

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département : Architecture
Ref :.....



جامعة محمد خيضر - بسكرة -
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم الهندسة المعمارية
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de

Doctorat en sciences en : Architecture
Option : Architecture

Intitulé :
MICROCLIMAT, FORMES URBAINES ET OPPORTUNITES
D'ADAPTATION BIOCLIMATIQUE DE L'ESPACE URBAIN
SAHARIEN
Cas de Biskra.

Présentée par :
SEBTI Moufida
Soutenue publiquement le : 02/07/2023

Devant le jury composé de :

Pr. ZEMOURI N.	Professeur	Président	Université de Biskra
Pr. ALKAMA DJ.	Professeur	Rapporteur	Université de Guelma
Pr. BOUZAHER S.	Professeur	Examinatrice	Université de Biskra
Dr. AHRIZ A.	Docteur	Examineur	Université de Tébessa

DÉDICACE :

Je dédie ce travail particulièrement,

À ceux qui ont la première faveur dans ma vie

À mes chers parents

Comme Je dédie ce travail Aussi

À mon mari

Et

À mes enfants

REMERCIEMENT :

Je tiens à remercier tout d'abord mon directeur de thèse Pr. ALKAMA Djamel pour m'avoir encadrée. Je lui exprime mes vifs remerciements et toute ma gratitude pour ses orientations précieuses, son aide et surtout à sa confiance.

Je tiens à remercier également les membres du jury : Pr. Noureddine ZEMMOURI, Pr. Soumia BOUZAHER et Dr. Atef AHRIZ pour avoir participé à évaluer ce travail. Un grand merci...

Je remercie aussi tous ceux qui m'ont encouragé et m'a aidé de près, ou de loin, A toutes mes amies particulièrement ; Ghanemi faten qui m'a aidé à maîtriser la simulation par le logiciel « ENVI-met » ; moufida boukhbla, Hakima necira, ines laouni et halima baadech pour leur encouragements.

RÉSUMÉ :

Le microclimat urbain est un facteur essentiel de la qualité des espaces urbains publics ; il est influencé par de nombreux paramètres morphologiques. Cette recherche porte sur l'impact des paramètres de la morphologie urbaine sur le microclimat urbain. Nous essayons à étudier la relation entre les paramètres morphologiques et la qualité thermique dans quatre places publiques situées dans la ville de Biskra, tout en essayant à distinguer les conditions génératrices de cette qualité thermique à travers une étude comparative des paramètres climatiques dans chaque place. Pour étudier l'adaptation bioclimatique dans les quatre places, nous avons sélectionné deux catégories de paramètres de la forme urbaine. Nous étudions la géométrie de l'espace public (indiquée par le facteur de vue du ciel "SVF" et le rapport d'aspect "H/W") qui se rapporte à la quantité de rayonnement ; et les caractéristiques de la couverture du sol (densité de l'espace végétal et albédo des surfaces) qui se rapportent avec la chaleur diffusée. Dans la place El Horia, nous distinguons la valeur minimale de la température de l'air avec une différence qui atteint 2 °C à midi par rapport aux autres places étudiées.

Nous adoptons aussi une autre étude comparative qui a été réalisée dans le but de vérifier l'adaptation bioclimatique dans la place El Horia qui présente les meilleures conditions climatiques parmi les autres places étudiées et la place du ksar Ouargla qui se présente comme une entité traditionnelle adaptée au climat.

Nous tentons aussi de trouver des solutions qui assurent l'amélioration du microclimat urbain dans la place El Horia à travers la simulation, tout en essayant de surmonter les problèmes constatés par l'utilisation de pavés frais dans tout l'espace et l'introduction de la végétation et les surfaces d'eau. Nous estimons que cette initiative contribue à la réduction de la température ambiante dans la place El Horia pendant une journée d'été typique.

Mot clés : microclimat urbain, place publique, morphologie urbaine, adaptation bioclimatiques, espace urbain.

ABSTRACT :

The urban microclimate is an essential factor in the quality of public urban spaces ; it influenced by many morphological parameters. This research focuses on the impact of urban morphology parameters on the urban microclimate. We try to study the relationship between the morphological parameters and the thermal quality in four public places located in the city of Biskra, while trying to distinguish the conditions generating this thermal quality through a comparative study of the climatic parameters in each square. To study the bioclimatic adaptation in the four square, we selected two categories of parameters of the urban form. We study the geometry of the public space (indicated by the sky view factor "SVF" and the aspect ratio "H/W") which relates to the amount of radiation ; and land cover characteristics (density of plant space and surface albedo) that relate to radiated heat. In El Horia Square, we distinguish the minimum value of air temperature with a difference that reaches 2°C at noon compared to the other squares studied.

We also adopt another comparative study, which carried out in order to verify the bioclimatic adaptation in the square El Horia, which presents the best climatic conditions among the other squares studied with the square of the ksar Ouargla that presents itself as a traditional entity adapted to the climate.

We are also trying to find solutions that ensure the improvement of the urban microclimate in the El Horia square through simulation, while trying to overcome the problems observed by the use of cool paving stones throughout the space and the introduction of vegetation and water surfaces. We estimate that this initiative contributes to reducing the ambient temperature in El Horia Square during a typical summer day.

Keywords : urban microclimate, public square, urban morphology, bioclimatic adaptation, urban space.

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

DÉDICACE :	I
REMERCIEMENT :	II
RÉSUMÉ :	III
ABSTRACT :	IV
TABLE DES MATIÈRES	V
TABLE DES ILLUSTRATIONS	XII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
INTRODUCTION	2
1- PROBLEMATIQUE	3
2- HYPOTHESES	5
3- OBJECTIFS	5
4- CAS D'ETUDE	6
5 - METHODOLOGIE DE RECHERCHE	6
6- STRUCTURE DE LA THESE	7
7- PLAN DE THESE	9
CHAPITRE I : MICROCLIMAT URBAIN, ASPECTS ET CARACTÉRISTIQUES	10
INTRODUCTION :	11
I. De climatologie urbaine au microclimat urbain	12
I.1. Climatologie urbaine	12
I.1.1. Terminologies et définitions	12
I.1.2. Echelles de la climatologie urbaine	12
I.1.3. Les couches verticales associées aux échelles spatiales	13
I.2. modes de transfert de chaleur et de masse	15
I.2.1. Le bilan radiatif	16
I.2.2. Le flux de chaleur anthropique Q_F	16
I.2.3. Le flux de chaleur sensible Q_H	17
I.2.4. Le flux de chaleur latente Q_E	17
I.2.5. Le terme de stockage de la chaleur ΔQ_S	18
I.2.6. Le flux advectif ΔQ_A	18
I.3. Types de rayonnement	18
I.3.1 Le rayonnement solaire en milieu urbain	18
I.3.2. Le rayonnement thermique	20
II. Spécificité du microclimat urbain	20
II.1. L'îlot de chaleur urbain	20

