. Cette approche nous permettra de modéliser les interactions entre la morphologie urbaine et les conditions climatiques locales, et d'identifier les zones les plus vulnérables aux ICU dans un contexte spécifique, celui du **nouveau pôle urbain d'Oran**, nommé **Ahmed Zabana**. Cette étude de cas nous offrira une analyse détaillée des effets de la morphologie urbaine sur les microclimats urbains et des pistes d'atténuation possibles du phénomène d'ICU.

Structure de la thèse

La thèse est structurée en cinq chapitres principaux, dont voici un aperçu :

- **Chapitre 1** : Contexte historique et scientifique du changement climatique, évolution du climat, et projections futures. Ce chapitre présente également une analyse des scénarios climatiques globaux et régionaux, notamment en Méditerranée et en Afrique du Nord.

- **Chapitre 2** : Etude de la relation entre l'urbanisation et le climat urbain. Ce chapitre explore le concept de microclimat, les facteurs influençant la formation des îlots de chaleur urbains et les spécificités des climats urbains en fonction de la morphologie des villes.
- **Chapitre 3** : Revue de littérature sur les îlots de chaleur urbains, leurs causes, leurs processus de formation, et les stratégies d'atténuation existantes. Ce chapitre présente également les méthodes utilisées pour évaluer l'ICU, y compris les approches de simulation numérique et les études précédentes pertinentes.
- **Chapitre 4** : Présentation détaillée de la méthode de simulation numérique CFD et des différents modèles de turbulence utilisés pour étudier les interactions entre la morphologie urbaine et le phénomène d'îlot de chaleur urbain. Ce chapitre met en lumière les fondements mathématiques de l'approche CFD et son application dans le contexte de l'adaptation au changement climatique.
- **Chapitre 5** : Application des simulations numériques à la ville d'Oran. Ce chapitre analyse les résultats des simulations et leur pertinence pour l'adaptation et l'atténuation des ICU à l'échelle urbaine. Une discussion sur les implications pratiques pour l'aménagement urbain sera également présentée.

La conclusion générale résume les principales découvertes de cette thèse et discute de leur implication pour construire des villes résilientes aux défis climatiques. Elle souligne l'importance de prendre en compte les interactions complexes entre morphologie urbaine, paramètres climatiques et changement climatique, tout en proposant des solutions durables, pratiques et innovantes face aux défis des îlots de chaleur urbains. Cette recherche apporte une contribution significative à la compréhension des phénomènes climatiques urbains et aux stratégies d'atténuation et d'adaptation des villes au changement climatique actuel et futur.

Chapitre I

**Généralités sur les changements
climatiques: passés, observés et
projetés**

I.1 Introduction

Depuis plusieurs années, le climat de la terre a été changé à cause des activités anthropiques, ce changement est d'autant plus rapide, c'est pour cela la problématique du changement climatique attire l'attention des scientifiques et les climatologues.

Le changement climatique est un phénomène planétaire ; en conséquence, tout le monde est exposé à ses effets négatifs. Le comité international des chercheurs en sciences du climat a déduit que l'homme contribue à la modification du climat de la Terre d'une manière qui amplifie les risques pour les villes.

Cette conclusion se base sur de nombreux types d'arguments, particulièrement l'histoire du climat de la Terre, les observations des changements dans les archives climatiques historiques récentes, les modèles climatiques régionaux et mondiaux (Rosenzweig et al, 2015).

En effet, tout un changement de la teneur atmosphérique des gaz à effet de serre, d'aérosols, du rayonnement solaire et des propriétés de la surface terrestre modifient le bilan énergétique du système climatique.

Il est admis que les villes représentent l'essentiel de l'origine des émissions des gaz à effet de serre. C'est pourquoi, il convient dès à présent de prôner de nouvelles politiques urbaines afin de rendre les villes moins émettrices en gaz à effet de serre et cela en diminuant leur consommation en énergie fossile. Aussi, à travers ces politiques le but recherché est de rendre ces villes plus résistantes aux perturbations climatiques.

Désormais, il s'agit de comprendre et d'anticiper ces changements climatiques en maintenant la durabilité des villes et en essayant de protéger les populations contre les effets et les aléas causés par le phénomène du changement climatique.

Dans ce chapitre nous présentons tous les aspects des changements climatiques, y compris l'évolution passée du climat, les causes qui renforcent les modifications du système climatique, les changements observés et projetés à l'échelle globale, sur la région méditerranéenne et sur le Nord d'Afrique en se basant sur les résultats abordé par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

I.2 Contexte historique du climat

Le climat de la terre avait une très longue histoire et il a toujours changé à différentes échelles spatio-temporelles. Le réchauffement climatique planétaire qu'on discute aujourd'hui présente une modification d'une histoire ancienne du climat.

Ainsi, des études historiques sur le climat ont été bien documentées avant que le phénomène de changement climatique apparait. De plus en plus, de plusieurs recherches sur le passé de la terre aident les scientifiques à établir comment l'homme influe sur la planète ce que l'on appelle une perturbation anthropique.

L'histoire de la climatologie a été développée à pour objectif d'étudier le climat et leurs effets sur l'homme avant la découverte des instruments de mesures des paramètres météorologiques (vent, température, ensoleillement.etc).

Comme le climat a une influence importante sur l'homme. Depuis une longue période et notamment vers la fin du XVIIIe siècle, il a été marqué qu'une autre histoire des effets anthropogéniques sur le climat a été étudié.

Cependant, l'homme a modifié les conditions climatiques à l'échelle régionale et locale, mais ce changement climatique anthropogénique a connu une évolution rapide des l'ère industrielle.

Par ailleurs, une période géologique appelée Anthropocène contribue dans l'histoire du climat de la terre. Ainsi plusieurs scientifiques apprécient que l'Anthropocène ait commencé avec la révolution industrielle au XVIIIe siècle.

Dans cette nouvelle époque d'Anthropocène, l'homme est considéré comme la principale force de changement climatique sur terre.

Pendant les 12000 années précédentes, l'évolution de l'humanité s'est bien développée dans la période interglaciaire actuelle nommée l'Holocène, cette dernière a été débuté à 11650 ans avant l'année 1950.L'époque de l'Holocène désormais l'une des deux époques géologiques du Quaternaire, l'antécédente étant le Pléistocène.

En effet, il est admis qu'à partir des années 1980, le phénomène de l'effet de serre attire l'attention des chercheurs et les scientifiques dans le monde.

Pour répondre à la problématique et aux questions liées au changement climatique : un Groupe d'Experts Intergouvernemental su l'évolution du climat (GIEC) est créé par l'ONU en

1988, ainsi la convention cadre des nations unies (CCNUCC) pour étudier le changement climatique et ses impacts est entré en vigueur en 1994.

En plus, le rôle du GIEC est de montrer aux scientifiques, des évaluations périodiques en utilisant des modèles climatiques globaux et régionaux sur l'état du climat et les projections des changements climatiques futures, leurs impacts et les risques futurs liés à ce phénomène en proposant des stratégies d'atténuation d'adaptation à fin de limiter le réchauffement climatique .

Ainsi, les travaux du CCNUC sur le changement climatique permettent d'assurer la stabilisation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau bien déterminé en évitant toute une perturbation du système climatique liée aux effets anthropogéniques.

I.3 Fonctionnement du système climatique

Le système climatique est défini comme étant l'ensemble des interactions entre ses différentes composantes :

- L'atmosphère.
- L'hydrosphère (les océans, les cours d'eau .etc.).
- La cryosphère (les glaciers, les neiges).
- La lithosphère (la croûte terrestre).
- La biosphère (les êtres vivants).

Le système climatique est considéré comme une machine qui fonctionne à l'énergie solaire. Les composantes du système climatique interagissent entre eux sous l'effet du rayonnement solaire en déterminant le climat de la terre.

Selon les différentes échelles temporelles, les climats passés à cause de facteurs naturels et anthropiques ont constitué un ensemble d'expériences naturelles sur le système climatique terrestre.

L'histoire a montré que les mêmes mécanismes qui ont concouru à la mise en place des climats passés, modèlent le climat actuel et contribueront certainement dans l'évolution future du climat.

Les changements climatiques enregistrés dans le passé peuvent être considéré comme des réponses du système climatique face à plusieurs éléments notamment naturels qui interviennent à différentes échelles du temps.

Cela à toujours fait réagir le système climatique à des perturbations de natures physiques ou biogéochimiques. Le changement climatique actuel réagit quant à lui à des perturbations de natures anthropiques. Par conséquent, le système climatique à toujours été directement influencé par des facteurs extérieurs, appelés communément, forçages naturels et forçages anthropiques.

I.4 Notion du climat et du changement climatique

Le climat défini par le (GIEC, 2014) comme « le temps moyen ou, plus précisément, se réfère à une description statistique fondée sur les moyennes et la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes variant de quelques mois à des milliers, voire à des millions d'années ».

La période recommandé par l'Organisation météorologique mondiale, est de 30 ans. Ces grandeurs sont les paramètres de surface comme la température, la hauteur de précipitation et le vent. Généralement, le climat indique l'état du système climatique, y compris sa description statistique.

A partir delà on peut considérer et définir le climat comme étant un état d'équilibre du système climatique à l'échelle globale. Cet équilibre observé sur une période suffisamment longue se caractérise par la stabilité des principales variables météorologiques et statistiques de ce système.

Par ailleurs, cet équilibre de système climatique correspond à un équilibre entre l'énergie reçu par le soleil et l'énergie réfléchi. En absence d'un équilibre entre l'énergie reçu par la terre et rayonné par cette dernière, place la terre dans une situation de réchauffement climatique, qui est pour certains une amorce d'un changement climatique au niveau de la planète.

Un changement climatique: perçu comme étant sans équivoque. Le changement climatique tel que défini par le (GIEC ,2014) comme « la variation de l'état du climat, qu'on peut déceler (par exemple au moyen de tests statistiques) par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, notamment les modulations des

cycles solaires, les éruptions volcaniques ou des changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des terres ».

Un forçage est défini comme une perturbation externe du système climatique qui a une influence sur son bilan énergétique, ces forçages peuvent diviser en deux types : naturels (activités solaire et volcaniques) et anthropiques (effet des gaz à effet de serre).

➤ **Forçages naturels :**

Les activités solaires : sont dues aux variations dans le temps de l'intensité du rayonnement solaire et des modifications de l'orbite de la terre qui peuvent modifier l'énergie reçue du soleil.

Les activités volcaniques : les aérosols émis par les éruptions volcaniques dans l'atmosphère provoquent un refroidissement du climat, à titre d'exemple le volcan Pinatubo qui est apparu aux Philippines en juin 1991 a engendré un refroidissement de la planète de 0.4°C.

➤ **Forçage anthropique :**

Ce forçage est lié aux émissions des gaz à effet de serre et d'aérosols dans l'atmosphère.

Par ailleurs, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) définit les changements climatiques comme étant des «changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables».

Ainsi, la CCNUCC établit dans sa définition une différence entre les changements climatiques d'origine anthropique modifiant la composition de l'atmosphère et la variabilité du climat attribuable à des origines naturelles.

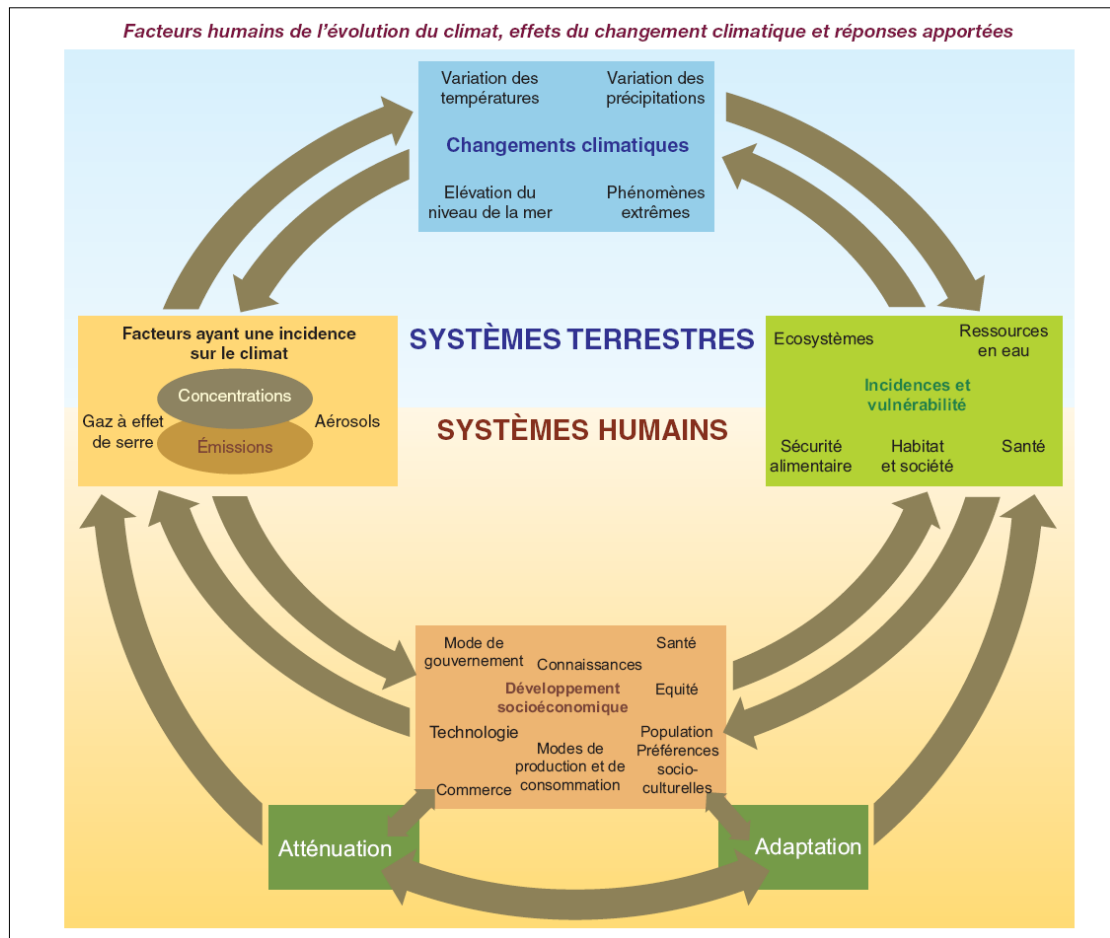


Figure I.1 : Relation entre les facteurs humains influents sur l'évolution du climat, les effets du changement climatique et les réactions soutenues. **Source** : (GIEC, 2007).

I.4.1 Changement climatique à l'échelle globale

I.4.1.1 Causes du changement climatique

Comme la modification du bilan énergétique du système climatique est causée principalement par l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre et d'aérosols dans l'atmosphère, cette dernière est considérée comme étant la principale source de l'élévation de la température mondiale remarquée depuis le milieu du 20^e siècle.

Selon le glossaire du (GIEC,2018), les gaz à effet de serre (GES) sont définis comme « des constituants gazeux de l'atmosphère, tant naturels qu'anthropiques, qui absorbent et émettent un rayonnement à des longueurs d'onde données du spectre du rayonnement terrestre émis par la surface de la Terre, l'atmosphère et les nuages. C'est cette propriété qui est à l'origine de l'effet de serre. La vapeur d'eau (H₂O), le dioxyde de carbone (CO₂), l'oxyde nitreux (N₂O), le méthane (CH₄) et l'ozone (O₃) sont les principaux gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère terrestre ».

Cette augmentation des émissions de gaz à effet de serre, sous forme de concentrations de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄) et d'oxyde nitreux (N₂O) dans l'atmosphère est sans précédent.

L'avènement de la révolution industrielle dans le monde au milieu du 18^{ème} siècle et la croissance économique, démographique et urbaine qui s'en est suivi a engendré indéniablement une augmentation des émissions des gaz à effet de serre.

La croissance économique, démographique et urbaine liée à d'autres facteurs anthropiques ont été identifiés par les experts comme étant la cause cruciale du réchauffement observé depuis le milieu du XX^e siècle.

Ces facteurs anthropiques et leurs impacts sur le système climatique sont détaillés dans la figure I.2. Les observations et les mesures indiquent que l'effet des GES sur le réchauffement du système climatique de la terre (forçage radiatif) change en fonction des propriétés radiatives de ces gaz et leur durée de vie dans l'atmosphère.

Selon le glossaire du (GIEC,2018), un forçage radiatif est défini comme « la variation du flux de rayonnement résultant (différence entre l'éclairement descendant et l'éclairement ascendant, exprimée en W/m²), à la tropopause ou au sommet de l'atmosphère, due à une modification d'un agent externe du changement climatique, par exemple une modification de la concentration de dioxyde de carbone ou du rayonnement solaire ».

L'effet des GES peut être exprimé par une mesure standard basée sur le forçage radiatif attribuable au CO₂ (GIEC,2007) :

L'émission d'équivalent-CO₂ : est défini par la quantité diffusé de dioxyde de carbone qui déclencherait le même forçage radiatif assimilé dans le temps jusqu'à une date donnée. L'émission d'équivalent-CO₂ est calculée par la multiplication de la valeur de l'émission d'un gaz à effet de serre par son potentiel de réchauffement global (PRG) pour la période de temps déterminé.

La concentration d'équivalent-CO₂ : est la concentration de dioxyde de carbone qui provoquerait un forçage radiatif de même importance qu'un mélange donné de CO₂ et d'autres éléments de forçage.

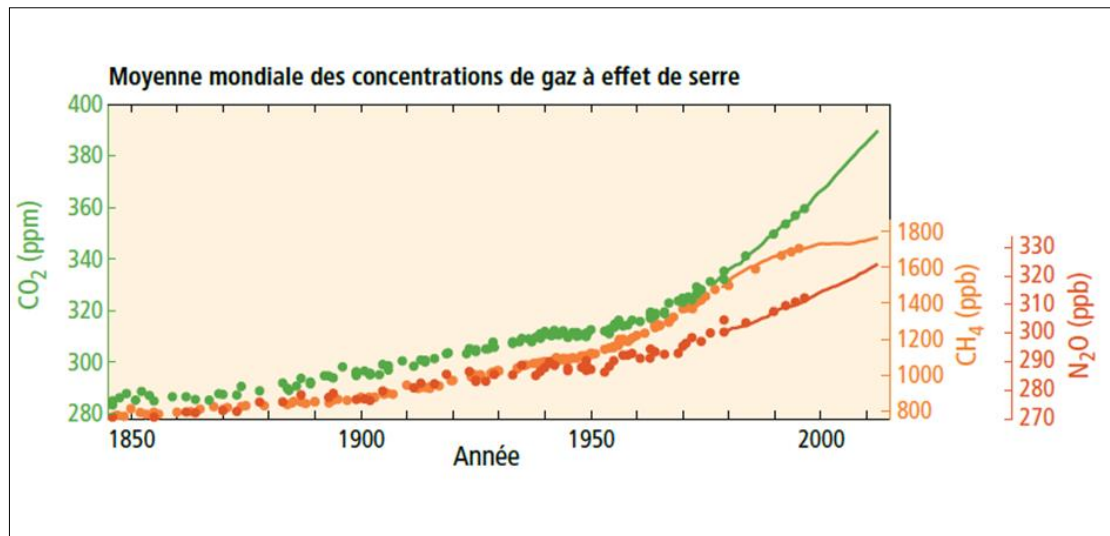


Figure I.2 : Concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre.

Source : (GIEC, 2014).

Aussi, il a été constaté que le taux des émissions mondiales anthropiques de GES a connu une augmentation entre 1970 et 2010.

Cette croissance en valeur primordiale observée entre 2000 et 2010 était encore plus accentuée et cela malgré les stratégies d'atténuation du changement climatique adoptées.

Pour preuve, les émissions anthropiques annuelles de GES ont atteint 49 (\pm 4,5) Gt_{eq}CO₂ en 2010, alors que les rejets du dioxyde de carbone (CO₂) dus à l'utilisation de combustibles fossiles et aux activités industrielles ont été à l'origine de l'augmentation du total mondial des émissions de GES entre 1970 et 2010 à concurrence de 78%, soit une augmentation assez prononcée, voir la figure I.3.

Ce qui confirme que l'aggravation des émissions de CO₂ soit imputée aux développements économiques, démographiques et urbains en raison de l'usage illimité des combustibles fossiles.

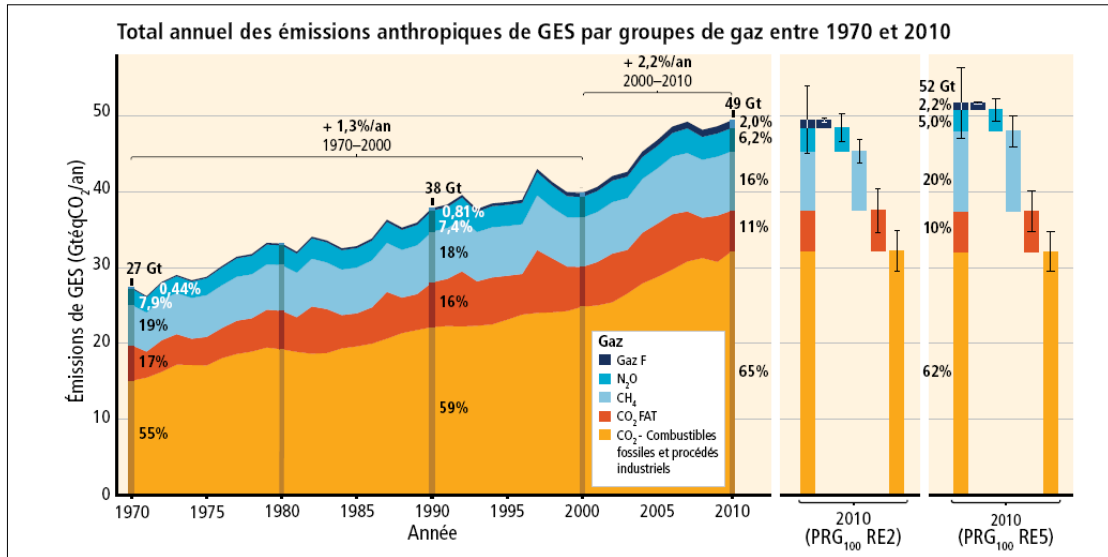


Figure I.3 : Total annuel des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) (gigatonne d'équivalent CO₂ par an, Gt_{eq}CO₂/an), pour la période 1970–2010.

Source : (GIEC, 2014).

I.4.1.2 Modifications passées de la concentration en gaz à effet de serre

La connaissance de la concentration atmosphérique en CO₂ est nécessaire pour apprécier les émissions anthropiques des GES. Ainsi, plusieurs méthodes directes et indirectes nous aident à évaluer l'évolution de la concentration atmosphérique en CO₂.

Pour estimer l'évolution de la concentration atmosphérique en CO₂ dans le passé, les méthodes indirectes semblent les mieux indiquées pour évaluer la concentration atmosphérique en CO₂ au cours des 65 millions d'années passées, voir la figure I.4.

Ces méthodes indirectes se basent par exemple sur l'étude des isotopes stables du carbone dans des sédiments marins ou terrestres. Il a été constaté que le climat était plus chaud que durant la période préindustrielle au cours plusieurs périodes passées déterminées par une augmentation de concentration en dioxyde de carbone.

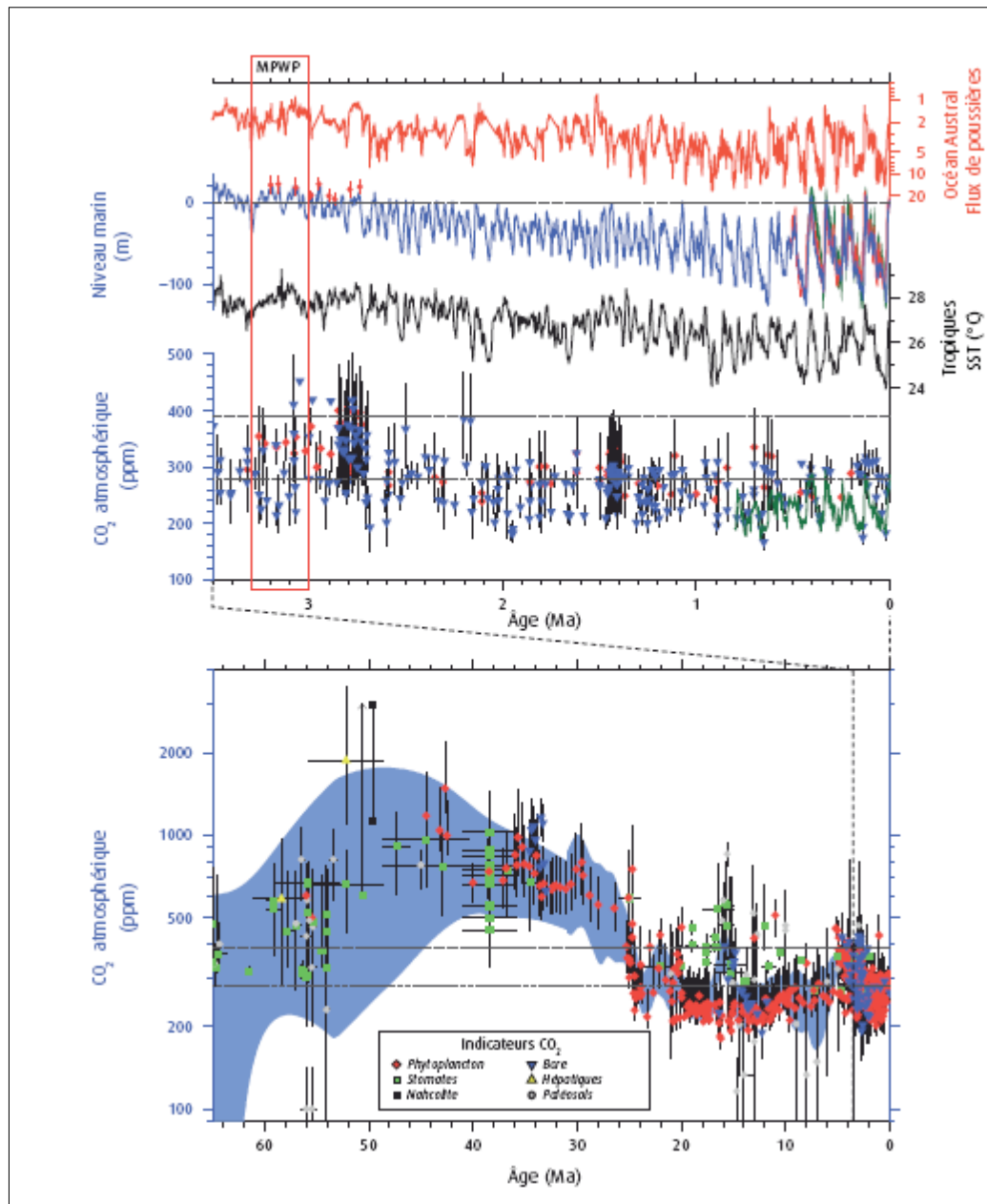


Figure I.4 : Estimation de la teneur en CO₂ de l’atmosphère au cours des derniers 65 millions d’années (en bas) et des derniers 3,5 millions d’années (en haut).

Source : (Masson-Delmotte et al., 2015)

I.4.2 Scénarios climatiques

L’utilisation des scénarios d’émission et socio-économiques dans les études sur le climat permet de décrire d’une manière prospective comment évoluent les variables socio-économiques et les développements technologiques en rapport avec la consommation de l’énergie, l’utilisation des terres et l’importance des rejets de gaz à effet de serre.

Pour apprécier les effets du changement climatique, les scénarios sont utilisés pour estimer l'incertitude de la contribution de l'homme au changement climatique, la réaction du système climatique aux activités humaines, les effets du climat futur d'une part et l'importance des différentes stratégies d'atténuation des émissions des GES et d'adaptation aux nouvelles conditions climatiques d'autre part.

Selon le glossaire du (GIEC, 2018), un scénario est défini comme étant « la description vraisemblable de l'avenir, fondée sur un ensemble cohérent et intrinsèquement homogène d'hypothèses concernant les principales forces motrices (rythme de l'évolution technologique, prix, etc.) et les relations en jeu ».

Cependant, il est à noter qu'un ensemble des scénarios n'est pas une prévision et une projection, néanmoins il permet d'estimer beaucoup plus les conséquences du changement climatique et d'incertitudes de différentes évolutions.

I.4.2.1 Scénarios SRES (Special Report on Emissions Scenarios)

En 1996, le GIEC a commencé d'élaborer un nouvel ensemble de scénarios d'émission ; Ce nouvel ensemble de scénarios est décrit dans le Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions SRES (Special Report on Emissions Scenarios, ou Rapport spécial sur les scénarios d'émissions).

Les scénarios d'émissions décrivent des changements futurs possibles des GES, des aérosols et autres gaz anthropiques dans l'atmosphère.

Quatre canevas ont été élaborés pour décrire la relation entre les forces qui conduisent à ces émissions et leur évolution. Ces différents canevas sont décrits comme suit :

A1 : Le canevas et la famille de scénarios **A1** décrivent un monde futur caractérisé par un développement économique très rapide, une augmentation accélérée de la population mondiale au milieu du siècle, ensuite elle tend à diminuer, ainsi de nouvelles technologies efficaces seront apparus.

La famille de scénarios A1 se divise en trois groupes liés à différentes hypothèses à propos de l'évolution technologique du système énergétique.

(A1F1) : usage intensif de combustibles fossiles

(A1T) : sources d'énergie autres que fossiles

(A1B) : équilibre entre toutes les sources d'énergie

A2 : Le canevas et la famille de scénarios **A2** décrivent un monde très hétérogène. La population mondiale augmente d'une manière constante. une évolution très lente de la croissance économique par habitant et le développement technologique.

B1 : Le canevas et la famille de scénarios **B1** décrivent un monde convergent composé du même caractère démographique, une augmentation de la population mondiale au milieu du siècle pour diminuer après.

B2 : Le canevas et la famille de scénarios **B2** décrivent un monde qui cherche à mis en place des solutions locales en matière d'une durabilité économique, sociale et environnementale.

I.4.2.2 Scénarios socio-économique RCP (Representative Concentration Pathways)

Les scénarios socio-économiques comprennent plusieurs hypothèses sur le développement économique futur et ses effets sur l'environnement. Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans son 5e rapport a créé une nouvelle série de scénarios appelé RCP (Representative Concentration Pathways) ; en vue de remplacer l'ancien jeu nommé SRES (Special report on emissions scenarios) (Boucher et al., 2015).

Les scénarios socioéconomiques du GIEC ont pour objectif de présenter différents types d'évolutions futures possibles du monde jusqu'à l'horizon de 2100 et plus, qui dépendent des émissions de GES et les forçages radiatifs qui causent le réchauffement du climat.

Le terme «représentatif" désigne que chacun des RCP indique un ensemble très importants de scénarios dans la littérature, L'expression "concentration pathway "veut dire que ces RCP ne forment pas un ensemble absolu de projections socio-économiques, d'émissions et de climat , mais précisément des ensembles similaires de projections des composantes du forçage radiatif.

L'utilisation du mot "concentration" plutôt que "d'émissions" note que les concentrations sont utilisées comme la matière principale des RCP, conçus comme une entrée dans les modèles climatiques (Van Vuuren et al., 2011).

L'ensemble RCP correspond à l'évaluation du forçage radiatif à la fin du XXIe siècle (figure I.5). Ces scénarios ont été prolongés jusqu'à l'horizon 2300.

Les profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) décrivent quatre modes différents d'évolution des émissions et des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre, des émissions de polluants atmosphériques et de l'utilisation des terres au XXIe siècle (GIEC, 2014) :

Le scénario RCP8.5 : correspond aux émissions de gaz à effet très accentués et un forçage radiatif très élevé à la fin du XXIe siècle.

Le scénario RCP2.6 : comprend une politique intense d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement climatique à 2 °C environ par rapport à la température de la moitié du XIXe siècle.

Le scénario RCP 4.5, correspondant à un scénario avec politiques climatiques visant à stabiliser les concentrations en CO₂.

Le scénario RCP 6.0 correspond à la stabilisation des émissions avant la fin du XXIe siècle à un niveau moyen.

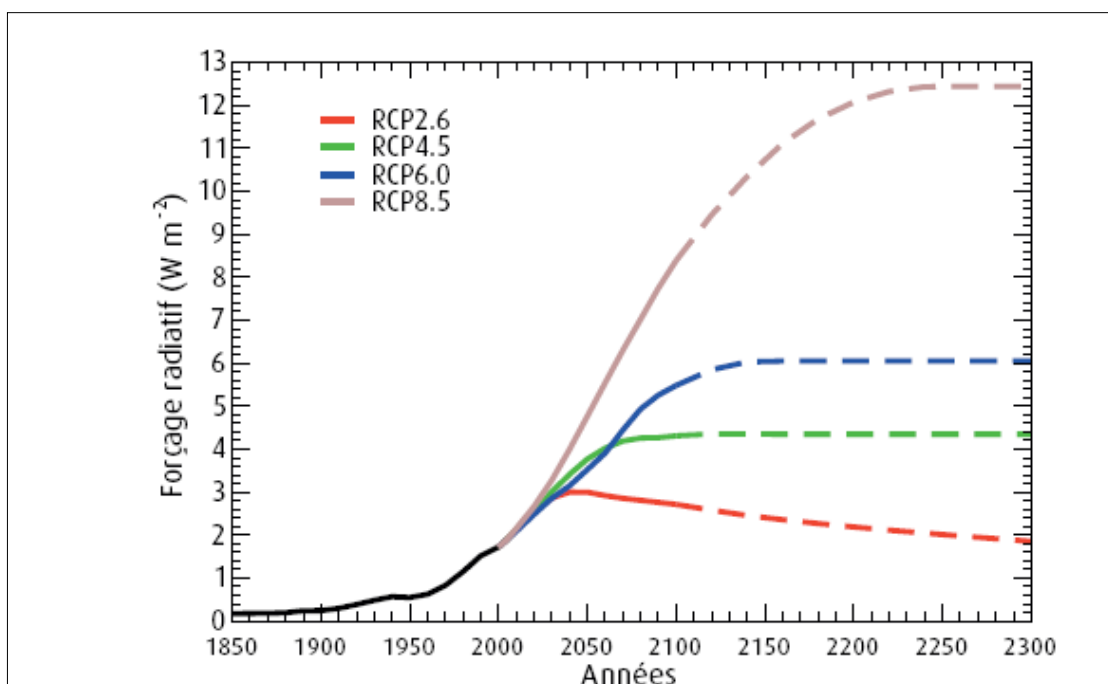


Figure I.5 : Evolution du forçage radiatif total et global ($W m^{-2}$) pour la période historique (1850-2005) .Source : (Boucher et al .,2015).

I.4.2.3 Comparaison entre les scénarios RCP et SRES

Les profils représentatifs d'évolution de concentration présentent un ensemble de scénarios plus grand par rapport aux scénarios d'émissions car ils sont composés également

des scénarios qui prennent en compte une politique climatique, pour plus de détails voir le tableau I.1.

À la différence des SRES, les RCP sont identifiés en termes de concentrations de gaz à effet de serre et pas d'émissions en adoptant des stratégies d'atténuation et d'adaptation.

En termes de forçage radiatif, le scénario RCP8,5 est absolument comparable au scénario A1 du SRES, ainsi le RCP6,0 est équivalent au B2 et le RCP4,5 au B1 et en fin le scénario RCP2,6 n'a pas d'équivalent dans le SRES..

En résumé, le meilleure scénario est le RCP2.6 car a une probabilité d'intégrer les effets de politiques possibles de réduction des émissions de GES afin de limiter le réchauffement planétaire à 2°C.

Tableau I.1 : Comparaison entre RCP et SRES

Scénarios RCP	Forçage radiatif	Teneur de GES (ppm)	Trajectoire	SRES équivalent
RCP 8.5	8.5w.m ² en 2100	Supérieur 1370	Croissant	SRES A1
RCP 6.0	6w.m ² après 2100	Environ 850	Stabilisation sans dépassement	SRESB2
RCP4.5	4.5w.m ² après 2100	Environ 650	Stabilisation sans dépassement	SRESB1
RCP2.6	2.6w.m ² avant 2100	Environ 490	Pic puis diminue	Aucun

I.4.2.4 Scénarios SSP (Shared Socio-economic Pathways)

Le GIEC dans son 6ème rapport (AR6) a élaboré un nouveau ensemble des scénarios appelé SSP (Shared Socio-economic Pathways ou trajectoires socio-économiques partagées), ces scénarios sont basés sur un ensemble d'hypothèses socioéconomiques.

Les SSP peuvent être utilisé comme des données d'entrée dans les modèles d'évaluation, ces modèles intègrent des hypothèses sur l'évolution de la population, la consommation énergétique, la technologie et aussi des hypothèses sur les mesures d'atténuation des changements climatique.

Ainsi, les scénarios SSP peuvent être utilisés dans l'évaluation des politiques sur le changement climatique.

SSP1 décrit par : faible défi d'adaptation et un faible défi d'atténuation

SSP2 caractérisé : par un défi d'adaptation moyen et un défi d'atténuation moyen.

SSP3 présente un défi d'adaptation élevé et un défi d'atténuation élevé.

SSP4 indique qu'un défi d'adaptation élevé et un faible défi d'atténuation.

SSP5 contient un faible défi d'adaptation et un défi d'atténuation élevé.

I.4.3 Changement climatique observé dans le système climatique

Aujourd'hui, le réchauffement climatique global du système climatique est considéré comme sans équivoque. Le réchauffement climatique est défini comme l'augmentation de la température moyenne mondiale de la surface de la terre.

Généralement, il désigne la modification des phénomènes météorologiques à l'échelle globale qui en résulte. Aussi, il est dû aux émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropiques.

En effet, des changements significatifs sont observés depuis les années 1950 et qui sont marqués par un réchauffement de l'atmosphère, de l'océan, une réduction de couverture neigeuse et de glace et en fin par une élévation de niveau des mers.

Les observations depuis 1850 indiquent que les trois dernières décennies ont été sans cesse les plus chaudes à la surface de la Terre. Aussi, les mesures les plus récentes sont aussi plus affirmatives sur l'augmentation à l'échelle globale.

Selon les conclusions de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (WMO, 2022), il a été constaté que les années entre 2015 à 2021 présentent la période la plus chaude n'ont jamais enregistrées.

La température moyenne mondiale 2018-2022 (basée sur les données jusqu'en mai ou juin 2022) est estimée à $1,17 \pm 0,13$ °C au-dessus de la moyenne de 1850-1900, voir (figure I.6).

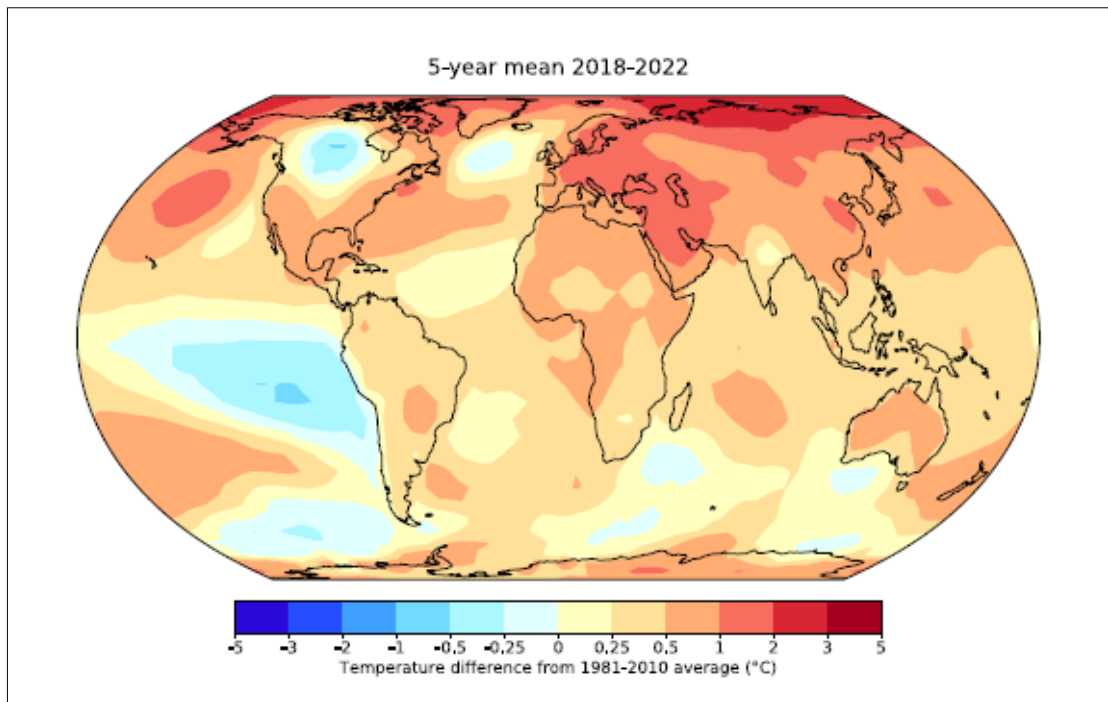


Figure I.6 : Ecart moyen sur cinq ans de la température proche de la surface par rapport à la moyenne 1981-2010 pour la période 2018-2022. **Source** :(WMO, 2022)

Dans le même ordre d'idées, le rapport AR5 du GIEC montre que la période des trente années passées est la plus chaude qu'ait vécue l'hémisphère Nord depuis 1 400 ans, voir (Figure I.7).

Aussi, la température moyenne à la surface de la terre indique une évolution importante aux échelles décennale et interannuelle. Par ailleurs, il est constaté qu'à l'échelle globale, le réchauffement de l'océan est plus marqué à proximité de la surface.

Partant de l'importance des océans dans le globe terrestre en termes de surface et d'importance dans le système climatique, les données entre 1971 à 2010 indiquent que le réchauffement des 75 premiers mètres de profondeur est égal à 0,11°C.

En outre, les mêmes données entre 1971 et 2010 renseignent sur un réchauffement pratiquement certain de l'océan superficiel (jusqu'à 700 m de profondeur), alors que ce réchauffement n'était que probable entre 1870 et 1971. Les recherches montrent aussi que depuis le début de l'ère industrielle, les océans absorbent le CO₂ ce qui engendre une acidification de l'eau de mer.

Toujours concernant les mers et durant la période de 1901 à 2010, il a été constaté que le niveau moyen des mers à l'échelle du globe s'est augmenté de 0,19 m [de 0,17 à 0,21 m].

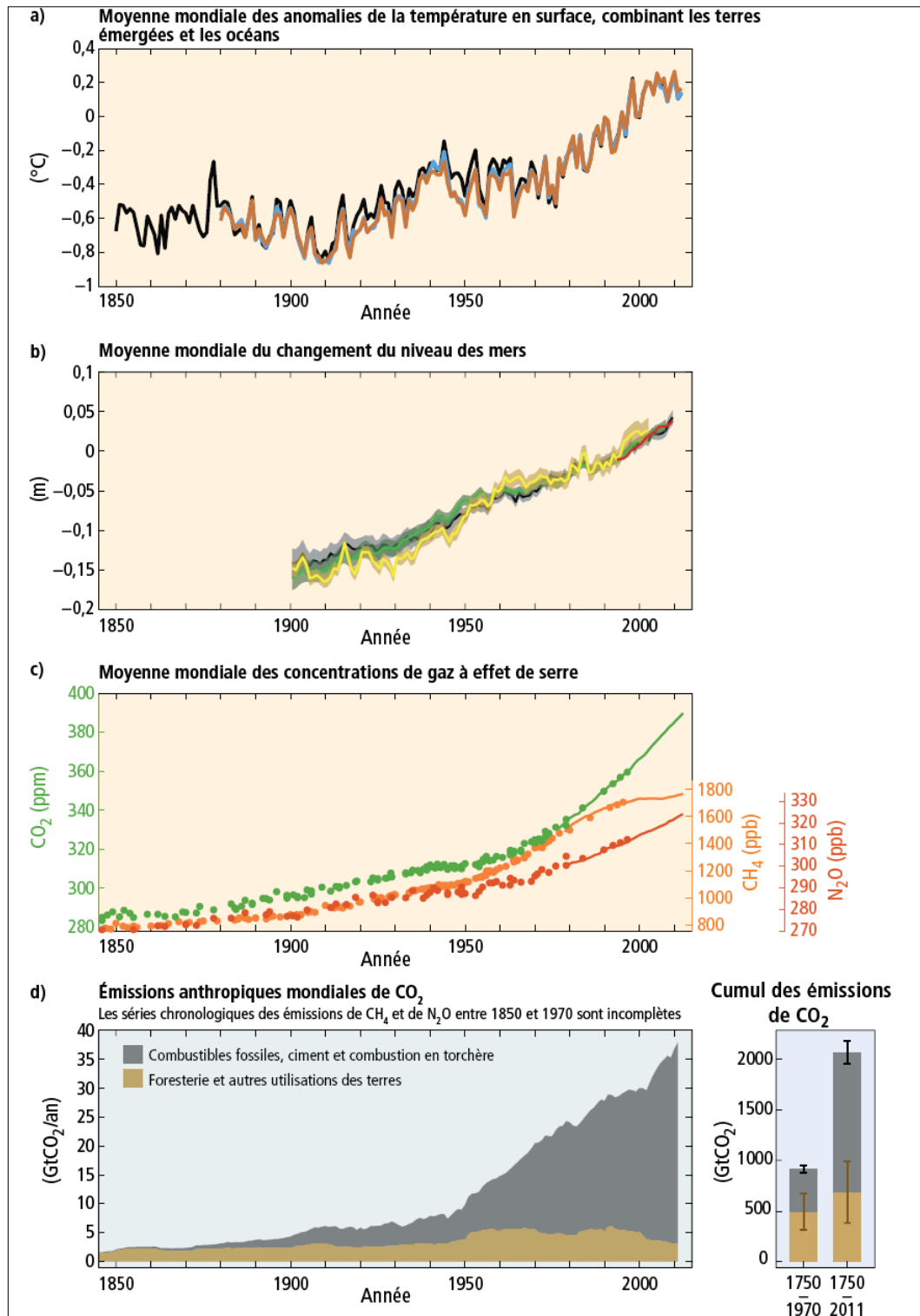


Figure I.7 : Observation et autres indicateurs d'un système climatique planétaire en évolution. **Source :** (GIEC, 2014).

I.5 Projections du changement climatique au cours du 21e siècle

I.5.1 Réchauffement global

Les modélisateurs du climat ont essayé de saisir les processus du changement climatique à partir des différents scénarios RCP (Representative Concentration Pathway).

Ainsi, différents exercices de simulations climatiques dans le cadre du CMIP5 « Coupled Model Intercomparison Project » ont été entrepris.

Le projet d'intercomparaison des modèles couplés (CMIP) ou Coupled model intercomparison project vise à effectuer des simulations climatiques et permet d'estimer l'incertitude causé par l'imperfection des modèles dans l'évaluation du changement climatique liés aux effets anthropogéniques.

Ce sont des simulations qui ont concernés aussi bien le climat passé que les projections climatiques futures en fonction de différents scénarios et expériences.

A l'aide des modèles climatiques et en tenant compte de différents forçages naturels et anthropiques sur la période 1850-2005.

Ces simulations ont essayé d'évaluer à la fois la stabilité du climat en l'absence de toute perturbation et des évaluations en présence de différents forçages naturels et anthropiques.

Dans le cadre du projet CMIP5 et pour le compte des simulations et des évaluations, les modèles CNRM-CM5 et IPSL –CM5A-LP ont été d'une contribution jugée intéressante.

Il est utile de signaler que depuis l'année 2005, toutes les simulations concernant les projections futures prennent en compte les différents forçages notamment dans les quatre scénarios RCP.

Dans le cadre de scénario RCP8.5, les modèles utilisés ont simulé une augmentation de la température au cours du XXIe siècle, varié aux petites échelles temporelles par la variabilité interne du climat, voir la figure I.8.

Quant au scénario RCP2.6, les résultats de simulation montrent que la température moyenne du globe a tendance à se stabiliser graduellement à la suite d'une diminution des forçages.

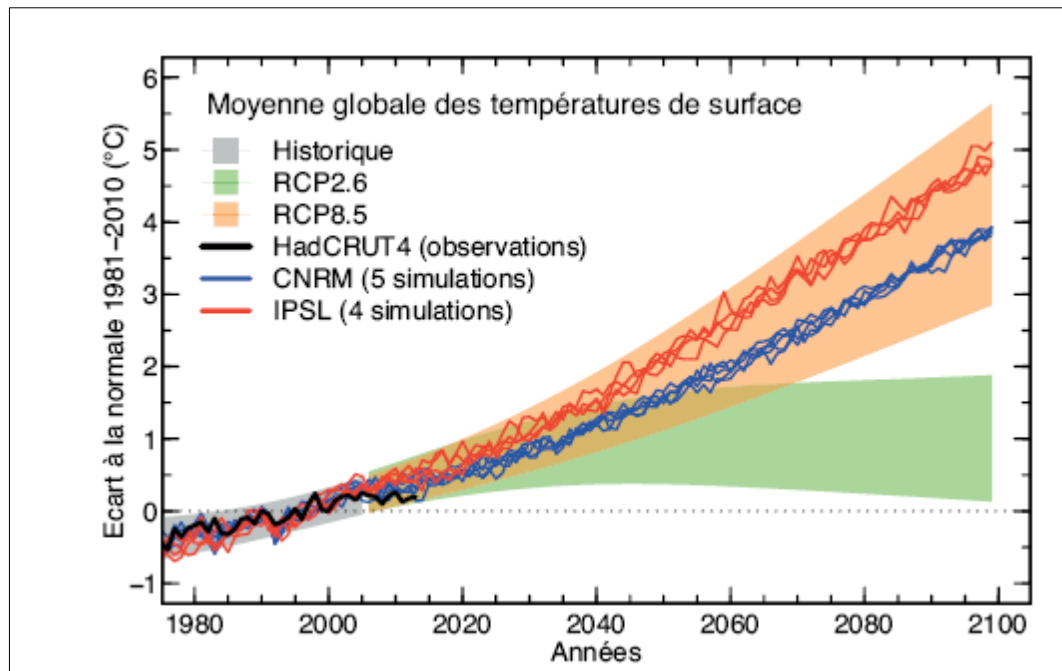


Figure I.8 : Ecart à la normale 1981-2010 de la moyenne globale des températures de surface (°C).Source:(Boucher et al ,2015).

I.5.1.1 Evolution de la température de l'air

Selon les quatre scénarios RCP, le changement de la température moyenne à la surface du globe est similaire entre les périodes 2016-2035 et 1986-2005.

Probablement, durant ces périodes la température pourrait varier entre 0,3 °C et 0,7 °C.

Toutefois, les projections du climat futur jusqu'en 2100 demeurent tributaires des types de scénarios utilisés, voir le tableau I.1.

Si la période 1850–1900 est retenue comme référence, l'évolution de la température à la surface du globe à la fin du XXI^e siècle (2081–2100) peut dépasser probablement 1,5 °C selon les scénarios suivants : RCP 4,5, le RCP 6,0 et le RCP 8,5.

Il est à noter que le réchauffement de la région arctique est et sera certainement plus rapide que la moyenne mondiale, voir la figure (I.9 a et b).

Alors que, la température moyenne au niveau de la surface des continents est plus importante que celle enregistrée au niveau de la surface des océans et demeure plus élevée que la moyenne du réchauffement à l'échelle mondiale.