II.1. 1. Définition et caractéristiques de l'ICU	20
II.1. 2. Son intensité.....	22
II.1. 3. Ses causes et ses impacts	23
II.2. facteurs affectant le climat urbain	24
II.2.1. La morphologie propre à l'espace.....	24
II.2. 2. Les activités humaines (anthropiques).....	24
II.2.3. Les matériaux	25
II.2. 4. L'albédo	27
II.2. 5. La densité et la taille de la ville	30
II.2. 6. Absence de végétation et d'eau.....	31
II.3. Humidité et qualité de l'air en milieu urbain	31
II.3.1. Humidité de l'air dans la ville	31
II.3.2. Qualité d'air et microclimat urbain	32
III. Les effets aérodynamiques en milieu urbain	32
III.1. Les couches atmosphériques près de la surface du sol	32
III.2. comportement du vent autour d'un bâtiment	33
III.3. comportement du vent dans une rue	34
III.4. Les effets aérauliques en milieu urbain	34
III.4.1. Effet Wise	34
III.4.2. Effet de coin	34
III.4.3. Effet de barre	35
III.4.4. Effet et de canalisation.....	35
III.4.5. Effet Venturi	35
Conclusion :	36
CHAPITRE II : INTERACTION ENTRE FORME URBAINE ET MICROCLIMAT	37
INTRODUCTION :	38
I. Genèse de la relation forme urbaine / microclimat.....	39
I.1. Formes urbaines au cours de l'histoire et leurs caractéristiques microclimatiques.....	39
I.1.1. Formes traditionnelles compactes.....	39
I.1.2. Formes pavillonnaires	40
I.1.3. Formes répétitives verticales	41
I.2. Influence de la forme urbaine sur la température, le rayonnement et la vitesse du vent.....	41
I.2.1. Influence de la forme urbaine sur la température de surface et le rayonnement	41
I.2.2. Influence de la forme urbaine sur la vitesse du vent	42
I.3. Facteurs morphologiques modifiant le microclimat.	42
I.3.1. Le facteur de vue du ciel	43

I.3.2. Le profil de la rue (H/W) ou canyon urbain	44
I.3.3. L'orientation par rapport au soleil :	45
I.3.4. La densité du bâti	45
I.3.5 La densité végétale (Dv)	45
I.3.6. La géométrie des constructions	46
I.3.7. L'ombre des surfaces.....	46
1.3.8 Albédo moyen des surfaces	46
II. Dispositifs et opportunités d'adaptation au climat urbain.....	47
II.1 Rafrâichissement de l'air par la végétalisation	47
II.1.1 Végétation urbaine.....	47
II.1.2 Végétalisation autour des bâtiments	48
II.1.3 Plantation ponctuelle d'arbres.....	49
II.1.4 Murs végétaux et toits verts	49
II.2. Aménagement urbain et structures urbaines durables	52
II.3 limitation des sources de chaleur	53
II.3.1 Contrôle de la chaleur produite dans le bâtiment.....	53
II.3.2 Diminution du parc automobile en environnement urbain.....	53
III. Stratégies d'adaptation climatique anciennement utilisées dans l'habitat saharien	53
III.1. compacité du tissu	54
III.2. Diminution de la surface de l'enveloppe :	56
III.3. forme et orientation du bâti	56
III.4. forme et orientation de la voirie	57
III.6. matériaux de construction	60
IV. La place et le microclimat dans un milieu saharien	61
IV. 1. Caractéristiques climatique du climat chaud et aride	61
IV.1.1. Un rayonnement solaire intense	61
IV.1.2. Des températures diurnes très élevées	61
IV.1.3. Les vents de sable	62
IV.1.3. L'humidité relative	62
IV.2. la place : un espace public en question	62
IV.2.1. Définition de la place publique	62
IV.2.2. la problématique climatique de l'espace public	62
CONCLUSION :	63
CHAPITRE III : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : ÉTUDES MENÉES SUR LE MICROCLIMAT URBAIN.....	64
INTRODUCTION :	65

I. Micro climatologie urbaine, fondement et évolution	66
I.1. prémices de la recherche sur le climat urbain	66
I.2. Evolution de la prise en compte du climat en ville	67
II. Des études récentes sur le microclimat urbain	69
II.1. Etudes sur l’îlot de chaleur urbain et le changement climatique	69
II.1.1. étude de Irina Tumini et Carlos rubio-Bellido, 2016	69
II.1.2. étude de Pattaranan Takkanon, 2016	71
II.2. Etudes sur la géométrie de l’espace public urbain	73
II.2.1. Etude de Samira Bouketta et Al. 2014	73
II.2.2. Etude de Shahab Kariminia et Al. 2015	74
II.3. Etude sur l’amélioration des conditions microclimatique	75
II.3.1. Etude de Niki Gaitani et al., 2011	75
II.3.2. Etude de Mirela Robitu, M. Musy, Christian Inard, D. Groleau, 2006:	77
II.3.3. Etude de M. Santamouris et al., 2012	79
III. Modélisation numérique appliqué au microclimat urbain	82
III.1. Modélisations par discrétisation spatiale	82
III.1.1. ENVI-met (Environmental Meteorology)	82
III.1.1.1. Présentation :	82
III.1.1.2. Échelle d’application	83
III.1.2. LE MODELE THERMO-RADIATIF « SOLENE »	85
III.1.2.1. Présentation :	85
III.1.2.2. Échelle d’application	86
III.2. Modélisations par paramétrisation.....	87
III.2. 1. modèle Town Energy Balance (TEB).....	87
III.2. 1. 1. Présentation :	87
III.2. 1. 2. Échelle d’application	87
Conclusion :	90
CHAPITRE IV : PRÉSENTATION DE CAS D’ÉTUDE ET PROCESSUS DE L’INVESTIGATION ..	91
INTRODUCTION	92
I. Objectif de l’expérience	93
II. Présentation du contexte d’étude	93
II.1. Présentation de la ville de Biskra	93
II.2. Etude climatique	94
II.2.1. Température de l’air	94
II.2.2. Humidité relative.....	95
II.2.3. Précipitation	95