Il est à retenir que tous les scénarios RCP montrent que la superficie de la glace de mer arctique diminuera tous les mois de l'année et qu'il est très probable que les vagues de chaleur seront plus fréquentes et persisteront sur de longues périodes.

Tableau I.2 : Evolution projetée de la température moyenne à la surface du globe et de l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale pour le milieu et la fin du XXI^e siècle par rapport à la période de référence 1986-2005. **Source** : (Pachauri et al., 2014).

	Scénario	2046–2065		2081–2100	
		Moyenne	Plage probable ^c	Moyenne	Plage probable ^c
Évolution de la température moyenne à la surface du globe (°C) ^a	RCP2,6	1,0	0,4 à 1,6	1,0	0,3 à 1,7
	RCP4,5	1,4	0,9 à 2,0	1,8	1,1 à 2,6
	RCP6,0	1,3	0,8 à 1,8	2,2	1,4 à 3,1
	RCP8,5	2,0	1,4 à 2,6	3,7	2,6 à 4,8
	Scénario	Moyenne	Plage probable ^d	Moyenne	Plage probable ^d
Élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale (m) ^b	RCP2,6	0,24	0,17 à 0,32	0,40	0,26 à 0,55
	RCP4,5	0,26	0,19 à 0,33	0,47	0,32 à 0,63
	RCP6,0	0,25	0,18 à 0,32	0,48	0,33 à 0,63
	RCP8,5	0,30	0,22 à 0,38	0,63	0,45 à 0,82

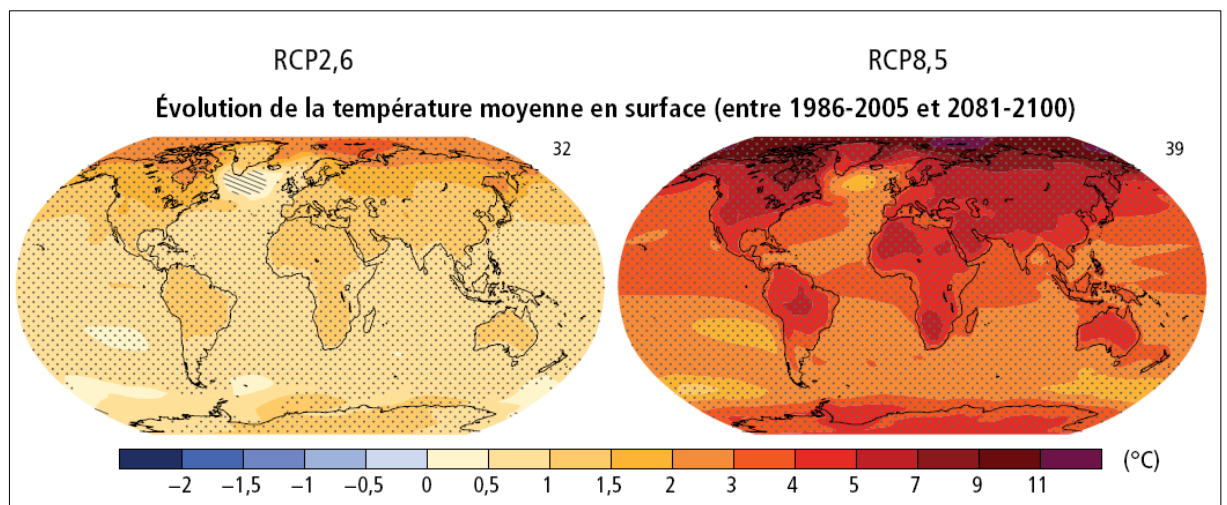


Figure I.9.a : Projections de température moyenne annuelle en surface (°C) pour la période 2081–2100. **Source** : (GIEC ,2014).

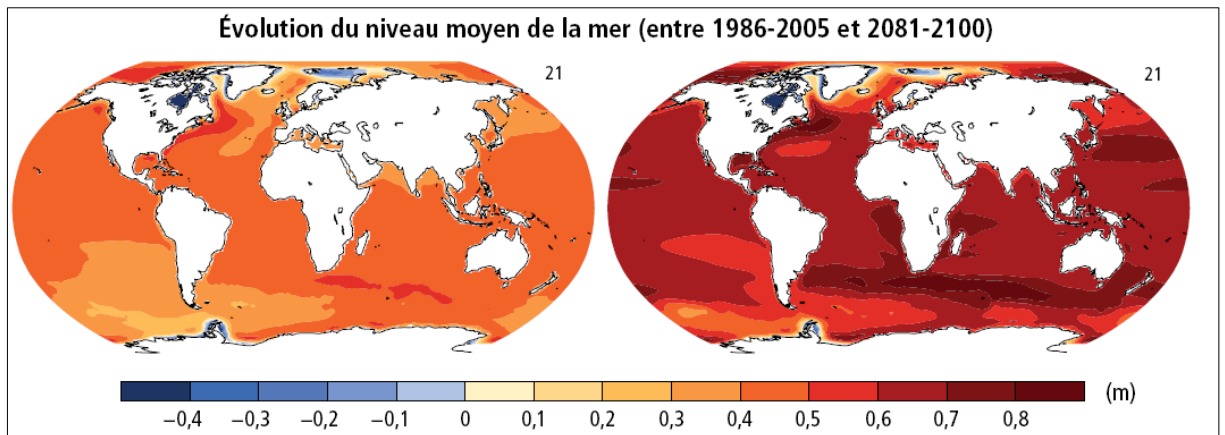


Figure I.9.b : Projections de la variation du niveau moyen de la mer pour la période 2081–2100. **Source** :(GIEC ,2014).

I.5.1.2 Evolution des températures extrêmes

Le climat a tendance à continuer à se réchauffer. Ainsi, des changements des températures extrêmes ont été observés et contribueront sans aucun doute au réchauffement climatique.

La figure I.10 représente les changements moyens multi-modèles des indices de température absolue du jour le plus froid de l'année et du jour le plus chaud de l'année ainsi que les indices basés sur le seuil des jours de gel et des nuits tropicales de l'ensemble du modèle adopté CMIP5 .

A partir des conclusions du CMIP5, il est constaté :

Une augmentation des extrêmes de température chaude, alors que les extrêmes de température froide ont tendance à diminuer. Ces changements, toujours croissant, à la hausse et à la baisse selon les extrêmes ont comme principale cause, sans aucun doute, l'augmentation du forçage anthropique.

La nuit la plus froide de l'année a connue par contre des augmentations plus significatives que le jour le plus chaud dans la série chronologique moyennée à l'échelle mondiale (figure I.10 b et d).La hausse de la fréquence des nuits chaudes sont plus appréciables que les hausses de la fréquence des jours chauds.

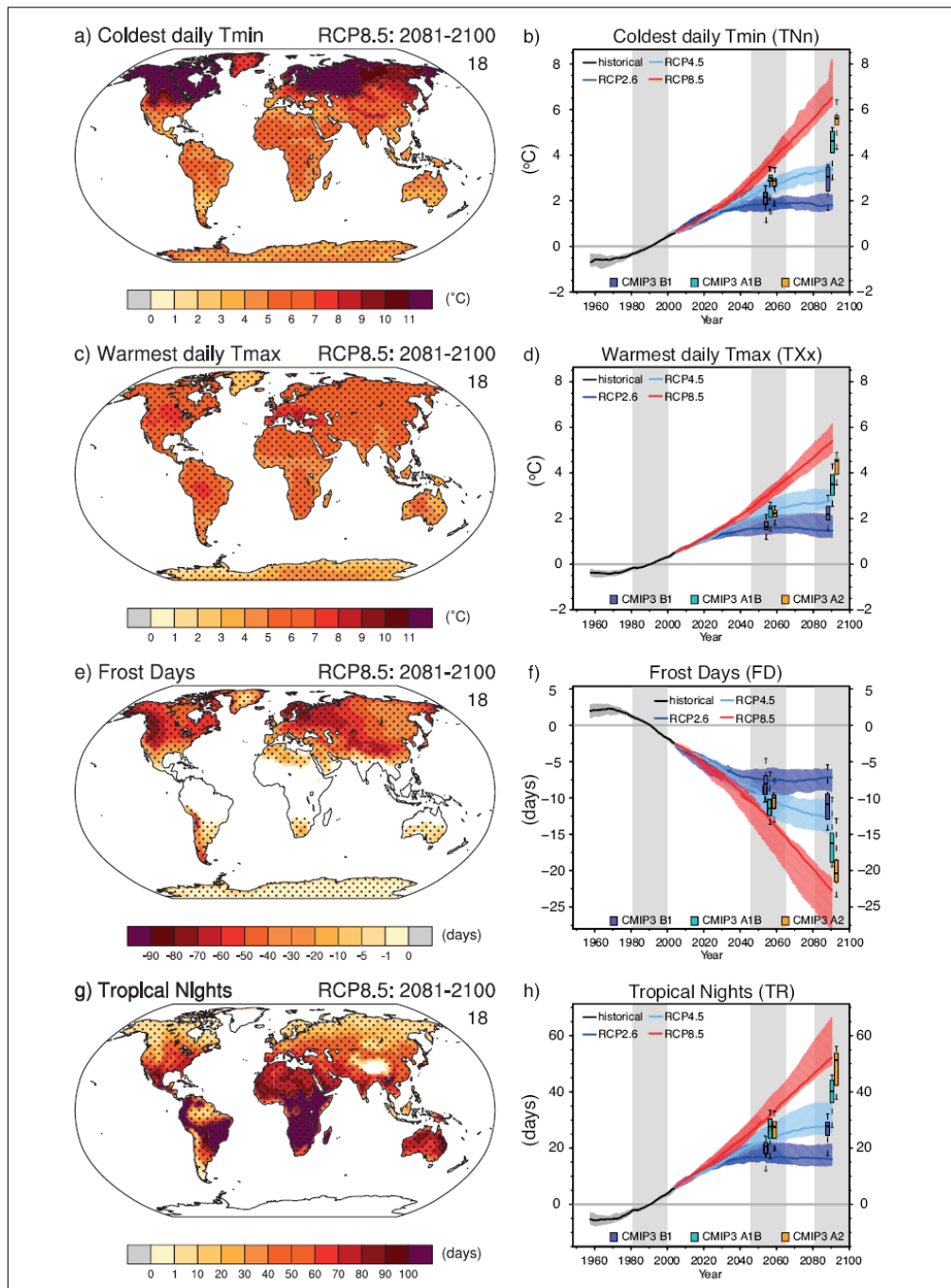


Figure I.10 : Changements géographiques moyens multi-modèles du CMIP5 (par rapport à une période de référence 1981-2000 : (a, b) le minimum annuel de la température minimale journalière, (c, d) le maximum annuel de la température maximale journalière (e, f) les jours de gel et (g, h) les nuits tropicales .**Source** :(Collins et al.,2013)

I.5.2 Modèles régionaux et saisonniers de réchauffement de la surface

Comme il est constaté que les températures de surface de la terre augmentent plus rapidement que celle de la surface de la mer, il serait intéressant de comprendre les mécanismes qui favorisent ce contraste thermique entre de la terre et la mer.

Cela est a priori la conséquence des rétroactions régionales distinctes sur l'océan et la terre et des changements dans le transfert de l'énergie atmosphérique de l'océan vers les régions terrestres.

Le réchauffement projeté en hiver indique une amplification polaire marquée dans l'hémisphère Nord (figure I.11).

L'amplification polaire est un phénomène lié au changement dans le bilan radiatif net (augmentation de l'effet de serre) qui provoque l'augmentation de température moyenne près des pôles. Un réchauffement est marqué au niveau des pôles quand la température moyenne de la surface terrestre est élevée.

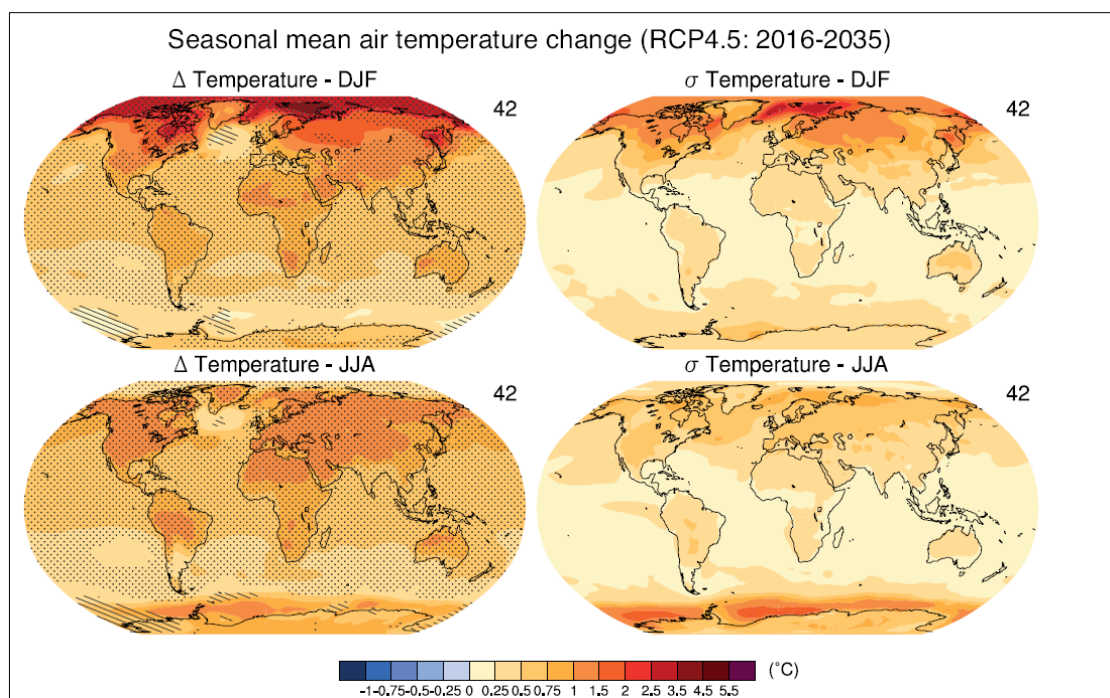


Figure I.11 :Moyenne de l'ensemble multi -modèle CMIP5 des changements projetés de la température de l'air en surface en Décembre, Janvier et Février et en Juin, Juillet et Août pour la période 2016-2035.Source :(Kirtman et al.,2013)

I.6 Changements climatiques en méditerranée

I.6.1 Climat méditerranéen

La région méditerranéenne est définie par plusieurs caractéristiques morphologiques, géographiques, historiques et sociétales. Toutes ces caractéristiques intègrent à chaque fois la dimension climatique dans leurs définitions.

La zone méditerranéenne se caractérise par une position géographique de choix, ce qui fait d'elle une zone assez intéressante et très convoitée aussi bien sur le plan économique que militaire et stratégique.

Sur le plan climatique c'est une zone de transition entre le climat aride et semi aride de l'Afrique du Nord et le climat tempéré et pluvieux de l'Europe centrale. La région méditerranéenne est affectée par les interactions entre les mécanismes de latitude moyenne et tropicales.

Le climat méditerranéen désigne le climat des régions tempérées, plus rarement subtropicales, caractérisant les espaces terrestres bordant le bassin Méditerranéen.

En été, le climat est caractérisé par une extension de la chaleur vers les pôles d'anticyclones subtropicaux. En hiver, des flux de perturbations tempérées venues d'Atlantique caractérisent la région méditerranéenne. Le climat méditerranéen se caractérise par des précipitations basses et des températures modérées.

I.6.2 Caractéristiques et évolution du climat méditerranéen

En raison des émissions anthropiques de gaz à effet de serre, la rapidité du changement climatique dans le bassin méditerranéen, historique et projeté par les modèles climatiques, est supérieure aux tendances mondiales.

La région méditerranéenne a été référencée comme l'une des régions les plus réactives au changement climatique. Le contexte du réchauffement climatique renforce la nécessité d'évaluer les conséquences possibles du changement climatique sur cette région sensible qui est susceptible de devenir plus chaude et plus sèche.

Les températures moyennes annuelles sur terre et sur mer dans le bassin méditerranéen sont 1,5 °C supérieures à celles de l'époque préindustrielle et elles devraient augmenter d'ici à 2100 de 3,8 à 6,5 °C pour un scénario de forte concentration de gaz à effet de serre (RCP8.5). La durée et les températures maximales des épisodes caniculaires s'intensifieront.

Donc, la méditerranéen est représenté par un «Hot Spot » (point chaud), Hot Spot peut être déterminé lorsque le climat d'une région est essentiellement vulnérable au changement climatique global.

En générale, la caractérisation des points chauds se basent sur la réaction du climat afin d'identifier et d'étudier les mécanismes principaux du changement climatique régional (Giorgi, 2006).

Au cours des dernières années, l'attention accordée aux effets du changement climatique planétaire sur la région méditerranéenne très vulnérable est augmenté (Dell'Aquila et al ,2018).

La zone méditerranéenne se caractérisé par une sensibilité importante à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre. Des études sur le changement climatique à long terme et la variabilité décennale dans la région méditerranéenne pendant la période 1860-2100 a été effectué sur la base de données d'observation et des expériences du projet (CMIP5).

Les informations obtenues à l'aide des données d'observation expriment que la région méditerranéenne être très chaudes et sèches entre 1860 et 2005.La liaison avec les simulations du modèle CMIP5 en intégrant les gaz à effet de serre (GES), plus les aérosols anthropiques et les forçages naturels indiquent que des changements forcés ont caractérisé le climat méditerranéen au cours de cette période (Mariotti et al , 2015).

Les projections climatiques disponibles actuellement prévoient sans exception que la région méditerranéenne sera très affectée par le changement climatique. Un changement climatique causé par le renforcement de la teneur des gaz à effet de serre avec un réchauffement régional très important vers la fin du siècle.

I.6.3 Evolution de la température en méditerranée

L'étude réalisée par (Mariotti et al.,2015) sur le changement climatique en méditerranée a analysé les simulations du modèle CMIP5 pour le climat actuel (1860-2005) et ses projections climatiques futures.

Les résultats obtenus de cette étude montrent que :

Un réchauffement significatif marqué en méditerranée au cours du XXIe siècle concernant toutes les saisons et touchant toutes les régions.

L'étude précise que :

Ce réchauffement est important sur la surface des terres que sur la surface de la mer. Il atteint une valeur maximale durant la saison estivale JJA (Juin, Juillet, Août) comme indiqué dans la figure I.12. La température simulée depuis les années 1960 est élevée et plus importante dans la saison d'été (JJA). Durant la période 1860-2005, l'augmentation de la température de l'air remarqué à long terme est associé à une variabilité décennale, voir la figure I.13.

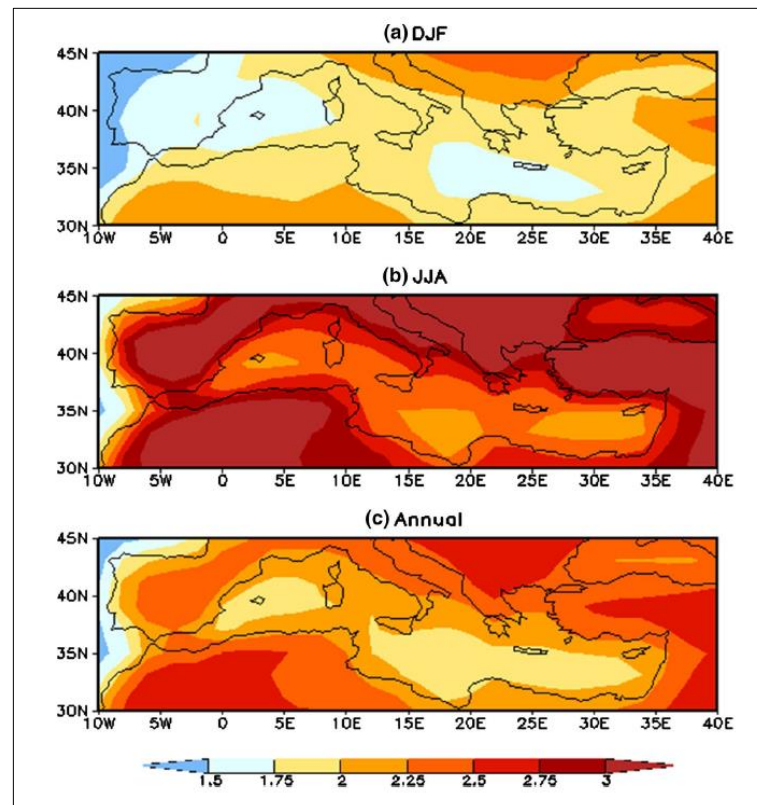


Figure I.12: Projections de l'évolution de la température de l'air de surface (°C) en Méditerranée à l'horizon 2071-2098 par rapport à 1980-2005. **Source :** (Mariotti et al.,2015).

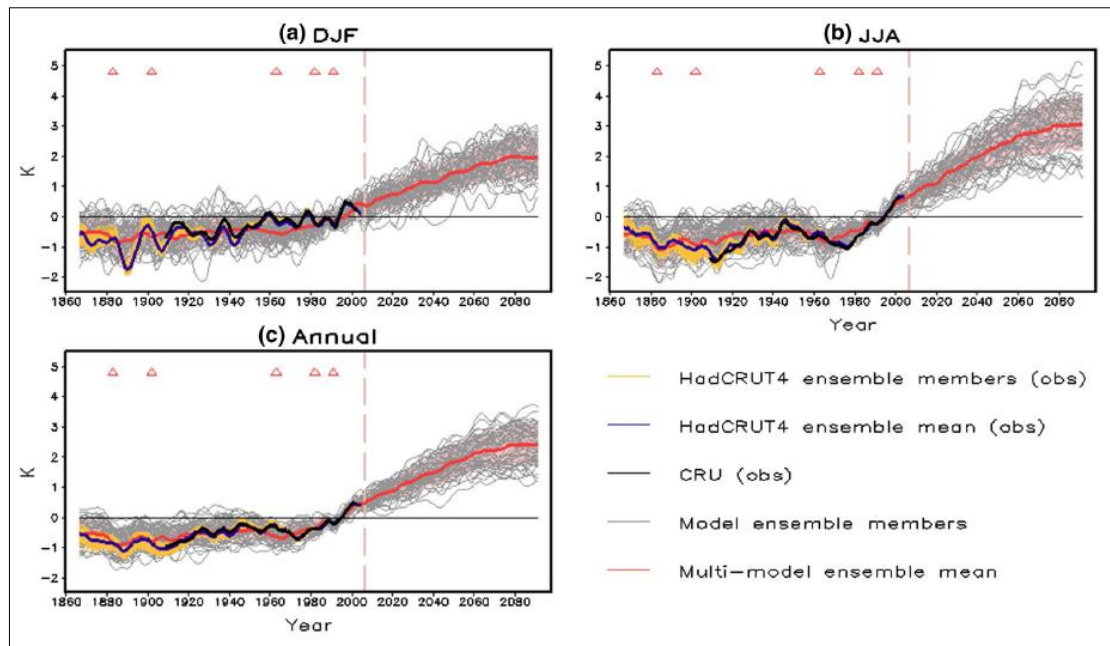


Figure I.13 : Anomalies de température de l'air, en surface moyenne méditerranéenne (terre seulement) sur la période 1860-2098. **Source** :(Mariotti et al.,2015)

I.7 Changements climatiques en Afrique du Nord

Oran ville méditerranéenne est situé précisément en Afrique du Nord qui représente la rive sud de la méditerranée, cette rive sud de la méditerranée est plus que la rive nord vulnérable aux effets du changement climatique.

Cela est dû au faite qu'elle soit exposée aux élévations de température et à une forte croissance de la population. Il a été constaté durant les dernières décennies que les tendances annuelles et saisonnières sont assez marquées en Afrique du Nord.

Ces tendances qui prennent en compte la température moyenne près de la surface de la terre indiquent déjà un réchauffement très important.

En Afrique du Nord, le changement climatique causé par les activités humaines provoque déjà une augmentation des températures au cours du 21e siècle. Le réchauffement le plus important est bien marqué et il le sera d'avantage le long de la côte méditerranéenne notamment en Algérie, la Libye et à l'Egypte.

Les prévisions indiquent que :

Un accroissement du nombre de jours de canicule est attendu dans le court et moyen terme et corrobore avec les résultats présentés dans le 5e rapport d'évaluation du GIEC (IPCC,2014) :

Au cours des saisons chaudes (Mars, Avril, Mai ; Juin, Juillet, Août) la température à proximité de la surface est très élevée représenté sur le Nord de l'Algérie et du Maroc. Une augmentation du nombre de jours de vague de chaleur sera prévue pendant le 21e siècle.

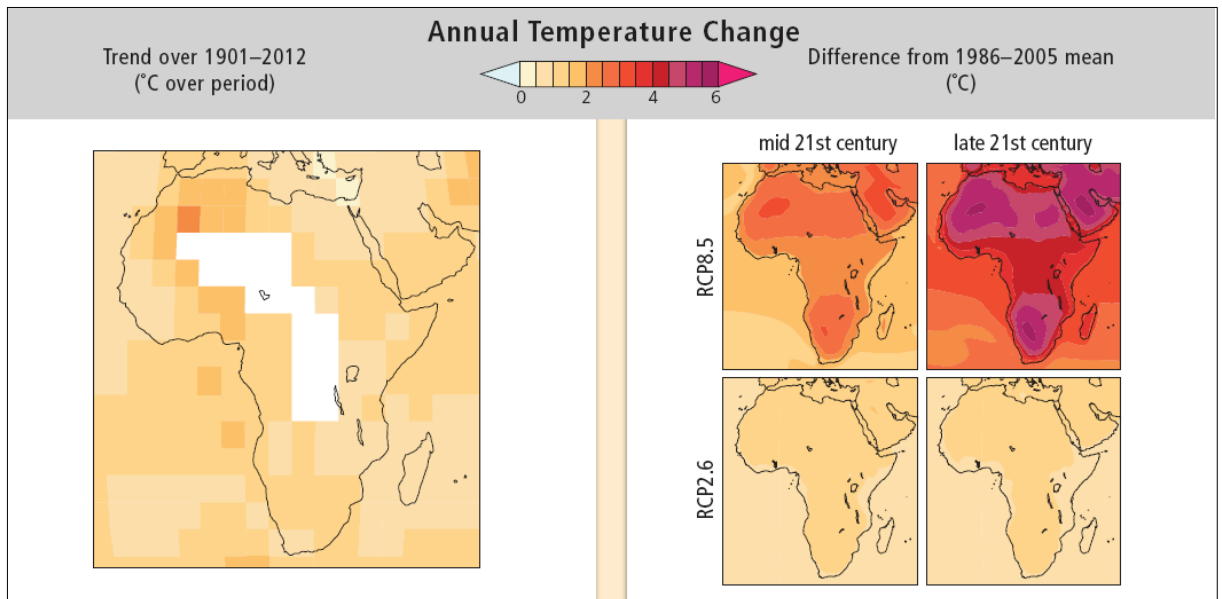


Figure I.14 : Carte de l'évolution de la température moyenne annuelle observée de 1901 à 2012 .Source : (IPCC, 2014)

Conclusion

Dans ce chapitre, il est apparu que l'homme a une influence irréversible sur le climat à l'échelle mondiale, dont il contribue à ces changements par les émissions des gaz à effet de serre.

Aussi, une augmentation de température moyenne mondiale et une modification de toutes les composantes du système climatique ont été bien observées.

En effet, pendant les dernières décennies, des changements bien marqués notamment dans les phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes (l'augmentation des extrêmes de chaleur et la diminution des extrêmes de froid).

Cependant, les projections du climat futur effectuées sur la base de tous les scénarios climatiques montrent une augmentation de la température au cours du XXIe siècle. Ainsi, une augmentation des extrêmes de température chaude, alors que les extrêmes de température froide ont tendance à diminuer.

Une augmentation du nombre de jours de vague de chaleur sera prévue pendant le 21^e siècle. Donc, il est très probable que les vagues de chaleur seront plus fréquentes et persisteront sur de longues périodes.

Enfin, Des études sur l'évolution de climat montrent que l'Algérie soit exposée aux élévations de température notamment l'apparition du phénomène d'îlot de chaleur urbain et à une forte croissance de la population.

Il est vraisemblable que les besoins en matière d'adaptation au changement climatique seront augmentés. Pour renforcer nos capacité de réaction, il faut lier l'atténuation et l'adaptation en réduisant les émissions des GES à pour conséquence de limiter le réchauffement planétaire.

Chapitre II

Interaction entre le microclimat et la morphologie urbaine

II.1 Introduction

Les villes peuvent modifier leur propre climat et fait réagir à l'instabilité du climat urbain. Ce dernier est un problème effectif sur les climats locaux et globaux qui est influencé par plusieurs facteurs tels que la morphologie, la densité urbaine et les propriétés des surfaces urbaines.

L'étude du microclimat dans les canyons des rues est un sujet important de la climatologie urbaine et fait l'objet d'une attention progressive dans le cadre de la planification urbaine puisque il affecte directement les personnes et les bâtiments.

En effet, le canyon de la rue (une route entre les bâtiments qui la bordent) forme une unité géométrique de base qui peut être utilisée pour bâtir des constructions urbaines plus importantes.

Par ailleurs, la relation entre le climat et la ville est réciproque : d'une part, la ville influence son climat urbain à travers sa typologie : orientation des géométries et matériaux de construction, d'autre part, le climat urbain affecte les performances énergétiques et les besoins climatiques des bâtiments.

Cependant, il est a constaté que les microclimats urbains varient en intensité à différents instants de la journée et de l'année, ces changements peuvent comprendre: les températures de l'air et de la surface, le rayonnement solaire directe et diffus sur les surfaces horizontales et verticales, la direction et la vitesse du vent, et peut varier de manière significative sur de très courtes distances.

Ce chapitre passe en revue de la littérature actuelle de l'impact de la conception des rues sur le microclimat urbain, en particulier les effets de la géométrie des rues (rapport hauteur/largeur) et de l'orientation des rues sur la circulation de l'air, la distribution de température et l'accès au soleil dans un canyon urbain.

II.2 Changement climatique et urbanisation

Le changement climatique et l'urbanisation sont deux phénomènes anthropiques de dimension planétaire en coévolution au sein de l'écosystème global.

Ils représentent un double défi pour le développement durable en ce que chacun accentue les menaces mondiales qui pèsent sur la stabilité écologique, le développement économique et l'équité sociale, bref, sur la vie humaine.

L'urbanisation croissante, qui se traduit par une explosion démographique, une augmentation de nombre des villes et des extensions spatiales des villes, le tout conjugué à une dynamique économique urbaine sans précédent. Tout cela, contribue sans aucun doute à intensifier les émissions de gaz à effet de serre (GES).

Depuis, l'urbanisation qui est le rapport entre la population établie dans les villes et la population totale n'a cessé d'augmenter pour atteindre des proportions inattendues, comparativement aux taux enregistrés avant l'avènement de l'industrialisation dans le monde à partir de la moitié du XVIII^e siècle.

Bien que, l'installation des populations dans les villes soit très ancienne, l'urbanisation dans le monde n'a enregistré avant la moitié du XVIII^e siècle que des taux faibles à très modestes voir tableau II.1.

Tableau II.1: Urbanisation du monde, en l'an – 3000 et en l'an 1700.

Source : (Bairoch ,1996)

	– 3000	1700
Population totale (en millions)	40-70	560-720
Population urbaine (en millions)	1-2	60-80
Taux d'urbanisation (en %)	2-4	9-11

On peut retenir que durant la période comprise entre moins 3000 avant J.C. et 1700, soit **47 siècles**, le monde était faiblement urbanisé.

Aussi, la croissance de cette urbanisation était considérée comme très faible, pour preuve le passage d'un taux d'urbanisation maximal de 4% enregistré en l'an moins 3000 avant J.C à un taux maximal de 11 % en 1700.

Cette urbanisation, pendant cette longue période, était soutenue essentiellement par des activités commerciales et, à moindre mesure, par des activités politiques et religieuses.

L'Europe qui est au cœur de la civilisation mondiale actuelle n'était en faite que faiblement urbanisée entre 1300 et 1700 avec une forte disparité entre les pays, voir tableau II.2.

Tableau II.2: Taux d'urbanisation (%) de quelques pays européens en 1300 et en 1700. **Source :** (Bairoch,1996)

Pays	1300	1700
Allemagne	8	8
Espagne	22	20
France	8	12
Italie	21	23
Pays-Bas	14	39
Royaume-Uni	4	12
Pays scandinaves	1	5
Pologne	2	4
Russie d'Europe	5	5
Europe totale	10	11

L'urbanisation a commencé très progressivement avec les débuts de la révolution industrielle au milieu du XIX^{ème} siècle. Ainsi, sont nées les villes dans leurs formes modernes et la population urbaine n'a cessé d'augmenter jusqu'à dépasser en nombre la population rurale au début de XXI siècle, voir le tableau II.3.

Tableau II.3: Urbanisation de quelques pays européens, des États-Unis et du Canada, de 1800 à 2005. **Source :** (Bairoch,1996)

Pays	1800	1850	1910	1950	2005
Allemagne	9	15	49	53	88,5
Angleterre	23	45	75	83	89,2
Belgique	20	34	57	64	97,3
France	12	19	38	48	76,7
Italie	18	23	(40)	(56)	67,5
Pays-Bas	37	36	51	75	66,8
Portugal	16	15	16	25	55,6
Suède	7	7	23	45	83,4
Europe	12	19	41	51	73,0
États-Unis	5	14	42	57	80,8
Canada	6	9	32	46	81,1

En résumé, l'essor de l'urbanisation dans le monde notamment durant les deux derniers siècles est incontestablement lié à l'avènement de la révolution industrielle dans le monde.

En effet, si on comparait l'urbanisation dans le monde durant les 47 siècles précédents la révolution industrielle (1750) et celle observé durant les deux siècles et demi passés (1750-2000), on remarque que le taux d'urbanisation dans le monde est resté faible et confiné dans des proportions ne dépassant guère les 10% durant les 47 siècles et réalisant un bond record en seulement 250 ans à partir de 1750 .

II.3 Notion de la ville

La ville est un terme du langage courant désignant un espace à fort degré d'anthropisation, le lieu privilégié de la concentration des humains et de l'accumulation historique (Geoconfluence, n.d.)

Selon le dictionnaire, la ville peut être défini comme une agglomération relativement importante et dont les habitants ont des activités professionnelles diversifiées majoritairement dans des secteurs non agricoles. Sur le plan statistique, globalement une agglomération acquiert un statut urbain à partir de 5000 habitants agglomérés.

La ville a considérablement évolué au cours les deux derniers siècles, notamment en termes de taille, forme, structure et composition. C'est le lieu par excellence de l'émergence de ce que l'on qualifié des 2D à savoir : Densité et Diversité.

De part, ces densités et diversités des personnes, des fonctions, des activités, des structures, des morphologies, des mobilités, des échanges, les villes sont indiquées comme étant la première source des émissions des gaz à effet de serre.

Les activités industrielles, de transport, l'utilisation de l'énergie pour des besoins domestiques sont considérés comme étant responsable de ces émissions.

Le point commun de toutes ces utilisations est sans aucun doute la combustion des énergies fossiles.

Ces mêmes densités, concentrations et diversités qui caractérisent la ville et son fonctionnement font que cette dernière soit fortement impactée par les conséquences du changement climatique.

Cette situation fait en sorte que les villes deviennent les principales victimes des impacts du changement climatique tels que l'intensification des aléas climatiques

(événements météorologiques extrêmes comme les tornades, les inondations, sécheresses, l'occurrence des vagues de chaleur ou de froid, etc.).

D'ailleurs et au regard des événements climatiques qui sont apparus au début de ce siècle et dont le plus important : la canicule de 2003 en Europe, les villes se révèlent, depuis, mal adaptées à telles conditions de chaleur.

Et depuis lors, le climat urbain s'est révélé comme une composante essentielle dans la recherche scientifique portant sur le changement climatique.

La surmortalité enregistrée dans certaines villes européennes a montré que la cause était bien une conjonction entre une caractéristique du climat urbain (ICU) et la forte augmentation de la température enregistrée durant cet épisode.

Ainsi, on peut considérer que le changement climatique représente localement un risque pour autant que les aléas climatiques se combinent avec des vulnérabilités urbaines préexistantes, en raison des enjeux importants que représentent les composantes socio-économico-technico-naturelles des villes.

II.3.1 Ville et changement climatique

La ville est considérée comme l'un des éléments primordiaux dans la réponse mondiale à la question du changement climatique dans le contexte de l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et d'adaptation au changement climatique.

Les climatologues sont au cœur de tels efforts parce que ils dirigent vers des actions pour le climat en adoptant des stratégies et des mesures qu'ils intègrent dans la croissance urbaine nécessaires pour s'ajuster à la modification du climat.

Il est désormais incontestablement que les villes doivent chercher aux solutions globales pour faire face aux effets du changement climatique car elles jouent un rôle très important dans la réduction de la vulnérabilité des systèmes humains et naturels aux risques climatiques.

A cet effet, et notamment à l'échelle de la ville, il est nécessaire de mettre en œuvre des stratégies climatiques efficaces qui apportent une orientation stratégiques, des idées novatrices, des outils d'évaluation des risques climatiques ont pour objectif la lutte contre le changement climatique à long terme.

II.4 Notion du climat urbain

La littérature portant sur la géographie urbaine et l'histoire a montré qu'il existait une forte relation entre les villes et les éléments naturels tels que le climat. L'étude des sites originels des villes notamment dans le pourtour méditerranéen montre que le choix des emplacements des villes était aussi dicté par des considérations climatiques.

L'étude du climat urbain a été tout d'abord poursuivie par les climatologues, les géographes et les urbanistes qui se sont intéressés à l'impact des conditions climatiques et environnementales sur les conceptions urbaines.

Le climat urbain peut être défini comme étant une couche limite atmosphérique particulière appelée : couche limite urbaine. Aussi, les observations indiquent que ce climat urbain se caractérise par des conditions météorologiques qui varient entre la ville dense et son espace périurbain à la limite du rural voisin.

II.5 Echelles climatiques

II.5.1 Echelle globale

Correspond à des phénomènes météorologiques de taille spécifique de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres et leur durée de vie est de l'ordre de plusieurs mois ou de l'année.

Cette échelle est liée aux caractéristiques astronomiques générales de la terre qui induisent des variations climatiques importantes de la planète en fonction de la latitude et de la saison.

II.5.2 Echelle régionale ou méso échelle

Cette échelle s'étend sur quelques centaines de kilomètres. Les reliefs, la proximité d'une zone océanique et l'emplacement de la région par rapport aux déplacements d'air affectent le climat à ce niveau et à la fois caractérise et singularise un climat régional.

II.5.3 Echelle locale

Cette échelle s'étend sur une dizaine de kilomètres. Le climat local est souvent modulé en fonction de la morphologie du site, exemple : la présence d'une côte, d'une vallée, d'une plaine, d'un plateau, d'un flanc de montagne ou encore d'un type d'utilisation du sol et d'activités humaines spécifiques exemple : une ville. C'est l'échelle par excellence des brises thermiques et des effets thermiques diurnes.

II.5.4 Echelle microclimatique

L'échelle microclimatique caractérise des sites qui s'étendent de quelques centaines à des milliers de mètres carrés.

Il est considéré que la topographie à petite échelle, la morphologie ainsi que les bâtiments, les végétations et les plans d'eau qui caractérisent un lieu participent à la modification des composantes du climat à cette échelle.

Divers éléments définissent un microclimat dont les plus importants: la température, le vent et le rayonnement solaire.

Ces éléments sont eux-mêmes influencés par l'environnement qui constitue la zone du microclimat tels que: le relief, l'altitude, la mer, les plans d'eau, les cours d'eau ou encore la présence ou absence de végétation.

Cette échelle microclimatique retient l'attention des chercheurs et des experts particulièrement dans les zones urbaines qui se caractérisent par des densités, des diversités et surtout par des proximités qui favorisent des interactions capables d'introduire des changements et des modifications sur le climat local.

A titre d'exemple, deux masses d'air proches, situées l'une de l'autre à quelques dizaines de mètres au dessus d'une ville peuvent avoir des différences de températures très remarquables. Ces différences peuvent être expliquées par la nature de surface qui entoure chacune d'elles et des activités humaines qui se déroulent au niveau du même quartier ou d'une rue. Impactant par la même un bâtiment, un îlot ou encore un morceau de quartier.

A partir de là, on peut considérer que l'échelle microclimatique est la seule échelle où l'homme peut modifier durablement le climat en ayant recours à des systèmes artificiels ou en adaptant l'urbanisme aux paramètres climatiques locaux comme les vents dominants et l'ensoleillement.

II.6 Etude du microclimat : Relation entre climat local et ville

Dans une toute petite zone ou quartier, un microclimat localisé peut se développer en fonction des caractéristiques propres au site. Les principaux facteurs contribuant au microclimat dans les zones urbaines comprennent :

La topographie : dont nous retenons les éléments qui influencent le plus le climat à l'échelle locale à savoir :

Relief : montagnes, vallées, pentes, dépressions définies au moyen de courbes de niveau. Les reliefs se dressent en général comme des obstacles pour l'air qui cherche à les contourner.

Altitude : la pression atmosphérique et la température de l'air varient à la baisse ou à la hausse en fonction de l'altitude.

La couverture végétale :

L'ombrage créé par le couvert végétal réduit le rayonnement solaire des surfaces. Aussi, la présence de la couverture végétale participe à la modification des conditions climatiques locales en raison de l'augmentation de la rugosité de la surface et la variation de l'albédo selon le type de la plante. Par ailleurs la couverture végétale contribue à la modification de la température et l'humidité relative sous l'effet de l'évapotranspiration.

Hydrographie : lacs, cours d'eau, marécages...

Morphologie urbaine : géométrie, forme, structures, densité, compacité, volume, orientation des bâtiments ...

Paramètres météorologiques: température de l'air, vitesse et direction du vent, humidité relative, rayonnement solaire, nébulosité, la pression atmosphérique et précipitation.

Propriétés thermiques : l'albédo de surface, l'émissivité et l'imperméabilisation.

Tous ces paramètres peuvent contribuer à modifier le climat normal d'un lieu généralement urbain.

Les recherches récentes portant sur le climat urbain et les modifications et variations subit par celui-ci montrent l'existence de forte interaction entre la morphologie urbaine et les paramètres climatiques. C'est pourquoi, nous allons procéder dans ce qui suit de montrer l'importance de cette interaction entre morphologie urbaine et paramètres climatiques.

L'urbanisme opérationnel moderne est considéré à juste titre comme un levier important, permettant d'agir contre le changement climatique à plusieurs échelles: bâtiment, quartier ou plus globalement l'espace urbain.

La prise en charge de l'étude de la relation réciproque entre la morphologie urbaine et le climat dans le cadre de cet urbanisme opérationnel moderne a pour objectif la prise en compte des critères climatiques comme : le vent, la température, le rayonnement solaire,

l'humidité et les précipitations, dès le choix de son implantation jusqu'aux caractéristiques de ses bâtiments à fin de concevoir une ville idéale et adaptée au climat actuel et futur.

Aussi, il est souhaité à travers les nouvelles conceptions et formes urbaines que ces dernières impacteraient les consommations d'énergie, les émissions de gaz à effet de serre, la qualité de l'air et le confort thermique, ces actions ont également pour objectif d'augmenter la capacité d'adaptation de l'espace urbain face au changement climatique et à partir de là l'augmentation de la résilience des espaces urbains face aux aléas climatiques notamment les vagues de chaleur.

II.6.1 Morphologie urbaine

La morphologie urbaine est l'étude des formes des villes. L'étude de la morphologie urbaine porte sur l'analyse spatiale des constructions urbaines, des bâtiments, des espaces ouverts, du tracé des rues, de la géométrie et la volumétrie urbaines en général et sur l'utilisation du sol urbain.

Aussi, il s'agit de comprendre la forme urbaine à travers une combinaison de la typologie et de la morphologie urbaine qui désigne dans son sens le plus large « l'étude de la forme physique et la géométrie de la ville ».

Notre objectif à travers l'étude de la morphologie urbaine est d'engager une "lecture analytique" des tissus urbains, de comprendre la combinaison entre la forme urbaine et les paramètres climatiques.

L'approche par le biais de la morphologie urbaine a toujours été considérée comme une méthode utile pour appréhender les questions liées à l'échelle microclimatique en milieu urbain.

Ainsi, tous les éléments d'informations sur la morphologie urbaine peuvent constituer des indicateurs utiles dans l'étude et la prise en charge des aspects microclimatiques dans la ville, à l'exemple de l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Cependant, dans le cas de notre étude nous pouvons signaler, d'ores et déjà, qu'une attention particulière sera accordée dans la suite de la recherche essentiellement aux liens existants entre plusieurs éléments de la morphologie urbaine décrits dans la figure II.1 comme :

- Orientation de l'ensemble bâti par rapport au vent et au soleil.
- Forme urbaine: tissu urbain (îlot), espace ouvert et clos.

- Cadre bâti : localisation de site, hauteurs des bâtiments, canyons urbains.
- Densité et compacité .

D'autant plus, qu'il existe une corrélation positive significative entre ces paramètres et le climat local.

C'est pourquoi nous considérons que la bonne maîtrise de ces liens et relations entre paramètres morphologiques et climatiques demeure nécessaire et utile dans toute nouvelle conception urbaine qui a pour objectif la création d'une forme urbaine durable, climatiquement acceptable, supportable et pourquoi pas confortable, répondant au principe d'équilibre entre les aspects sociaux, économiques et environnementaux.

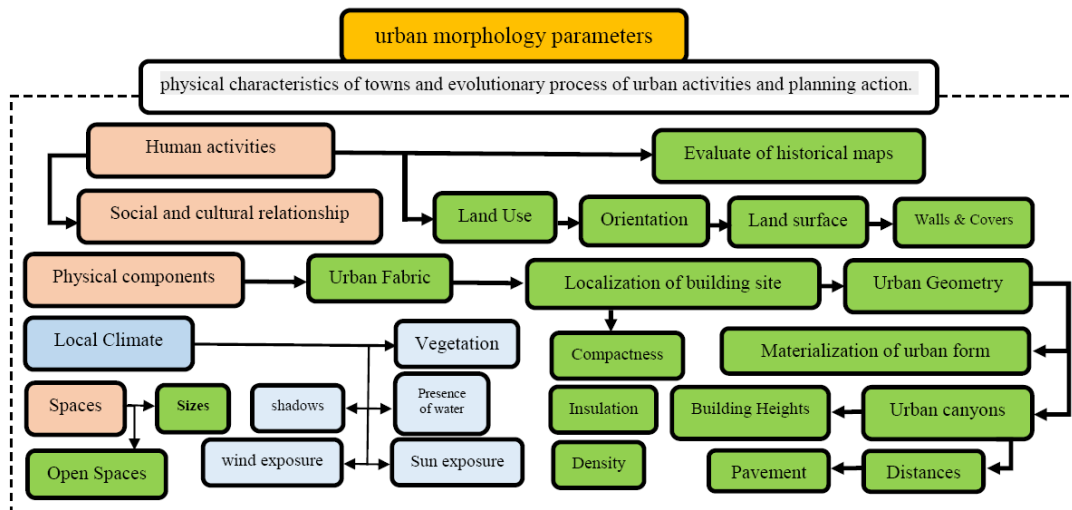


Figure II.1 : Eléments clés liés à la morphologie urbaine pour créer une forme raisonnable et durable dans une ville .Source :(Makvandi & Li, 2016)

II.6.1.1 Forme urbaine

La forme urbaine est définie comme le rapport entre le bâti et les espaces libres à l'intérieur d'une agglomération ou de différents types des espaces urbains (quartier, rue, etc.) en fonction des articulations et des dispositions spécifiques aux contextes sociaux, historiques, politique, physiques et naturels: topographie, géologie, climat, etc.

Ces articulations et dispositions confèrent à la forme urbaine une certaine homogénéité. Une forme urbaine doit être facilement identifiable et repérable visuellement.

En utilisant certains paramètres essentiellement physiques de la morphologie urbaine décrits ci-dessus nous allons essayer d'établir des relations entre le climat et les paramètres

physiques de la morphologie urbaine. Il est souhaité à travers cette approche, de comprendre les mécanismes qui favorisent la formation et l'apparition de microclimat en milieu urbain.

II.6.1.2 Canyon urbain

Dans une zone urbaine, l'unité de surface de base est considérée comme un canyon urbain. Un canyon urbain est défini par l'espace formé par deux bâtiments parallèles, séparés par une voie urbaine (Figure II.2).

La notion du canyon urbain dans notre étude va aider à reproduire et à comprendre avec beaucoup de détails les processus microclimatiques qui se déroulent au sein de l'espace urbain.

Sans aucun doute, l'étude du canyon urbain servirait également à restituer le dialogue entre le climat et la ville à des échelles fines.

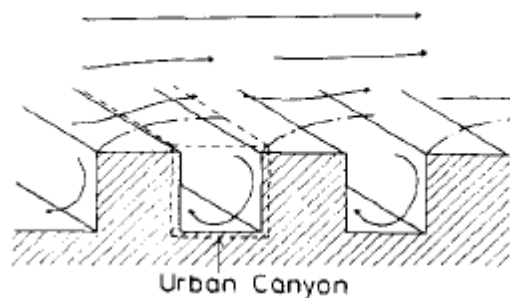


Figure II.2: Canyons urbains .Source: (Yoshida et al., 1990).

La géométrie des canyons de rue est caractérisée par :

- **H**: Hauteur moyenne des bâtiments.
- **W**: Largeur du canyon.
- **L** : Longueur du canyon

Les dimensions d'un canyon de rue sont indiquées par son rapport d'aspect (**H/W**) : qui est la hauteur (**H**) du canyon divisée par la largeur (**W**).

Les différents types de canyon en fonction du rapport d'aspect décrit dans le tableau suivant :

Tableau II.4: Dimensions du canyon urbain.

Type de canyon	Rapport d'aspect (H/W)
Uniforme	1
Avenue	0.5
Profond	2

Au sein d'un tissu urbain, il a eu de signaler que la longueur (**L**) du canyon représente en réalité une section de voie urbaine délimitée par deux intersections, ce qui nous permet de diviser les canyons de rue en :

- canyons courts ($L/H \approx 3$).
- canyons moyens ($L/H \approx 5$).
- canyons longs ($L/H \approx 7$).

Le canyon est symétrique: si les bâtiments qui le bordent sont de même hauteur.

Le canyon est asymétrique: si les immeubles sont de grandes hauteurs différentes.

Le côté amont du canyon est appelé **sous le vent** et il est nommé **au vent** lorsque le vent est perpendiculaire au canyon de rue, voir figure II.3.

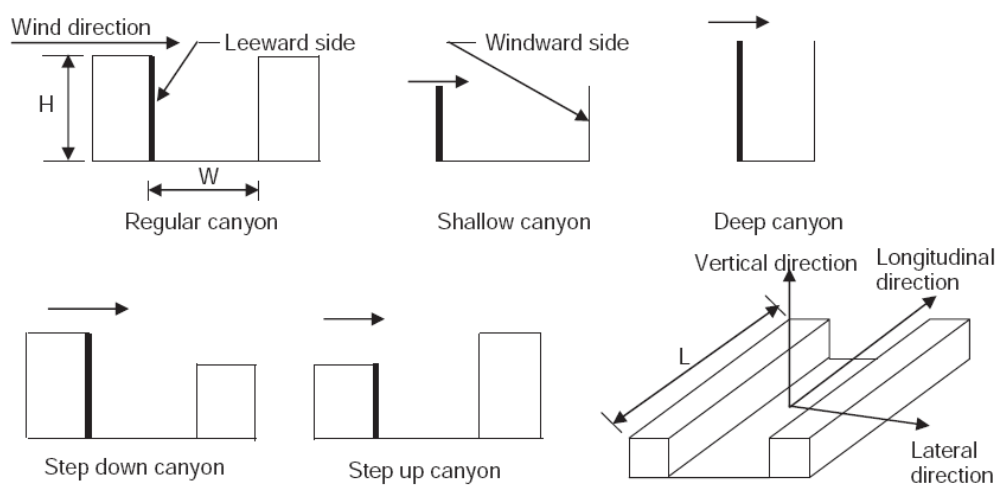


Figure II.3: Caractéristiques des canyons de rue. **Source :** (Ahmad et al., 2005)

II.6.2 Aspects de Géométrie et d'Orientation

La géométrie et l'orientation sont très importantes pour déterminer les caractéristiques climatiques d'une rue.

(Oke ,1981) a montré dans son étude que la modification de la géométrie de la surface a une influence sur la température .Dans le cas des canyons urbains avec un rapport d'aspect (H/W) élevé, la température diminue ,voir figure II.4.b.

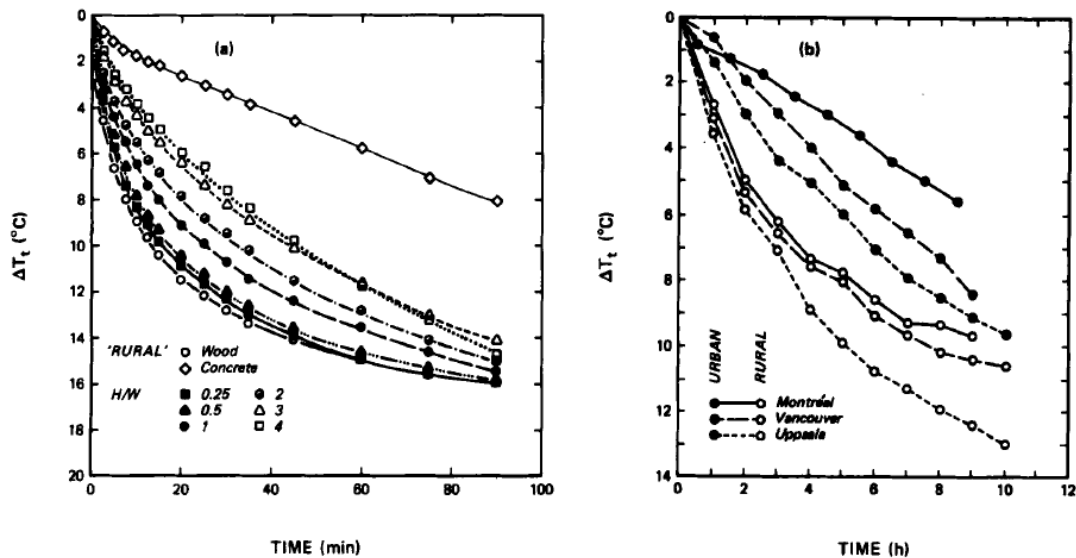


Figure II.4 : Diminution de la température (ΔT) en fonction du temps à partir du coucher du soleil pour des emplacements ruraux et urbains. (a) Résultats du modèle, (b) observations sur le terrain pour Montréal (HW/ = 3,29) .Source: (Oke ,1981)

II.7 Climat des canyons urbains

Selon la théorie (d'Oke ,1977), une surface aérienne au dessus d'une ville peut être divisée en une canopée urbaine et une couche limite au- dessus de l'espace urbain appelée « dôme aérien urbain ».

Les conditions climatiques particulières à un point donné de la canopée sont identifiées par la nature du site, par sa géométrie, ses matériaux et ses propriétés. La limite supérieure de la canopée urbaine varie d'un point à l'autre en fonction de la hauteur variable des bâtiments et de la vitesse du vent (Nunez & Oke, 1977)

II.7.1 Structure verticale de l'atmosphère urbaine

L'atmosphère est la couche la plus fine d'air entourant la Terre. L'atmosphère est composée d'azote (78%), d'Oxygène (21%) et d'autres gaz comme l'Argon (Ar), l'Hélium (He), le CO₂ et l'Ozone (O₃).

Chapitre II: Interaction entre le microclimat et la morphologie urbaine

Généralement, toutes les études sur le climat porte en premier temps à étudier l'atmosphère et ses composantes car à laquelle se produisent tous les phénomènes météorologiques.

A l'échelle de la ville, l'atmosphère est composée de différentes couches, voir figure II.5, elles sont définies dans le tableau II.5 :

Tableau II.5: différentes couches de l'atmosphère

<i>Types de couches</i>	<i>Définitions</i>
<i>Couche limite atmosphérique (CLA)</i>	<i>partie la plus basse de l'atmosphère terrestre a une profondeur de 100 à 300</i>
<i>Couche limite urbaine (CLU)</i>	<i>L'ensemble de la couche limite urbaine peut remplir s'il y a un vent regional La couche limite interne se développe vers le haut avec la distance a une épaisseur entre (100 à 3000 m) En milieu urbain, la couche limite urbaine donne naissance à un microclimat</i>
<i>Couche de surface</i>	<i>occupe les 10% les plus bas de CLA, où les influences du chauffage, du refroidissement et la rugosité</i>
<i>Couche de la canopée urbaine</i>	<i>situé entre le sol et la hauteur moyenne des bâtiments Dans cette couche ou il ya la production de l'humidité et la chaleur. Elle est au voisinage de la hauteur moyenne des éléments importants de rugosité</i>

L'atmosphère urbaine observée sur un grand nombre de campagnes expérimentales (Lauzet ,2019):

- Pour une journée ensoleillée où une grande quantité de l'énergie solaire est absorbé par la surface terrestre, la sous-couche inertielle apparait constante.
- Dans La nuit, avec l'absence du rayonnement solaire, les flux de chaleur provenant de la ville génèrent une couche inertielle .Cette couche ne se forme pas dans une zone rurale, et l'atmosphère reste stable.

Comme la structure de l'atmosphère urbaine est fortement influencée par les principaux paramètres climatiques à savoir, le vent, la température de l'air et le rayonnement solaire, nous considérons qu'il est nécessaire de présenter ces paramètres climatiques imbriqués dans leur contexte urbain, le tout représenté par la canopée urbaine.

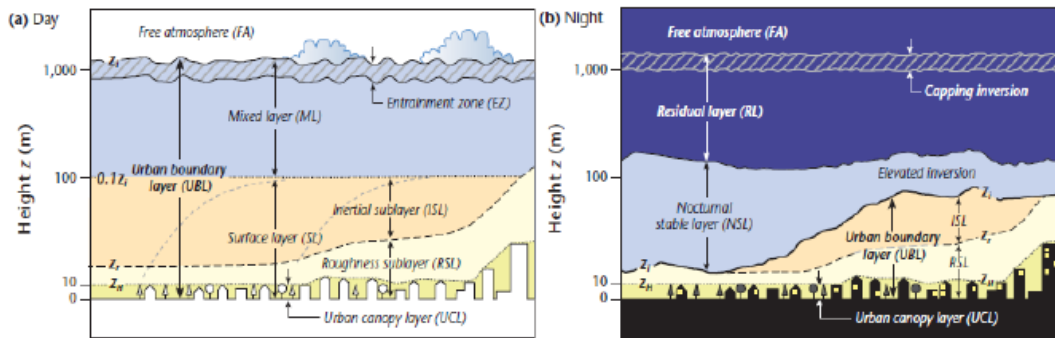


Figure II.5 : Schéma théorique des couches atmosphériques au-dessus d'une ville (a) la journée et (b) la nuit .**Source** :(Oke et al., 2017)

II.7.2 Distribution de la température dans les canyons urbains

La distribution de la température dans les canyons urbains est généralement modifiée par le bilan radiatif urbain.

La répartition de la température de l'air dans les canyons urbains a une importance majeure pour les études des échanges de chaleur entre les bâtiments et l'air du canyon (Santamouris et al., 1999).

En effet, lorsque la température de l'air est élevée dans un canyon, cela amplifie la convection de la chaleur vers un bâtiment, car la température de l'air dans un canyon est influencée par la température de la surface du canyon, à cause de l'énergie transportée par le processus de convection (Santamouris et al.,2001).

Dans le canyon de la rue, la température de surface des bâtiments et du sol est plus élevée que celle de l'air environnant, ce qui peut engendrer des flux d'air ascendants.

La différence de température peut dépendre de la hauteur à cause de la stratification thermique (Yang et al., 2011).

C'est pourquoi qu'il est très important d'appréhender le mécanisme qui caractérise la distribution de la température ambiante dans un canyon et établir la relation entre la géométrie et la température de l'air.

II.7.3 Distribution du vent dans l'environnement urbain

La compréhension des caractéristiques des flux d'air dans les canyons urbains est importante pour toutes les études liées à la ventilation naturelle des bâtiments. Ces études ont fait l'objet d'une importante littérature ces dernières années (Santamouris et al., 2001).

Dans la ville, le flux d'air représente l'un des variables climatiques les plus importantes, voir (figure II.6).

L'air qui souffle des zones rurales vers les villes rencontre une rugosité et un réchauffement de surface croissante qui modifie largement le profil du vent. Généralement, la vitesse moyenne annuelle du vent dans le centre d'une ville est de 20 à 30 % inférieure à celle des zones rurales voisines (Lee ,1979).

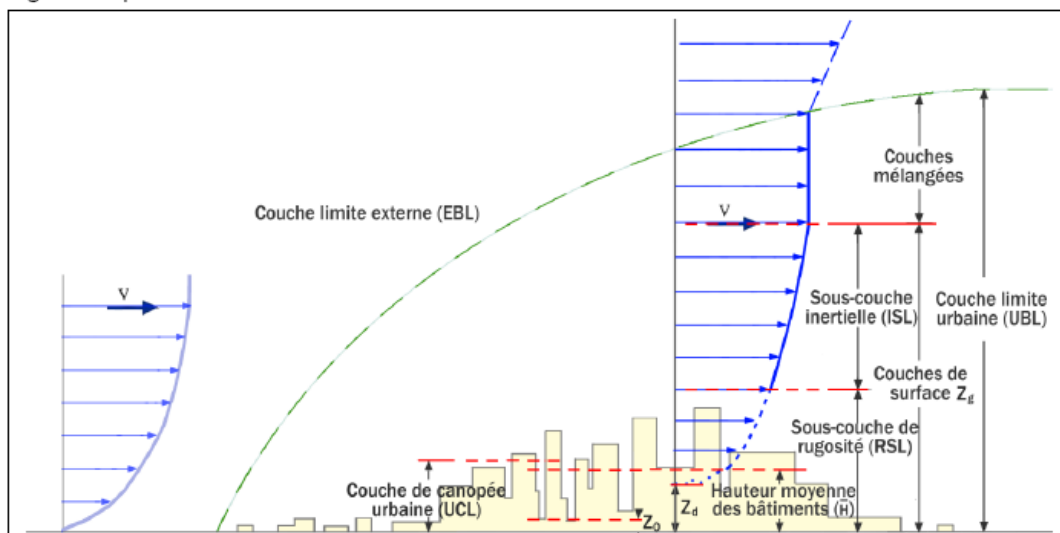


Figure II.6 : Profil vertical de vitesse du vent dans un contexte urbain selon la loi logarithmique. **Source :** (Wang,2015).

II.7.3.1 Structure verticale du vent dans les zones urbaines

Pour le vecteur vent moyenné, on peut présenter la relation entre le vent géostrophique et le vent dans les couches inférieures comme suit (Landsberg ,1981) :

$$\bar{v}_z - \bar{v}_G = \frac{1}{f} \frac{d}{dz} \left(\frac{\tau_z}{\rho} \right) \quad \text{Eq.1}$$

Avec:

\mathbf{v}_z : Vecteur du vent moyen à tout niveau z en dessous du niveau du vent géostrophique

τ_z : Stress de cisaillement

ρ : Densité atmosphérique

Le stress de cisaillement, également appelée stress de Reynolds, peut être défini à partir des composantes turbulentes de la vitesse du vent, c'est-à-dire les écarts par rapport à la moyenne dans trois composantes : $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$

Un paramètre appelé vitesse de frottement u_* a été introduit. Il est égal à $\left(\frac{\tau}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$ et est fonction de la fluctuation moyenne du vent horizontal et vertical:

$$\frac{\tau}{\rho} = u_*^2 = \langle -\dot{u}\dot{w} \rangle \quad \text{Eq. 2}$$

Le profil du vent vertical définit comme suit:

$$\bar{U}_z = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad \text{Eq.3}$$

Où:

k : Constante de Von Karman ($\sim 0,4$)

Z : Hauteur

Z_0 : Hauteur de frottement ou paramètre de rugosité

Dans tout environnement, la valeur de Z_0 peut être estimée par l'observation du vent à deux hauteurs:

$$\ln Z_0 = \frac{\bar{u}_2 \ln z_1 - \bar{u}_1 \ln z_2}{\bar{u}_2 - \bar{u}_1}$$

II.7.4 Configuration de l'écoulement du vent dans le canyon de la rue

II.7.4.1 Vent perpendiculaire à l'axe du canyon

Trois types de régimes d'écoulement de l'air peuvent être observés en fonction de la géométrie du bâtiment (L/H) et du canyon (H/W) lorsque la direction dominante du vent est approximativement normale ($\pm 15^\circ$) le long de l'axe du canyon de la rue (Allard et al., 2009).

La géométrie des bâtiments est caractérisée par :

- **H**: Hauteur moyenne des bâtiments.
- **W**: Largeur du canyon.
- **L** : Longueur du canyon

Cas : bâtiment isolé

(Oke, 1988) dans son étude portant sur un bâtiment comme exemple d'un obstacle isolé voir figure II.7, pour cela, il a décrit trois zones principales de perturbation :

- A l'avant de l'obstacle, la circulation de l'air autour des bâtiments isolés se caractérise par un tourbillon engendré par l'écoulement le long de la façade faisant face au vent.
- Dans la cavité de basse pression où se forme un autre tourbillon sous le vent générant la séparation de l'écoulement au niveau du sommet et des côtés du bâtiment.
- En aval, le sillage de construction caractérisé par une turbulence intensifiée avec des vitesses horizontales inférieures à celles de l'écoulement non perturbé.

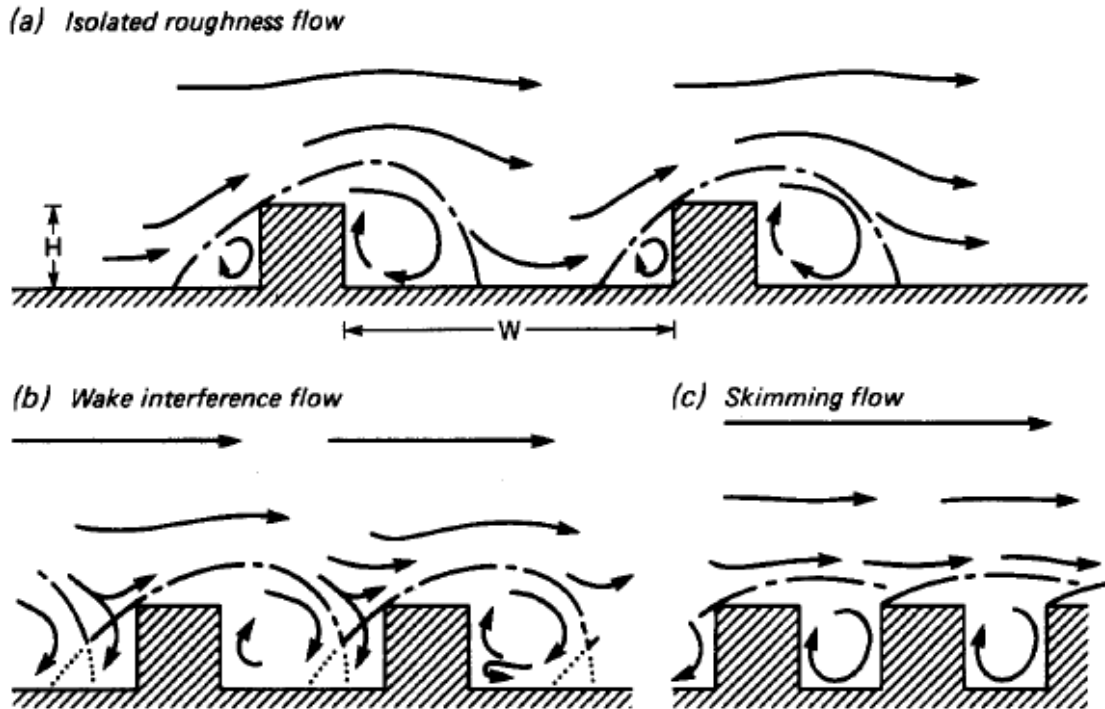


Figure II.7: Régimes d'écoulement rencontrés avec l'écoulement de l'air sur des réseaux de bâtiments de H/W croissant .Source: (Oke,1988)

- Si les bâtiments sont bien séparés (H/W supérieur à 0,05), leurs champs d'écoulement n'interagissent pas. Lorsque les distances sont plus rapprochées, comme montré dans la figure (II.7.a), les sillages sont perturbés.
- Lorsque la hauteur, l'espacement et la densité du bâtiment s'arrangent pour perturber les tourbillons de la cavité, ce régime d'écoulement à rugosité isolée se transforme en un régime appelé écoulement d'interférence de sillage, voir (figure II.7.b)
- A une hauteur, si l'espace entre les bâtiments et la densité sont plus grands, un tourbillon circulaire stable est créé dans le canyon (figure II.7.c).

Le régime de rugosité isolée crée entre des bâtiments bien séparés, quand il n'y a pas d'interaction entre les flux d'air au vent et sous le vent.

En augmentant le rapport H/W , les sillages sont perturbés, ce qui conduit à un régime d'interférence de sillage.

Une augmentation supplémentaire du rapport H/W rend le canyon de la rue isolé de l'air circulant dans la couche limite urbaine et ainsi, un tourbillon circulaire régulier est créé dans le canyon.

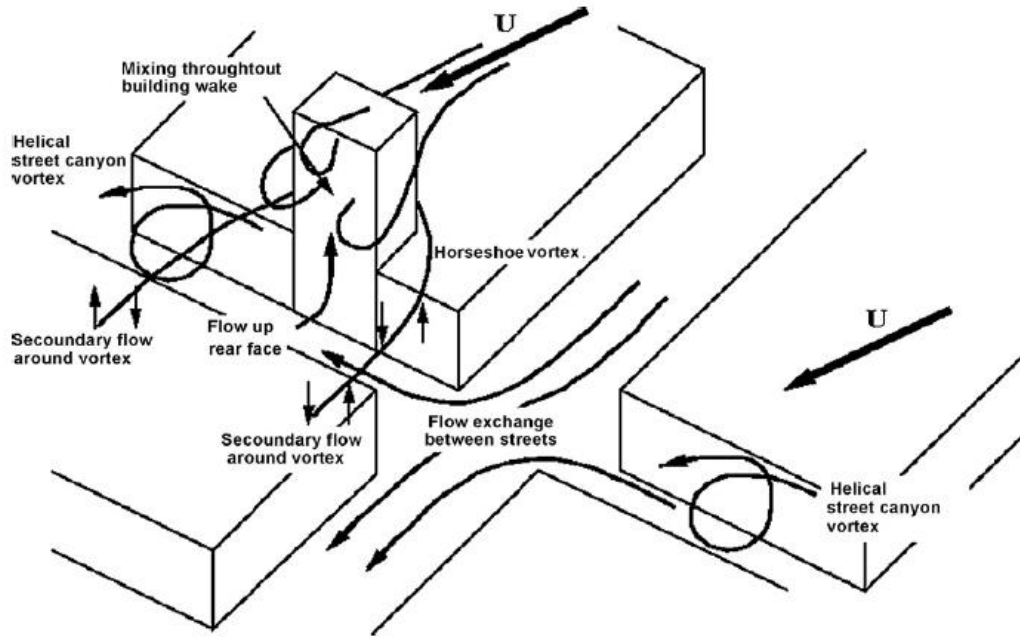


Figure II.8: Champ d'écoulement à l'intersection d'une rue et d'un grand bâtiment indiquant des échanges entre les rues et des processus de mélange supplémentaires dus au grand bâtiment. **Source:** (Shishegar,2013)

Lorsque , les obstacles d'un champ d'écoulement incident sont placés à bonne distance les uns des autres - quelques dizaines de hauteurs d'obstacles, l'écoulement près de chaque obstacle sera identique à celui autour des obstacles isolés(Figure II.8).

Des zones de séparation et de recirculation en amont et en aval du vent seront produites par chaque obstacle (Hosker & Lindberg, 1986).

Cas: groupe de bâtiments

Comme la forme de la ville moderne se présente comme une succession de différents groupes de bâtiments de différentes hauteurs, différentes densités, cette situation tend à ce que le flux d'air fort soit brisé et dévié dans certaines conditions vers les rues voisines, voir la figure II.9.

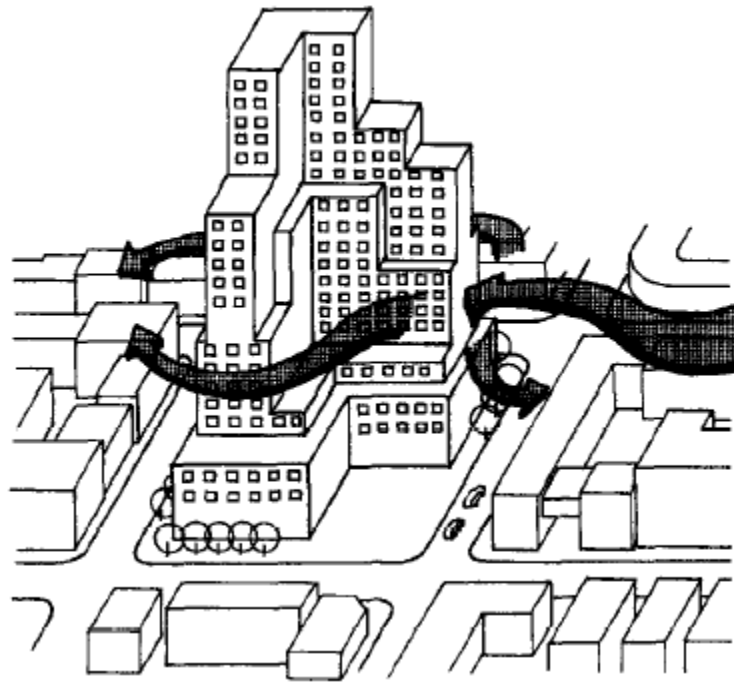


Figure II.9: Déviation du vent dans différentes directions.

Source : (Golany ,1996).

Dans un espace urbain dense qui se caractérise par une succession des bâtiments et un réseau viaire dense, les flux d'air circulent selon certaines conditions liées à la forme et l'orientation des rues.

La forme des rues : en plus de la géométrie et de l'orientation des rues, la forme des rues peut influencer le flux d'air au niveau de la canopée.

Les rues qui sont droites et parallèles les unes aux autres : contribuent le mouvement de l'air dans les zones urbaines. L'absence de végétation et de couvertures adéquates dans les rues droites engendre des vents chauds (dans un climat chaud et sec) ou froids (dans un climat froid et sec) dans les rues, voir la figure II.10.

Les rues étroites et sinueuses: réduisent les vents froids ou chauds et diminuent l'influence des vents de tempête, voir la figure II.11.

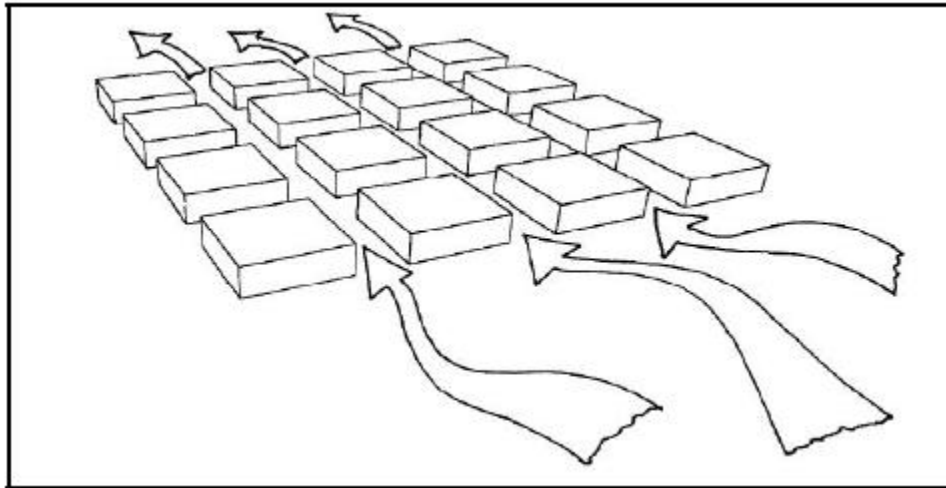


Figure II.10: Rues droites et parallèles améliorent la circulation de l'air dans la ville et à l'intérieur de celle-ci. **Source :**(Shishegar ,2013)

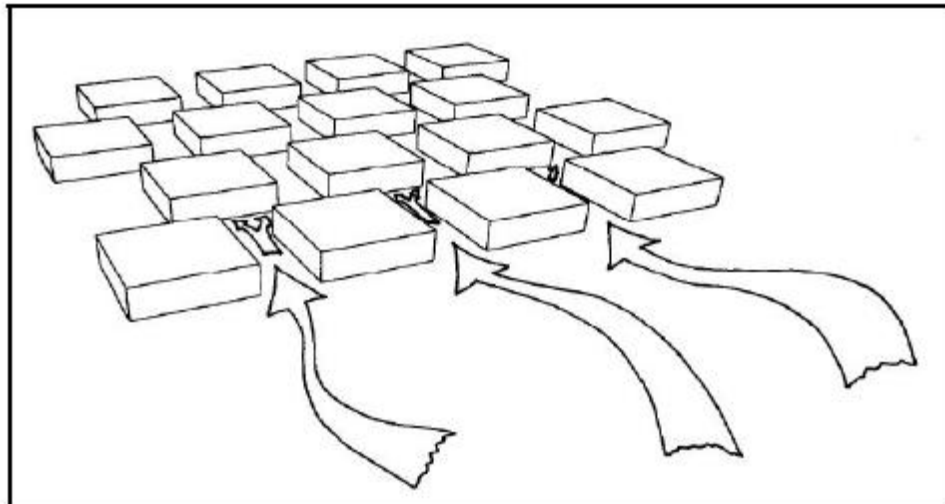


Figure II.11 : Rues étroites et sinueuses ralentissent la circulation de l'air.
Source :(Shishegar ,2013).

Par ailleurs, la turbulence de l'air peut être engendrée par l'air chaud qui s'élève dans le centre de la ville et porte l'air plus frais de la périphérie pour le remplacer à travers des rues droites et ouvertes, voir figure II.12.

L'air turbulent peut être très efficace lorsque les rues sont perpendiculaires au bord d'une mer. Les rues étroites diminueraient le processus d'évaporation dans leur environnement et l'humidité relative aurait très élevée par rapport aux rues plus larges de la ville elle-même (Golany, 1996).

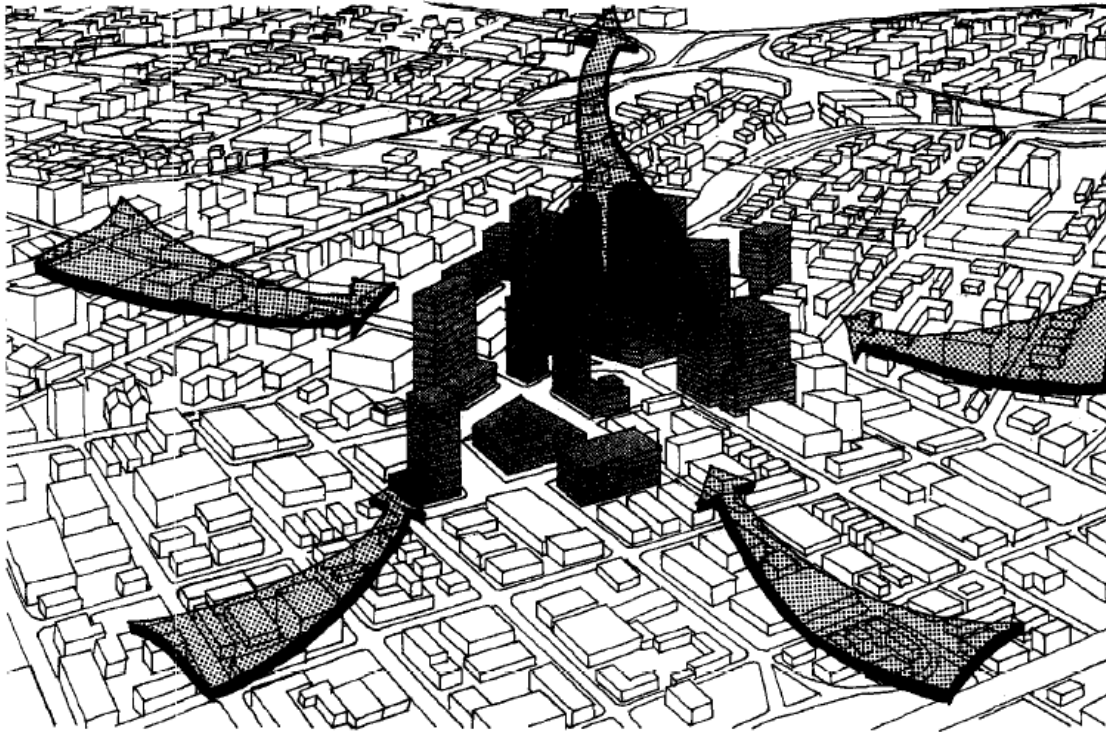


Figure II.12: Montée de l'air chauffé au centre de la ville attirerait l'air de la périphérie de la ville pour le remplacer. **Source :**(Golany ,1996).

L'écoulement de l'air dans la couche de la canopée est influencé par le vent dans la couche limite urbaine, et il dépend de la géométrie des bâtiments et des rues, ainsi que de la présence d'autres obstacles comme les arbres.

En général, la vitesse du vent est inférieure dans les villes parce que les bâtiments forment des obstacles qui jouent un rôle de diminution de sa vitesse.

II.7.4.2 Vent parallèle à l'axe du canyon

Comme dans le cas de vents perpendiculaires, lorsque le vent est parallèle à la rue, les flux d'air dans le canyon de la rue sont entraînés par les forces combinées de la poussée thermique et du vent (Yang et al.,2011).

Alors, l'écoulement d'air dans le canyon est estimé comme un élément de circulation secondaire poussé par l'écoulement forcé au-dessus du toit (Allard et al ,2009).

Compte tenu de ce qui précède, il est retenu que:

- Si la vitesse du vent à l'extérieur du canyon est inférieure à 2m/s, la relation entre la vitesse du vent au-dessus du toit et la vitesse de l'air à l'intérieur du canyon est déterminée par une dispersion significative.

- Si la vitesse de vent est élevée, le flux d'air ambiant parallèle cause un vent moyen le long de l'axe du canyon.

II.7.3 Différents types d'effet du vent autour des bâtiments

Les mécanismes de l'écoulement de l'air autour des bâtiments isolés et groupés sont identifiés par les chercheurs à partir des effets suivants:

- **Effet Wise:** c'est un phénomène de tourbillon vertical qui se produit au dessous des bâtiments exposé à la direction du vent. Cet effet est d'autant plus fort quand les bâtiments ont des hauteurs très élevées généralement supérieure à 40m avec une longueur aussi importante.
- **Effet de barre :** définit comme un phénomène de déviation en vrille dans une orientation de 45° par rapport à la direction du vent dominant. Ce phénomène crée un confort pour les piétons.
- **Effet Venturi :** ce phénomène produit lorsque la vitesse du vent est élevée en formant un angle ouvert par rapport à la direction du vent .Cet effet devenu plus important lorsque la hauteur des bâtiments augmente.
- **Effet de pyramide:** c'est un phénomène d'écoulement engendré par un ensemble de constructions de formes pyramidales .Cet effet provoque la protection des piétons par rapport au vent.

II.8 Effet du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire, ou rayonnement de courtes longueurs d'onde (CLO), est un paramètre majeur pour la performance énergétique des bâtiments et le confort intérieur dans les villes.

Le rayonnement solaire incident sur les surfaces urbaines est absorbé puis transformé en chaleur sensible. La plupart des rayons solaires balayent les toits et les murs verticaux des bâtiments (figure II.13).

La quantité de rayonnement solaire retransmit dans l'air de la ville est inférieure à celle qui se produit dans l'espace ouvert à l'extérieur de la ville, car une partie de ce rayonnement est absorbée par les murs des bâtiments (Golany, 1996).

Les caractéristiques thermiques des matériaux utilisés dans les constructions urbaines, notamment l'albédo pour le rayonnement solaire et l'émissivité pour le rayonnement à ondes longues, ont un effet très essentiel sur le bilan énergétique urbain.

Chapitre II: Interaction entre le microclimat et la morphologie urbaine

Lorsque les matériaux ont un albédo élevé, la quantité de rayonnement solaire absorbée par les bâtiments et les structures urbaines sera réduite et leurs surfaces demeurent plus fraîches.

Ainsi, les matériaux à forte émissivité considérés comme de bons transmetteurs de rayonnement solaire à ondes longues et libèrent aisément l'énergie qui a été absorbée sous forme de rayonnement à ondes courtes.

Une température de surface plus basse fait décroître la température de l'air ambiant parce que l'intensité de la convection thermique à partir d'une surface plus froide est plus faible (Santamouris et al., 2001).

Dans une ville à climat sec, le rayonnement solaire, absorbé tout au long de la journée par les bâtiments, est immédiatement retransmis dans l'air au cours de la soirée.

Quand l'humidité relative est faible et à cause de l'absence de nuages, la température va diminuer extrêmement. Une zone densément bâtie dégage cette température plus graduellement.

En raison de la chaleur absorbée tout au long de la journée, le processus de refroidissement est plus faible dans le centre de la ville que dans sa partie périphérique (Golany, 1996).



Figure II.13 : Illustration des rayonnements directs, diffus, et inter-réflexions solaires

Source : (Lauzet, 2019).

Conclusion

L'étude du climat des canyons urbains représente un aspect très important de la climatologie urbaine. Le climat des canyons urbains est également un gain pratique considérable. Les caractéristiques de l'écoulement de l'air et les caractéristiques thermiques jouent un rôle majeur pour la sécurité et le confort des citoyens.

Chapitre II: Interaction entre le microclimat et la morphologie urbaine

Par conséquent, la compréhension du climat des canyons en rapport avec la géométrie des canyons et les conditions météorologiques forme une contribution essentielle à la conception des rues urbaines ; car elle influe directement sur la quantité d'énergie consommée par les bâtiments.

Nous retenons de ce qui précède que dans un canyon de rue, la distance entre les bâtiments (H/W) à un impact considérable sur les conditions de la ventilation naturelle.

La diminution du rapport H/W amplifié l'exposition la rue au soleil. Il est retenu également que l'orientation de la rue influence la distribution diurne et saisonnière de rayonnement solaire du canyon.

Ainsi donc, pour assurer un microclimat agréable dans les zones urbaines, il est essentiel de concevoir des voies urbaines d'une manière à créer la ventilation naturelle à fin de réduire l'effet de l'îlot de chaleur urbain dans la ville.

Chapitre III

Revue de littérature sur les îlots de chaleur urbains

III .1 Introduction

Les villes et leurs populations sont très sensibles aux effets négatifs du réchauffement planétaire et présentent la cause majeure du changement climatique global.

L'urbanisation rapide conjuguée à la forte industrialisation a amplifié aussi bien la consommation énergétique que les émissions de gaz à effet de serre.

En effet, à cause de cette urbanisation rapide et en raison de la forte industrialisation, un réchauffement planétaire est observé depuis un siècle causé par l'augmentation continue de la température mondiale.

Parallèlement à cette augmentation continue de la température mondiale, les zones urbaines se caractérisent, depuis, par un réchauffement local avec une température plus élevée dans les zones urbaines que dans les zones rurales voisines, connu sous le nom d'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) .

Désormais, les changements climatiques et les îlots de chaleur urbains sont considérés comme deux faces d'un risque auquel les populations urbaines doivent faire face.

Cependant, cette relation entre les villes, le changement climatique et l'effet d'îlot de chaleur urbain est relativement complexe. C'est pourquoi les relations entre ces trois éléments doivent être appréhendées d'une manière raisonnable.

C'est dans le contexte de la notion d'adaptation des villes aux changements climatiques que nous allons essayer d'appréhender cette relation complexe entre villes, changement climatique et ICU. Si la notion de la ville et de changement climatique ont été déjà présenté celle de l'effet d'îlot de chaleur urbain mérite d'être examiner dans tous ses détails y compris dans ces relations avec la ville et notamment le changement climatique.

Cette relation entre la ville, changement climatique et l'ICU est l'objet d'une importante recherche scientifique qui attire l'attention aussi bien des chercheurs, des ingénieurs que des urbanistes et de tous les spécialistes de la ville. Ensemble ils tentent à travers des exercices de traiter les interactions possibles entre les zones urbaines et le changement climatique et l'ICU.

Dans ce chapitre nous allons considérer qui était important si non obligatoire de passer en revue la littérature qui essaye d'exprimer la notion et tous les éléments de base d'un îlot de chaleur urbain, ainsi que l'essentielle des techniques et méthodes utilisées pour étudier ce

phénomène et identifier ses rapports complexe avec l'espace urbain, le changement climatique global et surtout avec la notion d'adaptation au changement climatique.

III. 2 Contexte historique

III.2.1 Phénomène d'îlot de chaleur urbain

Le terme "îlot de chaleur" désigne un phénomène microclimatique qui se génère en zone urbaine. Il fait l'objet ces dernières années d'une importante recherche scientifique dans le cadre de la compréhension du microclimat urbain.

L'îlot de chaleur est le résultat des différences de température observée entre les stations urbaines et rurales. C'est un phénomène qui se produit quand les températures de l'air sont augmentées dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales voisines.

Le phénomène est nommé "île" puisque les modèles isothermes de la température de l'air près de la surface correspondent aux profils d'une île dans la "mer" de la campagne proche plus froide (Oke ,1995).

L'ICU est aujourd'hui un phénomène global observé dans les villes, quelles que soient leur site et leur taille. Il est considéré comme un phénomène d'accumulation de chaleur et reflète la situation des températures différenciées qui caractérisent une ville.

Les îlots de chaleur urbains accentueront les effets du réchauffement régional par l'élévation des températures estivales (Wilby ,2007).

La société météorologique américaine (AMS, 2017) décrit le climat urbain comme « *Le climat affecté par la présence d'une ville* ».

En 1810, Luke Howard un scientifique britannique était le premier qui s'est penché sur l'observation de différentes températures dans les villes et par conséquent la formation du phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Ses observations qui ont porté sur la ville de **Londres** ont démontré que la ville centre de **Londres** était plus chaude que son milieu rural environnant.

Ainsi, pour la première fois, **Luke Howard** a découvert que les zones urbaines se caractérisaient par un climat local. Ses observations sur le climat, y compris ses mesures, sa description et son analyse ont été consignées dans le premier manuel de climatologie.

Luke Howard a mesuré la température collecté sur trois sites différents à l'extérieur de **Londres** comme montré dans la figure III.1 et un seul site (**Royal Society**) à **Londres**, les relevés de température ont été réalisés entre **1813** et **1816** (Howard,1833).

L'effet urbain est considéré comme la différence de température entre les milieux "urbains" et "ruraux" $\Delta T(u-r)$:

Avec :

$$\Delta T(u-r) = \Delta T_u - \Delta T_r \quad \text{Eq III.1}$$

Luke Howard a déduit que « la température de la ville ne doit pas être considérée comme celle du climat ; elle participe trop à une chaleur artificielle, induite par sa structure, par une population surpeuplée » (Mills ,2008).

Dans son **Résumé** du **CLIMAT**, **Luke Howard** présente une déclaration concise sur la variation temporelle de $\Delta T(u-r)$ et donne des indications sur son caractère spatial:

La température moyenne du climat ... est strictement d'environ **48,50° F** : mais dans les parties les plus denses de la métropole, la chaleur est portée, par l'effet de la population et des incendies, à **50,50° F** ; et elle doit être proportionnellement affectée dans les parties suburbaines.

Luke Howard considère que: l'excès de température de la ville varie au cours de l'année, étant le plus faible au printemps et le plus fort en hiver ; et il appartient, en rigueur, aux nuits ; qui sont en moyenne trois degrés et sept dixièmes plus chaudes qu'à la campagne ; tandis que la chaleur du jour, tombe, sur une moyenne d'années, environ un tiers de degré de moins que dans la plaine ouverte.

Depuis les premières observations menées par **Luke Howard** plusieurs études ont été entamées pour préciser le phénomène d'îlot de chaleur urbain dans les villes.

L'îlot de chaleur urbain semble actuellement parmi les phénomènes climatiques urbains les plus documentés dans la littérature scientifique. Car il contribue au réchauffement climatique planétaire.

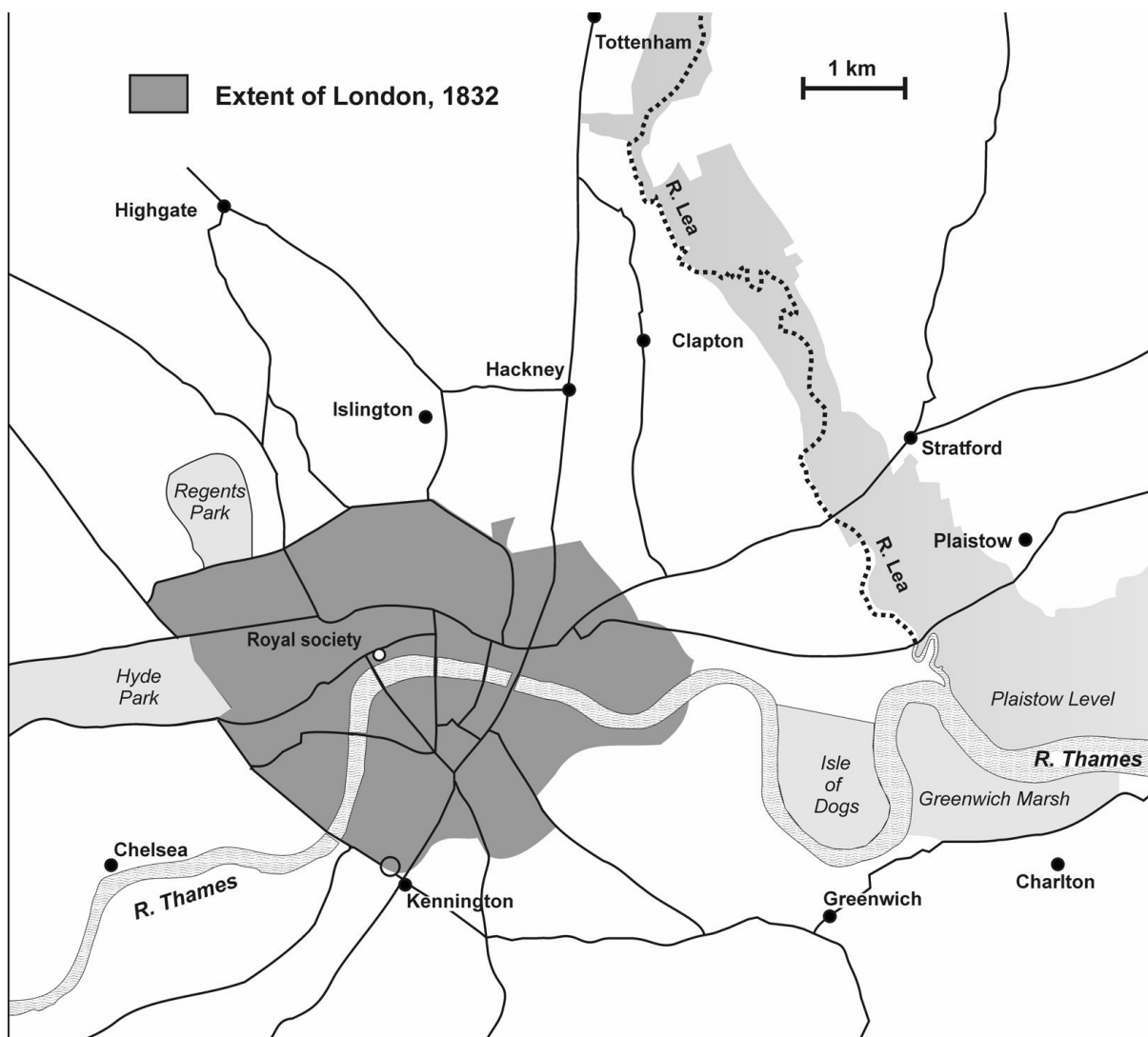


Figure III.1 : Carte de Londres en 1820 et les sites de mesures.

Source : (Howard ,1833)

III.2.2 Intensité d'îlot de chaleur urbain

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain est définie par (Santamouris ,2013), comme « la différence de température maximale entre la ville et la zone environnante ».

Cette définition est le résultat de la collecte par (Santamouris ,2001) de données issues de plusieurs études sur les îlots de chaleur dans le monde entier. Il cite en effet des intensités d'îlots de chaleur observées dans plusieurs villes européennes, africaines et asiatiques :

- **Villes européennes :** en juin-juillet 1976, l'amplitude de l'îlot de chaleur nocturne était en moyenne de 2,5°K à (Londres, Royaume-Uni), entre 3- 4°K en septembre 1986 à (Essen, Allemagne) et 6°K pour (Bâle et Berne, Suisse).
- **Villes africaines :** 4°K à (Caire, Egypte)

- **Villes asiatiques : 1°K à Singapore, entre (0.5°-6°K) à (Dhaka, Bangladesh), entre 2-7°K à Malaysia,**

Egalement, l'intensité de l'îlot de chaleur représente l'indicateur le plus simple et le plus quantitatif de la modification thermique appliquée par la ville sur le territoire (Aflaki et al., 2017).

III.2.3 Facteurs affectant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain

L'intensité des îlots de chaleur urbains varie selon le nombre de la population, de la morphologie et de la taille de la zone urbaine.

(Oke, 1973) montre la relation entre l'intensité des îlots de chaleur urbains $\Delta T_{u-r(\max)}$ (différence entre les températures en milieu rural et les températures urbaines les plus élevées) et la taille de la ville (mesurée par la population, **P**) dans les équations suivantes :

- Le modèle **Nord-Américain** (figure III.2) est montré par la relation suivante :

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 2.96 \log P - 6.41 \quad \text{Eq III.2}$$

- La relation **Européenne** (figure III.3) étant donnée par :

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 2.01 \log P - 4.06 \quad \text{Eq III.3}$$

Ainsi, (Oke, 1973) a noté que pour une taille de ville donnée (**P**), l'îlot de chaleur européen sera plus petit car les villes **européennes** se caractérisent par des densités de population plus significatives et le $\Delta T_{u-r(\max)}$ est proportionnel à **P** en **Amérique du Nord**.

A partir de là, (Oke, 1973) a exprimé que la relation logarithmique que pour un accroissement donné de **P**, $\Delta T_{u-r(\max)}$ augmente plus pour une petite ville et ville moyenne que pour une grande ville.

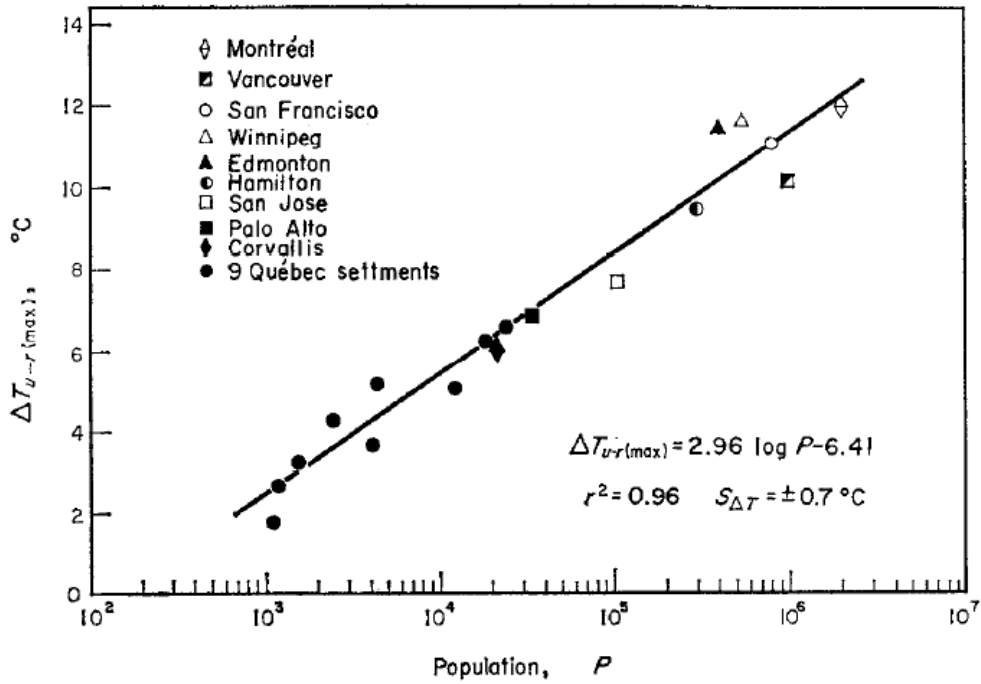


Figure III.2: Relation entre $\Delta T_{u-r(max)}$ et $\log P$ pour le Nord-Américain .

Source: (Oke ,1973)

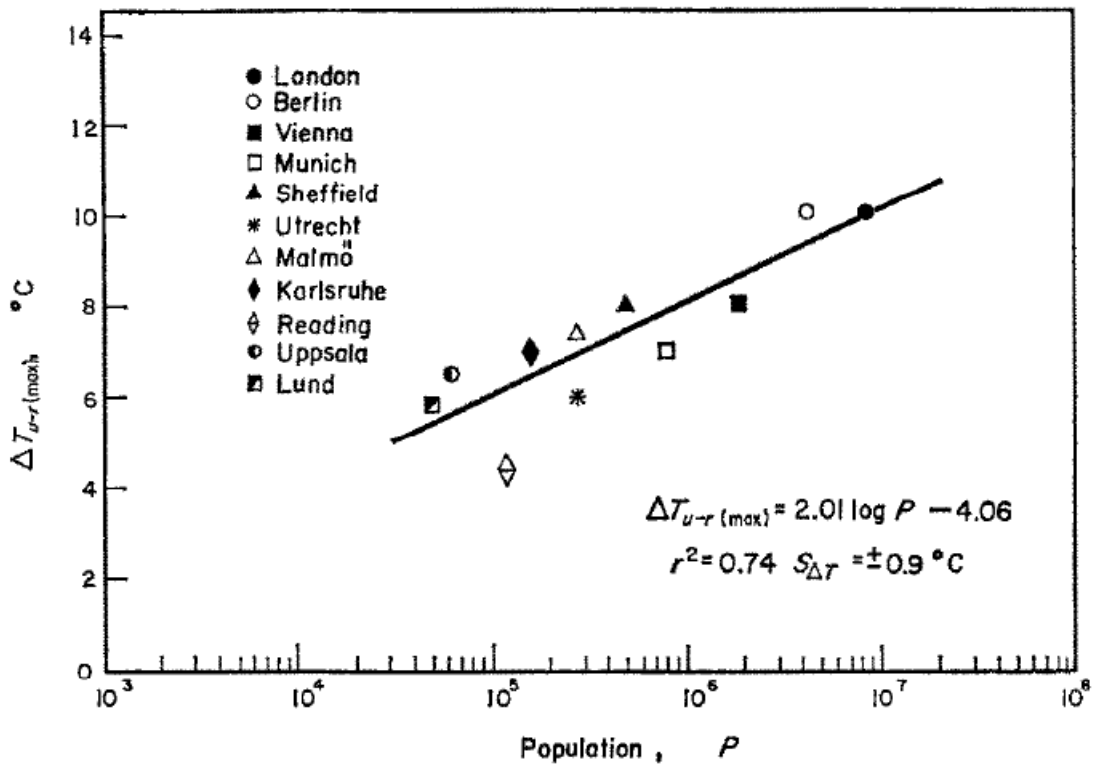


Figure III.3: Relation entre $\Delta T_{u-r(max)}$ et $\log P$ pour les villes Européennes

Source : (Oke,1973)

Des études statistiques menées par (Oke ,1982) montrent que la vitesse du vent et la couverture nuageuse sont des facteurs régulateurs de l'intensité des îlots de chaleur. Ces variables météorologiques sont associés aux rôles liés du transfert turbulent et radiatif dans la création du changement de température.