II.2.3. Insolation.....	96
II.2.4. Vents	97
II.2.5. Conclusion de l'étude climatique.....	98
III. ECHANTILLONAGE	98
III.1 Choix des échantillons.....	98
III.2. Présentation des échantillons	99
III.2.1 Premier échantillon : La place El-Horia	99
III.2.2 Deuxième échantillon : La place de ZWAKA (Guattari El Okbi).....	102
III.2.3 Troisième échantillon : La place : DHALAA	104
III.2.3 Quatrième échantillon : La place IBEN BADIS de 726 logements	106
IV. Facteurs climatiques mesurés	108
IV. 1. La température de l'air	108
IV. 2. La température radiante.....	108
IV. 3. L'humidité relative	108
IV. 4. La vitesse de l'air	108
V. Instrument de mesure.....	108
VI. Campagne de mesure.....	109
VI.1 Période et journée de collecte des données	109
VI.2 Horaires de prise de mesure.....	110
VI.1 Description du déroulement des campagnes de mesure.....	110
CONCLUSION :	111
CHAPITRE V : ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS D'INVESTIGATION : ÉTUDE ANALYTIQUE.....	112
INTRODUCTION :	113
I. Evaluation du comportement microclimatiques dans chaque place	114
I.1 Détermination des variations microclimatiques journalières de place EL HORIA	114
I.2 Détermination des variations microclimatiques journalières de place DHALAA.....	116
I.3 Détermination des variations microclimatiques journalières de place ZOUAKA.....	119
I.4 Détermination des variations microclimatiques journalières de place IBEN BADIS	121
I.2. Comparaison des variations microclimatiques journalières dans toutes les places.....	124
I.2.1 Comparaison des variations microclimatiques journalières de la température de l'air.....	124
I.2.2 Comparaison des variations microclimatiques journalières de la température radiante	126
I.2.3 Comparaison des variations microclimatiques journalières de l'humidité relative	128
I.2.4 Comparaison des variations microclimatiques journalières de la vitesse de l'air	129
Conclusion :	129

II. Relation entre les facteurs morphologiques et l'environnement thermique dans chaque place	130
.....	
II.1 l'orientation du grand axe : Nord/Sud	130
II.2 l'orientation du grand axe : Sud-Est/Nord-Ouest	132
II.3 Résultats obtenus :	134
Conclusion :	135
CHAPITRE VI : LA PLACE EL HORIA : ÉTUDE COMPARATIVE ET SIMULATION	136
INTRODUCTION :	137
I. Comparaison entre La place El Horia à Biskra et la place du ksar Ouargla : une tentative d'évaluation d'adaptation bioclimatique	138
I.1 motivation du choix du place de Ksar Ouargla comme un référence d'adaptation bioclimatique dans un espace urbain saharien.....	138
I.2 Présentation des campagnes de mesure dans la place du Ksar Ouargla.....	140
I.3. Comparaison des variations microclimatiques journalières dans les deux places (place El Horia et place du ksar Ouargla)	141
I.4. Discussion du résultat :	142
II. Simulation de l'amélioration de l'environnement thermique dans la place El Horia	143
II.1. Présentation et motivation du choix du logiciel de simulation « Envi Met »	143
II.2. méthodologie de simulation	144
II.3. Résultats de la simulation :	147
II.3.1 résultats de la simulation de la condition initiale de la place (modèle de référence (S0)..	147
II.3.2 résultats de la simulation du premier scénario (S1)	149
II.3.3 résultats de la simulation de deuxième scénario (S2)	151
II.3.4 comparaison des résultats de simulation de deux scénarios (S1) et (S2)	153
Conclusion	156
CONCLUSION GÉNÉRALE	157
Conclusion	158
Recommandations :	163
Limites de recherche	165
Recherches futures.....	166
BIBLIOGRAPHIE	167
ANNEXES	175

TABLE DES ILLUSTRATIONS

1- Liste des figures :

Chapitre I :

Figure I. 1: Représentation schématique des échelles climatiques et des couches verticales dans une surface urbaine (Bouyer Julien, 2009)	14
Figure I. 2: Balance énergétique terrestre. Source : Liebard A., DE Herde A., 2005.....	19
Figure I. 3: Définition de l'îlot de Chaleur Urbain : différence instantanée de température entre une station rurale (Entzheim) et urbaine (Kléber).Source : NAJJAR Georges et al., 2010	21
Figure I. 4: Schéma de l'îlot de chaleur urbain, source : Mélissa Giguère, M. Env., 2009.	21
Figure I. 5: Représentations des isothermes traduisant l'îlot de chaleur urbain et l'influence de la direction du vent. Source : Benzerzour Mohamed, 2004.	22
Figure I. 6: Température de revêtement de l'espace public, le 1er Aout 2011 à 20h.	25
Figure I. 7: Comparaison de deux revêtements de trottoir 1 heure après le coucher du soleil, le 31 Juillet 2011. Le stabilisé (à gauche) est nettement plus frais que l'asphalte (à droite), c'est leur différence de couleur qui l'explique. Source : Bigorgne Julien, 2012	26
Figure I. 8: Signature radiative nocturne d'une composition de revêtement de sol à la ZAC de la Grange-aux-Belle, le 1er Aout 2011 vers 22h. Source : Bigorgne Julien, 2012	26
Figure I. 9: Divers albédos de la ville. Source : http://www.notre-planete.info	28
Figure I. 10: Coupe schématique de visualisation des températures en 2008 pour une nuit de canicule (type été 2003). Source : http://www.notre-planete.info	30
Figure I. 11: Modélisation météorologique des vents dominants à différentes échelles climatiques. Source : (Bozonnet Emmanuel, 2005).....	32
Figure I. 12: Ecoulements autour d'un bâtiment, source : Bozonnet Emmanuel, 2005	33
Figure I. 13: Rue de type canyon avec un rapport d'aspect W / H supérieur à 2,5 (rugosité isolée), compris entre 1,54 et 2,5 (interférence de sillage), et inférieur à 1,54 (rasant), source : BOZONNET Emmanuel, 2005.....	34
Figure I. 14: Configuration de quelques types des effets aérodynamiques en milieu urbain, établit par auteur, 2013	35