La différence de température est plus grande la nuit que le jour et elle est davantage accentuée quand les vents sont faibles. L'idée répandue que le phénomène d'îlot de chaleur urbain est un phénomène qui se produit uniquement durant la saison estivale est battue en brèche par (Musco ,2016) qui estime que le phénomène d'îlot de chaleur urbain se produit aussi bien pendant la saison hivernale qu'estivale.

III.2.4 Bilan énergétique des surfaces urbaines

Les bilans énergétiques des surfaces varient entre les zones urbaines et les zones rurales avoisinantes en raison de la différence de couverture terrestre, des caractéristiques de surface et des activités humaines qui ont un effet sur la génération et le transfert de chaleur.

Cela provoque des différences de température de surface et de l'air entre les zones urbaines et les zones rurales (Van Hove et al .,2011).

Le bilan énergétique de surface est considéré comme un élément fondamental pour comprendre la météorologie et la climatologie de la couche limite d'un site.

En effet, il est également utile pour saisir le comportement thermodynamique de la température de l'air, de la surface, de l'humidité et la dynamique du flux d'air local et de la profondeur de la couche limite.

Associé au vent synoptique, le bilan énergétique produit des forces énergétiques resautées des flux verticaux de chaleur, de masse et de quantité de mouvement.

(Oke,1988) a défini le bilan énergétique de surface comme:

$$Q^* + QF = QH + QE + \Delta QS + \Delta QA \quad \text{Eq III.4}$$

Où :

Q*: est le rayonnement net toutes ondes;

QF: dégagement de chaleur par combustion;

QH: densité de flux thermique sensible turbulent;

QE: densité de flux thermique latent turbulent;

ΔQS : stockage de chaleur net ;

ΔQA : advection de chaleur nette.

Généralement, le climat urbain est présenté par le bilan énergétique des surfaces urbaines, cet expression sera transformé dans l'environnement urbain et favorisera la formation de l'effet d'îlot de chaleur urbain (Van Hove et al., 2011).

III.2.5 Différents types d'îlot de chaleur urbain

On peut citer deux types d'îlot de chaleur urbain: L'ICU de surface et l'ICU atmosphérique, pour plus de détails voir le tableau III.1.

III.2.5.1 Ilot de chaleur de surface: définit par la différence de température de surface entre le milieu urbain et le milieu rural.

Ce phénomène causé par l'absorption de la chaleur du rayonnement solaire par les surfaces sèches et exposées de l'environnement urbain.

Sa dimension dépend de l'intensité du rayonnement solaire, qui varie selon les saisons et les jours, de ce fait les îlots de chaleur urbains de surface sont les plus élevés pendant la journée pour la saison de l'été, également en présence de condition de ciel dégagé, le rayonnement solaire reste non diffus, si les jours sont calmes, avec des vents faibles, le mélange de l'air diminuera (T E R I ,2017).

III.2.5.2 Ilot de chaleur atmosphérique : définit par la différence de température de l'air entre le milieu urbain et le milieu rural.

Le pic d'intensité se crée après le coucher du soleil à cause de dégagement de la chaleur stockée dans l'environnement bâti (Icaza ,2017).

Il existe deux types d'îlots de chaleur atmosphérique:

- **Ilots de chaleur urbains de la couche de la canopée:** se forment dans la couche allant du sol jusqu'en dessous des sommets des arbres et les toits.
- **Ilots de chaleur urbains de la couche limite:** commencent au niveau des toits et des arbres et s'élèvent jusqu'au point où les paysages urbains n'ont pas un effet sur l'atmosphère.

Tableau III.1: Comparaison entre les types d'ICU.

Source :(Ramakreshnan et al., 2018), traduit par auteur.

Types	ICU Atmosphérique		ICU de Surface
	ICU de la Couche de la canopée	ICU de Couche limite	
Définition	Le BES qui influence le volume d'air à l'intérieur du canyon par le transfert de chaleur sensible depuis la surface.	L'extension de la chaleur urbaine dans la couche CLU par l'entraînement d'air plus chaud au-dessus de la couche CLU.	Des températures de l'air plus élevées pendant les journées chaudes et estivales dans les villes en raison de rayonnement solaire intense sur les matériaux absorbant la chaleur par rapport aux températures de l'air ambiantes
Evolution temporelle	Se produit pendant les nuits/variatiions diurnes	Se produit à la fois le jour et la nuit/ la magnitude diminue linéairement avec la hauteur de CLU.	Se produit à la fois le jour et la nuit/intensité maximale pendant le jour
Couverture spatiale	Echelle locale (1-<10km) (Couverture limitée)	Méso-échelle (10 km) (Couverture élevée)	Micro-échelle (1-100 m) (couverture limitée)
Techniques de mesures	Stations météorologiques fixes et mobiles	Principalement des capteurs de température montés sur avion,hélicoptère, ballon et tour.	Télédétection intégrée aux applications des SIG.
Présentations méthodes	Graphes de température et cartes d'isothermes	Graphes de température	Images thermique
Impacts	Utilisation de l'énergie et de l'eau, confort thermique, qualité de l'air urbain et l'écologie urbaine.	Circulation locale de l'air, qualité de l'air, précipitations et activité orageuse sous le vent et la période de croissance des plantes.	Température des eaux pluviales des eaux de ruissellement, du confort thermique et la santé des écosystèmes aquatiques.

BES: Bilan énergétique de surface.

CLU: Couche limite urbaine.

III.3 Ilot de chaleur urbain selon les différentes échelles urbaines

La notion d'échelle est importante pour étudier la forme, la genèse et pour mesurer et modéliser les îlots de chaleur. Car le climat urbain composé par certains mécanismes se produit à plusieurs échelles.

Les différentes échelles urbaines permettent de comprendre les évolutions temporelles du phénomène d'îlot de chaleur urbain et servent à saisir et à

contrôler les processus qui contribuent à la formation de chaque type d'îlot de chaleur.

Ainsi, on peut citer les trois échelles horizontales et les échelles verticales qui leurs sont correspondantes (Van Hove et al., 2011):

- **Echelle micro ou Echelle du canyon de la rue:** relative aux dimensions des bâtiments individuels, des arbres, des routes, des rues, ses dimensions varient de moins d'un mètre à plusieurs centaines de mètres.
- **Echelle locale:** se présente par un climat moyen des quartiers dans une zone urbaine et elle comporte la topographie.
- **Méso-échelle ou Echelle de la ville:** ses conditions et interactions influencent les phénomènes à l'échelle locale.

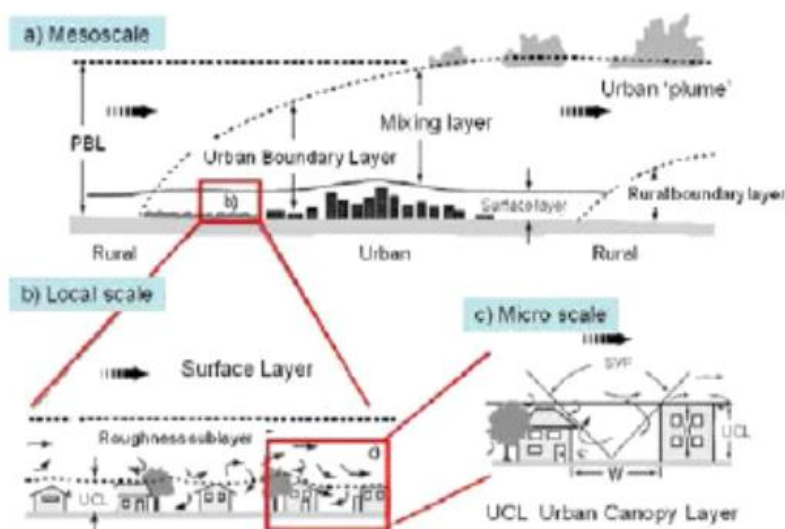


Figure III.4: Schéma des échelles climatiques

Source: (Oke,1987)

III.4. Causes d'îlot de chaleur urbain

(Oke ,1982) propose les différentes causes éventuelles de l'îlot de chaleur urbain :

- Piégeage du rayonnement à ondes courtes et longues entre les bâtiments.
- Diminution des pertes de chaleur radiative à ondes longues grâce à la réduction des facteurs de vue du ciel.
- Augmentation du stockage de la chaleur sensible dans les matériaux de construction.
- Chaleur anthropique dégagée par la combustion de combustibles (chauffage domestique, circulation).
- Un potentiel d'évapotranspiration réduit, ce qui implique que l'énergie est convertie en chaleur sensible plutôt que latente.
- Réduction de l'évacuation de la chaleur convective en raison de la réduction de la vitesse du vent.

Généralement, toutes ces causes ont un impact négatif sur l'environnement thermique notamment dans les espaces urbains, voir la figure III.5.

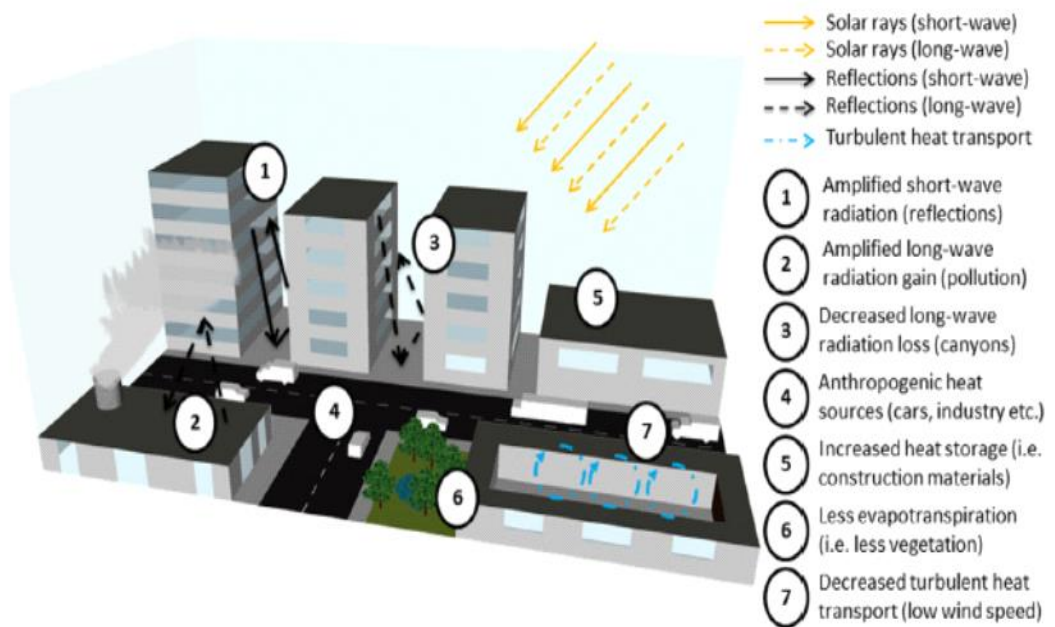


Figure III.5: Causes possibles de l'effet d'ICU .Source : (Toparlak et al.,2015).

III.5 Processus de formation d'îlot de chaleur urbain

Les principaux processus de formation d'un îlot de chaleur urbain varient en fonction des saisons (Peterson, 1969) :

- **En été:** à cause de leur géométrie et l'admittance thermique, les grands immeubles des zones urbaines absorbent une grande quantité de rayonnement solaire par rapport aux zones rurales.
- **En hiver :** la quantité de l'énergie solaire reçue par la terre est minimale car l'angle du soleil aux latitudes moyennes est faible et la vitesse restreinte du vent dans les zones urbaines, due à la rugosité de la surface de la ville, réduit la ventilation de la ville en altérant aussi l'îlot de chaleur

L'îlot de chaleur n'est pas lié à une seule cause, par contre à la conjonction de plusieurs facteurs comme les conditions météorologiques synoptiques (la vitesse du vent, la quantité et la hauteur des nuages), la topographie, la morphologie et la taille de la ville changent l'amplitude de l'intensité de l'ICU (Chow et al.,2006).

Par exemple (Peterson,1969) montre que la rugosité de la surface de la ville est un facteur qui contribue à la diminution de la vitesse du vent dans les zones urbaines.

III.6 Ilot de chaleur urbain et changement climatique

Le changement climatique ne constitue pas une cause du phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU), mais un facteur susceptible contribue à l'aggravation de son intensité.

L'augmentation de la température moyenne de la surface terrestre à l'échelle mondiale observée et projetée accentue l'apparition du phénomène d'ICU. Il est à rappeler que ce phénomène est caractérisé par des températures estivales plus élevées en milieux urbains que dans les zones rurales environnantes.

Dans un contexte de changement climatique, où les vagues de chaleur vont augmenter en fréquence et en intensité, les villes doivent se préoccuper du phénomène d'îlot de chaleur.

D'après les projections du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), il est très probable que de nombreuses villes du monde subiront une hausse de la fréquence et de la durée des vagues de chaleur.

En effet, Les zones urbaines sont affectées par le réchauffement climatique en raison de l'accumulation de chaleur engendré par l'effet d'îlot de chaleur urbain.

Par ailleurs, l'effet de l'îlot de chaleur urbain sur le changement climatique est complexe car d'une part, l'accumulation de chaleur causée par l'effet d'îlot de chaleur urbain provoque l'effet du réchauffement climatique dans les zones urbaines concernées. Donc, des vagues de chaleur très intensifiées peuvent survenir dans ces zones avec des températures estivales diurnes très élevées (T E R I ,2017).

D'autre part, l'augmentation des gains de chaleur dans les bâtiments causée par l'accumulation de chaleur augmente des besoins en matière de consommation énergétique pendant la saison estivale.

Un réchauffement de la ville dû à l'effet des îlots de chaleur urbains est un exemple de changement climatique local, ce dernier est différent du changement climatique mondial qui est causé par des forçages naturels (activité solaire et volcaniques) et par des forçages anthropiques (renforcement concentrations de gaz à effet de serre)

Cependant, les deux phénomènes ont un effet identique, par exemple plusieurs zones peuvent connaître des saisons chaudes plus longues, ces phénomènes peuvent également augmenter la demande énergétique notamment dans la saison d'été (Islands ,2011).

III.7 Stratégies d'atténuation d'îlot de chaleur urbain

L'étude qui a porté sur l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain dans les villes métropolitaines **d'Asie du Sud-Est à Singapour**, suivi de **Hong Kong** et de **Kuala Lumpur** (Aflaki et al.,2017) a montré que la morphologie urbaine, les matériaux de construction et l'application de différents types de verdure sur la façade du bâtiment sont des techniques efficaces pour atténuer l'ICU ,voir la figure III.6.

Les différentes stratégies d'atténuation d'ICU à **Hong Kong, Singapour** et **Kuala Lumpur** qui ont été établies en ce qui concerne la morphologie urbaine, les matériaux à faible albédo et les façades vertes spécifiées en fonction du contexte des villes sont présentées comme suit :

1. A Hong Kong :

- **Morphologie et formes urbaines:** implanter des arbres, l'analyse de la morphologie urbaine afin de trouver le plan d'urbanisme idéal.
- **Matériaux de construction à faible albédo:** le choix des matériaux à albédo variable pour une ventilation nocturne adéquate.

- **Toit et façade verts, verdure verticale et chaussée :** l'utilisation de surfaces végétalisées pour les façades du bâtiment, remplacement du béton utilisé dans l'enveloppe du bâtiment par un mur vert.

2. A Singapour

- **Morphologie et formes urbaines:** une bonne utilisation des sols dans un contexte urbain, limitation de la construction des bâtiments de grande hauteur pour améliorer la circulation de l'air à l'intérieur du canyon.
- **Toit et façade verts, verdure verticale et chaussée :** l'utilisation des canyons verts pour piétons, application de divers systèmes de verdure verticale

3. A Kuala Lumpur

- **Morphologie et formes urbaines:** augmentation du taux de couverture des espaces verts dans un contexte urbain, la configuration d'une géométrie appropriée pour une ventilation efficace en zone urbaine.
- **Matériaux de construction à faible albédo :** des matériaux froids avec un (albédo de 0,8) intégrés à des niveaux plus élevés de la canopée des arbres.
- **Toit et façade verts, verdure verticale et chaussée :** l'utilisation des toits verts sur les bâtiments de grande dimension, application du parc urbain.

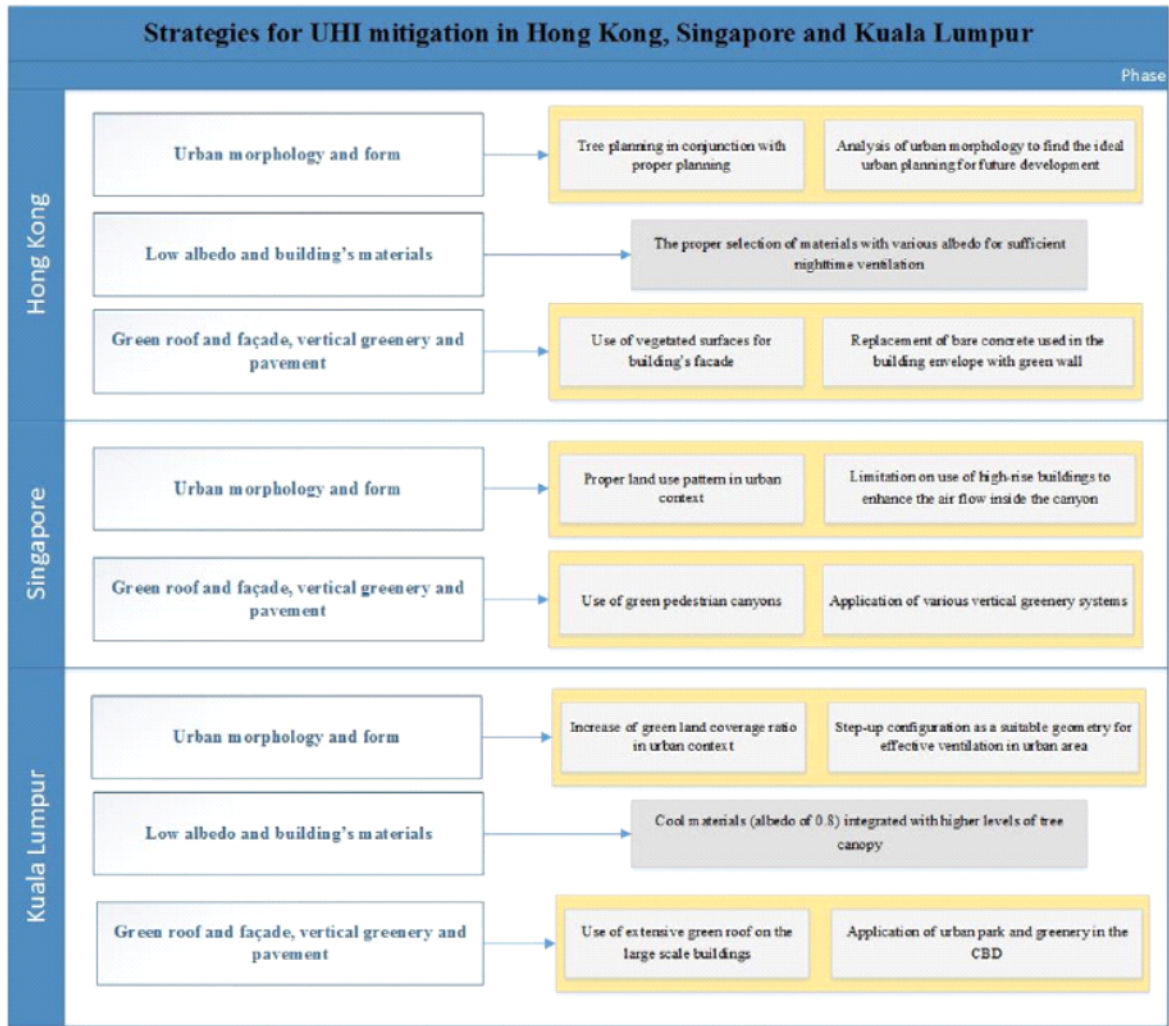


Figure III.6 : Stratégies d'atténuation de l'ICU. **Source :** (Aflaki et al., 2017)

Dans les villes étudiées, les matériaux de construction présentent un facteur important pour diminuer la température de l'air extérieur et la consommation d'énergie. Les matériaux à faible albédo sur la façade des bâtiments peuvent réduire l'absorption de la chaleur solaire et maintenir un confort approprié dans les zones urbaines.

Il a confirmé que les toits verts sont considérés comme un élément faisant partie d'une stratégie efficace de diminution de température ambiante et de la consommation énergétique à petite ou grande échelle dans le contexte urbain.

Aux Etats-Unis, les stratégies d'atténuation de l'ICU sont basées sur l'augmentation de la végétation urbaine, l'augmentation de l'albédo, ou réflectivité, des surfaces à travers l'addition des arbres dans les rues et du couvert végétal qui protège les bâtiments du rayonnement solaire.

Un système de végétation dynamique implanté sur un toit nommé : **toit vert** ; peuvent également diminuer la chaleur absorbée d'un bâtiment (Rosenthal et al., 2008).

Les villes du Québec, elles aussi, ont appliqué des stratégies pour limiter les effets des îlots de chaleur urbains. Ainsi, il a été fait appel à la végétation à fin de protéger les bâtiments du rayonnement solaire. Une autre stratégie appelée : **écologisation urbaine** a été mis en place. Cette stratégie avait pour finalité d'accroître l'indice de végétation totale d'une ville (par exemple: la végétation autour des bâtiments).

Les murs verts forment un microclimat en abaissant la température de l'enveloppe du bâtiment et perfectionne son efficacité énergétique, alors que les toits verts refroidissent l'air ambiant extérieur (Giguère ,2012).

Dans **les villes chaudes et sèches** divers critères de contrôle de l'ICU existent (Taslim et al., 2015) comme:

- Le rapport (H/W) entre la hauteur des bâtiments (H) et la largeur de la rue proche (W) est un facteur principal et efficace sur le confort thermique, notamment dans les climats tropicaux ;
- L'orientation du système des rues selon les mouvements du soleil et les vents dominants.

III.8 Approches de la détermination et de mesure de l'îlot de chaleur urbain

Le sujet de recherche de microclimat urbain a une longue histoire, (Mills,2014) a résumé les différentes approches de l'étude des effets du climat urbain de 1900 à 2000 :

- **En 1900:** Observation et description des effets urbains à l'aide des instruments météorologiques (thermomètres, hygromètres, etc.).
- **En 1960 :**
 - ✓ Evolution vers la mesure des variables de "processus": rayonnement, échanges de chaleur sensible et latente.
 - ✓ L'utilisation des méthodes statistiques pour synthétiser et généraliser les résultats.
- **En 1970 :**
 - ✓ Application de la théorie de la (micro) météorologie aux climats urbains.
 - ✓ Utilisation du bilan énergétique pour expliquer l'effet urbain.
 - ✓ Observation des variables de processus: rayonnement, flux estimés.

- ✓ Utilisation des techniques de modélisation informatique.
- ✓ Définition plus précise de la "surface" urbaine, des échelles urbaines et de l'observation des effets urbains.
- **En 1980:** Adoption d'une approche expérimentale : choix de formes urbaines (les rues deviennent des canyons).
- **En 1990 :**
 - ✓ Relations entre les formes urbaines réelles et l'effet du climat.
 - ✓ Analyse des projets urbains de terrain par des équipes de recherche.
- **En 2000 :**
 - ✓ Développement des modèles de climat urbain réalistes.
 - ✓ Utilisation de nouvelles techniques pour étudier le climat urbain.

Les processus de mesure et de détermination de l'îlot de chaleur urbain dépend du type d'îlot de chaleur urbain, l'**ICU de surface** implique la mesure de la température de surface pour une zone déterminé, alors que l'**ICU atmosphérique** consiste la mesure de la température de l'air (T E R I ,2017).

Les techniques qui tendent à étudier l'effet d'îlot de chaleur urbain peuvent être divisées en deux parties: **Approches Observationnelles** et **Approches de Simulations**.

III.8.1 Approches observationnelles

Ces dernières années, plusieurs observations générales ont été effectuées en fonction de la portée géographique utilisée dans les études sur les îlots de chaleur (Mirzaei et al 2010).

III.8.1.1 Télédétection thermique

Les îlots de chaleur de surface peuvent être étudiés à l'aide de la télédétection. Cette technique nous permet de cartographier la configuration des îlots de chaleur urbains de surface pour une ville ou une région entière (T E R I ,2017).

L'observation de l'ICU est devenue éventuelle au moyen du satellite, les plates-formes aériennes et les aéronefs (Becker et al., 1995).

En raison de la mauvaise résolution spatiale (sur les images satellites), l'approche thermique par télédétection présente quelques difficultés d'utilisation parce que l'image comporte des signaux thermiques du sol y compris les valeurs thermiques de la couche supérieure de la canopée (surfaces des toits) (Goldreich ,2006).

III.8.1.2 Modélisation à petite échelle

Un prototype de la zone urbaine est établi comme un modèle à petite échelle (Cermak ,1984).Le prototype est analysé grâce à des systèmes ; par exemple des souffleries (Uehara et al.,2000) ou espaces extérieurs ((De La Flor & Dominguez, 2004) ; (Kanda et al., 2005)).

La modélisation à petite échelle est utilisée dans plusieurs études de l'ICU en vue de vérifier, calibrer et améliorer les modèles mathématiques. Les inconvénients majeurs sont le coût et la difficulté de créer expérimentalement une stratification thermique qui ressemble à l'atmosphère réelle (T E R I, 2017).

III.8.1.3 Mesures sur le terrain

Dans l'approche de mesure sur le terrain, la température de surface est comparée entre une zone urbaine et rurale; en se basant sur des analyses statistiques des différences entre zones urbaines et rurales. Ces analyses statistiques sont fondées sur des données fournies par des paires de stations fixes ou mobiles ou des groupes de stations aussi bien à l'intérieur de la ville ou à proximité (Arnfield ,2003).

Il est à rappeler que la mesure sur le terrain a été utilisée pour la première fois pour étudier l'ICU par Howard en 1810 pour la ville de Londres.

III.8.2 Approches par simulations

En cherchant à se passer d'expérimentation ,**la simulation** qui sert à étudier les réactions d'un système à différentes contraintes demeure un outil largement utilisé dans le domaine de la recherche scientifique et du développement technologique à fin de déduire des résultats en fonction de différents scénarios .

Outre des approches d'observation, des modèles mathématiques ont été élaboré pour résoudre les problèmes de climat urbain, en particulier l'ICU, toutefois à cause de la complexité de l'ICU, des simplifications des processus sont jugées nécessaires.

L'avantage fondamental des études de simulation par rapport aux études d'observation est l'opportunité d'accomplir des analyses comparatives basées sur différents scénarios.

Par ailleurs, le développement des techniques de calcul pendant ces dernières décennies permettant aux chercheurs de résoudre des modèles mathématiques pour des problèmes à grande échelle tels que ; le bilan énergétique et les approches numériques dynamiques ont conduit à des résultats plus fiables et plus adéquats (Mirzaei et al.,2010).

III.8.2.1 Modèle du bilan énergétique (EBM)

Le bilan énergétique de la Terre fait le bilan de la quantité d'énergie reçue et réfléchi du climat de la Terre.

Le bilan énergétique peut être étudié à des échelles plus fines comme par exemple le bilan d'équilibre énergétique d'un canyon de construction qui a été proposé pour la première fois par (Oke ,1982) ou encore à l'échelle d'un bâtiment.

Cette méthode utilise la loi de l'énergie de conservation pour un volume de contrôle déterminé et étudie les phénomènes atmosphériques, les fluctuations de turbulence et le champ de vitesse, tels que les flux de chaleur.

Ces flux sont usuellement décrits par des équations analytiques ou empiriques. Le modèle de canopée urbaine (UCM) est déduit de l'équation du bilan énergétique pour un volume de contrôle qui constitue de deux bâtiments.

L'UCM prévoit la température de l'air et les températures de surface des bâtiments, des chaussées et des rues. La principale faiblesse de ce modèle est l'absence de champ de vitesse du vent (Mirzaei & Haghighat, 2010).

III.8.2.2 Dynamique des fluides computationnelle (CFD)

Le CFD est une méthode efficace pour prédire le vent et la température de l'air dans les zones urbaines (Ashie et al.,1999).

Cette technique résout en même temps toutes les équations directrices du fluide dans des zones urbaines ; conservation de la masse, de la température potentielle, de la quantité de mouvement et des espèces (vapeur d'eau et réaction chimique).

L'approche CFD peut donner des informations plus précises que l'UCM sur la distribution de l'ICU dans et en haut des toits des bâtiments (Toparlar et al.,2015).

III.9 Rétrospectives des travaux liés aux îlots de chaleur urbains

Cette étude rétrospective que nous avons menée dans le cadre de cette recherche a porté essentiellement sur les publications en rapport avec le sujet abordé à savoir l'ICU et à concerner les principales bases de données de recherche et les services d'indexation de citations tels que **Scopus, Science Direct, Researchgate** et **Google scholar**.

Dans le tableau III.2 que nous avons confectionné, nous présentons un aperçu de plusieurs études sur l'îlot de chaleur urbain qui ont utilisé des approches numériques

notamment : **CFD** (Dynamique des fluides computationnelle), **EBM** (Modèle du bilan énergétique), **Data Analys** (Analyse des données) ,**Remote Sensing** (Télédétection thermique).

Concernant la méthode **CFD** ,les auteurs suivants ont utilisé cette approche pour étudier l'îlot de chaleur urbain :

(Mochida et al.,1997) ; Ashie et al.,1999) ; (Takahashi et al ,2004) ;(Li et al., 2005) ;(Priyadarsini et al.,2008) ;(Li et al.,2008) ;(Chen et al.,2009) ;(Memon et al. ,2010) ;(Kaoru et al., 2011) ;(Ashie et al.,2011) ;(Bo-Ot et al.,2012) ;(Allegrini et al., 2015) ;(Toparlar et al., 2015) ;(Wang & Li,2016) ;(Fatima & Chaudhry ,2017) ;(Toparlar et al. ,2018);(Antoniou et al.,2019);(Piroozmand et al.,2020)

Aussi, il est à signaler que l'analyse du microclimat urbain fait appel aussi à la méthode basée sur les modèles de bilan énergétique (**EBM**).Certains auteurs comme (Kikegawa et al. ,2006) ont utilisé cette méthode.

Les études qui sont présentées dans le tableau que nous avons confectionné comportent les entrées suivantes :

- Auteurs et Année de publication.
- Pays.
- Méthodes.
- Paramètres climatiques
- Echelles climatiques
- Dimension
- Validation
- Journal Source.

Les mots clés utilisés dans toutes ces études sont résumés ci-dessous:

- Dynamique des fluides computationnelle (CFD)
- Stress thermique, îlots de chaleur, flux de chaleur, stress thermique et confort thermique, points chauds, vagues de chaleur
- Géométrie, type de bâtiment, rapport d'aspect (H/W), aérodynamique du bâtiment, matériaux de revêtements de façade.
- Energie, modélisation de l'énergie, consommation d'énergie.

Chapitre III: Revue de littérature sur les îlots de chaleur urbains

- Données climatiques, zone climatique, zones côtières, microclimat, climat méditerranéen.
- Couche limite atmosphérique (CLA)
- Canyon de la rue, inconfort urbain, urbanisme, conception urbaine, environnement urbain, physique urbaine, climat urbain, parc urbain, environnement thermique urbain, environnement thermique extérieur.
- Température, vitesse du vent, circulation du vent, rayonnement solaire, fichier météo.

Tableau III.2: Analyse comparative de 21 études d'ICU les plus citées de 1997 à 2020

Auteurs	Année de publication	Pays	Méthodes	Paramètres	Echelles climatiques	Dimension	Validation par mesure	Journal source
Mochida et al.,	1997	Tokyo,Japan	CFD	TA, VV	Méso	3D	Oui	Wind Engineering and Industrial Aerodynamics
Ashie et al.,	1999	Tokyo,Japan	CFD	TA,VV	-	-	-	Wind Engineering and Industrial Aerodynamics
Takahashi et al.,	2004	Kyoto,Japan	CFD	TA,VV,HR,FL	-	3D	Oui	Energy and Buildings
Li et al.,	2005	Pékin,Chine	CFD	TA	-	3D	Oui	Building and Environment
Kikegawa et al.,	2006	Tokyo,Japan	EBM	TA	Méso	-	-	Applied Energy
Priyadarsini et al.,	2008	Saïngapore	CFD	TA,VV	-	2D	Oui	Solar Energy
Li et al.,	2008	Wuhan,Chine	Remote sensing-CFD	TA,	Différentes échelles	1D	Oui	ST Sensors
Chen et al.,	2009	Tokyo Japan	CFD	TA,VV	Méso	2D	Non	Building and Environment
Kolokotsa et al.,	2009	Hania, Crète, Grèce	Data Analysis	TA,VV,UR, P, RS, RR	-	-	Oui	Solar Energy
Memon et al.,	2010	Chine	CFD	TA , VV	-	2D	Oui	Building and Environment
Kaoru et al.,	2011	Osaka,Japan	CFD	TA, VV,RS	-	3D	Oui	Building and Environment
Ashie et al	2011	Tokyo Bay,Japan	CFD	TA,VV	Méso	-	Oui	International Journal of climatology
Bo-Ot et al.,	2012	Tainan,Chine	CFD	TA,VV	-	3D	Non	energies
Allegrini et al.,	2015	Zürich,Suisse	CFD-BES	TA,TS,VV	-	3D	Non	Wind Engineering and Industrial Aerodynamics
Toparlar et al.,	2015	BergpolderZuid Rotterdam	CFD	TS,VV	-	3D	Oui	Building &Environment
Wang & Li,	2016	Hong Kong,Chine	CFD	TA,VV	Micro	1D	Non	Building & Environment
Fatima & Chaudhry,	2017	Dubaï,UAE	CFD	TA,VV	Micro	3D	Oui	Sustainable Buildings
Allegrini et al.,	2018	Zürich (Suisse)	CFD-BES	TA,ST,VV	-	3D	Non	Urban Climate
Toparlar et al.,	2018	Anvers, Belgique,	CFD—BES	TA ,VV	Micro	3D	Oui	Applied Energy
Antoniou et al.,	2019	Nicosie, Chypre	CFD	TA,ST,VV	Micro	3D	Oui	Science of the Total Environment
Piroozmand et al.,	2020	Zurich, Suisse	CFD	TA,VV	Micro	3D	Oui	Journal of Wind Engineering &Industrial Aerodynamics

TA: Température de l'air.

VV: Vitesse du vent.

HR: Humidity de l'air.

FL: Flux de chaleur.

Pa: Pression atmosphérique .

RS: Rayonnement solaire

RR: Précipitation.

TS: Température de surface

▪ **(Mochida et al.,) en 1997 :**

L'auteur a présenté dans son article, les résultats des analyses en utilisant la méthode **CFD** du climat à **méso-échelle** dans la région de Tokyo. Les climats urbains ont été analysés pendant les années 1930 et 1990.

L'exactitude des analyses **3D** est examinée en comparant leurs résultats avec des données mesurées afin d'étudier les effets de l'urbanisation sur la circulation des îlots de chaleur dans la région de Tokyo.

Deux cas d'analyse **CFD** sont réalisés afin d'examiner les effets du changement des conditions d'utilisation des terres et de l'augmentation de la libération artificielle de chaleur sur la base des valeurs de 1930 et de 1990 à **Tokyo**.

Les résultats montrent qu'en 1990, la circulation des îlots de chaleur est caractérisée par une grande différence de température entre les zones urbaines et rurales et que la brise souffle beaucoup plus loin à l'intérieur des terres que les résultats de 1930.

Les travaux ont conclu que l'analyse **CFD** a un grand potentiel pour représenter et permettre la compréhension d'un système climatique qui est à l'origine très complexe dans une zone urbaine .

L'auteur pense que la méthode **CFD** peut devenir à terme un puissant outil dans la conception des tissus urbains futurs.

▪ **(Ashie et al.,) en 1999 :**

L'auteur a appliqué la technique **CFD** en utilisant le modèle k-ε pour prédire le vent et la température dans les zones urbaines. Une simulation d'une journée d'été typique à Tokyo est utilisée comme étude de cas.

L'auteur a couplé un modèle de couvert de bâtiment avec le **CFD** pour analyser le climat urbain et clarifier la relation interactive entre le climat intérieur et extérieur.

Les résultats numériques montrent que l'implantation de bâtiments permet de réduire la température de l'air de 0,4° à 1,3°C.

L'étude a conclu que le modèle **k-ε** est développé pour la prédiction de la température et du champ de vitesse dans les zones urbaines.

▪ **(Takahashi et al.,) en 2004 :**

L'auteur avait comme objectif dans sa recherche :

- ✓ Clarifier l'influence des caractéristiques topologiques locales sur la température urbaine.
- ✓ Comparer les caractéristiques du flux de chaleur sensible et latent des zones urbaines avec différentes quantités de zones bâties et vertes, en utilisant la dynamique des fluides numérique (**CFD**) combinée par la conduction de chaleur en état instable des murs et des sols des bâtiments, l'échange de chaleur par rayonnement
- ✓ Prédire l'environnement thermique dans la ville de **Kyoto** comme la température de l'air, l'humidité, la vitesse du vent et le flux de chaleur de la couche limite et le comparer avec les flux mesurés.

Cette simulation **CFD** utilise le modèle **tridimensionnel** de flux turbulent **k-ε** et utilise la température de surface mesurée comme conditions limites.

Les mesures ont été effectuées en été, du 21 au 28 Juillet 2002, pour étudier les caractéristiques du flux de chaleur dans les zones urbaines à trois endroits de la ville de Kyoto (une zone urbaine commerciale, une zone de campus universitaire et une place couverte d'une dalle de béton qui a servi de point de référence pour les mesures).

Il a été constaté que ce modèle pouvait prédire l'environnement thermique réel de la zone urbaine.

Les résultats de l'environnement urbain d'une ville centrale sans beaucoup de vert et d'un campus universitaire avec suffisamment de vert montrent l'existence d'une différence de température de l'air distincte entre ces deux sites.

L'étude a conclu que ce nouveau code de simulation peut être utilisé pour analyser l'influence des formes des bâtiments et des configurations urbaines sur l'îlot de chaleur urbain et pour étudier l'effet d'une végétalisation supplémentaire des toits, afin d'atténuer l'îlot de chaleur urbain et d'améliorer l'environnement thermique urbain au niveau des rues.

▪ **(Li et al.,) en 2005 :**

L'auteur a proposé une méthode numérique pour simuler l'environnement thermique extérieur autour des bâtiments à **Pékin, en Chine**.

La prédiction de la distribution de la température de l'air extérieur et de la température des bâtiments et du sol est simulée **CFD tridimensionnel** basé sur l'équation de **Reynolds Navier-Stokes** en volume fini.

La méthode numérique est validée par les données mesurées de l'environnement thermique extérieur autour d'un seul bâtiment. Les mesures ont été effectuées un 29 Juillet.

Les résultats montrent que la température de l'air augmente avec la diminution de la distance au mur ouest dans le sens horizontal, ce qui est dû à l'effet de chauffage du mur.

L'étude a conclu que les températures de surface des bâtiments et du sol peuvent être traitées comme des zones appelées "zone d'ombre" et "zone d'ensoleillement".

Le nouveau modèle réduit considérablement le temps de calcul, ce qui peut conduire à une application réelle de la simulation de l'environnement thermique extérieur pour son gain de temps et son applicabilité opérationnelle.

▪ **(Kikegawa et al.,) en 2006 :**

L'auteur a examiné la disposition spatiale des stratégies d'atténuation des îlots de chaleur pour l'été à Tokyo et a également évalué leurs impacts possibles sur la demande en énergie de climatisation et les émissions de CO₂ qui en résultent.

Le système de simulation se compose de trois sous-modèles:

- ✓ Un modèle météorologique méso-échelle tridimensionnel (MM),
- ✓ Un modèle de canopée urbaine (UCM) unidimensionnel,
- ✓ Un modèle d'analyse énergétique des bâtiments (EBM).

L'auteur a été constaté qu'en termes d'atténuation du réchauffement urbain et d'économie d'énergie de refroidissement, les simulations suggèrent que la réduction de la chaleur anthropique de la climatisation pourrait être la mesure la plus efficace dans les auvents des immeubles de bureaux.

Les deux mesures indiquent des diminutions quotidiennes et spatialement moyennes de la température de l'air près du sol en été de 0,2 à 1,2 °C.

- **(Priyadarsini et al.,) en 2008:**

L'auteur a étudié l'existence de l'effet d'îlot de chaleur urbain à **Singapour** et a examiné les principaux facteurs à l'origine de cet effet.

Le **CFD** est utilisé comme principal outil d'analyse basé sur le modèle à **deux équations k-ε** pour permettre de prévoir l'effet de la turbulence et a utilisé le logiciel **CFX 5.6** qui est basé sur un volume fini.

Les conditions aux limites requises pour les simulations **CFD** ont été principalement obtenues à partir des données météorologiques et des mesures de terrain.

Une expérience en soufflerie et des mesures sur le terrain ont été utilisées comme outils complémentaires pour la validation du modèle. Les mesures ont été effectuées pendant une journée chaude en Août 2002.

Les résultats montrent que la zone du CBD (quartier central des affaires) a enregistré la température la plus élevée, la différence de température maximale de 4°C a été observée entre la zone de végétation et la zone du CBD.

Il est constaté que le fait de placer stratégiquement quelques blocs de tours de grande hauteur contribuera en fait à améliorer la vitesse à l'intérieur du canyon lorsque le vent souffle parallèlement ou perpendiculairement au canyon.

L'étude a conclu que le type de matériaux des façades et leur couleur sont parmi les facteurs importants qui provoquent l'effet d'îlot de chaleur urbain à Singapour.

Cette conclusion donne certainement une orientation claire aux concepteurs urbains sur la zone sur laquelle ils doivent se concentrer pour obtenir une bonne qualité environnementale.

- **(Li et al.,) en 2008:**

L'auteur a procédé à une étude comparative de l'environnement thermique urbain à différentes échelles spatio-temporelles pour vérifier les caractéristiques des îlots de chaleur de la ville de **Wuhan**, qui est chaude en été et froide en hiver.

L'étude était axée sur la planification urbaine. L'auteur a utilisé simultanément des approches numériques avancées de la télédétection (**Remote Sensing**) pour étudier la

température de surface ainsi que la dynamique des fluides numérique **CFD** pour valider l'amélioration de l'environnement thermique d'une ville.

Les résultats montrent que:

- ✓ Le vent est la cause principale du transfert de la basse température de la surface naturelle en banlieue vers la ville,
- ✓ La vitesse du vent ralentit lorsqu'il est proche de la ville,
- ✓ L'amplitude décroissante de la température ralentit également.

Ce qui permet de prédire que le changement de température de la végétation naturelle vers la ville est un processus continu avec une variation lente.

L'étude a conclu que la distribution de la température, les conditions d'îlots de chaleur et les effets de certaines mesures d'urbanisme peuvent être examinés ensemble dans la simulation **CFD**. Cette dernière étude semble avoir beaucoup de points similitude avec nre objectif de recherche.

▪ **(Chen et al.,) en 2009:**

L'auteur a réalisé des simulations couplées de convection, de rayonnement et de conduction pour évaluer l'environnement thermique extérieur des **blocs urbains existants** à **Tokyo**: Otemachi, un quartier d'affaires de grande hauteur, et Kyobashi, un quartier d'affaires typique de taille moyenne.

L'auteur cherche à préciser que les effets des contre-mesures sur les microclimats urbains diffèrent selon les blocs urbains.

Pour ce faire deux types de blocs urbains représentatifs de **Tokyo** sont choisis pour l'analyse numérique des microclimats urbains.

La température de surface est utilisée comme condition au limite pour le calcul de la dynamique des fluides (**CFD**), qui est basé sur le modèle standard **k-ε**.

Les résultats de la distribution horizontale de la vitesse du vent et de la température de l'air montrent que la température de l'air est plus élevée lorsque le vent est plus faible du côté sous le vent des bâtiments.

▪ **(Kolokotsa et al.,) en 2009 :**

L'étude a porté sur l'analyse des îlots de chaleur urbains dans une petite ville méditerranéenne, côtière et densément construite et peuplé, à savoir **Hania**, dans l'île de **Crète en Grèce**.

La recherche spécifique vise à vérifier l'existence de l'îlot de chaleur urbain et de mesurer son intensité, sa taille et de déterminer en fin sa forme.

L'étude vise aussi à comprendre la corrélation de l'ICU dans la ville de **Hania** avec les conditions météorologiques locales.

Pour ce faire, les auteurs ont utilisé une **analyse de données (Data Analysis)** pour étudier l'intensité des îlots de chaleur urbains (ICU) et leur impact sur les conditions de confort extérieur.

✓ **Neuf stations** météorologiques **urbaines** et **trois rurales** ont été utilisées.

Les mesures de température et d'humidité relative sont collectées du 26 Mai 2007 au 24 Octobre 2007, les données météorologiques, y compris la vitesse et la direction du vent, la pression barométrique, l'ensoleillement et les précipitations pour la région spécifique sont collectées et élaborées pour une corrélation croisée avec l'apparition de l'îlot de chaleur urbain.

Les résultats montrent que pendant la période estivale, où la température est élevée :

- ✓ L'îlot de chaleur urbain prend son intensité maximale d'environ 8°C,
- ✓ La forme de l'îlot de chaleur urbain est fortement influencée par la vitesse et la direction du vent et les vents du Nord élargissent le front de l'îlot de chaleur urbain, tandis que les vents de l'ouest contribuent à la réduction de l'îlot de chaleur urbain.

▪ **(Memon et al.,) en 2010:**

L'auteur a utilisé un modèle bidimensionnel (2D) de turbulence k- ϵ avec RNG(Re-Normalisation Group) pour évaluer l'impact du canyon de la rue et de la vitesse du vent sur l'intensité de la chaleur.

Le modèle du canyon de la rue a été validé en comparant ses résultats avec les données rapportées par la soufflerie et des modèles numériques similaires.

Les équations qui régissent le modèle ont été résolues pour différentes situations de réchauffement diurne avec des rapports d'aspect de 0,5 à 8.

Les équations du modèle sont discrétisées en utilisant un schéma du second ordre avec la méthode des volumes finis et sont résolues par le code CFD Fluent 6.2.1.

Les résultats montrent que la différence de température de l'air était plus élevée pendant la nuit dans un canyon de rue avec un rapport d'aspect élevée et faible, mais cette différence était faible ou même négative pendant la journée.

Cette étude a mis en évidence que l'îlot urbain frais peut être associé à un réchauffement direct du sol.

▪ **(Kaoru et al.,) en 2011 :**

L'auteur a appliqué une simulation **CFD** en utilisant les équations **3D** de **Navier Stokes** avec le modèle de turbulence standard **k-ε** à la ville **d'Osaka**, au **Japon**, pour évaluer l'applicabilité de l'analyse d'instabilité sur 24 heures.

La zone d'analyse est constituée de **16 blocs**. Les champs météorologiques dans la région de **Kinki** couvrant la zone d'analyse ont été calculés pour 7 jours, du 8 au 14 Août 2007, par la recherche et la prévision météorologique (WRF).

Les résultats ont montré que la méthode **CFD** intégrée était un outil utile pour analyser le phénomène des îlots de chaleur.

▪ **(Ashie et al.,) en 2011 :**

L'auteur a étudié l'environnement thermique des **23 quartiers** de **Tokyo** en effectuant une simulation **CFD**.

Les présentes simulations sont des simulations en régime permanent basées sur les équations de **Navier-Stokes** avec le modèle de turbulence **standard k-ε**.

L'environnement thermique simulé est comparé aux données météorologiques observées. L'analyse **CFD** est effectuée pour 1400 temps locale standard le 31 Juillet 2005.

Les résultats de la simulation ont reproduit les tendances de la température de l'air trouvées dans les observations, telles que des températures de l'air plus basses dans les zones côtières, les rivières et les espaces verts et une température de l'air plus élevée dans les zones bâties.

L'étude a conclu que les résultats de la simulation peuvent être utilisés pour discuter de la manière optimale de la conception de la morphologie urbaine en concertation entre les acteurs de développement urbain, les résidents et les autorités locales afin de créer un espace urbain à environnement thermique confortable.

▪ **(Bo-Ot et al.,) en 2012 :**

L'auteur a étudié les effets de la création d'un espace vert sur l'aménagement de l'environnement thermique extérieur au niveau d'un quartier dans la ville Tainan, chine.

Pour les besoins de l'étude, l'auteur a utilisé un code **CFD commercial, PHOENICS**, pour analyser l'influence de la température, la direction et la vitesse du vent dans le micro-environnement du quartier.

Les équations directrices résolues par **PHOENICS** comprennent l'équation de **Navier-Stokes incompressible tridimensionnelle**, dépendante du temps et les équations de turbulences **standard k-ε** couramment utilisées.

Les résultats montrent que la température moyenne de l'air avec un espace vert est inférieure à celle d'un cas similaire sans espace vert.

Aussi, il a été constaté que les aménagements avec un espace vert au centre peuvent réduire la température la plus élevée de 0,3°C.

Et que par extrapolation la présence d'un espace vert dans un bloc urbain peut réduire la température moyenne locale à concurrence d'un degré Celsius.

▪ **(Allegrini et al.,) en 2015 :**

L'auteur a simulé le microclimat urbain en couplant le **BES (simulation énergétique des bâtiments)** avec la simulation **CFD**.

Les simulations présentées sont réalisées pour **six morphologies urbaines** différentes pour le climat de **Zürich (Suisse)**.

Les simulations **CFD** sont réalisées pour prédire le microclimat local, où les températures de surface déterminées avec une simulation d'énergie du bâtiment (**BES**) sont utilisées comme condition aux limites.

La simulation **CFD tridimensionnelle** en **RANS** est réalisée en appliquant le modèle de turbulence **k-ε** avec **Open FOAM**.

Les résultats obtenus montrent que les températures de surface des façades des bâtiments sont principalement influencées par **la distance entre les bâtiments** et que la température de l'air est plus élevée à l'intérieur de la zone urbaine.

L'auteur a observé des îlots de chaleur locaux (différence entre la température locale et la température ambiante de l'air) peut atteindre 2,5 °C.

En conclusion l'étude montre qu'il existe un grand nombre de paramètres qui influencent le microclimat local, ce qui entraîne des îlots de chaleur locaux et des structures complexes d'écoulement du vent, qui ont un effet important sur le confort humain et la demande énergétique des bâtiments dans les zones urbaines.

▪ **(Toparlar et al.,) en 2015 :**

L'auteur a utilisé la méthode **CFD** pour prédire les températures urbaines dans la région de **Bergpolder Zuid à Rotterdam**.

Des simulations **3D URANS** avec le modèle de turbulence **k-ε réalisable** ont été effectuées sur une grille de calcul à haute résolution.

Les simulations incluent l'écoulement du vent et le transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement.

Les températures de surface résultantes sont validées à l'aide de données expérimentales provenant d'images satellites infrarouges thermiques à haute résolution réalisées pendant la vague de chaleur de juillet 2006.

Les résultats montrent que les simulations **CFD** sont capables de prédire les températures de surface urbaines.

L'étude a conclu que la méthode **CFD** a le potentiel de prédire avec précision le microclimat urbain.

Les résultats des simulations **CFD** peuvent donc être utilisés pour identifier les zones à problème et pour évaluer l'effet des mesures d'adaptation climatique dans ces zones, telles que l'écologisation urbaine et le refroidissement par évaporation.

▪ **(Wang & Li,) en 2016 :**

L'auteur a mis en œuvre un nouveau modèle pour étudier la circulation des îlots de chaleur urbains en utilisant **Fluent, CFD commercial** en utilisant le modèle **standard k-ε** dans différentes **villes de Hong Kong**.

Les prévisions ont été comparées aux données existantes dans la littérature obtenues à partir de modèles de simulation de tourbillons à grande échelle **LES (Large Eddy Scale)** et de méso-échelle, ainsi qu'à des expériences en laboratoire.

L'étude a démontré la capacité du nouveau modèle à modéliser la circulation des îlots de chaleur urbains pour différents environnements urbains.

Le modèle a correctement prédit que le flux de chaleur sensible est le principal facteur influençant la force de **l'ICU (circulation d'îlot de chaleur urbain)** et la hauteur de mélange.

▪ **(Fatima & Chaudhry ,) en 2017 :**

L'auteur a utilisé la méthode **CFD** pour analyser le comportement du flux thermique autour du **campus de l'Université Heriot-Watt de Dubaï (HWUDC)**

Les équations **tridimensionnelles de RANS** ont été résolues sous le **code commercial Fluent** pour simuler les paramètres de température et de vent.

Des mesures sur le terrain ont été effectuées autour du **HWUDC** nécessaire pour les conditions aux limites de l'entrée et la validation expérimentale afin d'illustrer une représentation plus proche du scénario réel.

Les résultats montrent que la configuration et la vitesse du vent sont l'un des principaux facteurs de la formation d'une température plus élevée avec la géométrie du bâtiment.

L'étude a conclu que la température de l'air est inversement proportionnelle à la vitesse du vent autour du campus. Le travail a mis en évidence l'application du **CFD** dans la modélisation d'un microclimat urbain.

Cette recherche a permis d'approfondir l'évaluation du phénomène d'îlot de chaleur en termes de rayonnement solaire, qui est l'un des principaux facteurs des températures élevées aux **Emirats Arabes Unis**.

▪ **(Allegrini et al.,) en 2018 :**

L'auteur a étudié l'effet d'une nouvelle construction sur le microclimat urbain local pour un site de construction à **Zürich (Suisse)**.

Une simulation **CFD** couplée avec **BES (simulations énergétiques des bâtiments)** appliquée pour déterminer l'augmentation des températures de l'air et de la surface due à la présence d'une nouvelle construction.

Des simulations **3D** en régime permanent **RANS** sont réalisées en utilisant le modèle de turbulence **k-ε réalisable** avec **Open FOAM** pour étudier le microclimat urbain.

Les résultats montrent que la formation de points chauds locaux dépend fortement des géométries de construction, des matériaux de construction, de la force de flottabilité et de la direction et de la vitesse du vent.

La compréhension de la formation des îlots de chaleur locaux pourrait être améliorée par l'exécution de simulations **CFD** à résolution temporelle (par exemple **LES : large eddy simulations**).

Il a été constaté que les îlots de chaleur sont formés très localement entre les bâtiments, leur formation dépend fortement de la géométrie du bâtiment, des matériaux de construction utilisés, ainsi de la direction et de la vitesse du vent.

- **(Toparlar et al.,) en 2018:**

Des simulations **CFD** ont été effectuées pour étudier le microclimat urbain du centre **d'Anvers, en Belgique** et pour fournir des conditions microclimatiques spécifiques à un lieu, qui seront utilisées dans la simulation énergétique des bâtiments (**BES**).

Les simulations CFD utilisent des mesures météorologiques effectuées dans une zone rurale en dehors d'Anvers et dans une zone urbaine du centre ville.

Les données de mesure et les résultats des simulations CFD pour la température de l'air (°C), la vitesse du vent (m/s) et la direction du vent (°) sont extraits à trois endroits: une zone rurale en dehors d'Anvers, une zone urbaine dans le centre d'Anvers, loin d'un parc urbain et une autre zone urbaine dans le centre d'Anvers, à proximité du même parc urbain.

Les équations 3D URANS, sont résolues en tenant compte des conditions climatiques de juillet 2013. Les températures de l'air simulées sont comparées aux valeurs mesurées à l'emplacement de la station de mesure urbaine.

Les résultats démontrent que l'impact du microclimat urbain sur la demande de refroidissement des bâtiments est assez complexe car il peut varier de manière significative au sein d'une même zone urbaine en fonction de l'emplacement du bâtiment dans la zone urbaine concernée, du type de bâtiment et de la période de construction du bâtiment.

L'étude conclut que les concepteurs et les ingénieurs qui se concentrent sur la conception de bâtiments à faible consommation d'énergie devraient également tenir compte de l'importance de l'utilité de CFD dans la production urbaine.

▪ (Antoniou et al.,) en 2019 :

L'auteur a appliqué la méthode **CFD** pour simuler un microclimat urbain dans un quartier dense et très hétérogène de **Nicosie, à Chypre**.

L'auteur a validé ses résultats en utilisant un ensemble de données de haute résolution de mesures sur site de la température de l'air, de la vitesse du vent et de la température de surface pour la même zone.

Les simulations **CFD** ont été réalisées en utilisant les équations **3D URANS** en combinaison avec le modèle de turbulence **k-ε réalisable**.

Les résultats montrent que les températures de surface les plus élevées sont observées dans les grands plafonds métalliques et les températures de surface les plus basses dans les zones vertes.

Il a été constaté que les équations **3D URANS** peuvent prédire la température de l'air dans un environnement urbain réel.

▪ (Piroozmand et al.,) en 2020 :

L'auteur a proposé une approche couplée pour l'étude de l'environnement urbain micro-atmosphérique pendant les vagues de chaleur.

Un modèle **CFD** à **micro-échelle** couplé avec le modèle atmosphérique régional **COSMO** à fin de tester des simulations de flux urbains dans une zone urbaine dense de **Zurich, en Suisse**, au cours d'une journée de canicule et d'une journée avec de forts vents.

Les simulations ont été réalisées pour deux jours échantillons: une journée avant le déclenchement de la canicule de deux semaines le 23 Juin 2015 et une deuxième journée d'été typique choisie au plus fort de la canicule le 2 Juillet 2015.

Les résultats montrent que l'approche couplée peut fournir une carte des vents et des températures à haute résolution.

L'étude a conclu que l'approche couplée peut être une base de référence vers des modèles **CFD** plus fiables pour l'étude des flux urbains et du microclimat.

Conclusion

Dans ce chapitre, une revue de la littérature sur l'îlot de chaleur urbain et son intensité dans le monde a été présentée.

Il a été montré qu'il y a une augmentation de la température des zones urbaines par rapport aux zones rurales environnantes.

L'ICU est un phénomène très important notamment dans les périodes chaudes. L'effet d'ICU dépend des régions et varie en fonction de la taille de la ville, de la topographie, de la végétation, de l'urbanisation d'une zone, de la saison de l'année et de l'heure de la journée et également selon les conditions météorologiques dominantes.

Les différentes techniques cités dessus, par rapport à l'**EBM** et à d'autres approches, la méthode **CFD** fournit des avantages comme la modélisation explicite de la géométrie urbaine et des bâtiments et la résolution des flux avec une haute résolution spatiale.

Considérant l'évolution de l'urbanisation, les études sur le microclimat urbain continueront à développer, les méthodes numériques pour analyser le microclimat urbain sont des outils majeurs pour les ingénieurs, les architectes, les urbanistes et les décideurs politiques pour comparer les différentes conceptions urbaines.

Le **CFD** est l'un de ces méthodes numériques, qui est généralement utilisé dans le climat urbain à plusieurs échelles climatiques et se décline comme une méthode à la fois d'atténuation et d'adaptation face au changement climatique global accentué par les ICU.

Chapitre IV

C.F.D : Outil d'adaptation des milieux urbains au changement climatique

IV. 1 Introduction

La ville est un environnement dans lequel de très nombreux phénomènes physiques interagissent à différentes échelles. La morphologie urbaine est souvent complexe et hétérogène, alors que les matériaux utilisés sont divers et composites (matières minérales et végétales).

La modélisation de cette complexité et diversité de la ville exige alors une connaissance détaillée des différents phénomènes physiques et des éléments qui la composent. Afin de procéder à la modélisation, chaque phénomène physique est décrit et présenté par des équations mathématiques.

La formulation mathématique permet de lier les différentes variables des phénomènes étudiées : la température, la pression, la vitesse du vent, lesquels relèvent du domaine de la dynamique des fluides. Un modèle numérique est ainsi définie par l'ensemble des équations décrivant chacun des phénomènes étudié et les éléments qui le composent.

Le CFD est adopté comme méthode pour étudier le climat urbain d'Oran afin d'identifier dans un premier temps le phénomène de l'îlot de chaleur urbain et ensuite évaluer le phénomène de l'ICU et enfin pour proposer des pistes menant à la mise en place des stratégies d'atténuation et d'adaptation au changement climatique à Oran.

Dans ce chapitre nous allons commencer par l'histoire de l'adaptation et son évolution dans les différents rapports du GIEC. Ainsi, nous décrivons l'outil CFD, en détails nous citons tous les étapes d'une simulation CFD, ensuite nous présentons les fondements mathématiques, les méthodes de discrétisation et les différents modèles de turbulence.

IV.2 Histoire de l'adaptation

A l'échelle globale, dans le contexte de la lutte contre le changement climatique, les villes doivent être engagées dans un volet d'atténuation particulièrement par des mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre en raison que leurs espaces urbains sont considérés comme un enjeu majeur des consommations énergétiques. Ce volet est essentiellement lié au concept d'adaptation.

Les recherches scientifiques sur les changements climatiques contribuent à appréhender les impacts directs et indirects du climat sur les systèmes naturels et humains, ainsi qu'à réfléchir de comprendre les concepts de résilience, de vulnérabilité et de l'adaptation de ces systèmes.

Au cours des dernières années, dans la littérature scientifique, le concept de vulnérabilité des systèmes naturels et humains face aux enjeux des changements climatiques est devenu très important.

Ainsi, la notion de résilience doit être bien précisée pour faire face aux aléas climatiques.

Cependant, le terme d'adaptation présente une longue popularité. Théoriquement, ces trois aspects évoluent avec la même manière ou différemment en s'influençant de temps en temps l'un à l'autre.

Toutes fois, la compréhension du concept de l'adaptation a été développée depuis sa première définition comme une réponse aux impacts du changement climatique.

IV.2.1 Evolution des définitions du terme adaptation

L'adaptation aux changements climatiques est considérée comme un processus qui permet aux sociétés d'aboutir des solutions et réponses aux variations de leur environnement, a pour objectif de réduire les impacts négatifs des changements climatiques, ainsi d'être bénéficiaires des conséquences positives.

Cependant, toutes les stratégies d'adaptation adoptées visent à augmenter la résilience et limiter la vulnérabilité des systèmes naturels et humains face aux aléas climatiques.

La notion d'adaptation au changement climatique a pris en considération dans toutes les études sur le changement climatique notamment dans les différents travaux réalisés par le

groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), dont elle définit dans tous ses rapports d'évaluation :

En 1995, dans son deuxième rapport (AR2), Le GIEC est défini l'adaptation comme un « Ajustement des systèmes naturels ou des systèmes humains face à un nouvel environnement ou un environnement changeant. L'adaptation aux changements climatiques indique l'ajustement des systèmes naturels ou humains en réponse à des stimuli climatiques présents ou futurs ou à leurs effets, afin d'atténuer les effets néfastes ou d'exploiter des opportunités bénéfiques. On distingue divers types d'adaptation, notamment l'adaptation anticipée et réactive, l'adaptation publique et privée, et l'adaptation autonome et planifiée ».

Toutes fois, une autre définition de l'adaptation a été dotée par le GIEC dans le troisième rapport (AR3), selon le glossaire du (GIEC, 2001), l'adaptation étant définie comme une « Démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences. Pour les systèmes humains, il s'agit d'atténuer les effets préjudiciables et d'exploiter les effets bénéfiques. Pour les systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat attendu ainsi qu'à ses conséquences ».

En effet, la définition de l'adaptation montrée dans le quatrième rapport (AR4) en 2007 présente des termes similaires que celle dans le deuxième rapport (AR2). Cette définition étant donnée comme des « Initiatives et mesures prises pour réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et humains aux effets des changements climatiques réels ou prévus. On distingue plusieurs sortes d'adaptation : anticipative ou réactive, de caractère privé ou public, autonome ou planifiée. Citons à titre d'exemple l'édification de digues le long des cours d'eau ou des côtes et le remplacement des plantes fragiles par des espèces résistant aux chocs thermiques ».

Néanmoins, en 2014, la définition de l'adaptation présentée dans le cinquième rapport (AR5) ainsi celle présentée dans le glossaire (GIEC, 2018) est la même définition indiquée dans le troisième rapport (GIEC, 2001).

Dés lors, dans le cinquième rapport (2014), le GIEC démontre que l'adaptation devenue une des primordiales préoccupations du phénomène du changement climatique.

D'ailleurs, à cause de la forte consommation d'énergie liée à l'augmentation du taux de population mondiale dans les villes. En plus, la problématique de l'adaptation au changement climatiques du aux activités humaines nécessite la mise en place des stratégies et des mesures efficaces qui peuvent faire face à ces impacts négatifs.

Au sens large, l'adaptation au changement climatique indique les stratégies, les décisions et des mesures qui ont pour objectif la réduction de la vulnérabilité des systèmes naturels et humains face aux impacts du réchauffement climatique observé et projeté .

Par ailleurs, le terme adaptation signifie la capacité des systèmes naturels et humains à s'ajuster, et donc une perspective dynamique aussi évolutive du fonctionnement de la société.

En outre, les stratégies d'adaptation vient de compléter les mesures d'atténuation adoptées .Ces stratégies visent à limiter les émissions des gaz à effet de serre vers l'atmosphère afin de protéger la planète devant toute perturbation du système climatique liée aux effets anthropiques.

A partir de l'année 1992, La notion d'adaptation et d'atténuation sont considérée comme étant les principaux piliers de la politique mondiale de l'évolution du climat et elles ont été adoptée dans la convention cadre des nations unis sur le changement climatique (CCNUCC).

Comme la politique sur l'atténuation nécessite un grand accord international pour limiter le réchauffement climatique à un seuil précis, donc, la compréhension de la question de l'adaptation au changement climatique demeure très complexe.

Ainsi, l'adaptation joue un rôle très important dans les négociations sur le climat qui se focalise aujourd'hui sur trois axes :

- La définition des objectifs d'adaptation plus qualitatifs.
- La mise en ouvre des enjeux de coopération et l'augmentation des capacités du développement technologique.
- La question du financement.

IV.3 Problématique d'adaptation au changement climatique dans les villes

La problématique d'adaptation au changement climatique dans les villes est un sujet très important et très développé pendant ces dernières années. Les études sur le changement climatique ont été dans un premier temps essentiellement portées sur le concept de l'atténuation (réduction des émissions de gaz à effet de serre) à fin de limiter le réchauffement climatique planétaire.

Néanmoins, l'enjeu de l'adaptation au changement climatique dans les villes est primordial puisque toutes les études scientifiques sur l'évolution future du climat montrent

qu'un changement climatique sans équivoque sera très marqué à l'échelle de la planète caractérisé par une hausse de température moyenne mondiale au cours du 21ème siècle.

Les populations mondiales devront donc faire face à ces nouvelles conditions climatiques et, plus particulièrement, dans les villes vulnérables au changement climatique en raison de leur densité et compacité urbaine.

En effet, l'objectif d'une stratégie d'adaptation est d'anticiper les impacts actuels et futurs du changement climatique sur une région donnée.

Les outils des réponses d'adaptation sont souvent utiles pour assurer une meilleure organisation et mettre en place des actions efficaces. Pour faire face à un aléa climatique, il est nécessaire de mettre en œuvre les démarches d'adaptation suivantes:

- L'évaluation de risque du système considéré et sa vulnérabilité face au climat observé actuellement et projeté.
- L'analyse de cette vulnérabilité selon les différents scénarios climatiques futurs du GIEC.
- L'estimation des impacts climatiques directs et indirects sur les systèmes naturels et humains.
- L'identification et l'évaluation des options d'adaptation.

Les stratégies d'atténuation et d'adaptation doivent être évoluées avec la même dynamique et élaborées en cohérence, de manière à ce que l'une n'arrive pas à dégrader l'intensité de l'autre.

IV.4 Mesures et outils d'adaptation et d'atténuation des îlots de chaleur urbain

A l'échelle urbaine, on peut définir l'adaptation des espaces urbains aux changements climatiques comme « un processus qui permet aux spécialistes de la ville (climatologue, géographes, urbanistes, etc.) de s'ajuster en réponse aux modifications climatiques sur toutes ses échelles (micro, méso, locale) à pour objectif de limiter les effets négatifs des changements climatiques observés et projetés ».

Depuis l'épisode caniculaire **d'Août 2003** et ses conséquences néfastes, les villes deviennent plus vulnérables. Donc, pour s'adapter aux impacts du réchauffement climatique, les villes doivent avoir une approche stratégique qui consiste à réduire les effets du phénomène de l'îlot de chaleur urbain qui a été intensifié par cette canicule.

L'adaptation devient certainement une urgence et une utilité obligatoire pour réfléchir aux impacts actuels et futurs du climat sur la ville dans plusieurs domaines à forte consommation énergétique comme le secteur de l'urbanisme.

Penser à s'adapter aujourd'hui est peu coûteux que chercher de s'adapter demain lorsque les impacts du changement climatique seront très aggravés.

L'adaptation stratégique des espaces urbains nécessitent des efforts complémentaires développés par les spécialistes de la ville qui peuvent leurs aider à élaborer de plusieurs recherches sur cette question.

Toutes les recherches actuelles sur la question de l'adaptation des villes au changement climatique montrent que la nature en ville serait l'un des facteurs permettant de faire face contre les effets négatifs du réchauffement climatique planétaire notamment le phénomène de l'îlot de chaleur urbain.

L'adaptation des milieux urbains doit réduire autant que possible les consommations énergétiques qui provoquent les émissions de gaz à effet de serre ainsi le phénomène d'îlot de chaleur (rejets d'air réchauffé en milieu urbain en dehors des bâtiments).

Cela passe par la détermination de la relation entre la géométrie urbaine du bâtiment et le climat, pour réduire un peu les besoins d'utilisation d'énergie. Certaines mesures doivent être prises dès lors toute conception urbaine sont citées comme suit :

- L'implantation de la végétation dans la ville (les toits, les murs...) ainsi la mise en place des systèmes de la présence d'eau dans les centres urbains.
- L'utilisation des surfaces et des matériaux de constructions à faible albédo à fin de limiter l'absorption du rayonnement solaire par les bâtiments.
- Le choix des formes urbaines qui limitent les îlots de chaleur urbains.
- La protection des bâtiments du soleil.
- L'orientation des bâtiments par rapport au vent dominant pour profiter de la ventilation naturelle.

L'adaptation au changement climatique notamment dans les épisodes caniculaires signifie donc de rechercher des outils qui nous aide à maintenir le confort d'été en limitant l'effet du phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Pour que les villes demeurent résistantes aux effets à long terme du changement climatique, les responsables de la ville doivent adopter les principes d'adaptation dans le domaine de l'urbanisme car la planification urbaine d'une ville peut être examinée.

Pour atténuer les effets de la chaleur dans les villes, il est utile de simuler la chaleur urbaine dans les villes à l'échelle-micro (exemple d'un quartier) en utilisant des outils de simulation numériques afin de déterminer les zones de la ville les plus vulnérables à la chaleur.

Aussi, il est utile d'élaborer les différentes interactions possibles entre les mesures de planification urbaine et d'adaptation au changement climatique à pour objectif de comprendre comment les approprier.

À cette fin, la méthode de la **Dynamique des fluides computationnelle (CFD)** est considéré comme un outil d'évaluation des interactions entre adaptation et atténuation pour aider les villes à identifier le phénomène d'îlot de chaleur urbain en proposant des mesures d'atténuation et d'adaptation.

IV.5 CFD : Outil de conception de la ville durable et climatiquement confortable

Les outils de simulation numériques sont considérés comme un moyen fondamental pour les ingénieurs et les chercheurs dans le domaine de la météorologie et de la climatologie urbaine.

Aujourd'hui, ils sont largement utilisés dans les études sur le climat urbain et les études thermo- aérauliques dans les tissus urbains. Le CFD est l'un des domaines les plus récents, développés dans les sciences appliquées.

Pour résoudre les équations mathématiques des phénomènes étudiés une grande diversité d'outils a été développée. Tous ces outils s'appuient sur différentes stratégies de définition du modèle numérique. Ces dernières vont dépendre par exemple du domaine considéré, de l'objectif de la simulation, ou encore des hypothèses qui sont formulées.

Pour traiter ces phénomènes physiques (la température, la pression, la vitesse du vent) et il est fait appel au domaine de la dynamique des fluides.

IV.5.1 Histoire du CFD

Historiquement, lorsque les ordinateurs n'étaient pas assez matures pour résoudre de grands problèmes numériques, deux méthodes étaient utilisées pour résoudre des problèmes de dynamique des fluides à savoir les méthodes : analytiques et expérimentales.

Si les méthodes analytiques étaient réduites uniquement à la résolution des cas simples comme : la résolution de géométrie unidimensionnelle 1D ou 2D, l'écoulement 1D et l'écoulement régulier (on parle d'écoulement laminaire, c'est-à-dire que le fluide est stationnaire), les méthodes expérimentales quant à elles exigeaient beaucoup de ressources telles que l'électricité, des équipements coûteux, le contrôle des données et le post-traitement des données (Jamshed ,2015).

Cependant, aujourd'hui au regard et compte tenu des évolutions technologiques et techniques dans le domaine du numérique et de l'industrie informatique, les techniques utilisés dans le domaine de la mécanique des fluides ont énormément évolué. Si bien que, aujourd'hui, quelques ordinateurs personnels de bonne configuration peuvent être utilisés pour exécuter un code CFD qui peut traiter facilement des géométries d'écoulement complexes.

Le CFD est l'abréviation de «Computational Fluid Dynamics» ou « Dynamique des fluides computationnelle ».

Il s'agit d'un domaine de la physique qui inclut toutes les méthodes numériques permettant d'étudier un écoulement de fluide (liquides et gaz) dans un environnement donné. La méthode CFD permet de modéliser le comportement des fluides.

Ainsi, grâce à la méthode CFD, les conceptions peuvent être établies avec beaucoup de certitudes. Aussi, les scénarios peuvent être simulés avec beaucoup de précision.

Et enfin, les résultats calculés sont affichés sous forme de présentation graphique, permettant une compréhension facile.

Pendant longtemps la méthode Dynamique des fluides numérique (CFD) a été utilisé dans le secteur de l'aérospatial avant d'être adoptée par le secteur de la construction automobile.

Plus tard, d'autres secteurs d'activités ont découvert l'utilité de la méthode de la méthode CFD dans la réduction des coûts en matière d'analyse et d'expérimentation.

La généralisation de l'utilisation du CFD permet, désormais, la modélisation et les simulations dans les domaines suivants:

- Aérodynamique.
- La distribution des conditions climatique dans des espaces spécifiques.

- L'efficacité des systèmes de traitement climatique (tels que le positionnement des entrées d'air).
- Hydrodynamique.
- Energies Renouvelables.
- Etude des déplacements des poussières.
- Génie de l'environnement.
- Génie maritime.
- Ventilation industrielle.
- Etudes thermo-aéraulique.
- Météorologie.
- **Urbanisme** : confort et sécurités des citadins, étude du microclimat urbain(courants d'avancement, canalisation du vent entre les bâtiments, transfert thermique)

IV.5.2 Domaines d'applications du CFD et ses objectifs

Le dénominateur commun entre les domaines d'application, les objectifs et les méthodes spécifiques au CFD est sans aucun doute les simulations qu'il permet.

En effet, le CFD est une approche de simulation utilisée pour analyser les phénomènes thermiques et des fluides complexes.

Les simulations projetées à travers le CFD permettront de prédire l'évolution de la pression, la température, la vitesse du vent couplée à l'expérience. Cette simulation permettra aussi de mieux comprendre les phénomènes de transferts thermiques en jeu dans le milieu urbain.

Les simulations sont généralement exécutées pour différents scénarios en testant notamment les comportements sous différents niveaux d'occupation, différentes conditions climatiques, différents modes de service, avec différentes ouvertures entre les espaces, etc.

L'un des avantages du CFD est d'accueillir des informations locales bien détaillées sur le système simulé.

Toutes fois, en préambule à toute utilisation, il convient de disposer d'une étude de validation réalisée par l'utilisateur de l'outil.

La validation par l'utilisateur est un point de passage essentiel car, au-delà de la validation de l'outil, il impose à l'utilisateur de s'interroger sur le contenu et les limites de l'outil.

Les paramètres clefs identifiés comme particulièrement influents sur le résultat d'une simulation sont les suivants :

- La génération du maillage,
- L'utilisation de conditions aux limites adaptées,
- la définition du terme source et son introduction dans l'outil de modélisation,
- La modélisation de la turbulence.
- Le choix des solutions les plus efficaces.

IV.6 Etapes des modèles CFD

Toute simulation numérique par le biais du CFD est doit obligatoirement suivre certaines étapes .Ainsi, la simulation commence par la création de la géométrie du domaine étudié. Il s'agit dans cette première étape de procéder à la création et du choix du maillage. Le maillage est généré automatiquement selon la géométrie du modèle et à partir des conditions aux limites

Aussi, l'étape de la définition des modèles de turbulence est importante, durant cette étape, il s'agit de définir les propriétés physique et les conditions aux limites (**Inlet /Outlet**).

En suite, l'étape de la résolution s'effectue généralement en discrétisant un volume de calcul en un maillage d'une multitude de petits éléments (plusieurs millions dans certains cas).

En fin, dans la dernière étape les résultats sont examinés pour analyser la solution du problème et extraire les données utiles.

Dans cette section, les différentes étapes dans CFD sont résumées comme suit et présentées dans la figure IV.1 :

IV.6.1Création de la géométrie

La résolution d'un problème CFD débute par la création de la géométrie du système étudié en 2D ou 3D.

Pour cette création de géométrie, un programme de CAO (**Conception Assistée par ordinateur**) est intégré dans tous les programmes CFD.

Cependant, il est possible de dessiner la géométrie du système étudié en dehors du programme CFD avec n'importe quel programme CAO puis procéder à son importation dans le programme de génération de grille.

Dans le cadre de la restitution géométrique de la morphologie urbaine, il serait plus pratique selon notre humble expérience d'utiliser un outil de conception assisté par ordinateur (CAO) comme exemple **Autocad**.

Ceci s'explique par le fait que la morphologie urbaine se caractérise par une complexité et diversité des aspects géométriques et volumétriques souvent irréguliers et que l'outil de dessin intégré au **CFD** ne peut malheureusement pas effectuer leur restitution géométrique.

IV.6.2 Génération de grille (maillage)

Un maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu, ou aussi, une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés finis et bien définis.

Un maillage divise une géométrie en plusieurs éléments. Ceux-ci sont utilisés par le solveur CFD pour construire les volumes de contrôle.

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, compte tenu, son influence sur la solution calculée.

Si le maillage est mal conditionné, il est possible que les résultats obtenus soient très imprécis. C'est pourquoi, il est important d'évaluer la qualité de maillage avant d'effectuer les simulations pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant.

En résumé de la réussite de l'étape de maillage dépend la qualité et la fiabilité du résultat final de la simulation .Nous considérons que le maillage est un pré requis indispensable dans toute simulation CFD.

IV.6. Définition des modèles

Considérant que dans les écoulements du fluide se présentent sous deux types : l'un laminaire et l'autre turbulent.

Un écoulement est dit turbulent dans la dynamique des fluides lorsque le mouvement des particules du fluide est irrégulier.

Un écoulement est dit laminaire lorsque l'écoulement d'un fluide où l'ensemble du fluide s'écoule plus ou moins dans la même direction.

En général, les valeurs par défaut sont le meilleur choix, mais dans certains cas, l'utilisateur peut trouver des paramètres plus appropriés.

Dans la plupart des programmes **CFD**, il est également possible d'écrire son propre modèle en utilisant d'autres langages de programmation.

IV.6.4 Définition des propriétés physiques du fluide

Un fluide définit lorsque les molécules d'un corps ont moins d'adhésion et glissent librement les unes sur les autres (liquides) ou se déplacent indépendamment les unes des autres (gaz), de façon que le corps prenne la forme du volume qui le contient.

Une propriété physique est une propriété mesurable dont la valeur décrit un état d'un système physique.

Un fluide se définit par ses propriétés physiques:

- **La masse volumique** : nommé également la densité volumique de masse, elle est définie par le rapport de la masse d'un corps à son volume (unité SI : $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; unité courante: $\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$ ou $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) à 0 °C et sous une pression atmosphérique égal à 760 mm de mercure.
- **La viscosité** : est considérée comme une **propriété spécifique des liquides**.

Elle exprime le coefficient de frottement du liquide sur lui-même, donc sa résistance à l'écoulement dans les conduites. On distingue :

- ✓ la viscosité absolue ou dynamique (généralement notée μ et exprimée en $\text{Pa} \cdot \text{s}$) pour une vitesse de déformation définie).
- ✓ la viscosité cinématique (exprimée en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$), rapport de la viscosité dynamique à la masse volumique du fluide.

Dans notre cas d'étude le fluide retenu est l'air, la propriété physique de l'air est la suivante :

La masse volumique de l'air , $\rho= 1,2 \text{ kg/m}^3$

Toutes les propriétés physiques des fluides doivent être définis telles que : la viscosité et la densité, ainsi que leur rapport avec la température et la pression. Certaines sont intégrées dans le logiciel **CFD**, d'autres par contre sont à rechercher dans les bases de données disponibles.

IV.6.5 Définition des conditions aux limites et initiales

En mathématiques, une **condition aux limites** est une contrainte sur les valeurs que prennent les solutions des équations aux dérivées ordinaires et des équations aux dérivées partielles sur une frontière.

Il existe un grand nombre de conditions aux limites possibles, en fonction de la formulation du problème, du nombre de variables en jeu, et (de manière plus importante) de la nature de l'équation.

Les **conditions initiales** se définissent comme étant les éléments nécessaires à la détermination de la solution complète et si possible unique d'un problème, éléments qui décrivent l'état du système à l'instant initial.

Lors de la définition des conditions initiales, toutes les conditions d'entrée (**Inlet**) et de sortie (**Outlet**) doivent être bien déterminées, exemple la température du mur. Aussi, les conditions aux limites résultantes périodiquement, doivent être à leur tour précisées.

Dans notre cas, les paramètres de la vitesse du vent et la température de l'air sont utilisés comme conditions d'entrée ou de sortie de l'écoulement dans le modèle.

IV.6.6 Résolution numérique

La résolution des équations de Navier Stocks aide à la solution numérique relativement à la distribution de la pression, les gradients de température et les champs de vitesses du vent.

En effet, le solveur du code CFD utilisé **résout de manière approchée les équations au niveau de chaque nœud du maillage**, tout en respectant les principes fondamentaux de la physique (conservation de masse et d'énergie).

Dans le cas des problèmes instables, il est conseillé d'utiliser des méthodes implicites ou explicites d'évolution dans le temps et de spécifier des schémas numériques pour améliorer la convergence.

IV.6.7 Analyse des résultats -Post-traitement

Le premier objectif de cette dernière étape est de permettre un post-traitement en vue d'examiner la qualité de la solution et d'expliquer que cette solution est indépendante de la taille de la grille, du critère de convergence et des schémas numériques.

L'analyse des résultats de la simulation finale fournis donc des informations locales sur les flux, les températures, etc.

L'analyse des systèmes complexes étudié jusqu'à lors par des méthodes classiques donnait des résultats peu précis.

Cependant, aujourd'hui, grâce au **CFD** il est possible de pouvoir prétendre à des réponses plus précises aux questions complexes posées.

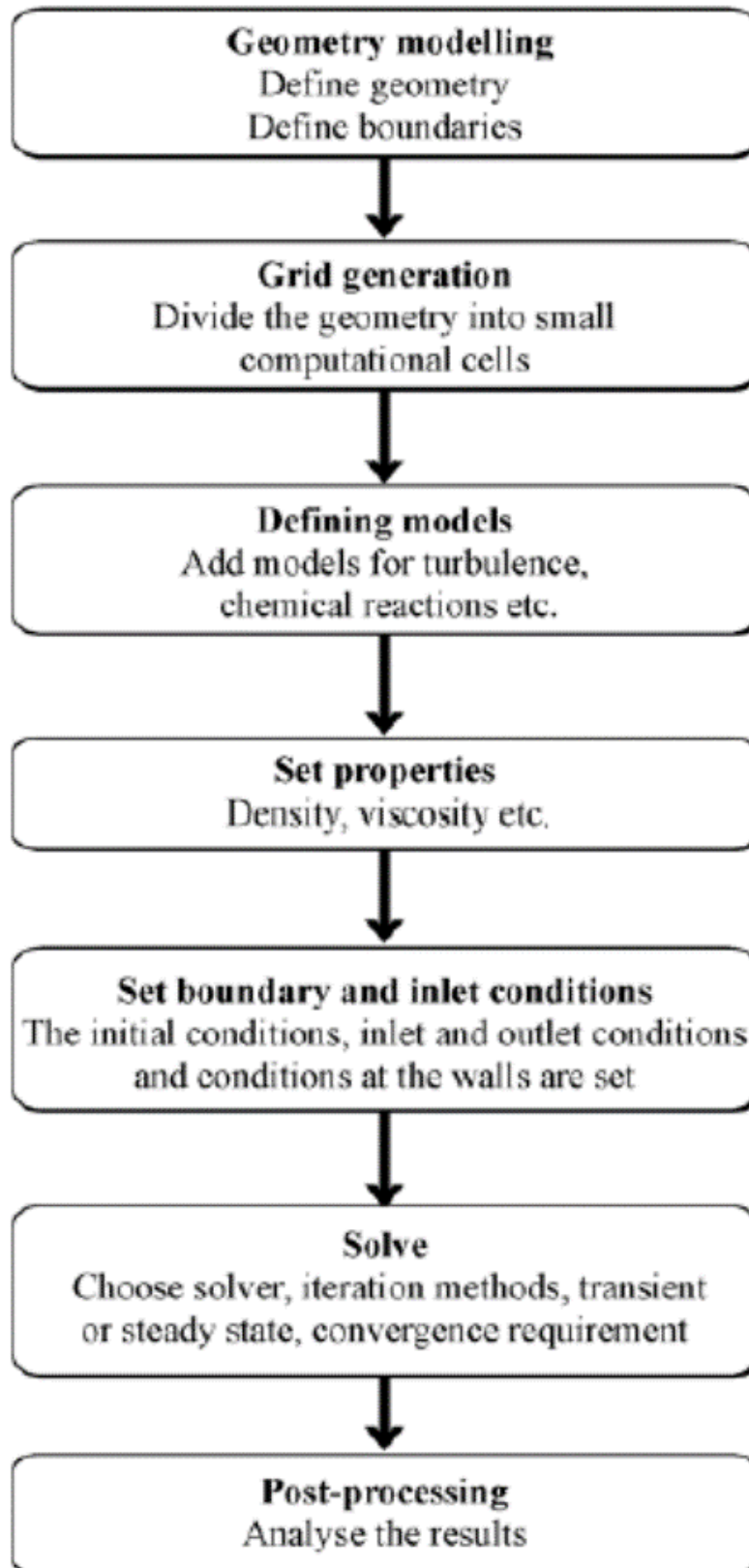


Figure IV.1: Différentes étapes des simulations CFD

Source : (Andersson, Andersson, & Håkansson, 2011)

IV.7 Fondements mathématiques du CFD

Le **CFD** est simplement le calcul numérique qui consiste à résoudre dans une géométrie donnée les équations fondamentales de la mécanique des fluides, que l'on peut éventuellement coupler aux équations de transfert thermique ou de réaction chimique.

Les équations directrices de la dynamique des fluides sont les **équations de Navier-Stokes**. Elles sont basées sur la loi de conservation des propriétés physiques des fluides. On cite: l'équation de la conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement (Versteeg & Malalasekera, 2007).

La masse d'un fluide est conservée lorsque :

- Le taux de changement de la quantité de mouvement est égal à la somme des forces sur une particule de fluide (**deuxième loi de Newton**).
- Le taux de changement d'énergie est égal à la somme du taux d'addition de chaleur et du taux de travail effectué sur une particule de fluide (**première loi de la thermodynamique**)

IV.7.1 Equation de Conservation de la masse

Une **équation de conservation**, dans plusieurs domaines de la physique, est pour une quantité conservée dans son mouvement, une équation mis la liaison entre sa variation en fonction du temps (notamment la masse, la quantité de mouvement et l'énergie) à sa variation dans l'espace.

En mécanique des fluides, le principe de conservation de la masse est défini par **l'équation de continuité** sous plusieurs formes différentes : locale conservative (dérivée en temps normale), locale non conservative (la dérivée en temps suit la particule dans son mouvement), ou intégrale.

Donc, l'équation de la conservation de la masse est également connue sous le nom **d'équation de continuité**.

L'équation de continuité s'écrit comme suit:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad \text{Eq.1}$$

Avec

$$\vec{U} = [u, v, w]$$

- ✓ Le premier terme présente la variation de la densité (ρ) en fonction du temps (t)
- ✓ Le second terme montre le gradient d'advection de fluide au travers de sa vitesse (\vec{U}).

IV.7.2 Equation de conservation de la quantité de mouvement

Dans le domaine de la physique, la **quantité de mouvement** est la grandeur physique liée à la masse et la vitesse d'un corps.

Ainsi, la quantité de mouvement d'un système concerne l'énergie et les valeurs qui se conservent pendant les interactions entre les éléments d'un système.

La loi de la **conservation de la quantité de mouvement** ou le principe de la **conservation de la quantité de mouvement** montre que la force d'un système isolé étant constante.

La conservation de la quantité de mouvement est basée sur la deuxième loi de Newton qui s'exprime par :

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Où

m : est la masse de la particule de fluide.

a : est son accélération.

Cette équation se présente par la formulation suivante:

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho\vec{V} \times \vec{V}) = -\vec{\nabla}p + \vec{\nabla} \cdot \vec{\tau} + \rho\vec{f} \quad \text{Eq.2}$$

Avec:

$\rho \vec{V}$: présente la variation de la quantité de mouvement,

$\vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V} \times \vec{V})$: représente le gradient d'advection de la quantité de mouvement,

$\vec{\nabla} p$: le gradient de pression ,

$\vec{\nabla} \cdot \bar{\tau}$: gradient du tenseur des contraintes visqueuses ,

\vec{f} : les forces volumiques .

IV.7.3 Equation de conservation de l'énergie

La **conservation de l'énergie** est l'un des principes de la physique, elle désigne que l'énergie totale d'un système isolé est constante tout au long du temps.

Ce principe, largement vérifié expérimentalement, est de première importance en physique, et impose que pour tout phénomène physique l'énergie totale initiale du système isolé soit égale à l'énergie totale finale, donc que de l'énergie passe d'une forme à une autre durant le déroulement du phénomène, sans création ni disparition d'énergie.

L'équation de l'énergie repose sur le principe de la conservation de l'énergie. Elle est également appelée la première loi de la thermodynamique. Sa forme générale est donnée comme suit :

$$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho E \vec{V}) = -\vec{\nabla} \cdot (p \vec{V}) + \vec{\nabla} \cdot (\bar{\tau} \cdot \vec{V}) + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} - \vec{\nabla} \cdot (\vec{q}) + r + S \quad \text{Eq.3}$$

Avec:

$\frac{\partial(\rho E)}{\partial t}$: variation d'énergie massique (E).

$\vec{\nabla} \cdot (\rho E \vec{V})$: gradient d'advection d'énergie massique.

$\vec{\nabla} \cdot (p \vec{V})$: gradient de travail de la pression.

$\vec{\nabla} \cdot (\bar{\tau} \cdot \vec{V})$: gradient de l'énergie de dissipation des effets visqueux.

$\rho \vec{f} \cdot \vec{V}$: travail des forces volumiques.

$\vec{\nabla} \cdot (\vec{q})$: gradient de flux de chaleur perdu par conduction thermique.

r : transferts volumiques d'énergie par rayonnement.

S : sources d'énergie.

IV.8 Méthodes de discrétisation

La méthode de discrétisation est la transposition d'un état continu vers un autre équivalent discret. Généralement, cette manière forme une étape très importante à la résolution numérique d'un problème ou sa programmation sur ordinateur.

En **CFD**, pour résoudre les équations de Navier-Stokes, trois approches sont utilisées : la méthode des différences finies (MDF), la méthode des volumes finis (MVF) et la méthode des éléments finis (MEF).

IV.8.1 Méthode des différences finies (MDF)

La méthode des différences finies est une technique usuelle a pour objectif de trouver des solutions approximatives des équations aux dérivées partielles qui comprend la résolution d'un système de relations (schéma numérique) liant les valeurs des fonctions inconnues en certains points suffisamment proches les uns des autres.

En effet, cette méthode est considérée comme étant la plus simple à utiliser .Elle est composée de deux étapes :

- ✓ La discrétisation par l'approche des différences finies
- ✓ La convergence du schéma numérique a eu quand la distance entre les points devienne petite.

La méthode des différences finies (**MDF**) était l'une des premières méthodes et a été utilisée par **Euler en 1768**.

La méthode des différences finies est liée à l'application à la forme différentielle des équations de base. Ce principe consiste à utiliser un développement en série de Taylor pour la discrétisation des dérivées des variables de l'écoulement (Blazek ,2015).

L'avantage de cette méthode est caractérisé par l'obtention des approximations de grands ordres une haute précision et le l'inconvénient de cette méthode est la nécessité d'une grille structurée (Johnson ,2015).

IV.8.2 Méthode des volumes finis (MVF)

La méthode des volumes finis est facile à mettre en ouvre pour la résolution d'une manière numérique des partielles. Cette méthode se basent sur les lois de conservation et la formulation intégrale des équations Navier-Stokes/Euler.

McDonald est le premier qu'a utilisé cette méthode en 1971 à fin de simuler des flux invisibles en 2D. La méthode des volumes finis discrétise les équations directrices en divisant en premier temps : l'espace physique en un certain nombre de volumes de contrôle (Blazek ,2015).

La MVF est considérée comme un cas spécifique de MEF.La méthode des volumes finis se base sur l'intégration des équations directrices définies précédemment sur un volume de contrôle dans lequel les différentes variables de l'écoulement seront estimées uniformes.

Le principal avantage de la méthode des volumes finis est que la discrétisation spatiale est réalisée explicitement dans l'espace physique. L'autre avantage de la méthode des volumes finis réside dans sa souplesse. Elle est particulièrement utilisée sur des grilles structurées et non structurées (Blazek ,2015).

IV.8.3 Méthode des éléments finis (MEF)

La méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles ce qui permet l'analyse du comportement dynamique de plusieurs systèmes physiques comme: mécaniques, thermodynamiques, etc.

La **MEF** est considéré comme l'un des outils de mathématiques appliquées. Cette méthode a été présentée pour la première fois par **Turner et al en 1956**, elle peut offrir un maillage non structuré et les nœuds de la grille sont uniquement utilisés pour atteindre une précision élevée (Johnson ,2015).

Si cette méthode a une formulation intégrale et une grille non structurée, elle est applicable pour les écoulements à géométrie complexe et convient particulièrement aux fluides non newtoniens.

L'avantage de cette méthode est la représentation d'un grand nombre de formes de structures à l'aide du modèle analytique général.

IV.9 Classification des modèles de turbulence

La modélisation de la turbulence est appliquée pour la prédiction du comportement d'un écoulement turbulent.

Il existe plusieurs approches de modélisation de la turbulence dans le CFD, on cite :**RANS** (Reynolds Averaged Navier Stokes),**LES** (Large Eddy Simulation) et **DNS** (Direct Numerical Simulation),voir la figure IV.2 :

Abréviations:

DNS = Direct Numerical Simulation

LES = Large-Eddy Simulation

RANS = Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations

1st-order = first-order closures

2nd-order = second-order closures

RST = Reynolds-Stress Transport models

ARS = Algebraic Reynolds-Stress models

0-, 1-, 2-Eq. = zero- (algebraic),

One-, Two-equations models.

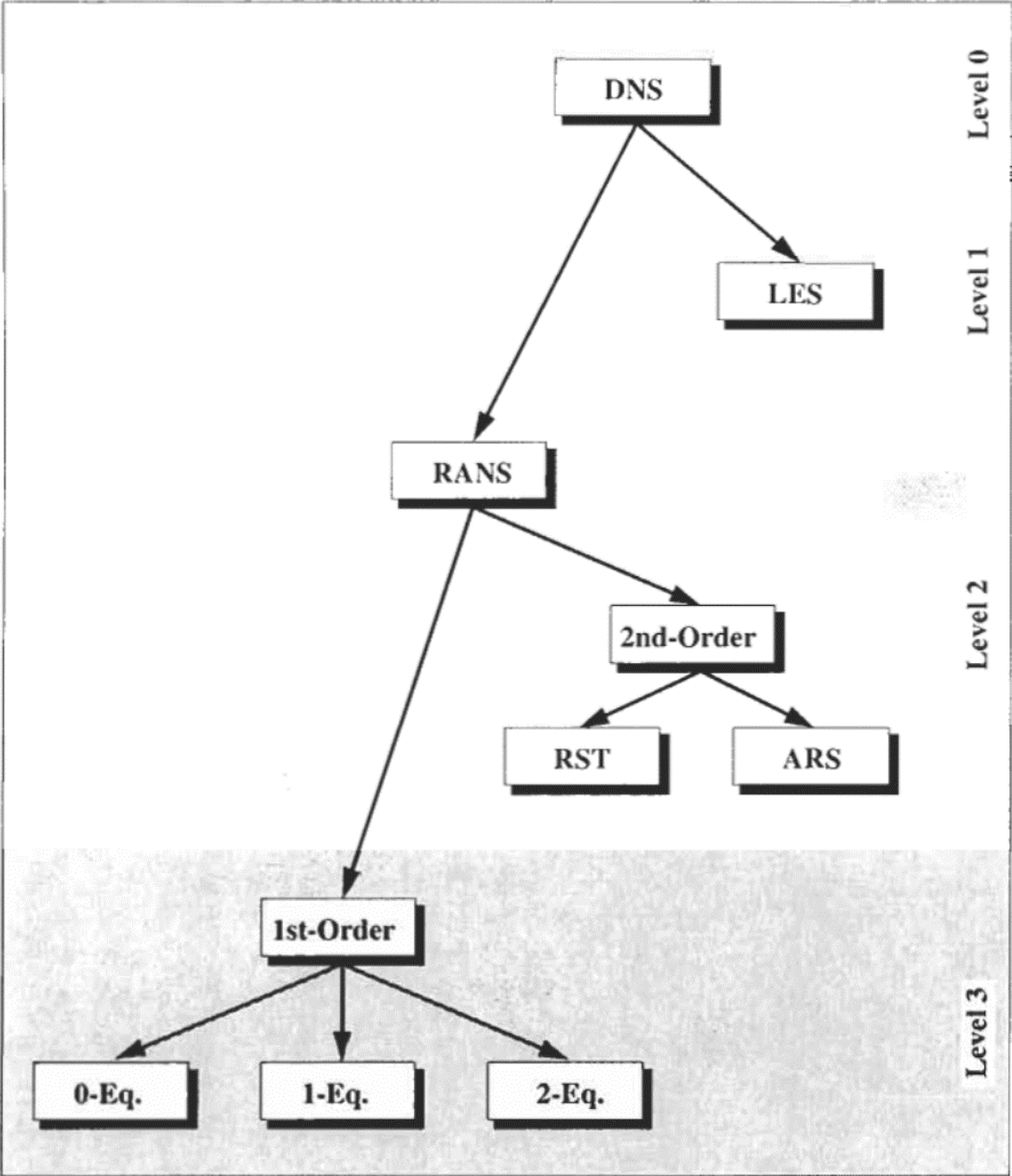


Figure IV.2 : Hiérarchie des modèles de turbulence

Source :(Blazek, 2015).

IV.9.1 Approche RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) ou (Navier-Stokes Moyennée par Reynolds)

Le modèle de turbulence RANS vise à résoudre le flux moyen qui varie graduellement en fonction du temps et de l'espace.

La méthode RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) est considérée comme l'approche la plus rapide du **CFD**. Cette méthode a été définie pour la première fois en 1895 par Osborne Reynolds. Il a suggéré la théorie de Navier-Stokes qui diminue largement la complexité de la simulation des flux turbulents.

Les équations de Navier-Stokes résultantes sont exprimées en termes de champ d'écoulement moyenné en temps comme le champ de vitesse, pression, densité et la température (Menter, 2011). Généralement, les équations RANS sont utilisées pour décrire les écoulements turbulents.

Les équations de flux provoqué par l'interaction entre différentes fluctuations turbulentes sont modélisées avec des modèles de turbulence classique : les plus connus sont le modèle k- ϵ et le modèle de stress de Reynolds (Andersson, Andersson, & Håkansson, 2011).

Les avantages de RANS comprennent sa présence dans tous les codes **CFD**, moins coûteux et considérablement validé, mais il n'est pas précis par rapport au modèle LES à cause du manque de capture de plus petite échelle de longueur dans RANS (Sidawi, 2014).

Les différents modèles de RANS sont décrits comme suit:

✓ **Eddy-viscosity models (EVM) ou (Modèle de viscosité)**

Le Modèle de viscosité vise à prendre en compte les effets perdus pendant le calcul de la moyenne des effets turbulents dans une simulation **CFD**.

Cependant, il permet la modélisation du transport et de la dissipation de l'énergie qui seront négligés après avoir modéliser la turbulence.

Ces modèles de turbulence sont composés des équations fondamentales qui maintiennent le développement mathématique des écoulements turbulents.