Chapitre II :

Figure II. 1: Schéma montrant un plan compact des maisons accolées les unes aux autres, typiques des climats chauds et arides. Source : Donnadiou C.et al., 1977	39
Figure II. 2: Schéma montrant des surfaces ombragées résultant de bâti dense.	40
Figure II. 3: Plan et coupes schématiques montrant le découpage de l'espace entre les barres pour les jardins privatifs et collectifs. Source : Panerai Ph. et al, 1977.	40
Figure II. 4: Morphologie de grands ensembles avec des espaces étendus et des immeubles de grande hauteur. Source : Panerai Ph. et al, 1977.	41
Figure II. 5: Le piégeage radiatif des rues. Source : Colombert M., 2008	42
Figure II. 6 : Facteurs de vue du ciel de différents sites à Hong Kong (Chine). Source :Colombert M., 2008	43
Figure II. 7 : Paramètres géométriques d'une rue canyon. (Athamena Kh., 2012).	44
Figure II. 8: Différents rapports d'aspect H/W de rues canyon (Athamena Khaled, 2012).	44
Figure II. 9: L'ombre procuré grâce à des arbres plantés autour des bâtiments	48
Figure II. 10: Le double effet de rafraîchissement et d'ombrage de l'arbre dans l'espace urbain. Source : J. Bigorgne, A. Mangold, 2014.	49
Figure II. 11: Différents types de toitures végétalisées. Source : DE Munck Cécile, 2013	50
Figure II. 12: Différents types de façades végétalisées. Source : De Munck Cécile, 2013	51

Figure II. 13: Façade végétalisée recouverte de plantes grimpantes. New York, 2009. Source : BERNIER Anne-marie, 2011	51
Figure II. 14: Tissus compacts des différents ksour de sud algérien (de gauche à droite : Ouargla, Touggourt et Ghardaïa). Etablit par auteur, 2011	54
Figure II. 15: Texture urbaine horizontale et verticale compacte. Source : auteur, 2011	54
Figure II. 16: protection des habitations contre les vents de sable	55
Figure II. 17: l'effet de l'ombre et contrôle de rayonnement solaire	55
Figure II. 18: Ksour du Sahara occidental, établi par auteur, 2013	56
Figure II. 19: Le ksar de Tamacine, orientation des ilots par rapport aux vents dominants, établi par auteur, 2013.	57
Figure II. 20: Mitoyenneté et direction irrégulière du parcellaire du ksar de Lichana à Biskra. Source marc Cote, 1988	57
Figure II. 21: La hiérarchisation de la structure viaire du ksar Ouargla, établi par l'auteur, 2013.	58
Figure II. 22: L'effet de l'orientation des rues et ruelles pour empêcher la pénétration d'ensoleillement, source : auteur, 2013.....	58
Figure II. 23: Le rétrécissement des voies et l'effet de venturi. Source : auteur, 2013.	59
Figure II. 24: Ombrage procuré par la morphologie des rues selon axe Est-Ouest au village de Melika dans la vallée du Mزاب. Source : Bennadji amar 1999.....	59
Figure II. 25: Passages couverts et impasse ombragés, source : auteur, 2013	59
Figure II. 26: L'effet d'ombrage résulté d'encorbellement, source : Auteur, 2013	60
Figure II. 28: Séchage au soleil d'Adobes. Source : Dethier J., 1986	61
Figure II. 27: L'usage ancestral du Pisé. Source : Dethier J., 1986	61

Chapitre III :

Figure III. 1 : La place de l'armas : a) Vue aérienne et b) photo de la place de l'armas source : Irina Tumini et al. 2016.....	69
Figure III. 2 : Résultat de la simulation, carte de la température de l'air, vue horizontale a) état actuel, avec indication des trois stations et de la section verticale ; b) scénario 2020 ; (c) scénario 2050 ; d) Scénario 2080. Source : Irina Tumini et al., 2016.	70
Figure III. 3 : Carte de la température de l'air, vue en coupe verticale (a) état actuel ; b) scénario 2020 ; Scénario 2050 ; (d) Scénario 2080. Source : Irina Tumini et al., 2016.	70
Figure III. 4 : Relation entre les rapports H / W et les intensités des îlots de chaleur	72
Figure III. 5 : (1) Les valeurs de températures de l'air à 14h, (2) les taux d'humidité, (03) et (04) vitesses du vent ; au cours d'une journée d'été. Source : Bouketta S. et Al., 2014	73
Figure III. 6 : Cours quotidien de température moyenne radiante (T _{mrt}) dans la zone médiane de la place : a) liés à l'orientation, b) affectée par le rapport H/W, c) affectée par l'orientation et le rapport H/W. Source : Shahab Kariminia et Al. 2015	75
Figure III. 7 : Place Messolongiou (a) Image satellite de la zone en cours de réhabilitation, (b) Géométrie et domaine de calcul de la zone simulée. Source : Niki Gaitani et al., 2011	75
Figure III. 8 : Température de l'air à 1,5 m de hauteur de la zone simulée pour des conditions d'heure d'été représentatives avant et après tenir compte des techniques d'amélioration du microclimat proposées. Source : Niki Gaitani et al., 2011.....	76
Figure III. 9 : Place Fleuriot (a) vue générale, (b) vide, (c) avec arbre et étang d'eau (cas réel). Source : Mirela Robitu et al., 2006	77
Figure III. 10: Positionnement des points. Source : Mirela Robitu et al., 2006	78
Figure III. 11 : Température de surface et rayonnement solaire dans la place Fleuriot : cas vide (Empty situation) et actuel (actual situation). Source : Mirela Robitu et al., 2006	78
Figure III. 12 : Vitesse du vent sur la place Fleuriot à 12h z = 1,5m (a) situation vide, (b) situation réelle. Source : Mirela Robitu et al., 2006.....	79