On suggère que la contrainte turbulente est conforme à la vitesse moyenne de déformation. De plus, une viscosité de tourbillon plus grande est dérivée des équations de transport turbulent.

✓ **Non-linear eddy-viscosity models (NLEVM) ou (Modèle de viscosité non linéaire)**

Le modèle de viscosité non linéaire fait partie des modèles de turbulence pour les équations RANS.

En effet, un coefficient de viscosité tourbillonnaire est appliqué pour mettre le lien entre le champ de turbulence moyen et le champ de vitesse moyen.

La contrainte turbulente peut modéliser comme une fonction non linéaire des gradients de vitesse moyenne. Les échelles turbulentes sont définies en résolvant des équations de transport.

Le modèle est réglé pour donner une limite de réponse de la turbulence à plusieurs types majeurs de contraintes.

✓ **Differential stress models (DSM) ou (Modèles de contrainte différentielle)**

Cette classe comprend les modèles de transport sous contrainte de Reynolds ou les modèles de fermeture de second ordre, donc Il est important de résoudre les équations de transport pour toutes les contraintes turbulentes.

IV.9.2 Approche LES (Large Eddy Simulation) ou (Simulation des grandes turbulences)

La méthode de simulation des grandes turbulences (LES) est utilisée pour la turbulence. Elle comporte la filtration des petites échelles qui sont déjà modélisées, ainsi elle peut calculer les grandes échelles de la cascade turbulente d'une manière directe et rapide.

Cette méthode de simulation (LES) est définie en 1963 par Smagorinsky en météorologie. Alors même que le problème crucial de la simulation des flux à nombre de Reynolds élevé est la présence des échelles de longueur et de temps très petites.

Le modèle LES ne peut pas remplacer les modèles RANS à grande échelle, malgré les grands efforts affectés dans cette technologie (Menter, 2011).

Le coût de calcul du LES est haut par rapport à les autres modèles de turbulence, ce coût de calcul élevé est engendré par une grille très fine et des pas de temps courts ((Andersson, Andersson, & Håkansson, 2011)

IV.9.3 Approche Direct Numerical Simulation (DNS) ou (Simulation Numérique Directe)

Une simulation numérique directe (DNS) est une simulation **CFD**, dont les équations de Navier-Stokes sont résolues numériquement, ce qui implique la résolution de toute la gamme des échelles spatio-temporelles de la turbulence.

La simulation DNS est déterminée par (Strelets , 2001) ainsi (Spalart et al., 2006). La simulation numérique directe (DNS) des écoulements turbulents est l'approche la plus claire et la plus simple utilisée afin de simuler des écoulements turbulents.

En appliquant la méthode DNS, avec la résolution directe des équations de Navier-Stokes, donc le modèle de turbulence ne doit pas être défini parce que les équations décrivent correctement les écoulements de fluides en même temps pour les conditions laminaires et pour les conditions turbulentes.

La difficulté focalise en résolvant ces équations à un grand nombre de Reynolds. Actuellement, le DNS est un outil de recherche qui peut nous aider à la conception technique. Le coût de calcul du DNS est grand et il augmente en fonction du nombre de Reynolds (Andersson, Andersson, & Håkansson, 2011).

Généralement tous les logiciels du **CFD** offrent les choix suivants de modèles de turbulence :

- ✓ **Modèle Spalart-Allmaras**
- ✓ **Modèle Standard k- ϵ**
- ✓ **Modèle RNG k- ϵ**
- ✓ **Modèle Realizable k- ϵ**
- ✓ **Modèles k- ω**
- ✓ **Modèle Standard k- ω**
- ✓ **Modèle Shear-stress transport (SST) k- ω**
- ✓ **Reynolds stress model (RSM)**

➤ **Modèle Spalart-Allmaras**

En physique, le modèle Spalart-Allmaras est un modèle composé d'une seule équation qui permet la résolution de l'équation de transport modélisée pour la viscosité cinématique turbulente.

Ainsi, ce modèle a été élaboré afin de l'utiliser dans les applications aérospatiales incluant les écoulements bornés par des parois.

Par ailleurs, il a été constaté que ce modèle donne de bons résultats pour les couches limites soumises à des gradients de pression. Le modèle Spalart-Allmaras était adapté pour utiliser les fonctions de mur quand la résolution du maillage n'est pas plus fine.

➤ **Modèle Standard k- ϵ**

C'est le modèle le plus couramment utilisé en **CFD** pour simuler les caractéristiques de l'écoulement moyen dans des conditions d'écoulement turbulent.

Il s'agit d'un modèle à deux équations qui donne une description générale de la turbulence. Les modèles simples ou complets de turbulence sont des modèles à deux équations dont la résolution de deux équations de transport séparées nous aide à définir les échelles de vitesse et la longueur de la turbulence, à condition que la puissance et les faiblesses du modèle standard k- ϵ ont été déterminé .

➤ **Modèle RNG k- ϵ**

Le modèle RNG a été développé en utilisant les méthodes du groupe de Renormalisation (RNG) à pour objectif de ré-normaliser les équations de Navier-Stokes, afin de tenir compte des effets des plus petites échelles de mouvement.

Le modèle RNG k- ϵ a été résulté en appliquant une méthode statistique rigoureuse (théorie des groupes de Renormalisation). Il est identique dans sa forme au modèle standard k- ϵ , mais comprend les améliorations suivantes :

- ✓ Le modèle RNG a un terme complémentaire dans son équation ϵ qui renforce la précision pour les flux rapidement appliqués.
- ✓ L'effet du tourbillon sur la turbulence est introduit dans le modèle RNG, ce qui perfectionne la précision des écoulements tourbillonnants.
- ✓ La théorie RNG offre une formule analytique pour les nombres de Prandtl turbulents, alors que le modèle standard k- ϵ utilise des valeurs constantes définies par l'utilisateur.

➤ **Modèle k- ϵ Realizable**

Le modèle k- ϵ réalisable est une extension plutôt nouvelle et il est différent du modèle k- ϵ standard de deux manières importantes :

- ✓ Le modèle k- ϵ réalisable possède à une nouvelle formulation pour la viscosité turbulente.
- ✓ Une nouvelle équation de transport pour le taux de dissipation ϵ , a été dérivée d'une équation exacte pour le transport de la fluctuation de la vorticité carrée moyenne.

➤ **Modèle Standard k- ω :**

Le modèle standard k- ω est basé sur le modèle Wilcox k- ω . Le modèle Wilcox k- ω présente un avantage par rapport au modèle de turbulence standard k- ϵ car ce dernier ne nécessite aucune fonction de paroi pour le calcul de la distribution des vitesses à proximité des parois.

En effet, David C.Wilcox a proposé un modèle de turbulence similaire au modèle de turbulence standard k- ϵ mais a remplacé l'équation du taux de dissipation (ϵ) par l'équation de la fréquence des tourbillons (ω).Ce remplacement a conduit à l'utilisation d'un nouveau modèle appelé le modèle standard k- ω .

➤ **Modèle Shear-Stress Transport (SST) k- ω ou (Modèle du Transport)**

Le modèle SST k- ω est identique au modèle standard k- ω , mais présente les améliorations suivantes :

- ✓ Le modèle standard k- ω et le modèle SST k- ω sont chacun d'eux multipliés par la fonction de mélange.
- ✓ La détermination de la viscosité turbulente est transformée en tenant compte du transport de la contrainte de cisaillement turbulente.
- ✓ Les constantes de modélisation sont différentes.

Ces caractéristiques rendent le modèle SST k- ω plus exact et plus fiable pour une grande classe d'écoulements ( coulements à gradient de pression, profils aérodynamiques ...) comparativement au modèle standard k- ω .

➤ **Modèle Reynolds Stress (RSM) ou (Modèle d'équation de contrainte de Reynolds)**

Le modèle d'équation de contrainte de Reynolds (RSM), également appelé fermeture du second moment, est le modèle classique de turbulence le plus complet.

Dans ces modèles, l'hypothèse de la viscosité de tourbillon est évitée et les composantes individuelles du tenseur des contraintes de Reynolds sont directement calculées.

Ces modèles utilisent l'équation exacte de transport de la contrainte de Reynolds pour leur formulation.

Le modèle RSM est un modèle de turbulence qui ferme les équations de RANS avec une résolution des équations de transport pour les contraintes de Reynolds, ainsi qu'une résolution d'une équation pour le taux de dissipation.

IV.10 Comparaison entre les différents modèles de turbulence

La plupart des écoulements qui intéressent le domaine de l'ingénierie sont turbulents et sont caractérisés par l'instabilité, la tridimensionnalité qui font varier sur des grandes d'échelles de longueur et de temps.

L'objectif des écoulements turbulents est de prendre en compte de la physique pertinente en utilisant le modèle mathématique le plus simple et économiquement plus réalisable.

Un bref résumé des avantages et des inconvénients de différents modèles de turbulence sera présenté dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Comparaison entre les différents modèles de turbulence.

<i>Modèles</i>	<i>Avantages</i>	<i>Inconvénients</i>
❖ <i>k-ε standard</i>	<i>Puissant et largement utilisé.</i>	<i>Pas bon pour les régions à faible Re (nombre de Reynolds)</i>
❖ <i>RNG k-ε</i>	<i>donne des simulations pour les flux tourbillonnants</i>	<i>Instable par rapport au k-ε standard</i>
❖ <i>Modèle k-ω</i>	<i>Fonctionne bien à faible nombre de Reynolds (Re)</i>	<i>Nécessite un maillage fin près du mur.</i>
❖ <i>RANS</i>	<i>Utiliser pour modéliser les flux turbulents. Basé sur des observations empiriques.</i>	<i>Coût de calcul élevé</i>
❖ <i>LES</i>	<i>Utiliser dans le cas des flux complexe. Peut donner des informations sur les flux turbulents.</i>	<i>Difficile à trouver des conditions aux limites des flux à des temps définis.</i>
❖ <i>DNS</i>	<i>Utiliser à faible nombre de Reynolds. Utiliser pour développer et valider les modèles de turbulence.</i>	<i>Coût de calcul extrême</i>

Dans notre cas, le modèle le plus fiable pour modéliser les flux turbulents est RANS k-ε standard parce que ce modèle est très rapide et donne une très bonne précision sur les champs de vitesse du vent et de température.

IV .11 Application du CFD dans le domaine de l'urbanisme

Dans toute conception urbaine des bâtiments, la méthode CFD permet:

- Aux concepteurs d'étudier et intégrer les paramètres climatiques (vitesse et direction du vent, température de l'air et de surface, rayonnement solaire, humidité) avant la réalisation des constructions.
- Effectuer plusieurs simulations en fonction de différents scénarios.

Les études thermo-aéraulique sont nécessaires dans le cas des bâtiments de grande hauteur qui perturbent la circulation de l'air.

Par ailleurs, les simulations CFD permettent :

- Le teste des mesures contre la formation des courants d'air,
- L'orientation des constructions pour des gains de chauffage et de ventilation.
- La meilleure compréhension de la répartition de température à l'intérieur d'un bâtiment
- La distribution de température de l'air et du vent à des échelles micro-urbaines.

En fin, l'effort de planification supplémentaire est plus que compensé par l'optimisation des concepts climatiques du bâtiment et des tissus urbains, d'où un confort accru pour les utilisateurs et les citoyens.

Conclusion

Pendant les dernières décennies, le **CFD** est présenté comme une méthode pertinente dans le domaine de l'ingénierie. Le **CFD** est considéré comme une nouvelle technologie et utilisé dans différents domaines y compris dans le domaine de la météorologie et de la conception des bâtiments et des tissus urbains.

Grace à la grande capacité du calcul et l'évolution rapide de cette capacité, les méthodes **CFD** sont utilisées dans la résolution des équations de mouvement de fluide en plus de la relation du fluide avec les corps solides.

Le **CFD** peut, dans les cas compliqués, évaluer les données expérimentales ou analytiques. Lorsque les flux d'intérêt technique sont turbulents, le traitement idéal de la turbulence sera important pour la performance du **CFD**. La validation des résultats de simulations **CFD** est tributaire de la précision des calculs des flux complexes.

Chapitre V

Prédiction de l'îlot de chaleur

urbain dans une ville

méditerranéenne : cas de la ville

d'Oran

V.1 Introduction

Les villes sont considérées comme des sources majeures d'émissions de gaz à effet de serre (GES), et l'impact de l'urbanisation massive sur l'environnement deviennent de plus en plus évidentes. En effet, l'interaction entre le microclimat et les bâtiments est particulièrement significative dans les zones urbaines. C'est pourquoi l'urbanisation est perçue comme l'une des principales causes de la formation des îlots de chaleur urbains (ICU).

Les îlots de chaleur urbains désignent le phénomène où la température dans le centre ville est significativement plus élevée que dans les zones rurales avoisinantes. Ce phénomène est d'autant plus marqué dans un contexte de changement climatique et d'urbanisation étendue, entraînant une élévation des températures dans les zones urbaines densément construites par rapport à celles situées en périphérie.

L'îlot de chaleur urbain est l'un des phénomènes liés au changement climatique les plus documentés dans la littérature scientifique. Les régions méditerranéennes, avec leur climat spécifique, sont particulièrement étudiées pour leur vulnérabilité à ce phénomène. Ainsi, de nombreux chercheurs et urbanistes ont proposé diverses méthodes et stratégies pour atténuer les effets des îlots de chaleur dans les villes, avec l'objectif de lutter contre les impacts du changement climatique.

Dans ce chapitre, nous proposons une analyse de l'îlot de chaleur urbain dans la nouvelle ville « Ahmed Zabana », à Oran, en utilisant des simulations numériques CFD. Nous commencerons par une présentation des îlots de chaleur urbains dans les villes méditerranéennes, en donnant quelques exemples. Puis, nous détaillerons la ville d'Oran, son contexte géographique et ses caractéristiques climatiques. Ensuite, nous procéderons à une analyse typo-morphologique de l'espace urbain d'Oran, en décrivant plus précisément le nouveau pôle urbain « Ahmed Zabana » et en présentant les résultats des simulations numériques du microclimat.

V.2 Présentation des îlots de chaleur urbains en méditerranéen

V.2.1 Notion des villes méditerranéennes

Pendant les deux décennies précédentes, la science de la planification et de la ville ont largement modifié leur démarche du phénomène territorial, social et économique de l'urbanisation en méditerranée.

Dans la planification urbaine, le concept de « ville » a été modifié, à cause des développements « pluralistes » et « multiethniques » des métropoles. Historiquement, les villes méditerranéennes ont caractérisé par une vitalité durable.

La forte croissance urbaine qui s'est apparait pendant les quarante dernières années a engendré plusieurs classifications comme la séparation habituelle « ville – campagne », en formant des zones « métropolitaines » et un développement de nouvelles actions économiques accentués par un nouveau dualisme « ville –banlieue ».

V.2.3 Exemple des études sur l'îlot de chaleur en méditerranéen

La région méditerranéenne est l'un des "points chauds" capable de connaître des changements climatiques significatifs au cours du XXI^e siècle à cause du renforcement des concentrations de gaz à effet de serre (GES) mondiale.

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain représente un sujet large de plusieurs études numériques et expérimentales effectués sur des villes méditerranéennes où le climat estival sec a été observé.

Pour **Athènes**, les travaux basés sur une analyse de la température de l'air pour la période 1961-1982 dans les stations du réseau du bassin d'Athènes, typiques des conditions urbaines et rurales, présentent des indications nécessaires sur les caractéristiques moyennes de l'îlot de chaleur **d'Athènes**, il est clair que la ville engendre un îlot de chaleur avec une température de 2° - 3°C de la banlieue au centre. Pris en compte de ces températures minimales, la présence de l'îlot de chaleur se produit précisément soit pendant les mois d'hiver soit pendant les mois d'été avec des valeurs ascendantes de l'hiver vers l'été (Katsoulis & Theoharatos, 1985).

De plus, l'ICU a été étudié dans différentes **villes italiennes**, les résultats, qui correspondent aux observations indiquent que l'îlot de chaleur urbain est un phénomène nocturne, présent également en hiver (la plus grande différence entre les températures urbaines et rurales est d'environ 2 °C) qu'en été (la différence de température est d'environ 5 °C) (Bonacquisti et al., 2006).

L'îlot de chaleur à **Barcelone**, a été examiné par une équipe de géographes de l'université de Barcelone, qui ont lancé des exercices de collecte de données à partir de 1985. L'estimation du degré d'évolution de l'îlot de chaleur urbain a été réalisée essentiellement par l'analyse des différences entre les températures maximales et minimales

quotidiennes pour les deux observatoires. Sur une base annuelle et globale, le centre de Barcelone est 1,4°C plus chaud que l'aéroport. Sur une base mensuelle, toutes les moyennes des différences entre les maxima sont pratiquement négatives sauf le mois de Janvier et Décembre. A propos des différences moyennes entre les minima, toutes sont plus élevés à 2,5 °C, atteignant 3°C en novembre et mars (Moreno-garcia, 1994).

V.3 Présentation de la ville d'Oran

V.3.1 Contexte géographique de la ville d'Oran

Oran (**Latitude** : 35°52'40", **Longitude** : 0°29'18"W), est une côtière méditerranéenne, elle se situe dans le Nord-Ouest de l'Algérie et elle est considéré comme la deuxième plus grande ville d'Algérie et une des plus importantes villes du Maghreb ,**Oran** est une ville portuaire occupe une superficie de 2 114 km².



Figure V.1: Situation géographique de la ville d'Oran

Source: www.memoireonline.com

C'est une ville plus dense avec environ plus d'un 1 millions d'habitants dans la ville centre que dans la zone métropolitaine.

La ville d'Oran est caractérisée par des unités topographiques bien définies dans le document PDAU, on cite :

▪ **Le golfe d'Oran :**

Le **golfe d'Oran** est un golfe du sud de la mer méditerranée, se trouve dans le Nord de la ville d'Oran en Algérie .Il est borné à l'Ouest par le cap Falcon et à l'est par le Aiguille. Il couvre les ports d'Oran et de Mer el Kébir. La partie est du **golfe d'Oran** nommée« baie des Aiguades ».

➤ **La côte rocheuse :**

La côte rocheuse se développe à l'Ouest par la Mer El Kébir, à l'Est par la pointe de Canastel. Cette côte est décomposé en lobes. Elle est caractérisée par sa forme et son aspect important des glissements qui lui ont donné naissance.

➤ **Le plateau :**

Il s'élève du pied de premières inclinaisons de Santa Cruz, de la Casbah, du Bois des Planteurs et s'étend à l'Est avec une pente complexe.

Par ailleurs, il se développe en pente douce vers Bir El Djir, comprise entre 80 m à 200 m.En outre, il descend légèrement vers le Nord jusqu'au bord des falaises supérieur la mer.

➤ **Les plaines :**

Au sud du plateau, les plaines se définissent par une topographie moins modérée et de dépressions qui s'tendent d'Ouest en Est.

➤ **Les collines :**

A l'Ouest et au Sud, la plaine est bornée par un ensemble de petites collines aux altitudes qui ne dépassent pas les 150 m .

➤ **La Sebka :**

La Sebka d'Oran est un lac se trouve à 15 km au sud d'Oran dans la commune de Misserghin. Elle s'éloigne de 12 km de la mer méditerranée.

Le bassin versant de la grande Sebka d'Oran est situé immédiatement au Sud–Ouest de la ville d'Oran. Son périmètre à la ligne de partage des eaux alimentant la dépression endoréique ayant pour centre la Sebka d'Oran (Hassani, 1987).

La Sebka d'Oran est considéré comme une dépression, clôturée à 110 mètres d'altitude et présente une topographie probablement plane. Elle se délimite au Nord par le massif du Murdjajo et au Sud par le massif de Tessala.

V.3.2 Climat d'Oran

La ville d'Oran est caractérisée par un climat méditerranéen semi aride, déterminé par un fort contraste thermique entre l'été et l'hiver.

Comme Oran située dans la rive sud de la méditerranée, elle est définie par un climat possédant une variabilité interannuelle relativement importante, semi-humide et froid dans la saison d'hiver, sec et chaud pour l'été.

Les températures moyennes dans la ville d'Oran peuvent atteindre 5 à 15°C en hiver et 15 à 30°C en été.

C'est un régime méditerranéen, avec une alternation importante entre deux saisons bien définies :

- ✓ un hiver froid et pluvieux,
- ✓ un été chaud et sec.

V.3.3 Evolution de température moyenne

La ville d'Oran est caractérisée par une augmentation significative des températures:

- La température moyenne annuelle peut dépasser 18 °C.
- Pendant la saison estivale et notamment durant le mois le plus chaud, la température moyenne maximale en Août peut atteindre 28 °C.
- Pendant la saison d'hiver, la température moyenne minimale en Janvier peut atteindre jusqu'à 8°C.

Cependant, un vent régional Sirocco, qui souffle pendant l'été provoque des extrêmes chauds.

V.3.4 Analyse des journées de forte chaleur à Oran

(Faci et al., 2016) ont décrit que le mois d'Aout était le troisième mois le plus chaud dans les annales avec une température moyenne de 1,4°C et ils ont analysé les données des températures journalières sur une période de soixante ans (1951-2010), pour chaque année, ils ont pris en considération des données de la T°max et Tmin journalière pour la période allant de Juin à Septembre car ces trois mois sont les plus chauds.

Les vagues de chaleur peuvent se produire à tout moment de l'année, même au niveau de la saison hivernale, tandis que les canicules se produisent en été voir Tab V.1 :

Tableau V.1 : Analyse des journées chaudes. **Source** : (Faci et al.,2016)

Période		1951-1980	1981-2010
Station d'Oran Es senia	Nombre de jours chaudes	260	407
	Evolution moyenne de l'accroissement de la durée de la période des journées chaudes (Jours/Décennie)	-4	10
	Nombre de vagues de chaleur	30	46

La durée de la période chaude (période entre la date du premier et du dernier enregistrement d'une journée chaude), cette période est environ 20 jours à Oran tels que :

- Dans la période 1951-1980: la durée des journées chaudes à **Oran** a connu une diminution.
- Dans la période 1981-2010: une nette observation a été observé.
- Le nombre de vagues de chaleur s'est multiplié de plus de 50 %.
- Les vagues de chaleur ont été reportées à **Oran** avec une tendance à la hausse à partir du milieu des années 1980
- L'évolution des vagues de chaleur à Oran a connu une légère tendance à l'accroissement au début des années 1990.

V.3.5 Simulations du climat d'Oran

Dans son étude (Sahabi Abed ,2012), une analyse des extrêmes thermiques et pluviométriques a été effectuée sur la région d'**Oran** au moyen des indices climatiques réalisés par l'équipe d'experts sur la détection du changement climatique durant la période 1950-2010.

Les résultats de cette étude indiquent que l'analyse à l'échelle des normales climatiques montre que les écart-types des températures (minimales, maximales et moyennes) sont variés comme suit :

Entre 0.23 et 0.38°C pour la période 1961-1990.

De 0.50°C à 0.56°C pour la période 2021-2050.

De 0.53°C à 0.63°C pour la différence (2021-2050)-(1961-1990).

Il a été constaté que les températures moyennes sont prévues d'accroître d'environ +1.6°C entre 2021 à 2050 par rapport à 1961-1990, et de +1.5°C pour les températures minimales et +1.8°C pour les températures maximales et pour les mêmes périodes, voir la figure V.2.

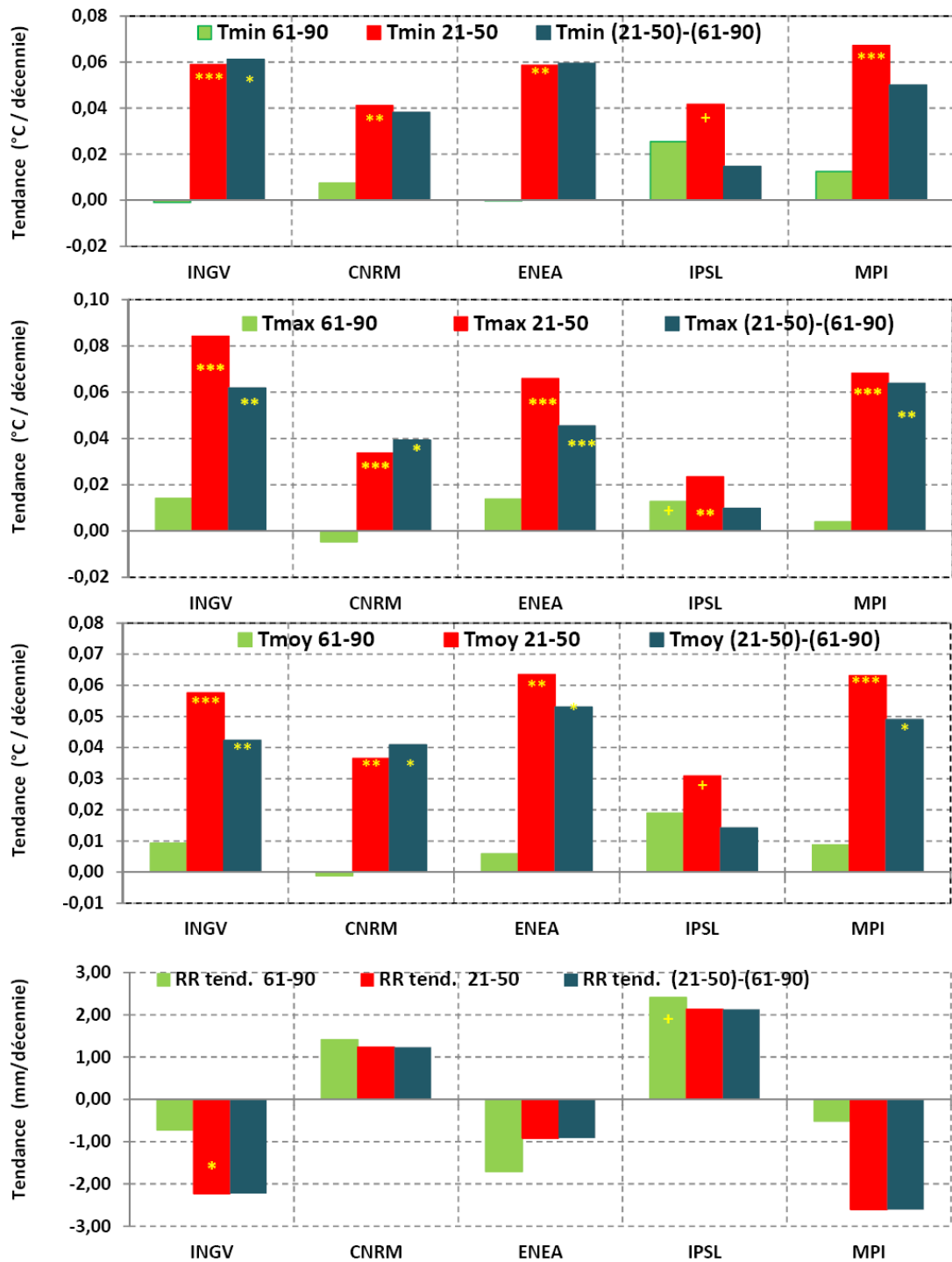


Figure V.2: Tendances par décennie des températures minimales, maximales, moyennes et des précipitations .Source :(Sahabi Abed ,2012).

Ainsi, les résultats de simulation montrent qu'une augmentation dans l'occurrence des nombres de nuits et de jours chauds (TN90p et TX90p), et une diminution des nuits et des jours froids (TN10p et TX10p) par rapport à la période climatique 1961-1990, voir la figure V.3.

L'étude conclut que ce réchauffement prévu sera conduit par une augmentation du nombre de jours chaud où les températures maximales dépasseront les 30°C.

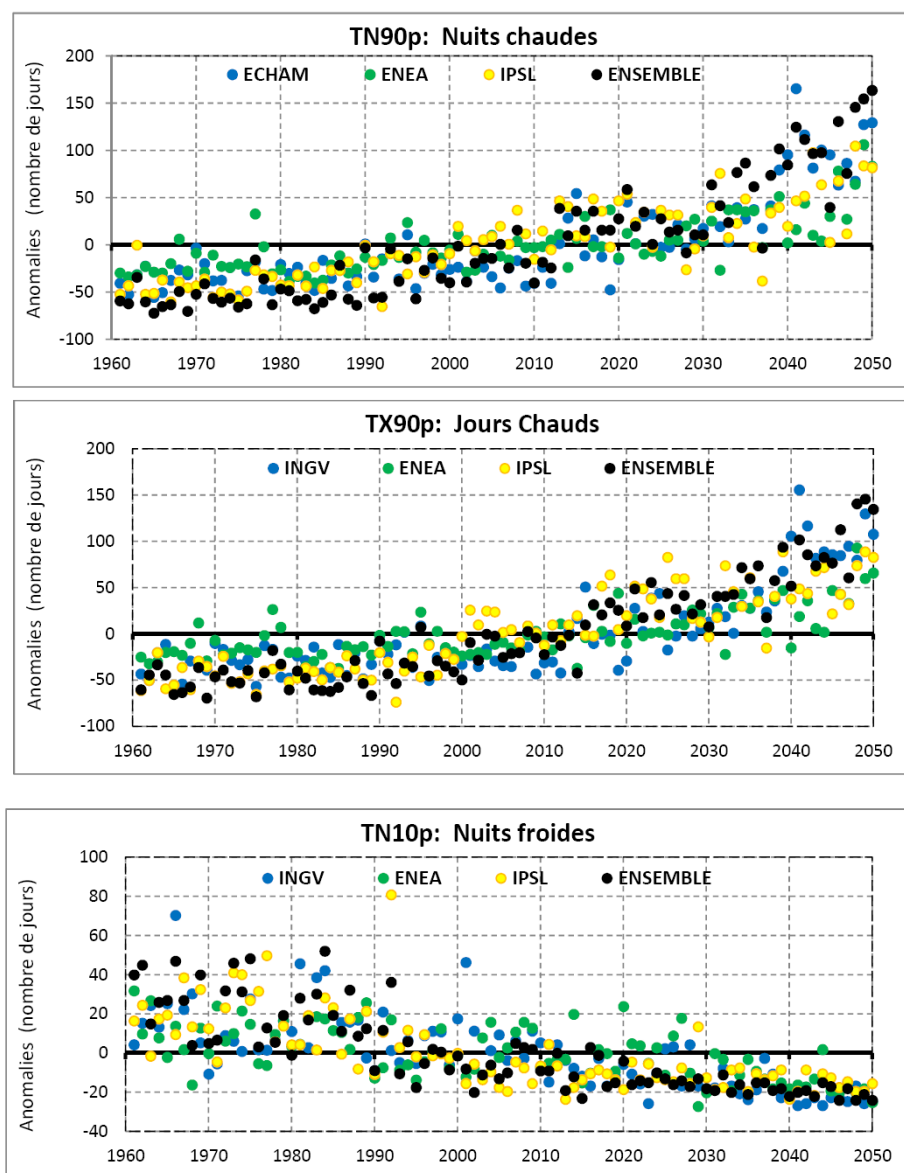


Figure V.3 : Anomalies relatives à la période 1961-1990 des indices des extrêmes thermiques. Source : (Sahabi Abed ,2012).

V.4 Analyse urbaine : Approche typo-morphologique

L'approche typo-morphologique détermine six échelles d'analyse, en passant du général au particulier; le territoire, le tissu urbain, les îlots et lotissement, le bâtiment et le logement.

L'interaction entre les échelles de l'analyse morphologique pose la question de l'importance de chaque projet à chacune des situations ; à partir de sa position au niveau du territoire jusqu'à la conception de l'espace intérieur, voir le tableau V.2 : (Michel, J.-M, 2003).


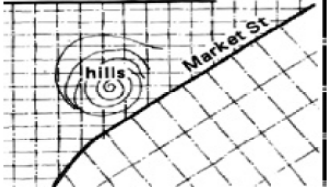
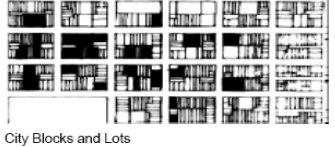
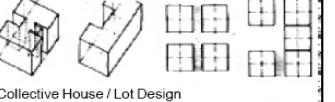
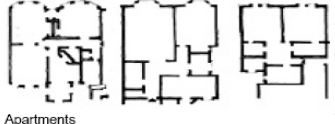
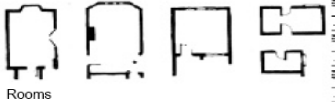
L'îlot vise des formes et des tailles très diverses, il inclut un groupe des parcelles, le groupe des voies internes et la moitié de la voie publique (ou espace public) périphérique (Jean-Marc, 2004).

V.4.1 Evolution de population et morphologie urbaine de la ville d'Oran

Comme la majorité des villes du Maghreb, **Oran** a vécu dans la période contemporaine une augmentation de sa population qui, excédant 400 000 habitants en 1961, a presque doublé en vingt ans, voir la figure V.4:

- Les étapes consécutives de la croissance **d'Oran** sont totalement connues et s'affichent dans le même site urbain
- La courbe de la population européenne se présentait régulièrement ascendante depuis la fin du XIXe siècle, avec une seule coupure, dans le sens de l'accélération à partir de 1956.
- La population musulmane, quasi étale, passe avec une manière rapide à partir de 1930 et possédait une accélération intense à partir de 1956-1957.

Tableau V.2 : Analyse typo-morphologique complète. **Source :** (Michel, J.-M, 2003

Analyse morphologique complète	Objectifs définis par le mandat	
1. Territoire - Topographie - Hydrographie	Grands corridors de circulation Parcours riverains	
2. Trame urbaine - Lotissement rural - Infrastructures de transports - Typologie des voies de circulation urbaines - Typologie des espaces publics	Entrées et parcours Abords des nœuds de transport	Topography, Water Edges, and Grids
3. Ilots et lotissement - Îlots - Lotissement urbain	Noyaux de villages et quartiers Lieu structurant urbain	
4. Bâtiments - Typologie des bâtiments - Utilisation du sol/usage - Implantation, volume, COS	Axes et pôles économiques Repères historiques	
5. Logements et suites - Composition architecturale - Disposition et accès aux logements et suites		
6. Pièces et espaces intérieurs - Plans intérieurs - Dimensions critiques des pièces - Composition : plans, coupes élévation		

Source: Build for change, Neighborhood architecture in San Francisco, Anne Vernez Moudon

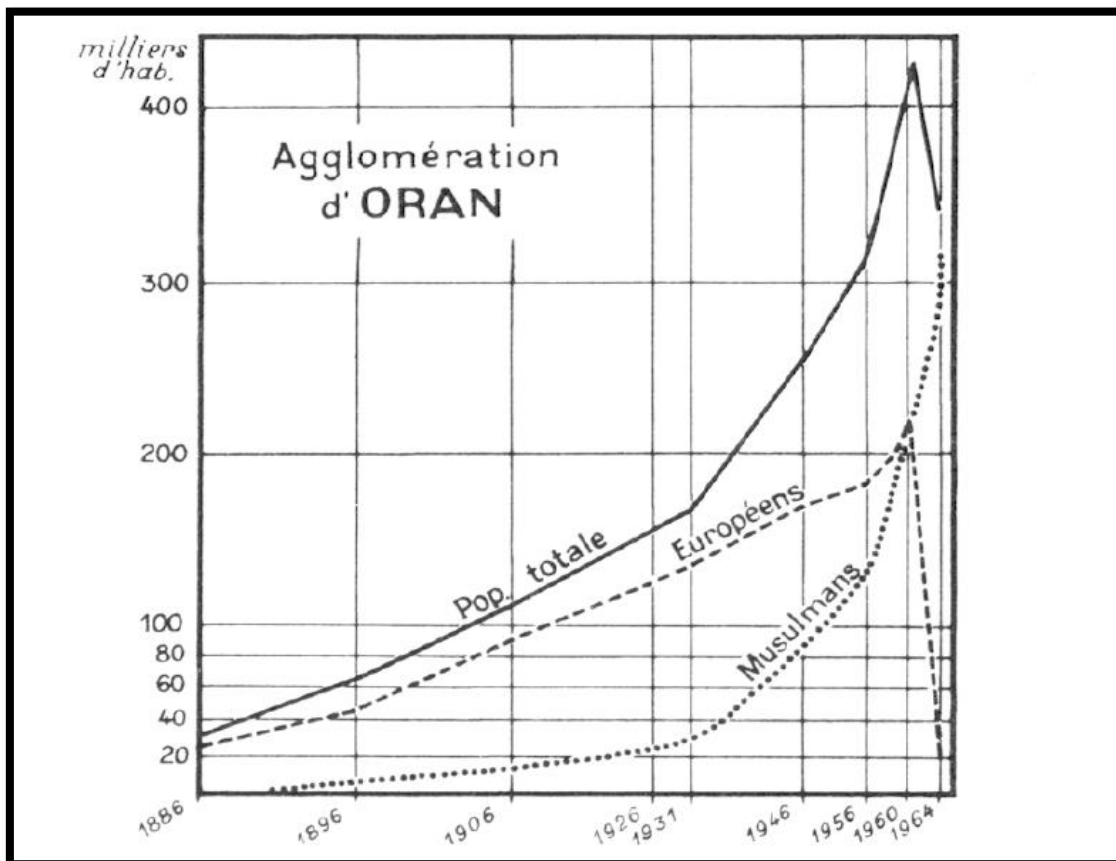


Figure V.4 :Evolution de la population oranaise (1886-1964).

Source :(Coquery, 1965)

La morphologie de la ville d'Oran s'est évoluée et changée en fonction de certains processus originaux ou bien très fréquents. A partir des années 1950, l'urbanisation s'est faite d'une manière spectaculaire et la ville a connu une modification de son paysage, voir la figure V.5.

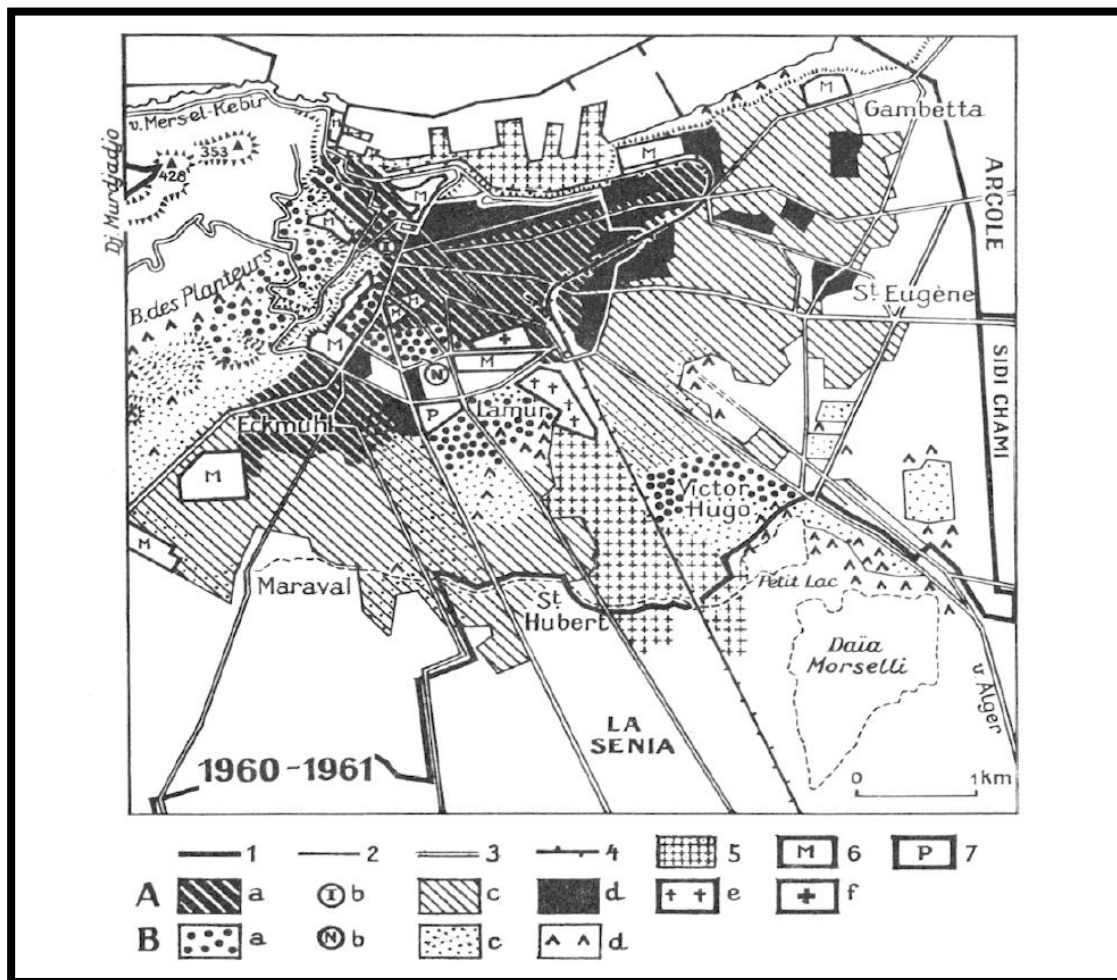


Figure V.5 : Ville d'ORAN à la veille de l'indépendance : morphologie urbaine et population. **Source :** (Coquery, 1965).

- 1: limites de la commune d'Oran ;
- 2 : limites de l'espace urbanisé ;
- 3 : principaux axes routiers ;
- 4 : voie ferrée ;
- 5 : zones portuaire et industrielle ;
- 6 : emprises militaires ;
- 7 : parc municipal.

A : Quartiers européens ;

- a) anciens et densément peuplés. Tissu urbain serré ;
- b) quartier juif(I) ;

c) tissu urbain périphérique plus lâche (pavillons, habitat individuel largement prédominant) ;

d) réaménagement (front de mer) et grands immeubles collectifs récents) ;

e) cimetière (Tamashouet) ;

f) hôpital civil.

B : Quartiers algériens ;

a) très densément peuplés : intégrés à la trame urbaine organisée (Ville Nouvelle, Lamur, Victor-Hugo) ou spontanés (Planteurs) ;

b) Médina Jdida (Ville Nouvelle) ;

c) spontanés en « dur », mais relativement desserrés ;

d) spontanés, de type bidonville.

V.4.2 Analyse typo-morphologique après l'indépendance

V.4.2.1 Zones d'Habitat Urbain Nouvelles (ZHUN)

A partir des années 1970, l'Algérie a commencé d'élaborer un programme très important de construction des zones d'habitat urbain nouvelles (ZHUN). La zone d'habitat urbain nouvelle (ZHUN) est une procédure mise en place après l'indépendance de l'Algérie.

Durant la même période, le paysage urbain des villes algériennes, et particulièrement de la ville d'Oran a connu une modification très significative.

Ainsi, les zones d'Habitat Urbain Nouvelles (ZHUN) se définissent par des « barres » à pour objectif de bénéficier d'ensoleillement et de végétations très denses.

En effet, ces constructions ont été réalisées à l'extérieure de la ville, caractérisées par une faible densité urbaine et demeure contestable lors du choix d'une implantation.

A Oran, on distingue les ZHUN de Seddikia, Dar El beida, Maraval, Hai khemisti, Othmania, Fellaoucen et USTO, voir la figure V.6.

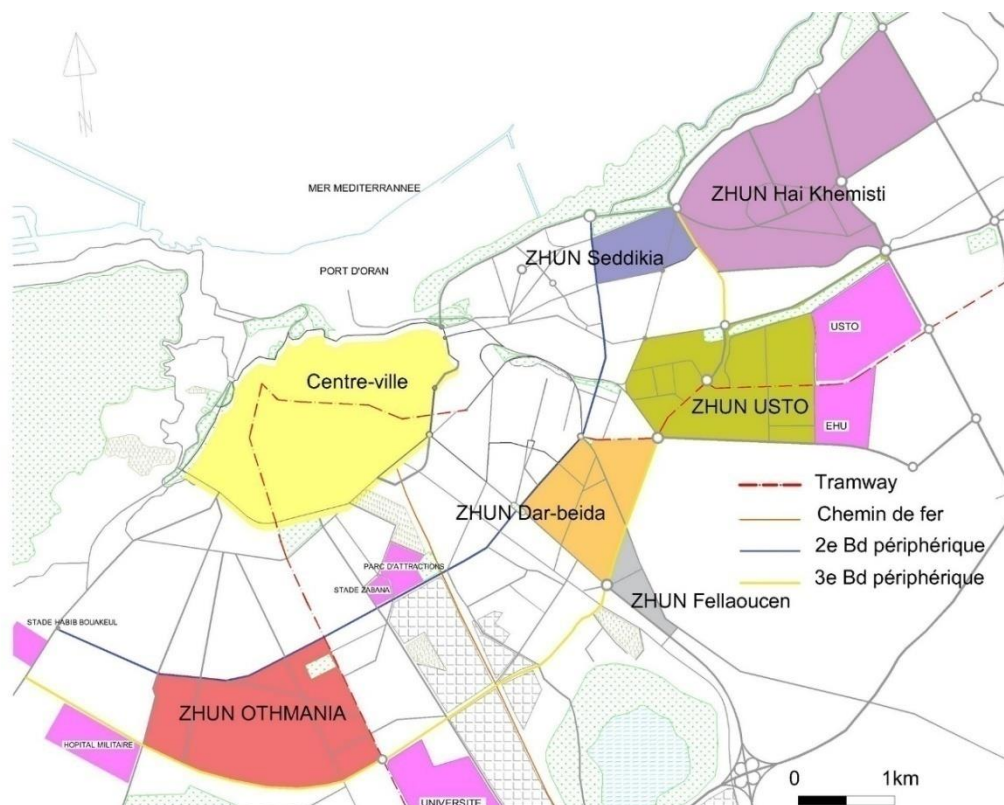


Figure V.6 : ZHUN à Oran .Source :(Mouaziz-Bouchentouf, 2020).

V.4.2.2 Centre ville d'Oran

Le centre-ville ancien de la ville d'Oran introduit dans la construction semi radioconcentrique de la ville, il est borné à l'Ouest par le massif du Murdjadjo, au Nord par la mer méditerranée et à l'Est et au Sud par le troisième boulevard périphérique ,voir la figure V.7.

A l'heure actuelle et dans le contexte du développement urbain, les constructions du centre-ville d'Oran demeurent désavantageuses et cela nécessite l'intégration des nouveaux modes de planification urbaine pour renouveler ses anciens bâtiments.

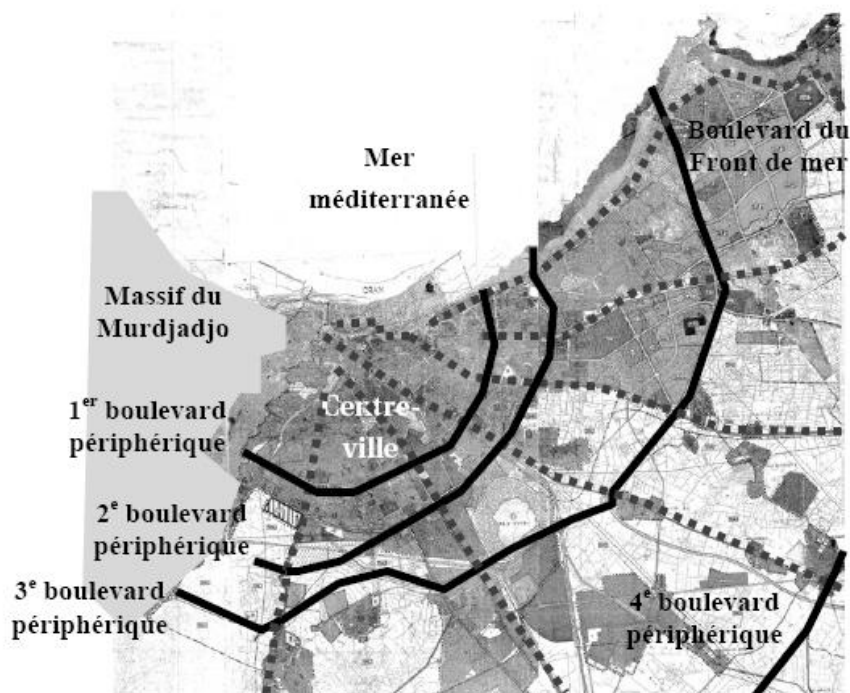


Figure V.7 : Situation des tissus urbains de la ville d'Oran.

Source : (Mazouz, 2015).

V.5 Description du cas d'étude : Nouveau pôle urbain d'Oran (Ahmed Zabana)

V.5.1 Situation géographique

Le nouveau pôle urbain Ahmed Zabana se situe dans la partie Sud-ouest de la ville d'Oran. Il s'étend sur une superficie de 1375 ha. Ce nouveau pôle urbain se décompose en trois parties sur (03) communes :

- ✓ Oran: 202 ha.
- ✓ Es-Senia : 329 ha.
- ✓ Misserghine : 844 ha.

Le site est borné :

- Au Nord par la zone périphérique sud d'Oran,
- A l'Ouest par le secteur urbanisé Bouamama,
- A l'Est par l'agglomération d'Ain El Beida,
- Au Sud-Ouest par la commune de Misserghine,
- Au Sud par la plaine agraire et la grande Sebkhia d'Oran.

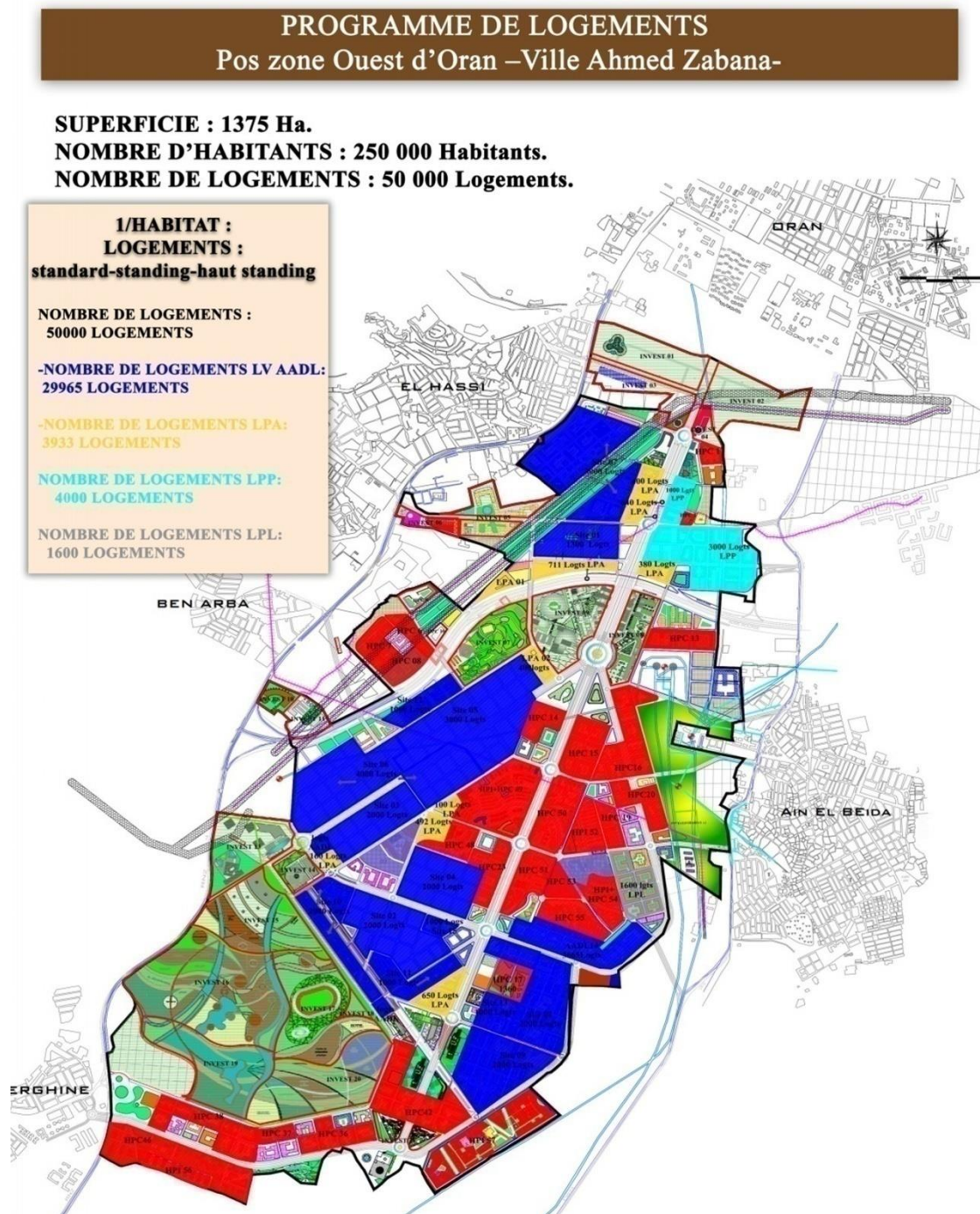


Figure V.8: Master Plan du nouveau pôle urbain « Ahmed Zabana ».