Figure III. 13 : Vue satellite du parc Flisvos à Athènes. Source : Santamouris M. et al., 2012	80
Figure III. 14 : Distribution spatiale de la température ambiante mesurée à 3. 5 m de hauteur pour le 4 août. Source : Santamouris M. et al., 2012	81
Figure III. 15 : Répartition spatiale de la température ambiante dans le parc pendant une journée d'été typique, (a) sans les trottoirs frais, et (b) avec les trottoirs frais. Source : Santamouris M. et al., 2012	81
Figure III. 16 : Interface du logiciel de simulation, source : ENVI-met https://envi-met.info	83
Figure III. 17 : Variation de température en site patrimonial (à droite) et en zone urbaine contemporaine (à gauche), la hauteur au-dessus du sol : 1,7 m à 15h00. (E. Jamei et al., 2017)	84
Figure III. 18 : Température de la surface du sol et température de l'air pour 12h00, Berceni (à gauche) et Berceni-Sud (à droite), en haut - les zones numérisées, au milieu - la température de la surface du sol, en bas - la température de l'air à 2 m de hauteur (Urițesc)	85
Figure III. 19 : interface du logiciel de simulation SOLENE, source : https://groupes.renater.fr	85
Figure III. 20 : Modèle géométrique d'un arbre au centre d'une cour ouverte (A) et discrétisation de la géométrie en faces triangulaires (B) (BOUYER Julien, 2009)	86
Figure III. 21 : Principes d'échanges eau/énergie - Modèle TEB (Town Energy Balance). Source :TERRAIN Jean-Jacques(2015).....	88
Figure III. 22: Explication de la physique de TEB et du modèle en rue canyon. Source : TERRAIN Jean-Jacques(2015).....	89

Chapitre IV :

Figure IV. 1: Situation géographique de la wilaya de Biskra. Source monographie de Biskra, 2016	93
Figure IV. 2: Situation des différentes places choisies (1 : place El Horia, 2 : place zwaka, 3 : place Dhalaa, 4 : place Iben Badis), source : auteur d'après le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.....	99
Figure IV. 3: Situation de la place El-Horia. le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.	99
Figure IV. 4: Vue satellite présente la situation de la place de El-Horia. Sorce : établit par auteur, 2016. 100	
Figure IV. 5: Divers équipement à l'alentour de la place El Horia. Source le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.	100
Figure IV. 6: Forme et dimensions de la place El Horia. Source le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.	101
Figure IV. 7: Composantes de la place El Horia. Source : Auteur, 2016	101
Figure IV. 8: Vues Sur La Place El Horia. Source : Auteur, 2016.....	101
Figure IV. 9: Situation De La Place De Zwaka. Source le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.....	102
Figure IV. 10 : vue satellite présente la situation de la place de Zwaka. Établit par auteur, 2016.	102
Figure IV. 11: Des activités commerciales et autres entourant la place Zouaka. Source : le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.	103
Figure IV. 12: vue sur la place Zouaka. Source : auteur, 2016.	103
Figure IV. 13: Situation de La Place Dhalaa. Source : le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.....	104
Figure IV. 14: Vue satellite présente la situation de la place Dhalaa. Etablit par auteur, 2016.	104
Figure IV. 15: La place Dhalaa avec ses différentes parties (A), (B) et (C). Source Google Earth, 2016.	105
Figure IV. 16: Divers activités entourant la place Dhalaa. Source : le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.	105
Figure IV. 17: Situation de la place Iben Badis. Source : le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.....	106

Figure IV. 18: Vue Satellite Présente La Situation De La Place IBEN BADIS (726 Lgts). Etablit par auteur, 2016.	106
Figure IV. 19: Aménagement de a pace Zouaka, source auteur, 2016.	107
Figure IV. 20: Vues sur a place Iben Badis, source : auteur, 2016	107
Figure IV. 21: L'instrument de mesure TESTO 480 utilisé dans cette expérimentation. Source : auteur, 2016	109

Chapitre V :

Figure V. 1: Comparaison des facteurs morphologiques et l'environnement thermique dans deux places, établit par auteur, 2018.....	130
Figure V. 2: Comparaison de facteur de la densité végétale avec les valeurs de la vitesse de l'air et l'humidité dans deux places, établit par auteur, 2018	131
Figure V. 3: Comparaison des facteurs morphologiques et l'environnement thermique dans deux places, établit par auteur, 2018.....	132
Figure V. 4: Comparaison de facteur de la densité végétale avec les valeurs de la vitesse de l'air et l'humidité dans deux places, établit par auteur, 2018	133

Chapitre VI :

Figure VI. 1: Le tissu traditionnel du ksar d'Ouargla, établi par l'auteur, 2013	139
Figure VI. 2: Localisation précise du 5ème point de mesure, établi par l'auteur, 2013	139
Figure VI. 4: Vue de placette côté Nord- Ouest. Source : Auteur, 2011	140
Figure VI. 3: Vue de la placette côté Sud- Est. Source : Auteur, 2011.....	140
Figure VI. 5: les instruments de mesure (A) Environnement Mètre 8820 et (B) Anémomètre à Fil Chaud. Source : Auteur, 2013	140
Figure VI. 6: valeurs Maximales et minimales de quatre grandeurs climatiques mesurées. Source : Auteur, 2013	140
Figure VI. 7: Carte des variations journalières de la température de l'air enregistrées dans la place El Horia pendant cinq moments d'une journée d'été au scénario de référence (S0). Source : Auteur	147
Figure VI. 8: Variation journalière de la température de l'air, de la température radiante, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air au cours d'une journée d'été (Place El Horia) Source : Auteur, 2022	148
Figure VI. 9: Calcul de l'indice de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour valider les valeurs simulées de la température de l'air et de l'humidité relative. Source : Auteur (D'après Ghanemi Faten, 2022)	149
Figure VI. 10: Carte des variations journalières de la température de l'air enregistrées dans la place El Horia pendant cinq moments d'une journée d'été au premier scénario (S1).	150
Figure VI. 11: Variation journalière de la température de l'air, de la température de radiante, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air enregistrée au premier scénario (S1) Source : Auteur, 2022.	151
Figure VI. 12: Carte des variations journalières de la température de l'air enregistrées dans la place El Horia pendant cinq moments d'une journée d'été au deuxième scénario (S2). Source : Auteur, 2022.	152
Figure VI. 13: Variation journalière de la température de l'air, de la température de radiante, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air enregistrée au deuxième scénario (S2). Source : Auteur, 2022.	153

Figure VI. 14: Comparaison des variations journalières et les écarts enregistrés des valeurs de la température de l'air et la température radiante dans les deux scénarios (S1) et (S2). Source : Auteur, 2022.	154
Figure VI. 15: Comparaison des variations journalières et les écarts de l'humidité relative enregistrés dans les deux scénarios (S1) et (S2). Source : Auteur, 2022.	155

2- Liste des tableaux :

Chapitre I :

Tableau I. 1 : Taux d'émission anthropique et bilan radiatif net annuel pour quelques villes américaines, européennes et asiatique. Source : Giguère Mélissa et al., 2009.	25
Tableau I. 2: Caractéristiques de surface (la réflectivité solaire et l'émissivité infrarouge) des matériaux de surface de couverture les plus communes (Anquez Philippe et al., 2011).	27
Tableau I. 3: les différents albédos de plusieurs matières existant dans la ville, établit par auteur, 2013 .	30

Chapitre II :

Tableau II. 1: Classification des matériaux en trois catégories en fonction de leur albédo source : Nikolopoulou, M. 2004.	47
Tableau II. 2: Comparaison des toitures intensives et extensives. Source : Djedjig Rabah, 2013, d'après Peck et al., 1999)	50

Chapitre III :

Tableau III. 1: Rapports H / W de chaque zone. Source Pattaranan T., 2016.	71
Tableau III. 2: Températures moyennes de l'air des zones étudiées. Source Pattaranan T., 2016.	72

Chapitre IV :

Tableau IV. 1: Les variations mensuelles de la température d'air au cours de la décennie (2005-2015) dans la ville de Biskra. Source : les données de la station météorologique de Biskra, 2016.	94
Tableau IV. 2: Les variations mensuelles de l'humidité relative au cours de la décennie (2005-2015) dans la ville de Biskra. Source : : les données de la station météorologique de Biskra, 2016.	95
Tableau IV. 3: Moyennes mensuelles des précipitations pendant la période (2005 -2015) Source : les données de la station météorologique de Biskra, 2016.	96
Tableau IV. 4: Moyennes mensuelles de l'insolation pendant la période (2005 -2015). Source : les données de la station météorologique de Biskra, 2016.	96
Tableau IV. 5 : Moyennes mensuelles de la vitesse de l'air pendant la période (2005 -2015) Source : les données de la station météorologique de Biskra, 2016.	97

Chapitre VI :

Tableau VI. 1: Comparaison des variations microclimatiques journalières dans la place du ksar Ouargla et la place El Horia. Source : Auteur, 2022	141
Tableau VI. 2: les données d'entrée de simulation pour le modèle de référence (S0) et les deux scénarios (S1) et (S2). Source : Auteur.	146

3- Liste des graphes :

Chapitre IV :

Graphe IV. 1: Les variations mensuelles de la température d'air au cours de la décennie (2005-2015) dans la ville de Biskra. D'après les données de la météo de Biskra, 2016.	94
Graphe IV. 2: Variations mensuelles de l'humidité relative au cours de la décennie (2005 -2015) Source : Auteur, d'après les données de la station météorologique de Biskra, 2016.	95
Graphe IV. 3: Moyennes mensuelles des précipitations pendant la décennie (2005 -2015) Source : Auteur, d'après les données de la station météorologique de Biskra, 2016.....	96
Graphe IV. 4: Moyennes mensuelles de l'insolation pendant la décennie (2005 -2015) Source : Auteur, d'après les données de la station météorologique de Biskra, 2016.....	97
Graphe IV. 5: Moyennes mensuelles de la vitesse de l'air pendant la décennie (2005 -2015) Source : Auteur, d'après les données de la station météorologique de Biskra, 2016.	97

Chapitre V :

Graphe V. 1: Variation journalière de la température de l'air au cours d'une journée d'été (Place El Horia), établit par auteur, 2016.....	114
Graphe V. 2: Variation journalière de la température radiante au cours d'une journée d'été (Place El Horia), établit par auteur, 2016.	114
Graphe V. 3: Variation journalière de la vitesse de l'air au cours d'une journée d'été (Place El Horia), établit par auteur, 2016.....	115
Graphe V. 4: Variation journalière de l'humidité relative au cours d'une journée d'été (Place El Horia), établit par auteur, 2016.....	115
Graphe V. 5: Variation journalière de la température de l'air au cours d'une journée d'été (Place Dhalaa), établit par auteur, 2016.....	116
Graphe V. 6: Variation journalière de la température radiante au cours d'une journée d'été (Place Dhalaa), établit par auteur, 2016.....	116
Graphe V. 7: Variation journalière de la vitesse de l'air au cours d'une journée d'été (Place Dhalaa), établit par auteur, 2016.	117
Graphe V. 8: Variation journalière de l'humidité relative au cours d'une journée d'été (Place Dhalaa), établit par auteur, 2016.....	118
Graphe V. 9: Variation journalière de la température de l'air au cours d'une journée d'été (Place Zouaka), établit par auteur, 2016.....	119
Graphe V. 10: Variation journalière de la température radiante au cours d'une journée d'été (Place Zouaka), établit par auteur, 2016.	119
Graphe V. 11: Variation journalière de la vitesse de l'air au cours d'une journée d'été (Place Zouaka), établit par auteur, 2016.....	120
Graphe V. 12: Variation journalière de l'humidité relative au cours d'une journée d'été (Place Zouaka), établit par auteur, 2016.....	120
Graphe V. 13: Variation journalière de la température de l'air au cours d'une journée d'été (Place Iben Badis), établit par auteur, 2016.	121
Graphe V. 14: Variation journalière de la température radiante au cours d'une journée d'été (Place Iben Badis), établit par auteur, 2016.	121
Graphe V. 15: Variation journalière de la vitesse de l'air au cours d'une journée d'été (Place Iben Badis), établit par auteur, 2016.....	122
Graphe V. 16: Variation journalière de l'humidité relative au cours d'une journée d'été (Place Iben Badis), établit par auteur, 2016.....	123