Source : (URBAB-Blida).

V.5.2 Composantes du système géographique

➤ **Orographique** :

Elle se distingue par la présence d'un point topographique culminant, se situe à 260 mètres d'altitude. Ce point barycentre de convergence de trois lignes de crête, décompose le site en plusieurs unités topographiques, suivant des déclivités de moyenne à forte.

Une quatrième ligne de crête prend naissance à partir du point (B) d'entrée et de sortie de Misserghine, qui longe le périmètre de délimitation du terrain.

➤ **Hydrographique** :

Elle se compose de quatre sous-bassins versants, avec la présence de trois cours d'eau importants (le premier dans la partie de l'extrémité Nord du terrain, et les deux autres dans la partie Sud).

Néanmoins, ces aléas naturels peuvent constituer des atouts d'aménagement palpables, et globalement aptes et prêts à être urbanisé.

➤ **Paysagère** :

Le système naturel paysager se caractérise par un ensemble de maquis, ponctués par des îlots boisés et des alignements d'arbres.

➤ **Régime foncier** :

Dans sa majorité, le site relève du domaine public de l'état, à l'exception de quelques parcelles privées. Les contraintes et servitudes urbaines (système infrastructurel et réseaux techniques)

Le site est encadré par un réseau de distribution urbain et territorial (RN 2, 4ème boulevard périphérique, C.W 33). Il est traversé par deux (02) conduites de gaz, trois (03) lignes de moyennes et hautes tensions, un réseau de conduite d'A.E.P, trois (03) réservoirs, poste de détente gaz, deux (02) carrières d'agrégat, etc.

V.5.3 Choix de l'îlot urbain

La Ville Nouvelle Ahmed Zabana, initialement conçue selon le modèle de l'îlot ouvert de l'architecte français Christian De Portzamparc, visait à offrir une grande diversité formelle et structurelle à travers ses différents quartiers urbains. Ce modèle intégrait plusieurs types de logements (logement social, AADL, LSP, LPP, PP) répartis dans diverses zones de la ville,

telles que la ville haute, la ville basse, El Batha, et le trident. L'idée centrale était de concevoir des unités de voisinage comme éléments de composition urbaine, favorisant l'intégration et la diversité architecturale.

Cependant, au fur et à mesure de la réalisation des travaux, des modifications importantes ont été apportées à la programmation des logements. Le nombre de logements AADL a ainsi considérablement augmenté, passant de 10 000 à plus de 30 000 unités. Ces changements ont abouti à l'abandon du principe de diversité des îlots ouverts initialement prévu dans le plan directeur, qui a été remplacé par des typologies standardisées d'îlots de type AADL. Ces nouvelles structures ont été conçues principalement par des entreprises chinoises et turques, en réponse aux besoins de logement massifs.

Bien que cette évolution ait conduit à une uniformisation des formes des îlots, le plan de masse initial a permis de maintenir une certaine logique de structuration urbaine dans l'ensemble des quartiers.

La conception des nouveaux îlots, régis par des normes de construction spécifiques comme le système de coffrage-tunnel, s'est orientée vers une approche pragmatique et rapide pour répondre à la forte demande en logements, tout en respectant les grandes lignes du tracé urbain prévu. En somme, bien que la diversité formelle des îlots ait été compromise, le développement global de la Ville Nouvelle Ahmed Zabana conserve une cohérence dans son aménagement, dictée par les impératifs de volume et de délais.

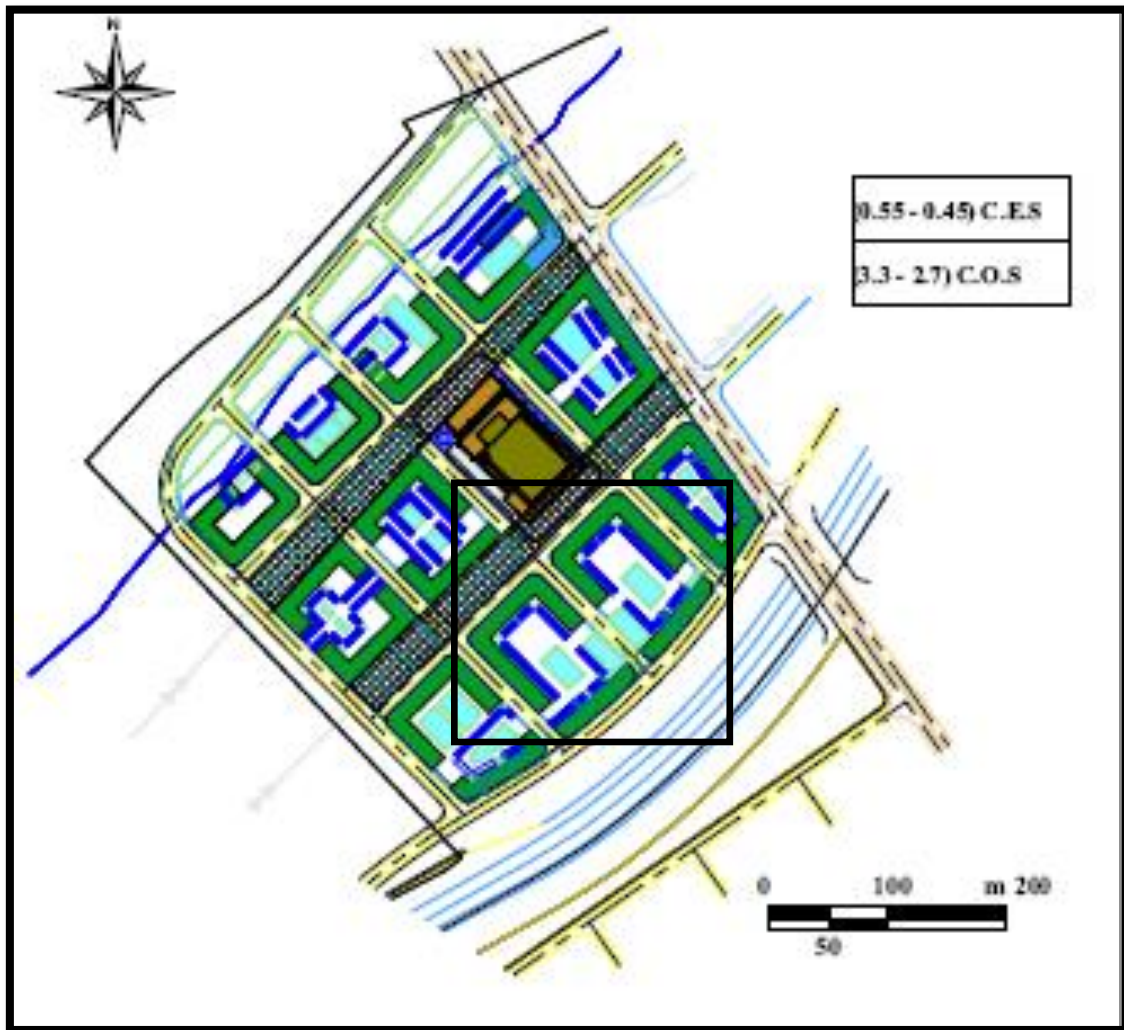


Figure V.9 : Forme des îlots urbains choisis appartenant du nouveau pôle urbain « Ahmed Zabana »

Source :(URBAB-Blida).

V.6 Présentation des simulations de microclimat urbain

Pour prédire l'effet d'îlot de chaleur urbain sur la zone étudiée au niveau du nouveau pôle « Ahmed Zabana » à Oran, des simulations CFD ont été effectuées.

V.6.1 Validation du modèle

La validation de notre modèle CFD a été réalisée en nous basant sur l'approche de (Aghamolaei et al., 2021), une étude de référence dans laquelle un modèle similaire a été utilisé pour simuler les flux radiatifs et convectifs dans des environnements extérieurs. Leur travail a été choisi comme référence en raison de la méthodologie rigoureuse qu'ils ont adoptée.

Conditions aux limites et hypothèses:

Pour valider notre modèle, nous avons utilisé les mêmes conditions aux limites qu'Aghamolaei et al. (2021). Leur étude repose sur un profil de vitesse logarithmique pour les conditions d'entrée, qui est une représentation couramment utilisée des profils de vitesse dans l'atmosphère, en particulier pour les simulations dans des environnements extérieurs. Nous avons ainsi appliqué ce même profil logarithmique dans notre modèle. En outre, nous avons utilisé la même condition de sortie, avec l'hypothèse de gradient nul, comme le préconise cette étude, afin d'assurer que notre simulation respecte les mêmes paramètres aux frontières du domaine.

V.6.2 Domaine de calcul et grille de cas d'étude

Dans notre étude, une approche de simulation CFD a été utilisée pour prédire l'effet d'îlot de chaleur urbain dans le nouveau pôle urbain « Ahmed Zabana » à Oran, décrit précédemment.

Les dimensions du domaine de calcul sont définies sur la base des lignes directrices des meilleures pratiques de (Franke et al., 2007) ; (Tominaga et al., 2008) et (Blocken, 2015).

Les lignes directrices recommandent que les dimensions du domaine soient requises en fonction de la hauteur maximale du plus haut bâtiment (H) (m) dans la zone d'intérêt de cette étude, qui est de 15 m et la largeur de rue ($W=30m$).

Le domaine de calcul 3D comme montré dans la figure V.12) créé a les caractéristiques de dimension : $50 \times 100 \times 200$ m³, sur la base des directives pratiques (Franke et al., 2007) et (Tominaga et al., 2008).

Etant donné la complexité de la géométrie urbaine de la zone d'intérêt étudiée, certaines simplifications doivent être introduites.

Bien que les détails des façades des bâtiments, y compris les balcons et la végétation de la rue, soient négligés.

La grille est construite en utilisant la technique d'extrusion surface-grille décrite par (van Hooff & Blocken, 2010).

L'opération est exécutée et produit une grille avec (2219766) cellules hexaédriques voir la figure V.11 :

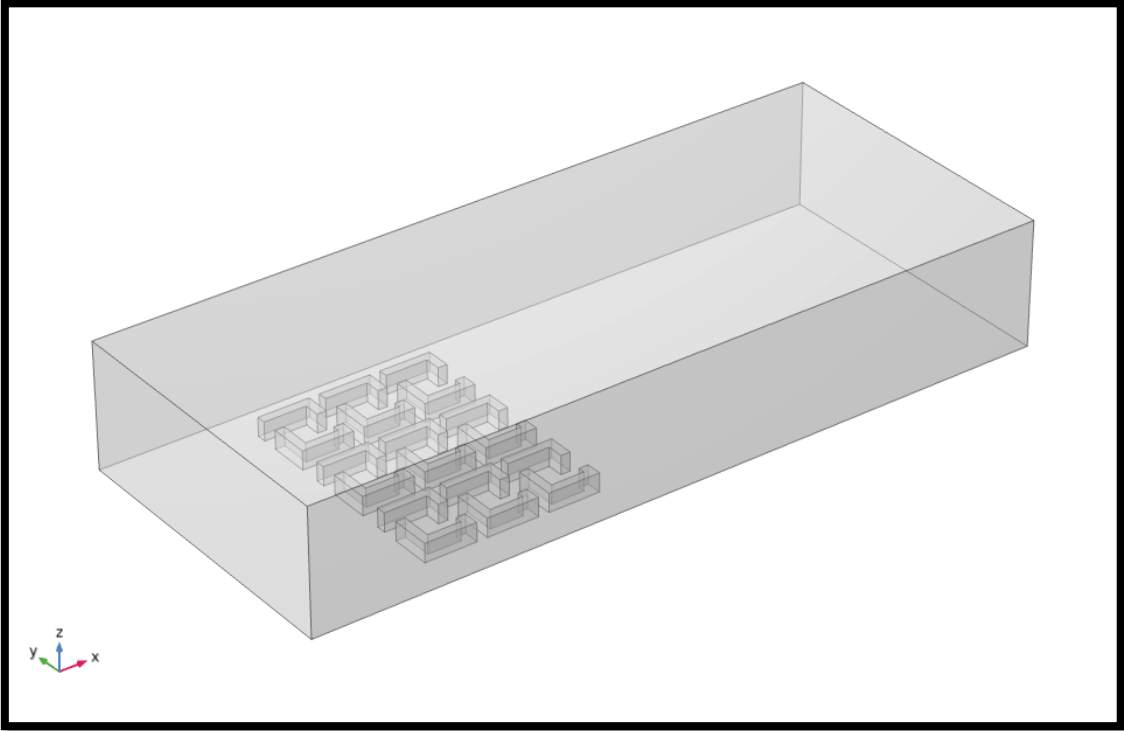
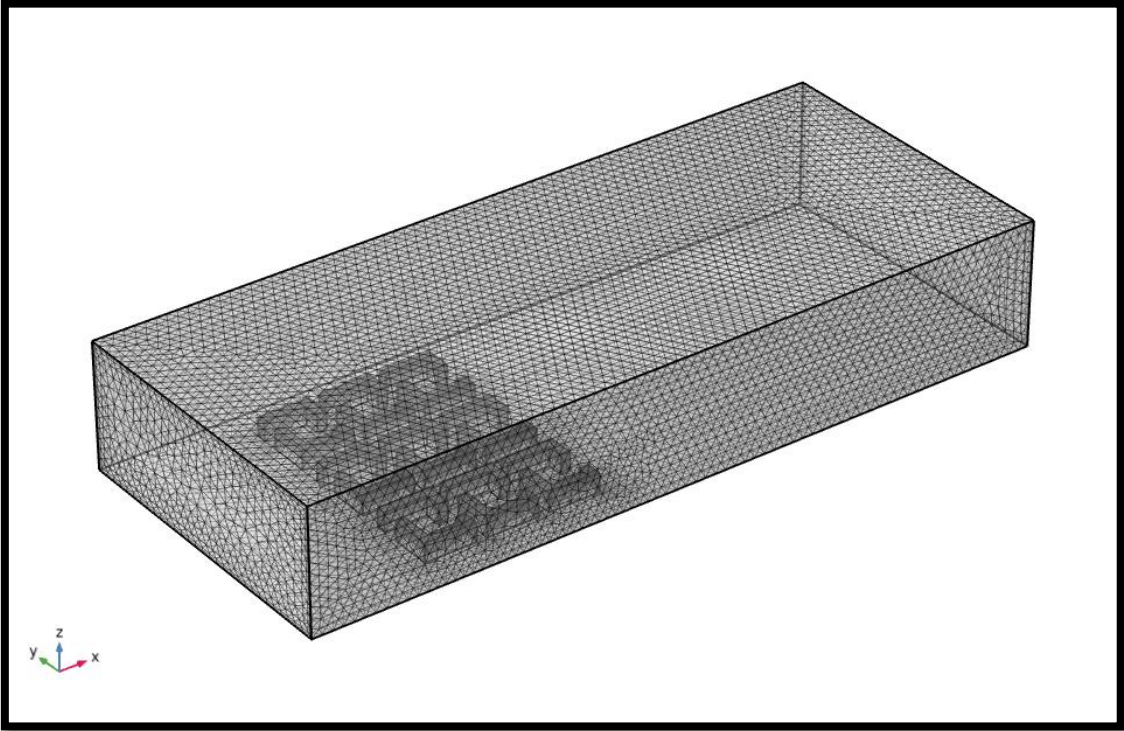


Figure V.10 : Géométrie du domaine de calcul des îlots urbains du nouveau pôle urbain « Ahmed Zabana »

a)



b)

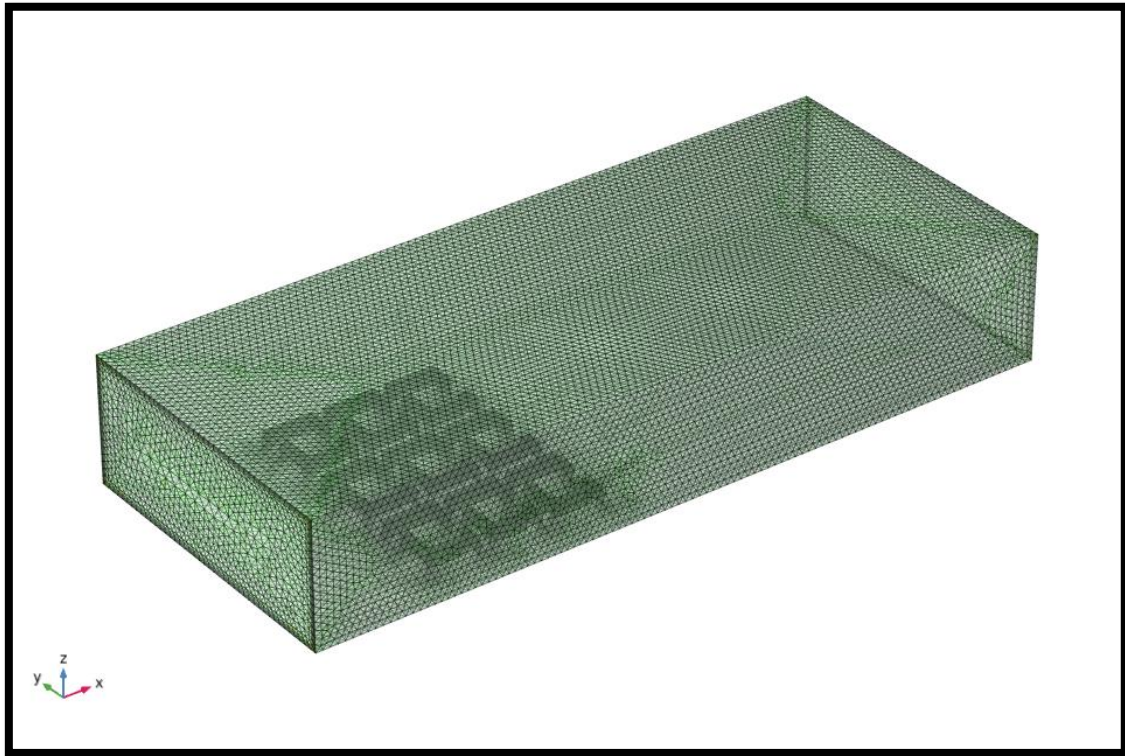


Figure V.11 : a) et b) Maillage du domaine de calcul (2219766 cellules)

V.6.3 Conditions aux limites

Les quatre faces verticales externes du domaine sont spécifiées comme des frontières d'écoulement et sont basées sur les données météorologiques recueillies à partir de la station météorologique nationale de l'aéroport d'Es Senia, Oran.

Cette station est qualifiée de station professionnelle au sein de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) sous le numéro d'identification international (60490). Cette station est située à 35°43'N de latitude et 00°36'W de longitude et se trouve à 90 m d'altitude. Les paramètres utilisés sont décrits dans le tableau V.3.

Tableau V.3 : Différentes conditions aux limites.

Paramètres	Valeurs
Inlet fluid temperature	28°C
Inlet fluid velocity (U ₀) m/s	10×10 ⁻³
Outlet fluid	Pressure Zero static
Compressibility	Incompressible flow
Turbulence model Type	RANS
Turbulent scheme	Standard k- ε

La frontière supérieure du domaine simulé , la rue de la surface, les toits des bâtiments et la frontière du sol sont définis comme des frontières de type mur.

Aux entrées, les profils verticaux pour la vitesse moyenne du vent (Eq (1)), l'énergie cinétique de la turbulence (k) (Eq. (2)) et le taux de dissipation de la turbulence (ε) (Eq. (3)) sont imposés par (Richards & Hoxey, 1993) :

$$U(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z + z_0}{z_0} \right) \quad (1)$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (2)$$

$$\varepsilon(z) = \frac{u_*^3}{k(z + z_0)} \quad (3)$$

Où :

u_* (m/s) est la vitesse de friction de la couche limite atmosphérique, et est généralement calculée à partir d'une vitesse donnée U_h à une hauteur de référence (h) comme suit:

$$u_* = \frac{kU_h}{\left(\frac{h+z_0}{z_0} \right)} \quad (4)$$

Avec :

k est la constante de Von Karman (≈ 0.4)

$z_0(m)$ est la longueur de rugosité aérodynamique.

$c_\mu = 0.09$ est une constante du modèle de turbulence.

Les données de température de l'air sont imposées aux entrées avec un profil uniforme. Aux sorties du domaine, la pression statique est nulle.

Les fonctions de paroi standard sont appliquées aux limites de la paroi (Launder & Spalding, 1974) avec des modifications de la rugosité (Cebeci & Bradshaw, 1977)

La valeur de la longueur de rugosité aérodynamique $Z_0 = 0,03$ m (Blocken et al., 2012) et peut varier de 0,25m à 0,5 m, selon la direction du vent.

La valeur de la hauteur de rugosité (k_s) pour la couche limite atmosphérique (ABL) est donnée par (Blocken et al., 2006):

$$k_{s,ABL} = 29.6y_0 \quad (5)$$

➤ **Pour les terrains accidentés et ouverts:**

$$y_0 = 0.1 \text{ m}$$

$$k_{s,ABL} \approx 3 \text{ m} ;$$

➤ **Pour les terrains très accidentés:**

$$y_0 = 0.5 \text{ m},$$

$$k_{s,ABL} \approx 15 \text{ m};$$

➤ **Pour les centres-villes :**

$$y_0 = 2 \text{ m}$$

$$k_{s,ABL} \approx 60 \text{ m}.$$

V.6.4 Paramètres de calcul

Les simulations dans cette étude ont été effectuées en utilisant la méthode CFD pour le mois le plus chaud de l'été (Août 2019).

Les équations de Navier-Stokes Reynolds moyennées (RANS) en régime permanent 3D sont résolues en combinaison avec le modèle de turbulence standard $k-\varepsilon$ (Shih et al., 1999).

Les équations gouvernantes pour la continuité (Eq. (6)), la quantité de mouvement (Eq. (7),(8), (9)) et les quantités turbulentes (Eq. (10),(11)) sont définies comme suit :

$$\text{div}\vec{V} = 0 \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} + \rho \text{div}(U\vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial X} + \text{div}(\mu \text{ grad } U) + \left[-\frac{\partial \rho \overline{u^2}}{\partial x} - \frac{\partial \rho \overline{uv}}{\partial y} - \frac{\partial \rho \overline{uw}}{\partial z} \right] \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial V}{\partial t} + \rho \text{div}(V\vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial Y} + \text{div}(\mu \text{ grad } V) + \left[-\frac{\partial \rho \overline{uv}}{\partial x} - \frac{\partial \rho \overline{v^2}}{\partial y} - \frac{\partial \rho \overline{vw}}{\partial z} \right] \quad (8)$$

$$\rho \frac{\partial W}{\partial t} + \rho \text{div}(W\vec{V}) = -\frac{\partial P}{\partial Z} + \text{div}(\mu \text{ grad } W) + \left[-\frac{\partial \rho \overline{uw}}{\partial x} - \frac{\partial \rho \overline{vw}}{\partial y} - \frac{\partial \rho \overline{w^2}}{\partial z} \right] \quad (9)$$

$$\rho \frac{\partial K}{\partial t} + \rho \text{div}(K\vec{U}) = \text{div}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{ grad } K\right) + 2\mu_t S_{ij} S_{ij} - \rho \varepsilon \quad (10)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \text{div}(\varepsilon \vec{U}) = \text{div}\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \text{ grad } \varepsilon\right) + \rho C_{1\varepsilon} \sqrt{2S_{ij} S_{ij}} \varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{U\varepsilon}} \quad (11)$$

Où:

\vec{V} est la vectrice vitesse moyen,

U, V and W sont la vitesse moyenne du vent dans les directions x, y, and z respectivement,

P est la pression moyenne,

μ est la viscosité dynamique,

ρ est la densité du fluide,

μ_t est la viscosité turbulente,

S_{ij} est le taux de déformation moyen,

k est l'énergie cinétique turbulente,

ε est le taux de dissipation de la turbulence.

Les constantes du modèle sont $C_{2\varepsilon} = 1.9$; $\sigma_k = 1.0$; $\sigma_\varepsilon = 1.2$.

V.7 Analyse et interprétation des résultats

Nous rappelons que les résultats présentés dans cette section concernent le mois le plus chaud de l'année (Août 2019). Ce mois est caractérisé par une température moyenne d'environ 28°C et une vitesse du vent égale à 10 m/s.

V.7.1 Distribution de la température de l'air

La figure V.12 montre la distribution des températures de l'air autour des îlots urbains du nouveau pôle urbain « **Ahmed Zabana** » au cours du mois d'Août 2019, la période la plus chaude de l'année. Cette analyse met en évidence les observations suivantes :

1- Augmentation de la température et formation des points chauds :

L'étude montre que, pendant la période chaude du mois d'Août, les températures étaient particulièrement élevées dans la zone étudiée, ce qui a conduit à la formation des points chauds (hot spots). Ces points chauds sont caractéristiques du phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) , où la température locale est significativement plus élevée que dans les zones rurales environnantes.

2- Stockage de chaleur sensible dans les matériaux :

L'augmentation de la température dans cette zone urbaine est liée à l'accumulation de chaleur dans les matériaux de construction (exemple : le béton), qui emmagasinent la chaleur pendant la journée et la relâchent progressivement, contribuant ainsi à l'intensification de l'ICU.

3- Effet d'admittance thermique :

L'admittance thermique des bâtiments, c'est-à-dire leur capacité à absorber la chaleur, joue un rôle majeur. Les bâtiments dans cette zone absorbent une grande quantité de rayonnement solaire, et ce rayonnement est piégé entre les structures urbaines, ce qui augmente la température ambiante. Cela est particulièrement accentué pendant la journée.

4- Dôme de chaleur à haute altitude :

L'augmentation des températures n'est pas limitée à la surface de la canopée urbaine (couche inférieure de l'atmosphère en contact direct avec la ville) mais peut également se manifester sous la forme d'un "dôme de chaleur" à des altitudes plus élevées, au-dessus de la surface urbaine.

5- Impact sur la demande énergétique :

Le phénomène d'ICU peut entraîner une augmentation de la demande énergétique, notamment en été, car les températures élevées augmentent l'utilisation des systèmes de climatisation et de refroidissement.

Enfin, les simulations numériques (CFD) sont utiles pour prédire les températures de l'air dans les milieux urbains réels, offrant des résultats de meilleure précision pour l'analyse du phénomène d'îlot de chaleur urbain.

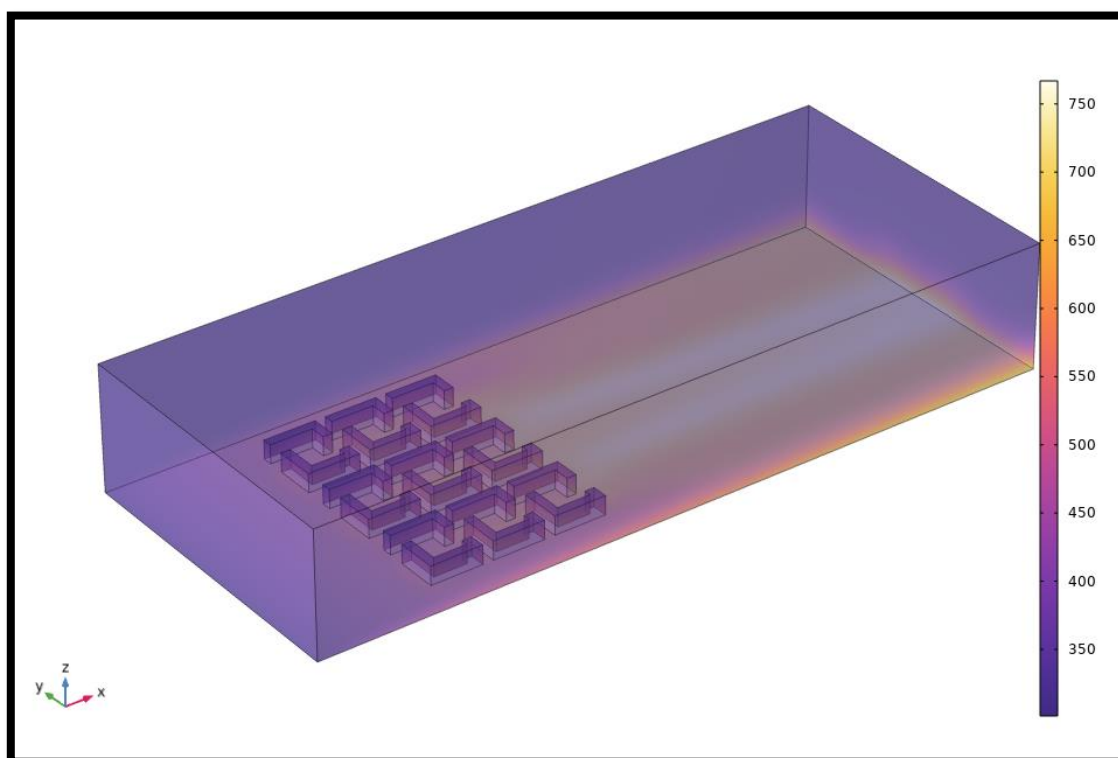


Figure V.12: La distribution de température de l'air en °k autour des îlots urbains du nouveau pôle urbain « Ahmed Zabana »

V.7.2 Distribution de la vitesse du vent

La figure V.13 présente la distribution de la vitesse du vent autour des bâtiments dans le nouveau pôle urbain « **Ahmed Zabana** », où l'on constate une accélération importante de la vitesse du vent sous le vent des blocs. Cela est particulièrement évident dans les zones situées en aval des bâtiments, où la vitesse du vent est plus élevée en raison de la configuration urbaine et de l'orientation des rues.

En effet, lorsque le vent souffle parallèlement à la rue, l'écoulement de l'air dans les canyons urbains (les rues entre les bâtiments) résulte des forces combinées de la poussée

thermique (due à l'accumulation de chaleur dans les bâtiments et les surfaces) et du vent lui-même. Cette interaction génère des flux d'air qui peuvent être plus intenses dans certaines zones.

L'orientation et la forme des rues du nouveau pôle urbain « **Ahmed Zabana** » influencent fortement la circulation de l'air. Les rues droites et parallèles, caractéristiques de ce nouveau pôle urbain, facilitent le mouvement de l'air le long de ces axes. Cela génère une meilleure circulation de l'air dans cette zone urbaine, ce qui contribue à améliorer la ventilation naturelle. Cette disposition urbaine favorise la dissipation de la chaleur accumulée, particulièrement pendant les journées chaudes, et permet un rafraîchissement de l'air.

En outre, la simulation montre la formation d'un vortex dans le canyon urbain, phénomène induit par le transfert de quantité de mouvement lorsque l'air traverse la couche de cisaillement au niveau des toits des bâtiments. Cette dynamique crée une zone de turbulence qui peut influencer la répartition des températures et la vitesse du vent à différentes hauteurs. Ce phénomène est plus marqué dans les canyons urbains à rapport d'aspect (H/W) faible, comme ceux observés dans le modèle du nouveau pôle urbain « **Ahmed Zabana** » avec un rapport H/W de 0,5, qui favorise une meilleure circulation de l'air en maintenant une ventilation naturelle plus efficace.

La conception de type "avenue" avec un rapport d'aspect réduit ($H/W = 0,5$) améliore la circulation de l'air, permettant une ventilation naturelle optimale, surtout pendant l'été. Cette configuration est bénéfique pour atténuer les effets des îlots de chaleur urbains, car elle facilite l'évacuation de l'air chaud et permet un rafraîchissement des espaces urbains.

Enfin, la configuration actuelle de l'urbanisme avec des espaces ouverts présente également des avantages pour le confort thermique. Ces espaces ouverts contribuent à réduire la chaleur dans les rues pendant les épisodes caniculaires, en particulier grâce aux vents dominants de l'ouest qui aident à réduire l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU). Ces vents jouent un rôle crucial dans l'atténuation des températures élevées, en apportant de l'air frais et en permettant une meilleure dissipation de la chaleur.

En conclusion, les résultats de la simulation avec le modèle de turbulence (3D RANS-Standard k- ϵ) montrent que cette méthode est capable de simuler de manière précise les flux d'air dans un environnement urbain. La simulation fournit des informations détaillées sur

l'écoulement de l'air, les dynamiques de la ventilation naturelle et l'impact des différentes configurations urbaines sur la réduction de l'îlot de chaleur urbain.

Ces résultats soulignent l'importance de concevoir des espaces urbains favorisant la circulation de l'air et la ventilation naturelle pour améliorer le confort thermique et limiter les effets négatifs des températures élevées, notamment durant les épisodes caniculaires.

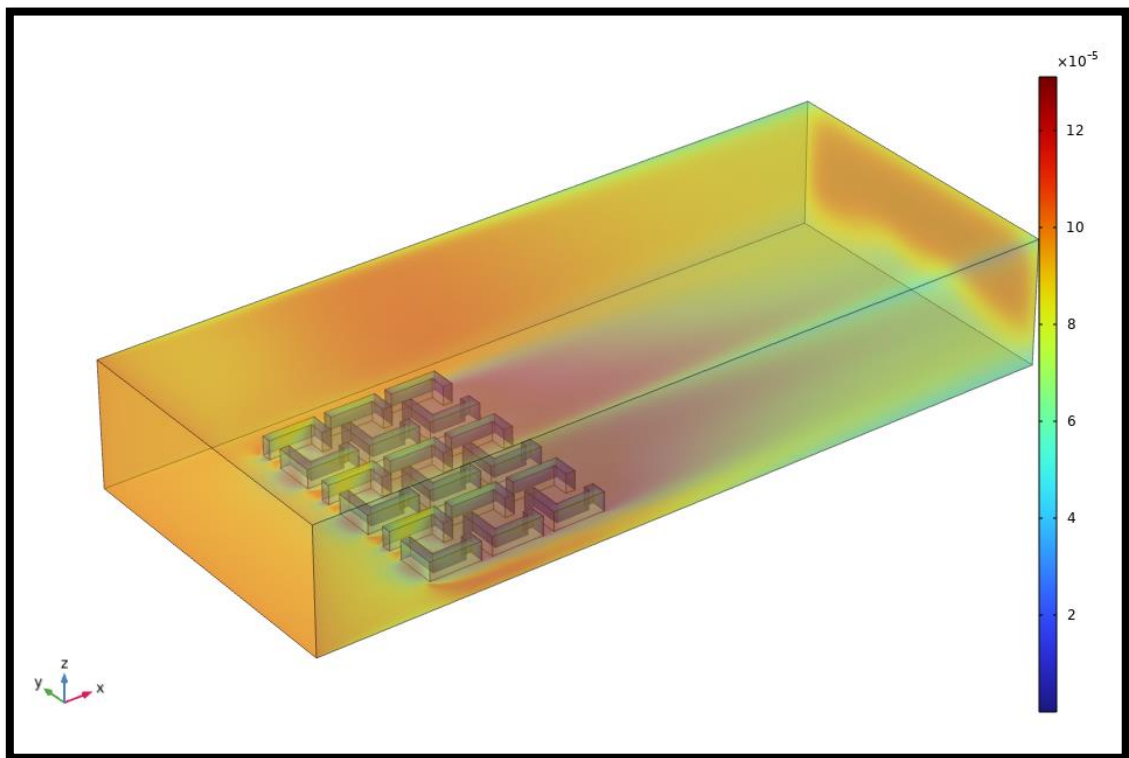


Figure V.13 : Magnitude de la vitesse volumique

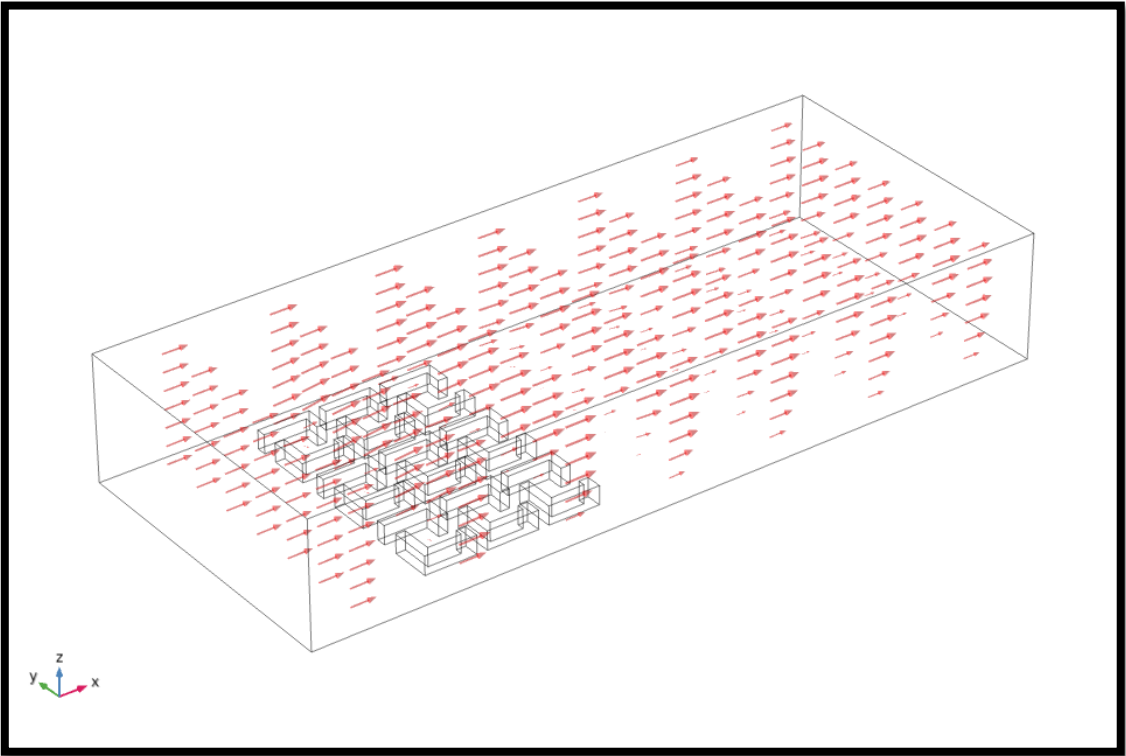


Figure V.14 :Champ de vitesse du vent m/s

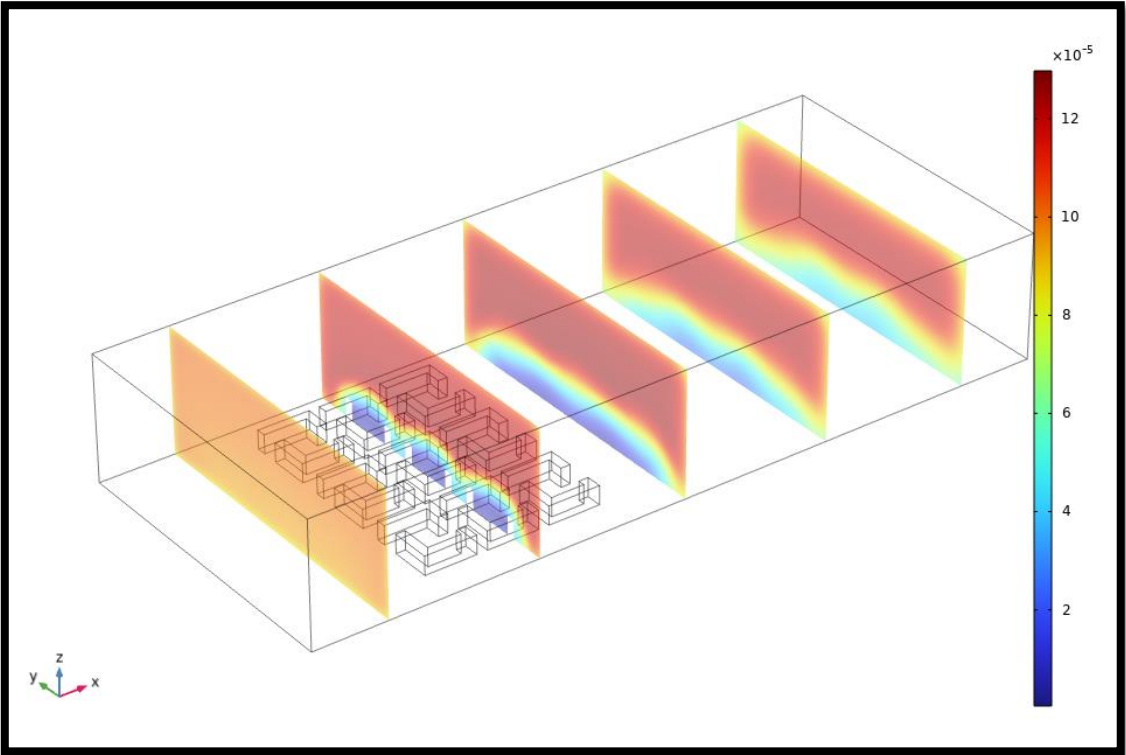
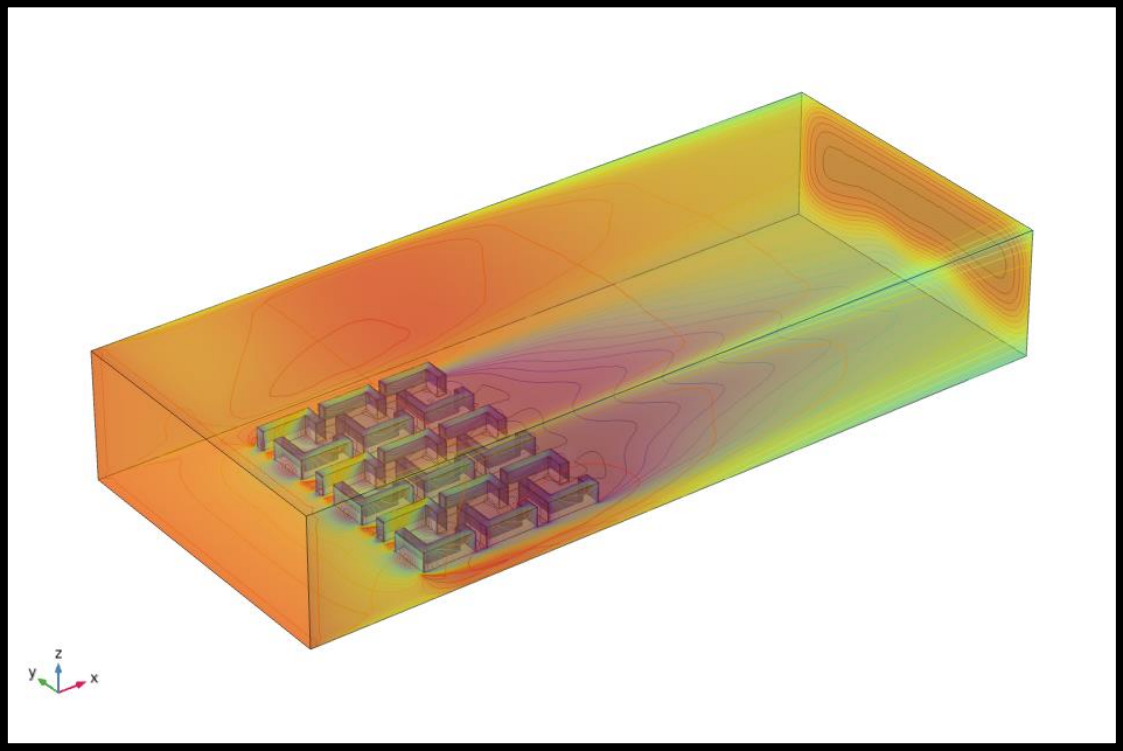


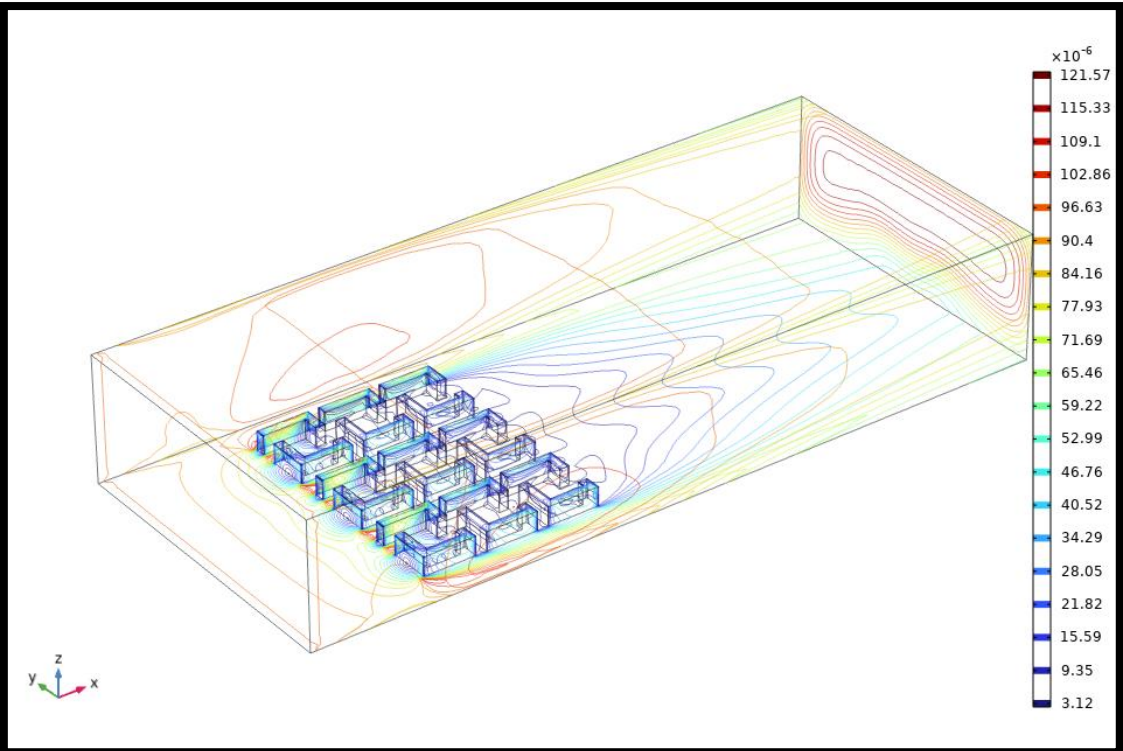
Figure V.15 : Slice ; magnitude de la vitesse

Chapitre V: Prédiction de l'îlot de chaleur urbain dans une ville méditerranéenne : cas de la ville d'Oran

a)



b)



c)

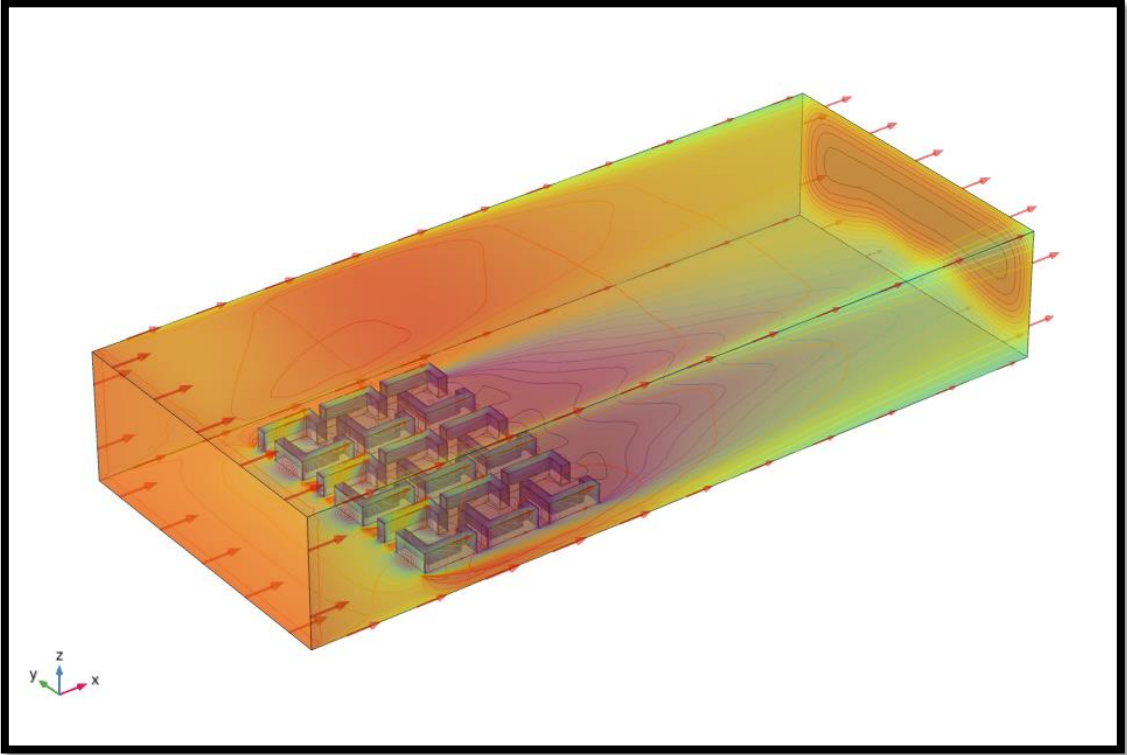


Figure V.16 :a),b) ,c) Contour de la vitesse du vent (m/s)

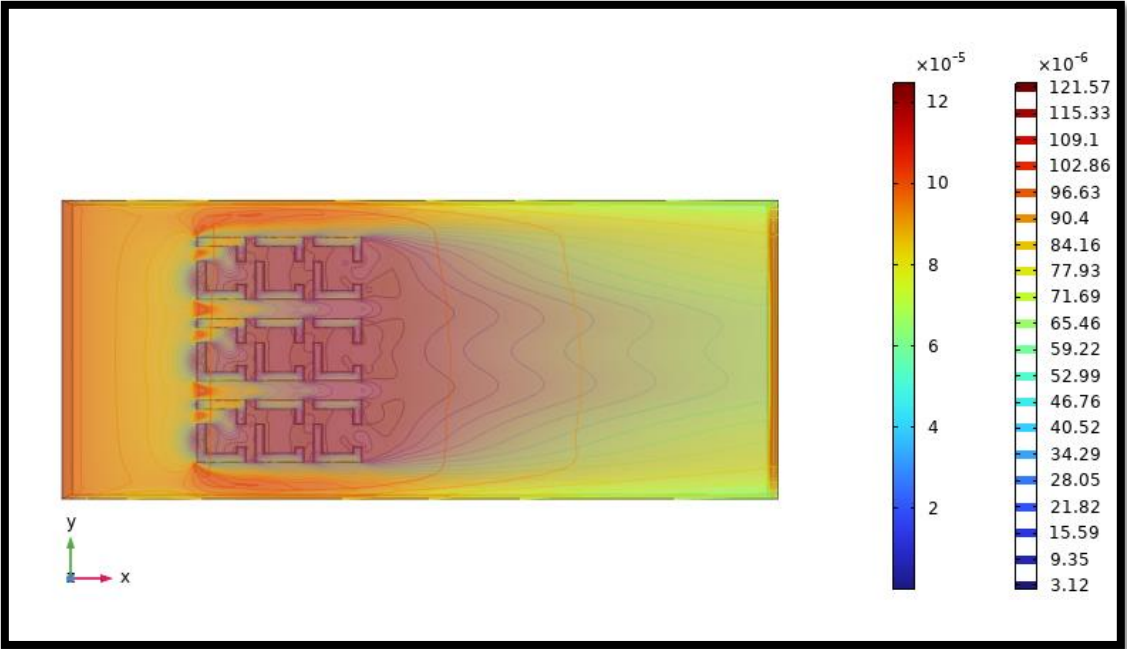


Figure V.17 : Distribution de la vitesse (m/s) sur le plan xy

V.7.3 Influence du transfert thermique

Dans un milieu urbain complexe, le microclimat est fortement influencé par les échanges énergétiques sous forme de flux de chaleur, en particulier par conduction thermique dans le sol et les matériaux de construction. La conduction thermique se produit lorsqu'il y a un transfert de chaleur entre deux zones d'un même milieu, ce qui joue un rôle central dans la régulation thermique de la zone urbaine.