Grappe V. 17: Variation journalière de la température d'air dans les différentes places au cours d'une journée d'été, établi par auteur, 2016.....	124
Grappe V. 18: Variation journalière de la température radiante dans les différentes places au cours d'une journée d'été, établi par auteur, 2016.....	126
Grappe V. 19: Variation journalière de l'humidité relative dans les différentes places au cours d'une journée d'été, établi par auteur, 2016.....	128
Grappe V. 20: Variation journalière de la vitesse de l'air dans les différentes places au cours d'une journée d'été, établi par auteur, 2016.....	129

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION

Depuis l'époque de Vitruve, il est reconnu que l'architecture et les espaces urbains peuvent être conçus en fonction du climat. Les habitats traditionnels ont été les précurseurs de l'architecture bioclimatique, et les adaptations de l'homme à son environnement se retrouvent partout dans le monde : les habitats troglodytes en Chine, en Espagne et en Égypte, les huttes en bambou en Asie du Sud -Est, les igloos au pôle Nord, les tipis chez les Indiens et les isbas russes. Pendant des siècles, l'homme primitif a cherché à s'adapter au climat avec des matériaux et des techniques très limités. Lorsqu'il a quitté le refuge des grottes, il a été confronté au défi de concevoir une architecture adaptée au climat.

L'adaptation bioclimatique d'un habitat passe avant tout par la configuration du groupement d'habitations. La topographie doit permettre une bonne évacuation des eaux de surface et des pluies, tandis que les rues peuvent être tracées de manière à protéger des vents violents. La disposition des habitations peut aussi jouer un rôle crucial dans leur protection contre l'ensoleillement ou, au contraire, dans l'optimisation de la ventilation et de la luminosité en fonction des contraintes climatiques. Par ailleurs, la typologie des habitations doit être choisie en fonction de ces mêmes contraintes, avec des options telles que les maisons à patio, à cour demi-close, ou encore les maisons isolées ou mitoyennes. Enfin, le choix des matériaux est essentiel pour garantir un effet de déphasage et un retard de transfert de chaleur.

Les établissements humains du Sahara ont toujours eu la capacité de créer des espaces qui répondent aux besoins climatiques des habitants. Les rues étroites et sinueuses créent des zones ombragées en été pour réduire l'exposition au soleil et les gains de chaleur. Les parcelles sont également disposées de manière irrégulière pour créer des coupe-vent continus, tandis que la forte mitoyenneté et l'accolement des bâtiments limitent la surface d'exposition au rayonnement solaire. Ces techniques permettent de réduire l'effet de stockage de chaleur et la température radiante dans ces espaces. Cette tradition a ainsi permis aux habitants de s'adapter aux conditions climatiques difficiles de la région.

Les techniques de construction, les matériaux utilisés et les stratégies d'implantation et d'orientation ont été développés au fil des millénaires pour améliorer les conditions de survie en réponse aux conditions climatiques difficiles. Les ksour, par exemple, sont des établissements humains sahariens qui illustrent bien cette adaptation au milieu physique et la protection contre les facteurs climatiques indésirables.

On trouve plusieurs niveaux d'adaptation qui ont permis à l'établissement humain saharien de fournir des espaces adaptés aux conditions climatiques, tels que la forme des habitations, le système viaire, le système parcellaire, la façade et les matériaux de construction. Ces niveaux d'adaptation représentent une expression optimale de l'habitat qui a su tirer partie du climat en utilisant des principes bioclimatiques. Ces principes peuvent être réutilisés dans une architecture contemporaine soucieuse de s'adapter au lieu où elle est construite, en les adaptant aux besoins architecturaux actuels.

Le progrès des modalités de vie et la diversité des activités humaines ont conduit à la perte de la relation entre l'homme moderne et son habitat, ainsi qu'à la disparition de connaissances empiriques. Cependant, ces connaissances ont produit des solutions climatiques efficaces avec des ressources limitées, tout en respectant les contextes socioculturels et économiques. Malheureusement, sous l'influence de valeurs modernes, cette ingéniosité n'a pas survécu.

De nos jours, la ville moderne tend à abandonner les espaces publics urbains traditionnels tels que la rue et la place, qui ont pourtant été des éléments structurants des villes depuis l'Antiquité. Ces espaces sont maintenant condamnés au nom de la séparation des flux de circulation et de la ségrégation des activités. Les espaces urbains récents sont souvent très ouverts, exposés à un soleil chaud et brûlant à toutes les heures. Malheureusement, les rues et les places, qui sont parmi les espaces urbains les plus touchés par la dégradation du confort thermique, sont souvent conçues sans prendre en compte les considérations climatiques.

1- PROBLEMATIQUE :

La ville ne s'est jamais présentée comme une structure urbaine continue et dense, mais offre plutôt une diversité d'espaces urbains aux fonctions variées. Ces espaces jouent un rôle crucial dans la récréation de la vie urbaine animée et dynamique, offrant ainsi un environnement intéressant et agréable à la jouissance de ses habitants.

Tout comme les bâtiments, les espaces extérieurs en milieu urbain sont soumis aux conditions climatiques qui influencent les ambiances thermiques. Ces ambiances peuvent affecter le confort thermique des habitants de la ville de manière variable. C'est pourquoi, la création de zones urbaines avec des espaces extérieurs agréables et confortables est l'un des principaux objectifs de la conception environnementale en milieu urbain. De ce fait, les paramètres microclimatiques jouent un rôle crucial dans la détermination des activités qui peuvent avoir lieu sur un site donné. Ils ont également un impact significatif sur la façon dont ces espaces sont utilisés jusqu'à un certain point.

La plupart des réactions face au microclimat sont instinctives, mais elles se traduisent souvent par des comportements différents en fonction des conditions climatiques. Par conséquent, la compréhension des caractéristiques microclimatiques d'un espace extérieur en milieu urbain ainsi que de leur impact sur le confort des utilisateurs offre de nouvelles perspectives pour le développement de l'environnement urbain. Cela peut ouvrir de nouvelles possibilités pour créer des espaces urbains plus agréables et adaptés aux besoins des citoyens.

Bien que les paramètres affectant les conditions thermiques à l'extérieur soient similaires à ceux à l'intérieur, ils sont plus nombreux et variables. La complexité de la variabilité temporelle et spatiale, ainsi que la diversité des activités humaines entraînent la compréhension du confort en conditions extérieures difficiles.