La figure V.18 présente l'influence des flux thermiques au niveau des îlots urbains du nouveau pôle urbain « **Ahmed Zabana** » pour différentes valeurs de chaleur ($q = 0.5$, $q = 0.7$, $q = 1.0$, $q = 1.5$). Les résultats montrent que le transfert de chaleur entre les bâtiments se fait par conduction thermique, ce qui signifie que la chaleur est propagée à travers les matériaux des murs et des sols. Pendant la journée, les bâtiments absorbent une grande quantité de rayonnement solaire, ce qui provoque un réchauffement des structures et entraîne un transfert de chaleur entre les bâtiments. Cette redistribution thermique conduit à une élévation des températures dans le nouveau pôle urbain, contribuant ainsi au phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU).

Par ailleurs, le sol emmagasine également une partie de l'énergie radiative incidente en se réchauffant pendant la journée. Cette chaleur est ensuite transférée en profondeur, ce qui entraîne une accumulation de chaleur dans le sol. Durant la nuit, le sol libère progressivement cette chaleur stockée, transférant de la chaleur vers la surface et provoquant un refroidissement du sol. Ce processus de stockage et de restitution de la chaleur est crucial pour expliquer le phénomène d'îlot de chaleur nocturne, où les températures restent plus élevées dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales environnantes.

Les résultats montrent que l'intensité du phénomène de conduction thermique dépend de la quantité de chaleur (q) absorbée et stockée par les matériaux et le sol. À des valeurs de chaleur plus élevées ($q = 1.0$ et $q = 1.5$), la propagation de la chaleur est plus marquée, entraînant une plus grande redistribution thermique et une intensification de l'îlot de chaleur urbain. En revanche, à des valeurs plus faibles de chaleur ($q = 0.5$ et $q = 0.7$), l'intensité du phénomène est moins prononcée, mais contribue néanmoins à l'augmentation des températures.

En conclusion, ces résultats indiquent que la conduction thermique joue un rôle majeur dans l'intensification de l'îlot de chaleur urbain, en particulier lors des périodes de forte chaleur. Le sol et les matériaux de construction agissent comme des réservoirs thermiques, stockant de la chaleur durant la journée et la libérant lentement durant la nuit, ce qui prolonge l'effet de la chaleur urbaine au-delà des heures diurnes. Ce mécanisme est essentiel pour comprendre et anticiper les variations de température dans les environnements urbains, notamment lors des vagues de chaleur, et souligne l'importance de la gestion thermique des matériaux et de l'urbanisme pour atténuer l'impact des îlots de chaleur urbains.

a)

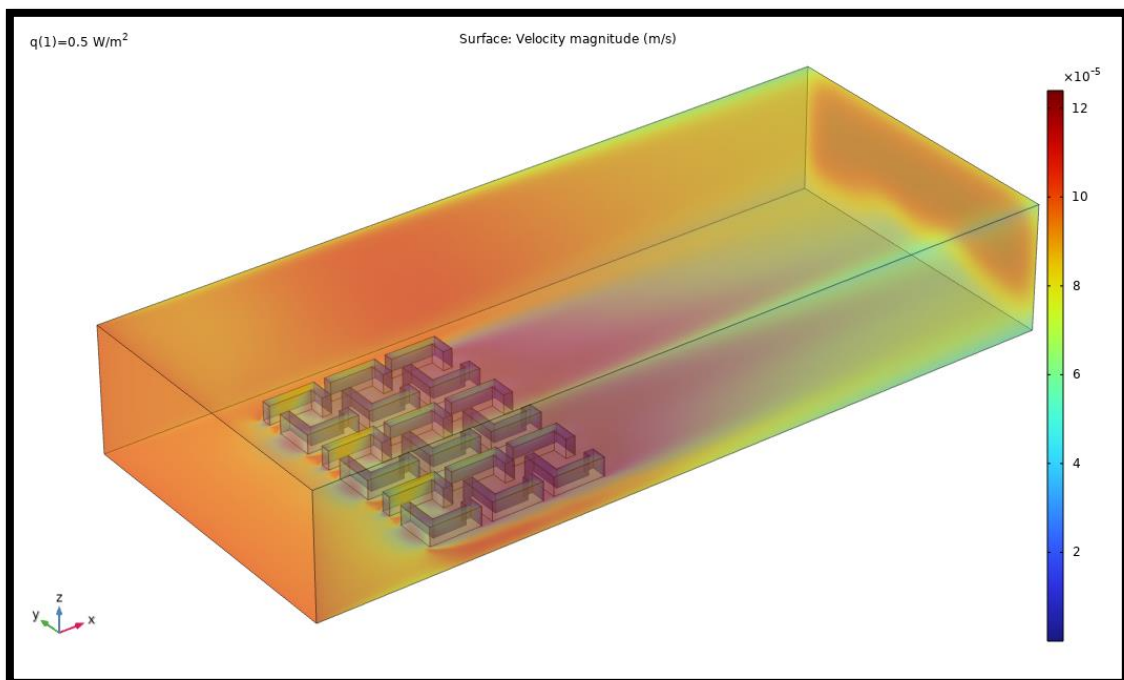


Figure V.18 : a) Influence du transfert de chaleur, $q=0.5$.

b)

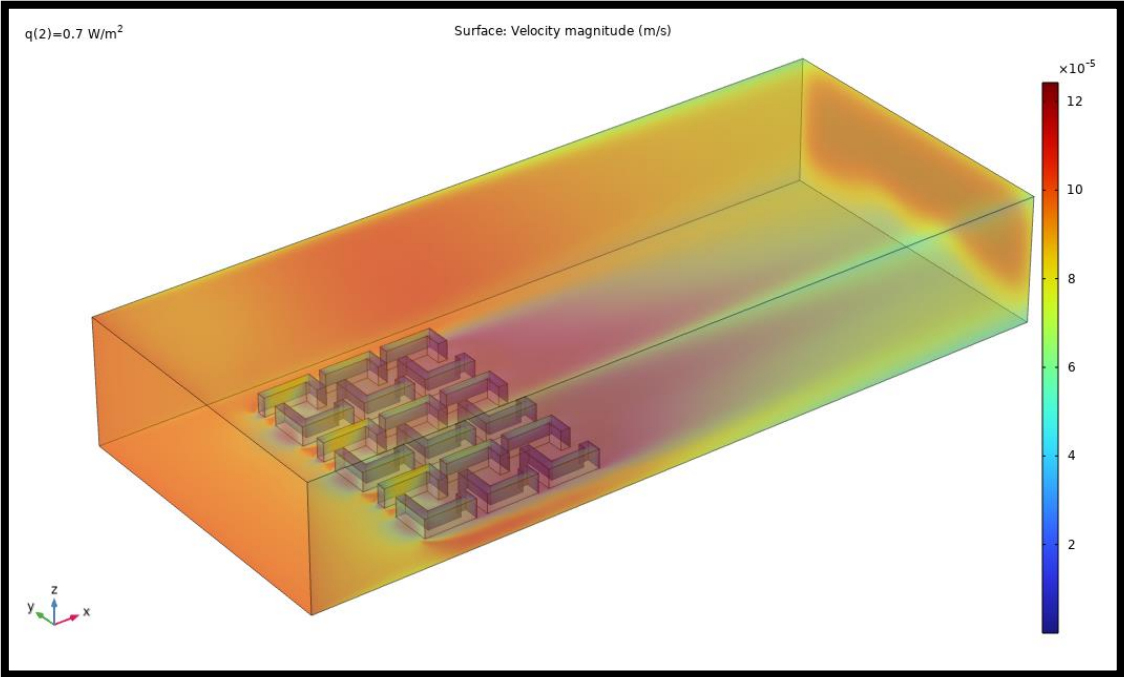


Figure V.19: b) Influence du transfert de chaleur, $q=0.7$.

c)

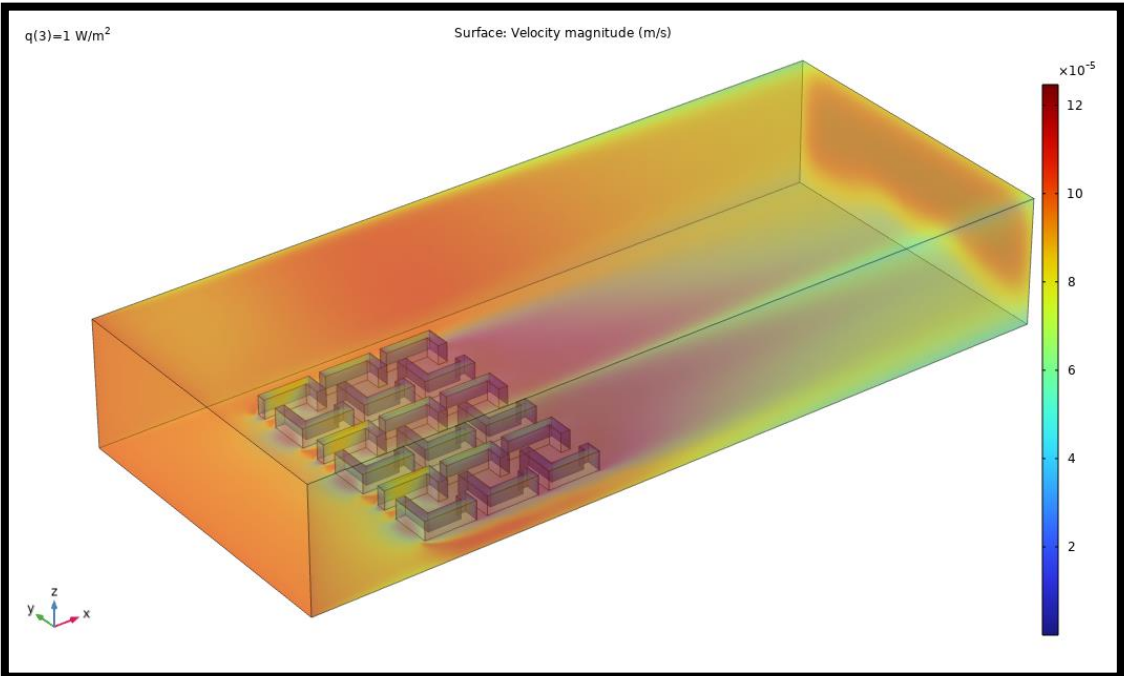


Figure V.20 : c) Influence du transfert de chaleur, $q=1.0$.

d)

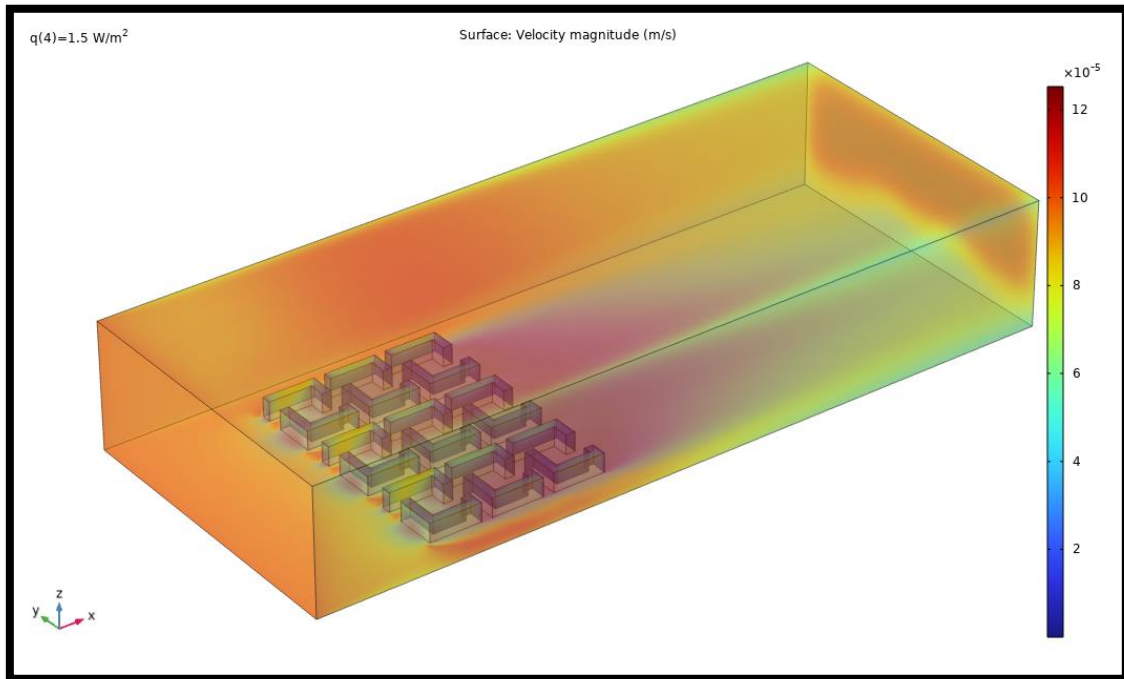


Figure V.21 : d) Influence du transfert de chaleur, $q=1.5$.

Conclusion

L'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) est un aspect fondamental à prendre en compte dans la conception des villes modernes. La forme urbaine influence non seulement le climat à l'échelle de la ville, mais aussi à celle des rues et des quartiers, en fonction de la disposition des îlots urbains et de leur orientation par rapport aux vents dominants. Une planification urbaine bien réfléchie, intégrant ces éléments, peut réduire l'impact de l'ICU et créer des environnements urbains plus agréables et plus durables.

Le vent joue un rôle essentiel dans le rafraîchissement de la ville en éliminant l'air chaud et en apportant de l'air plus frais et moins pollué. Ainsi, l'optimisation de la circulation de l'air dans la ville devient un enjeu crucial pour atténuer l'effet d'îlot de chaleur urbain, surtout en période estivale.

Dans cette étude, une simulation CFD utilisant le modèle de turbulence 3D RANS, couplé au modèle de turbulence standard $k-\epsilon$, a permis de prédire l'apparition de l'ICU dans le nouveau pôle urbain « **Ahmed Zabana** ». Les résultats ont montré que cette approche était

efficace pour identifier les zones sensibles à l'ICU et pour évaluer l'impact de diverses stratégies d'adaptation climatique, telle : la ventilation naturelle.

Les résultats ont également révélé l'importance de la disposition des bâtiments et de leur orientation par rapport aux vents dominants pour limiter l'effet de l'ICU et améliorer la ventilation naturelle. Placer des bâtiments de grande hauteur de manière stratégique, par exemple, améliore l'écoulement de l'air dans les canyons urbains, ce qui contribue à une meilleure circulation de l'air et, par conséquent, à un refroidissement plus efficace d'une zone urbaine.

Enfin, cette étude montre clairement l'importance d'intégrer les dynamiques thermiques et les flux d'air dans la conception urbaine pour atténuer l'impact de l'ICU. Donc, il est crucial d'utiliser des méthodes numériques CFD pour mieux comprendre les phénomènes thermiques dans les zones urbaines, ce qui permet aux urbanistes de prendre des décisions éclairées sur l'agencement des bâtiments, l'orientation des rues et les stratégies d'adaptation des villes au changement climatique. En tenant compte de ces facteurs, nous pouvons non seulement améliorer le confort thermique des habitants, mais aussi réduire la consommation énergétique, notamment durant les périodes de forte chaleur. Cela souligne l'importance d'adopter des stratégies de conception durable, en particulier dans les zones soumises à des conditions climatiques extrêmes, comme celles caractérisées par un climat méditerranéen. La prise en compte des phénomènes de chaleur urbaine et des solutions adaptées permettra de créer des environnements urbains plus résilients et plus agréables à vivre.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU), amplifié par les effets du changement climatique, représente un enjeu majeur pour les villes modernes, en particulier dans les régions méditerranéennes comme l'Algérie. Cette thèse a permis de mieux comprendre l'interaction complexe entre la morphologie urbaine et les paramètres microclimatiques, en se concentrant sur le cas de la ville d'Oran, confrontée à un réchauffement climatique marqué et une urbanisation rapide.

La présente thèse a exploré les interactions complexes entre la morphologie urbaine et les paramètres microclimatiques, en mettant l'accent sur la formation et l'intensification du phénomène des îlots de chaleur urbains (ICU) dans le contexte du changement climatique. À travers l'étude de l'ICU dans le nouveau pôle urbain « Ahmed Zabana » à Oran, en utilisant la méthode des simulations numériques CFD, nous avons démontré que la formation de l'îlot de chaleur urbain résulte d'un ensemble de plusieurs facteurs, dont la géométrie urbaine des bâtiments, la densité urbaine, l'absence de la végétation et la dynamique des flux thermiques. La simulation numérique a révélé que les températures élevées et les points chauds sont principalement dus à l'absorption et à la rétention de la chaleur par les matériaux de construction, aggravés par un faible échange thermique avec l'extérieur. Cette situation favorise l'intensification de l'ICU, avec des conséquences significatives sur le confort thermique et la consommation énergétique.

Les simulations numériques CFD ont permis de simuler avec précision la distribution des paramètres microclimatiques, notamment la température de l'air et la vitesse du vent, et de comprendre comment ces facteurs interagissent avec la morphologie urbaine. Nous avons mis en évidence l'importance de la ventilation naturelle, particulièrement dans les canyons urbains, pour limiter l'élévation de la température et réduire l'effet de l'ICU.

Les résultats obtenus sont en accord avec les recherches précédentes, confirmant l'efficacité des modèles de simulation numérique et la pertinence de la méthode RANS en combinaison avec le modèle de turbulence $k-\epsilon$ pour prédire les phénomènes microclimatiques dans des contextes urbains complexes. Ainsi, l'intégration de ces outils dans la planification urbaine devient indispensable pour anticiper et atténuer les impacts négatifs de l'ICU, tout en contribuant à la réduction de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre (notamment le principal gaz :CO₂).

Conclusion Générale

En effet, les îlots de chaleur urbains sont non seulement le résultat d'une accumulation thermique due à la configuration physique de la ville, mais aussi l'expression de facteurs sociaux et environnementaux qui exacerbent les effets du changement climatique. Par conséquent, la prise en compte de la morphologie urbaine et des caractéristiques climatiques locales lors de la conception urbaine est essentielle pour adapter les villes aux effets du changement climatique actuels et futurs.

Perspectives et recommandations

Les conclusions de cette recherche soulignent l'importance de repenser la conception urbaine afin de mieux intégrer les principes de résilience face aux effets du changement climatique. Parmi les pistes à explorer, la création de zones de ventilation naturelle et l'utilisation de matériaux de construction à faible conductivité thermique dans le développement urbain, constituent des leviers essentiels pour la réduction de l'ICU.

De plus, les résultats de cette thèse ouvrent la voie à de futures recherches sur la modélisation du microclimat urbain, avec des applications potentielles dans d'autres villes méditerranéennes confrontées à des défis similaires. Il serait également pertinent d'explorer l'intégration de ces approches dans les politiques publiques de gestion urbaine, afin de promouvoir des villes plus durables et climatiquement adaptées.

Enfin, cette étude met en lumière l'importance de concilier l'urbanisation et la gestion climatique pour assurer un avenir plus viable et résilient face aux impacts du changement climatique actuels et futurs. L'intégration des principes de durabilité et de résilience dans la conception urbaine constitue une étape cruciale pour limiter l'impact du changement climatique et améliorer la qualité de vie en milieu urbain.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Aflaki, A., Mirnezhad, M., Ghaffarianhoseini, A., Ghaffarianhoseini, A., Omrany, H., Wang, Z. H., & Akbari, H. (2017). Urban heat island mitigation strategies: A state-of-the-art review on Kuala Lumpur, Singapore and Hong Kong. *Cities*, 62, 131–145. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2016.12.015>
- Aghamolaei, R., Fallahpour, M., & Mirzaei, P. A. (2021). Tempo-spatial thermal comfort analysis of urban heat island with coupling of CFD and building energy simulation. *Energy and Buildings*, 251, 111317. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111317>
- Ahmad, K., Khare, M., & Chaudhry, K. K. (2005). Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections—a review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 93(9), 697–717. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2005.09.001>
- Allard, F., Ghiaus, C., & Szucs, A. (2009). Natural ventilation in high-density cities. In *Designing High-Density Cities* (pp. 164–189). Routledge.
- Allegrini, J., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2015). Influence of morphologies on the microclimate in urban neighbourhoods. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 144, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.02.022>
- Allegrini, J., & Carmeliet, J. (2018). Simulations of local heat islands in Zürich with coupled CFD and building energy models. *Urban Climate*, 24, 340–359. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.005>
- AMS.(2017).Meteorologicalglossary.Retrievedfrom http://glossary.ametsoc.org/wiki/Main_Page
- Andersson, B., Andersson, R., & Håkansson, L. (2011). *Computational fluid dynamics for engineers*. Hemisphere Publishing Corporation.
- Antoniou, N., Montazeri, H., Neophytou, M., & Blocken, B. (2020). CFD simulation of urban microclimate: Validation using high-resolution field measurements. *Building and Environment*, 174, 106751. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106751>
- Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- Ashie, Y., Ohta, T., & Iwata, T. (1999). A study on the urban heat island in the Tokyo Metropolitan Area: Characteristics and urban climate simulation. *Atmospheric Environment*, 33(6), 867–875. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(98\)00242-7](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(98)00242-7)
- Ashie, Y., Takahashi, F., & Matsui, T. (2011). Urban-scale CFD analysis in support of a climate-sensitive design for the Tokyo Bay area. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(8), 835–847. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2011.06.002>
- Bairoch, P. (1996). *Victoires et déboires: Histoire économique du monde du XVIe siècle à nos jours*. Gallimard.

- Becker, P., Mills, G., & Oke, T. R. (1995). *Urban heat island and its impact on urban energy use*. *Journal of Applied Meteorology*, 34(7), 1501–1513. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1995\)034<1501:UHIAP1>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1995)034<1501:UHIAP1>2.0.CO;2)
- Blazek, J. (2015). *Computational fluid dynamics: Principles and applications* (3rd ed.). Elsevier.
- Bonacquisti, V., Casale, G. R., Palmieri, S., & Siani, A. M. (2006). A canopy layer model and its application to Rome. *Atmospheric Environment*, 40(12), 2345–2357. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.12.003>
- Blocken, B., Janssen, W. D., & van Hooff, T. (2012). CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. *Environmental Modelling & Software*, 30, 15–34. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.11.009>
- Blocken, B., Stathopoulos, T., & Carmeliet, J. (2007). CFD simulation of the atmospheric boundary layer: Wall function problems. *Atmospheric Environment*, 41(2), 238–252. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.08.019>
- Blocken, B. (2015). Computational fluid dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations. *Building and Environment*, 91, 219–245. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.015>
- Bo-Ot, L. M., Wang, Y.-H., Chiang, C.-M., & Lai, C.-M. (2012). Effects of a green space layout on the outdoor thermal environment at the neighborhood level. *Energy and Buildings*, 49, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.005>
- Boucher, O., Dufresne, J. L., Vial, J., Brun, É., Cattiaux, J., Chauvin, F., ... & Guivarch, C. (2015). Projection des changements climatiques futurs. *La Météorologie*.
- Cebeci, T., & Bradshaw, P. (1977). *Momentum transfer in boundary layers*. Hemisphere Publishing Corporation.
- Cermak, J. E. (1984). Physical modelling of flow and dispersion over complex terrain. In J. W. Stramski & G. Fischer (Eds.), *Boundary layer structure* (pp. 261–292). Springer.
- Chen, H., Ooka, R., Huang, H., & Tsuchiya, T. (2009). Study on mitigation measures for outdoor thermal environment on present urban blocks in Tokyo using coupled simulation. *Building and Environment*, 44(11), 2290–2299. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.03.015>
- Chow, W. T. L., Chan, C. K., & McAllister, M. (2006). Urban heat island effects in a tropical city. *Atmospheric Environment*, 40(15), 2925–2937. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.01.018>
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichet, T., Friedlingstein, P., ... & Wehner, M. (2013). Long-term climate change: Projections, commitments, and irreversibility. In T. F. Stocker et al. (Eds.), *Climate change 2013: The physical science basis* (pp. 1029–1136). Cambridge University Press.
- Coquery, M. (1965). Quartiers périphériques et mutations urbaines. *Méditerranée*, 6(4), 285–298. <https://doi.org/10.3406/medit.1965.1175>

- De La Flor, F. S., & Dominguez, S. A. (2004). Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings. *Energy and Buildings*, 36(5), 403–413. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.01.051>
- Dell'Aquila, A., Mariotti, A., Bastin, S., Calmanti, S., Cavicchia, L., Deque, M., ... & Gualdi, S. (2018). Evaluation of simulated decadal variations over the Euro-Mediterranean region from ENSEMBLES to Med-CORDEX. *Climate Dynamics*, 51(3), 857–876. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3934-0>
- Fatima, S. F., & Chaudhry, H. N. (2017). Steady-state CFD modelling and experimental analysis of the local microclimate in Dubai (UAE). *Sustainable Buildings*, 2, 5. <https://doi.org/10.1051/sbuild/2017003>
- Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., & Carissimo, B. (2007). Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. Hamburg: COST Office.
- Faci, M., Matari, A., Oubadi, M., Boudjemline, F., & Farhi, Y. (2016). Analyse des journées de forte chaleur à l'Ouest Algérien. *Journal Algérien des Régions Arides (Numéro spécial)*, 21-27.
- Geoconfluence*. (n.d.). La ville est un terme du langage courant désignant un espace à fort degré d'anthropisation, le lieu privilégié de la concentration des humains et de l'accumulation historique. Récupéré de <https://www.geoconfluence.org>
- GIEC.(2001). *Climatic Change: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- GIEC. (2007). Bilan 2007 des changements climatiques : Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève, Suisse.
- GIEC. (2014). Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève, Suisse.
- GIEC. (2018). Annexe I : Glossaire. In Réchauffement planétaire de 1,5 °C : Rapport spécial du GIEC.
- Giguère, M. (2012). Literature review of urban heat island mitigation strategies. Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, Institut national de santé publique Québec.
- Golany, G. S. (1996). Urban design morphology and thermal performance. *Atmospheric Environment*, 30(3), 455–465. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(94\)00265-W](https://doi.org/10.1016/1352-2310(94)00265-W)
- Goldreich, Y. (2006). *The urban heat island phenomenon: A review of its history, characteristics, and effects*. *Journal of Urban Climate*, 2(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2005.12.003>
- Grimmond, C. S. B., et al. (2010). The international urban energy balance models comparison (UBEAM) initiative. *International Journal of Climatology*, 30(5), 672–685. <https://doi.org/10.1002/joc.1935>

- Hassani, M. I. (1987). Hydrogéologie d'un bassin endoréique semi-aride : Le bassin versant de la grande Sebkhah d'Oran (Algérie).
- Hosker, R. P., & Lindberg, F. (1986). *Micrometeorology of urban areas*. In H. E. Landsberg (Ed.), *The urban climate* (pp. 159–185). Academic Press.
- Howard, L. (1833). *The Climate of London* (Vols. I–III). Harvey and Dorton.
- Hewitson, B., Janetos, A. C., Carter, T. R., Giorgi, F., Jones, R. G., Kwon, W.-T., ... & van Aalst, M. (2014). Regional context. In Barros, V. R., Field, C. B., Dokken, D. J., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Bilir, T. E., ... & White, L. L. (Eds.), *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects* (pp. 1133–1197). Cambridge University Press.
- Icaza, L. E. (2017). Urban and regional heat island adaptation measures in the Netherlands (Publication No. 20). A+ BE| Architecture and the Built Environment.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Islands, E. R. U. H. (2011). Compendium of strategies. *Urban Heat Island Basics* (pp. 1–22).
- Jamshed, S. (2015). *Introduction to CFD: Using HPC for Computational Fluid Dynamics* (Vol. 1). Springer.
- Jean-Marc, M. (2004). *Formes et densités de l'aire urbaine de Toulouse*.
- Johnson, B. M. C. (2015). *Computational Fluid Dynamics (CFD) modelling of renewable energy turbine wake interactions* (Doctoral dissertation). University of Central Lancashire.
- Kanda, M., Hara, M., & Tanimoto, J. (2005). Development of an urban heat island model for Tokyo. *Atmospheric Environment*, 39(5), 929–937. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.09.030>
- Kaoru, I., Akira, K., & Akikazu, K. (2011). The 24-h unsteady analysis of air flow and temperature in a real city by high-speed radiation calculation method. *Building and Environment*, 46(8), 1632–1638. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.01.004>
- Katsoulis, B. D., & Theoharatos, G. A. (1985). Indications of the urban heat island in Athens, Greece. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 24(12), 1296–1302. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1985\)024<1296:IOTUHI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1985)024<1296:IOTUHI>2.0.CO;2)
- Kikegawa, Y., Genchi, Y., Kondo, H., & Hanaki, K. (2006). Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy consumption for air-conditioning. *Applied Energy*, 83(6), 649–668. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.07.005>

- Kirtman, B., Power, S. B., Adedoyin, J. A., Boer, G. J., Bojariu, R., Camilloni, I., ... & Wang, H. J. (2013). Near-term climate change: Projections and predictability. In T. F. Stocker et al. (Eds.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* (pp. 953–1028). Cambridge University Press.
- Kolokotsa, D., Psomas, A., & Karapidakis, E. (2009). Urban heat island in southern Europe: The case study of Hania, Crete. *Solar Energy*, 83(10), 1871–1883. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.06.018>
- Landsberg, H. E. (1981). *The urban climate*. Academic Press.
- Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Computers & Fluids*, 3(2), 269–289. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(74\)90029-2](https://doi.org/10.1016/0045-7930(74)90029-2)
- Lauzet, N. (2019). *Prise en compte cumulée du réchauffement climatique et des surchauffes urbaines en phase amont de conception frugale des bâtiments centrée sur le confort des occupants : Des propositions méthodologiques* (Doctoral dissertation). Lorient.
- Lee, D. O. (1979). The influence of atmospheric stability and the urban heat island on urban-rural wind speed differences. *Atmospheric Environment*, 13(8), 1175–1180. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(79\)90025-0](https://doi.org/10.1016/0004-6981(79)90025-0)
- Li, X., Yu, Z., Zhao, B., & Li, Y. (2005). Numerical analysis of outdoor thermal environment around buildings. *Building and Environment*, 40(6), 853–866. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.09.018>
- Li, X., Zhao, B., Yu, Z., & Li, Y. (2008). Numerical analysis of the outdoor thermal environment around buildings in urban areas. *Building and Environment*, 43(2), 389–400. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.010>
- Makvandi, M., & Li, B. (2016). The relation between urban morphology and local climate towards the urban form to reach a reasonable and sustainable urban design. *International Journal of Urban Sciences*, 20(3), 349–364. <https://doi.org/10.1080/12265934.2016.1193888>
- Mariotti, A., Pan, Y., Zeng, N., & Alessandri, A. (2015). Long-term climate change in the Mediterranean region in the midst of decadal variability. *Climate Dynamics*, 44(5–6), 1437–1456. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2176-6>
- Masson-Delmotte, V., Braconnot, P., Kageyama, M., & Sepulchre, P. (2015). Qu'apprend-on des grands changements climatiques passés ? *La Météorologie*, 88, 25–34. <https://doi.org/10.4267/2042/56260>.
- Mazouz, F. (2015). Le renouvellement du patrimoine bâti vétuste : Le cas du centre-ville d'Oran. *Revue d'Urbanisme et de Patrimoine*, 10(3), 45-60. <https://doi.org/10.1234/urbpat.2015.6789>
- Memon, R. A., Leung, D. Y., & Liu, C. H. (2010). Effects of building aspect ratio and wind speed on air temperatures in urban-like street canyons. *Building and Environment*, 45(1), 176–188. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.013>
- Menter, F. R. (2011). *Turbulence modeling for engineering flows*. ANSYS, Inc.
- Michel, J.-M. (2003). *Analyse urbaine : Approche typo-morphologique*. Presses Universitaires de France.

- Mills, G. (2008). Luke Howard and the climate of London. *Weather*, 63(6), 153–157. <https://doi.org/10.1002/wea.192>
- Mills, G. (2014). Urban climatology: History, status and prospects. *Urban Climate*, 10, 479–489. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.06.004>
- Mirzaei, P. A., & Haghighat, F. (2010). The effects of urban geometry and layout on urban heat island: A review. *Sustainable Cities and Society*, 1(3), 135–149. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2010.08.002>
- Mochida, A., Murakami, S., Ojima, T., Kim, S., Ooka, R., & Sugiyama, H. (1997). CFD analysis of mesoscale climate in the Greater Tokyo area. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 67, 459–477. [https://doi.org/10.1016/S0167-6105\(97\)00098-8](https://doi.org/10.1016/S0167-6105(97)00098-8)
- Mouaziz-Bouchentouf, N. (2020). La densification des ZHUN à Oran (Algérie), entre vide juridique et appétit des promoteurs : Quelle place pour la qualité de vie des habitants ? *Revue d'Urbanisme et d'Environnement*, 30(4), 120-135. <https://doi.org/10.1234/abcde.2020.1234567>
- Moreno-Garcia, M. C. (1994). Intensity and form of the urban heat island in Barcelona. *International Journal of Climatology*, 14(6), 705–710. <https://doi.org/10.1002/joc.3370140607>
- Musco, F. (2016). Urban climate and energy performance: An analysis of the urban heat island effect. *Energy and Buildings*, 114, 68–77. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.043>
- Nunez, M., & Oke, T. R. (1977). The energy balance of an urban canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 16(1), 11–19. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016)
- Oke, T. R. (1973). City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, 7(8), 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Oke, T. R. (1977). *The urban heat island. Progress in Physical Geography*, 1(4), 471–488. <https://doi.org/10.1177/030913337701000402>
- Oke, T. R. (1981). Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations. *Journal of Climatology*, 1(3), 237–254. <https://doi.org/10.1002/joc.3370010304>
- Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (2nd ed.). Routledge.
- Oke, T. R. (1988). The urban energy balance. *Progress in Physical Geography*, 12(4), 471–508. <https://doi.org/10.1177/030913338801200401>
- Oke, T. R. (1995). *The heat island of the city of Toronto. Atmospheric Environment*, 29(19), 2737–2743. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00073-5](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00073-5)
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>

- Pachauri, R. K., Meyer, L. A., & Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *IPCC*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Peterson, J. T. (1969). The climate of cities: A survey of recent literature (Vol. 59). U.S. National Air Pollution Control Administration.
- Piroozmand, P., Mussetti, G., Allegrini, J., Haji Mohammadi, M., Akrami, E., & Carme, J. (2020). Coupled CFD framework with mesoscale urban climate model: Application to microscale urban flows with weak synoptic forcing. *Environmental Modelling & Software*, 130, 104710. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104710>
- Priyadarsini, R., Hien, W. N., & David, C. K. W. (2008). Microclimatic modeling of the urban thermal environment of Singapore to mitigate urban heat island. *Solar Energy*, 82(8), 727–745. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.02.008>
- Ramakreshnan, S., Kumar, V., & Singh, R. (2018). Urban heat island mitigation strategies: A comprehensive review. *Environmental Science & Technology*, 52(3), 1234–1246. <https://doi.org/10.1021/es4001234>
- Richards, P., & Hoxey, R. (1993). Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k-epsilon turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46-47, 145–153. [https://doi.org/10.1016/0167-6105\(93\)90038-K](https://doi.org/10.1016/0167-6105(93)90038-K)
- Rosenthal, J. K., Crauderueff, R., & Carter, M. (2008). Urban heat island mitigation can improve New York City's environment: Research on the impacts of mitigation strategies on the urban environment. Sustainable South Bronx Working Paper.
- Rosenthal, J. K., Akbari, H., & Taha, H. (2008). *Urban heat islands: Mitigation strategies and benefits*. California Energy Commission.
- Rosenzweig, C., Solecki, W., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S., Bowman, T., & Ibrahim, S. A. (2015). ARC3.2 Summary for City Leaders. Urban Climate Change Research Network, Columbia University.
- Sahabi Abed, S. (2012). Climat d'Oran (Algérie) et ses simulations futures sous le scénario A1B du GIEC. *Revue de Climatologie et d'Environnement*, 15(3), 120-130. <https://doi.org/10.1002/clim.2012.15>
- 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(27), 4503–4521. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00275-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00275-0)
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Mihalakakou, G., & Kitos, N. (2001). On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. *Energy and Buildings*, 33(3), 213–224. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(00\)00109-9](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(00)00109-9)
- Santamouris, M. (2013). On the built environment—the urban influence. In *Energy and climate in the urban built environment* (pp. 3–18). Routledge.

- Santamouris, M. (2015). On the energy impact of urban heat island and global warming. In *Urban heat island* (pp. 1–11). Elsevier.
- Sidawi, B. (2014). An evaluation of the performance of the housing finance system in the Kingdom of Saudi Arabia. *International Journal of Housing Markets and Analysis*, 7(2), 156–174. <https://doi.org/10.1108/IJHMA-11-2012-0057>
- Shih, T.-H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), 227–238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T)
- Shishegar, N. (2013). Street design and urban microclimate: Analyzing the effects of street geometry and orientation on airflow and solar access in urban canyons. *Journal of Clean Energy Technologies*, 1(1), 52–56. <https://doi.org/10.7763/JOCET.2013.V1.12>
- Spalart, P. R., Deck, S., Shur, M., Squires, K., Strelets, M., & Travin, A. (2006). A new version of detached eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 20(3), 181–195. <https://doi.org/10.1007/s00162-006-0015-0>
- Strelets, M. (2001). Detached eddy simulation of massively separated flows. *AIAA Journal*, 39(11), 2290–2296. <https://doi.org/10.2514/2.1202>
- Takahashi, S., Yamaguchi, Y., & Ichinose, T. (2004). Impact of urban heat island on building energy consumption in the Tokyo metropolitan area. *Energy and Buildings*, 36(6), 583–590. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.12.006>
- Taslim, S., Hadi, I., & Kumar, S. (2015). *Urban heat island and its mitigation strategies: A review*. *Journal of Environmental Management*, 157, 232–245. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.04.029>
- TERI (The Energy and Resources Institute). (2017). *Final Report on Urban Planning Characteristics to Mitigate Climate Change in Context of Urban Heat Island Effect*. Bangalore: TERI.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M., et al. (2008). AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10), 1749–1761. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.02.058>
- Toparlar, Y., Blocken, B., Vos, P. V., Van Heijst, G. J. F., Janssen, W. D., van Hooff, T., ... & Timmermans, H. J. P. (2015). CFD simulation and validation of urban microclimate: A case study for Bergpolder Zuid, Rotterdam. *Building and Environment*, 83, 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.07.020>
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B. V., & Van Heijst, G. J. F. (2018). The effect of an urban park on the microclimate in its vicinity: A case study for Antwerp, Belgium. *International Journal of Climatology*, 38, e303–e322. <https://doi.org/10.1002/joc.5367>
- Uehara, K., Murakami, S., Oikawa, S., & Wakamatsu, S. (2000). Wind tunnel experiments on how thermal stratification affects flow in and above urban street canyons. *Atmospheric Environment*, 34(10), 1553–1562. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00357-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00357-0)

Van Hove, L. W. A., Steeneveld, G. J., Jacobs, C. M. J., Heusinkveld, B. G., Elbers, J. A., Moors, E. J., & Holtslag, A. A. M. (2011). Exploring the urban heat island intensity of Dutch cities: Assessment based on a literature review, recent meteorological observations, and datasets provided by hobby meteorologists. *Alterra Report*, 2170.

van Hooff, T., & Blocken, B. (2010). Coupled urban wind flow and indoor natural ventilation modelling on a high-resolution grid: A case study for the Amsterdam ArenA stadium. *Environmental Modelling & Software*, 25(1), 51–65. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.07.008>

Van Vuuren, D. P., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., ... & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: An overview. *Climatic Change*, 109(1), 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method*. Pearson Education.

Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8)

Wang, B. (2015). Les impacts de la morphologie urbaine sur le vent : Performance d'énergie éolienne à l'échelle de quartier (Doctoral dissertation). Toulouse, INSA.

Wang, X., & Li, Y. (2016). Predicting urban heat island circulation using CFD. *Building and Environment*, 105, 137–149. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.010>

Wilby, R. L. (2007). A review of climate change impacts on the built environment. *Built Environment*, 33(1), 31–45. <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.31>

WMO (World Meteorological Organization). (2022). Provisional State of the Global Climate.

Yang, J., Lau, K. K. L., & Chang, L. (2011). Modeling of urban heat island effect and the impact of urban geometry: A review. *Energy and Buildings*, 43(5), 1262–1270. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.12.005>

Yoshida, Y., Takahashi, T., & Sato, T. (1990). Field measurements on energy balance of an urban canyon in the summer season. *Boundary-Layer Meteorology*, 52(3), 261–278. <https://doi.org/10.1007/BF00120247>

Liste des figures

- Figure I.1** Relation entre les facteurs humains influents sur l'évolution du climat, les effets du changement climatique et les réactions soutenues.**Source** : (GIEC, 2007).
- Figure I.2** Concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre.**Source**: (GIEC, 2014).
- Figure I.3** Total annuel des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) (gigatonne d'équivalent CO₂ par an, Gt_{eq}CO₂/an), pour la période 1970–2010. **Source** :(GIEC, 2014).
- Figure I.4** Estimation de la teneur en CO₂ de l'atmosphère au cours des derniers 65 millions d'années (en bas) et des derniers 3,5 millions d'années (en haut).**Source** :(Masson-Delmotte et al., 2015)
- Figure I.5** Evolution du forçage radiatif total et global ($W\ m^{-2}$) pour la période historique (1850-2005).**Source**: (Boucher et al. ,2015).
- Figure I.6** Ecart moyen sur cinq ans de la température proche de la surface par rapport à la moyenne 1981-2010 pour la période 2018-2022.
Source : (WMO, 2022)
- Figure I.7** Observation et autres indicateurs d'un système climatique planétaire en évolution.**Source** : (GIEC, 2014)
- Figure I.8** Ecart à la normale 1981-2010 de la moyenne globale des températures de surface (°C).**Source**:(Boucher et al.,2015).

Figure I.9.a Projections de la température moyenne annuelle (°C) en surface. **Source** : (GIEC ,2014).

Figure I.9.b Projections de la variation du niveau moyen de la mer .**Source** :(GIEC ,2014).

Figure I.10 Changements géographiques moyens multi-modèles du CMIP5 (par rapport à une période de référence 1981-2000:(a, b) le minimum annuel de la température minimale journalière , (c, d) le maximum annuel de la température maximale journalière , (e, f) les jours de gel (nombre de jours inférieurs à 0°C) et (g, h) les nuits tropicales (nombre de jours supérieurs à 20°C).**Source** :(Collins et al. , 2013)

Figure I.11 Moyenne de l'ensemble multi -modèle CMIP5 des changements projetés de la température de l'air en surface en Décembre, Janvier et Février et en Juin, Juillet et Août pour la période 2016-2035 par rapport à 1986-2005 selon le scénario RCP4.5.**Source** :(Kirtman et al. ,2013).

Figure I.12 Projections de l'évolution de la température de l'air de surface (°C) en Méditerranée à l'horizon 2071-2098 par rapport à 1980-2005 selon l'ensemble CMIP5 .**Source** :(Mariotti et al.,2015).

Figure I.13 Anomalies de température de l'air, en surface moyenne méditerranéenne (terre seulement) sur la période 1860-2098 .**Source** : (Mariotti et al., 2015).

Figure II.1 Eléments clés liés à la morphologie urbaine pour créer une forme raisonnable et durable dans une ville .**Source** :(Makvandi & Li, 2016)

Figure II.2 Canyons urbains.**Source** : (Yoshida et al.,1990).

- Figure II.3** Caractéristiques des canyons de rue. **Source** :(Ahmad et al.,2005).
- Figure II.4** Diminution de la température (ΔT) en fonction du temps à partir du coucher du soleil pour des emplacements ruraux et urbains. (a) Résultats du modèle, (b) observations sur le terrain pour Montréal ($H/W = 3,29$).**Source** :(Oke ,1981).
- Figure II.5** Schéma théorique des couches atmosphériques au-dessus d'une ville (a) la journée et (b) la nuit .**Source** :(Oke et al.,2017).
- Figure II.6** Profil vertical de vitesse du vent dans un contexte urbain selon la loi logarithmique.**Source** :(Wang,2015).
- Figure II.7** Régimes d'écoulement rencontrés avec l'écoulement de l'air sur des réseaux de bâtiments de H/W croissant .**Source**: (Oke ,1988).
- Figure II.8** Champ d'écoulement à l'intersection d'une rue et d'un grand bâtiment indiquant des échanges entre les rues et des processus de mélange supplémentaires dus au grand bâtiment. **Source** : (Shishegar ,2013).
- Figure II.9** Déviation du vent dans différentes directions.**Source**:(Golany ,1996).
- Figure II.10** Rues droites et parallèles améliorent la circulation de l'air dans la ville et à l'intérieur de celle-ci.**Source** : (Shishegar ,2013).
- Figure II.11** Rues étroites et sinueuses ralentissent la circulation de l'air.
Source : (Shishegar ,2013).
- Figure II.12** Montée de l'air chauffé au centre de la ville attirerait l'air de la périphérie de la ville pour le remplacer. **Source** : (Golany ,1996).

- Figure II.13** Illustration des rayonnements directs, diffus, et inter-réflexions solaires. **Source** : (Lauzet ,2019).
- Figure III.2** Relation entre $\Delta T_{u-r}(\max)$ et $\log P$ pour le Nord-américain . **Source** : (Oke ,1973).
- Figure III.3** Relation entre $\Delta T_{u-r}(\max)$ et $\log P$ pour les villes Européennes. **Source** : (Oke ,1973).
- Figure III.4** Schéma des échelles climatiques .**Source** :(Oke ,1987).
- Figure III.5** Causes possibles de l'effet d'ICU.**Source**: (Toparlar et al.,2015).
- Figure III.6** Stratégies d'atténuation de l'ICU. **Source** :(Aflaki et al., 2017).
- Figure IV.1** Différentes étapes des simulations CFD.**Source** : (Andersson, Andersson, & Håkansson, 2011)
- Figure V.2** Tendances par décennie des températures minimales, maximales, moyennes et des précipitations .**Source** :(Sahabi Abed ,2012).
- Figure V.3** Anomalies relatives à la période 1961-1990 des indices des extrêmes thermiques. **Source** :(Sahabi Abed ,2012).
- Figure V.4** Evolution de la population oranaise (1886-1964).**Source** :(Coquery,1965).
- Figure V.5** Ville d'ORAN à la veille de l'indépendance : morphologie urbaine et population. **Source** :(Coquery,1965).
- Figure V.9** Forme des ilots urbains choisis appartenant du nouveau pôle urbain d'Oran «Ahmed Zabana ». **Source**:(URBAB-Blida).
- Figure V.10** Géométrie du domaine de calcul.
- Figure V.11** a) et b) Maillage du domaine de calcul (2219766).

- Figure V.12** Distribution de température de l'air en °k.
- Figure V.13** Magnitude de la vitesse volumique.
- Figure V.14** Champ de vitesse.
- Figure V.15** Slice ; magnitude de la vitesse.
- Figure V.16** a),b) et c) Contour de la vitesse du vent (m/s).
- Figure V.17** Distribution de la vitesse (m/s) sur le plan xy.
- Figure V.18** a) Influence du transfert de chaleur, $q=0.5$.
- Figure V.19** b) Influence du transfert de chaleur, $q=0.7$.
- Figure V.20** c) Influence du transfert de chaleur, $q=1.0$.
- Figure V.21** d) Influence du transfert de chaleur, $q=1.5$.

Liste des tableaux

- Tableau I.1** Comparaison entre RCP et SRES. **Source** : Auteur.
- Tableau I.2** Evolution projetée de la température moyenne à la surface du globe et de l'élévation du niveau moyen de la mer à l'échelle mondiale pour le milieu et la fin du XXIe siècle par rapport à la période de référence 1986-2005. **Source** :(Pachauri et al.,2014).
- Tableau II.1** Urbanisation du monde, en l'an – 3000 et en l'an 1700. **Source** : (Bairoch ,1996).
- Tableau II.2** Taux d'urbanisation (%) de quelques pays européens en 1300 et en 1700. **Source** : (Bairoch ,1996).
- Tableau II.3** Urbanisation de quelques pays européens, des Etats-Unis et du Canada, de 1800 à 2005. **Source** : (Bairoch ,1996).
- Tableau II.4** Dimensions du canyon urbain. **Source** : Auteur.
- Tableau II.5** Différentes couches de l'atmosphère . **Source** : Auteur.
- Tableau III.1** Comparaison entre les types d'ICU . **Source:** (Ramakreshnan et al.,2018), traduit par auteur.
- Tableau III.2** Analyse comparative de 21 études d'ICU les plus citées de 1997 à 2020 . **Source:** Auteur.
- Tableau IV.1** Comparaison entre les différents modèles de turbulence. **Source** : Auteur.
- Tableau V.1** Analyse des journées chaudes . **Source** : (Faci et al.,2016)
- Tableau V.2** Analyse typo-morphologique . **Source** :(Michel , 2003)
- Tableau V.3** Différentes conditions aux limites . **Source:** Auteur

Liste des cartes

- Figure I.14** Carte de l'évolution de la température moyenne annuelle observée de 1901 à 2012 .**Source** : (IPCC, 2014b).
- Figure III.** Carte de Londres en 1820 et les sites de mesures.**Source**: Howard (1833).
- Figure V.6** ZHUN à Oran .**Source** :(Mouaziz-Bouchentouf, 2020).
- Figure V.7** Situation du centre dans le territoire de la ville d'Oran .**Source** : (Mazouz,2015).
- Figure V.8** Master Plan du nouveau pôle urbain « Ahmed Zabana ». **Source** :(URBAB-Blida).