Les espaces urbains sont caractérisés par des variations importantes des paramètres microclimatiques, qui sont difficiles à gérer (par exemples, l'humidité, la température de l'air, les vents et les rayonnements). Le milieu urbain présente des particularités qui entraînent des modifications climatiques perceptibles à différents niveaux.

Les microclimats en milieu urbain sont plus complexes que dans les autres environnements, car ils sont activés par la morphologie des bâtiments, des espaces publics et de nombreux autres facteurs. La configuration des obstacles et les champs radiatifs thermiques peuvent avoir une grande influence sur les conditions climatiques. Cependant, il est possible d'utiliser ces facteurs pour créer des microclimats bénéfiques et améliorer les conditions de confort en milieu urbain. Des moyens architecturaux et mécaniques ont été développés pour répondre aux besoins climatiques dans des espaces spécifiques, tels que les galeries urbaines couvertes dans les climats froids ou les dais pour couvrir les marchés dans les climats chauds. Cependant, d'autres éléments urbains peuvent également jouer un rôle important dans l'amélioration des conditions extérieures, comme les surfaces d'eau, la présence de végétation et le choix de revêtements de sol.

L'effet climatique des revêtements de sol varie en fonction de plusieurs facteurs, tels que leur capacité à absorber ou refléter les rayonnements thermiques, leur taux d'absorption d'eau et leur conductivité.

Les revêtements en asphalte et en béton ont une capacité d'absorption thermique élevée et une faible capacité d'absorption d'eau, ce qui les fait fonctionner comme des "radiateurs" urbains, émettant de la chaleur jour et nuit. Dans les climats chauds, il est recommandé de les ombrager autant que possible ou même de les remplacer par des revêtements plus poreux.

Dans les régions au climat chaud et sec, comme la ville de Biskra où la durée et l'intensité de l'ensoleillement sont importantes, l'aménagement de l'espace public doit être pensé pour prévenir certaines situations excessives qui peuvent être insupportables et pour favoriser une adaptation optimale avec le climat. Au fil des siècles, l'espace public des régions sahariennes a démontré sa capacité à s'adapter au climat en mettant en place une structure urbaine compacte qui permet de réduire les gains solaires en été et les pertes de chaleur en hiver. Également, les rues profondes et sinueuses créent des zones d'ombre pendant la journée en été, réduisant ainsi l'irradiation solaire et limitant les gains d'énergie. Cela soulève la question de savoir si les nouveaux espaces urbains sont adaptés pour répondre aux exigences d'un climat chaud et sec, comme ils l'étaient dans le passé.

- Quelles sont les spécificités de ces derniers auxquelles la forme de la place doit se plier afin de créer une adaptation parfaite avec l'environnement ?
- Quelles seront les outils architecturaux passifs susceptibles de provoquer cette adaptation ?
- Enfin, Peut-on obtenir des améliorations réellement quantifiables des caractéristiques microclimatiques des places, par l'introduction ou la multiplication de la végétation et des bassins d'eau ?

2- HYPOTHESES :

Trois hypothèses sont établies pour cette recherche :

- L'orientation d'une place par rapport au soleil et par rapport aux vents dominants et le rapport entre la hauteur moyenne des bâtiments qui l'entourent et sa largeur, sont les paramètres effectifs pour générer une adaptation parfaite avec l'environnement et créer un microclimat favorable dans les villes sahariennes à climat chaud et sec.
- la faible réflectivité du revêtement du sol et l'ombre résultant de la faible ouverture au ciel sont susceptibles de soutenir cette adaptation.
- La présence des végétations et des espaces d'eau peuvent créer des échanges thermiques (effet d'évapotranspiration) qui modifient la température d'air afin d'améliorer quantitativement les conditions microclimatiques dans l'espace urbain.

3- OBJECTIFS :

Deux principaux objectifs sont visés pour cette recherche :

- Mettre en exergue la relation entre la morphologie de l'espace urbain public et le microclimat.

- évaluer l'influence des facteurs morphologiques des espaces urbains sur les conditions microclimatiques.

Comme objectifs secondaires de :

- Démontrer la variabilité de l'environnement thermique dans l'espace urbain public.
- évaluer les conditions favorables de l'environnement thermique ainsi que d'identifier les opportunités d'adaptation bioclimatique dans l'espace urbain public.

4- CAS D'ETUDE :

Cette recherche s'appliquera au cas de la ville de Biskra, appartenant aux régions sahariennes à climat chaud et sec en Algérie. Son climat aride se caractérise par des hivers froids et secs et des étés chauds et secs. Outre sa représentativité des villes sahariennes, le choix de la ville de Biskra s'explique également par des considérations méthodologiques. En effet, pour réaliser l'expérimentation envisagée dans cette étude, des échantillons d'espaces urbains de formes variées sont nécessaires, mais qui sont soumis aux mêmes conditions climatiques et qui présentent des caractéristiques topographiques similaires. Par conséquent, le cas de la ville de Biskra a été sélectionné car il offre la diversité morphologique requise dans le même contexte climatique. Afin d'évaluer l'adaptation bioclimatique de l'espace public urbain à Biskra, une étude comparative a été menée avec la ville d'Ouargla, choisie comme exemple d'entité traditionnelle adaptée au climat chaud et aride. Ces deux villes, Biskra et Ouargla, appartiennent au même contexte des villes sahariennes.

5 - METHODOLOGIE DE RECHERCHE :

Cette thèse s'inscrit dans la problématique générale des ambiances urbaines. Elle traite de façon particulière des aspects physiques de ces ambiances, en interrogeant les interactions entre les actions sur la forme urbaine et les paramètres microclimatiques. Les espaces urbains concernés par cette recherche sont les places urbaines. Deux méthodes complémentaires seront utilisées pour mener cette recherche :

- une méthode descriptive par une étude expérimentale, qui consiste en une acquisition de paramètres climatologiques standards (température de l'air, humidité, vitesse du vent, ...) et qui seront traités de manière statistique.
- Une méthode physique, qui s'appuie sur la modélisation pour interpréter les paramètres et comportement climatiques tels qu'ils résultent des mesures.

La démarche suivie pour réaliser la modélisation consiste à appliquer des scénarios visant à améliorer l'environnement thermique et modifier le microclimat urbain de la place concernée. L'objectif est de contrôler les effets négatifs de la forme urbaine et de ses surfaces sur les conditions climatiques confortables.

6- STRUCTURE DE LA THESE

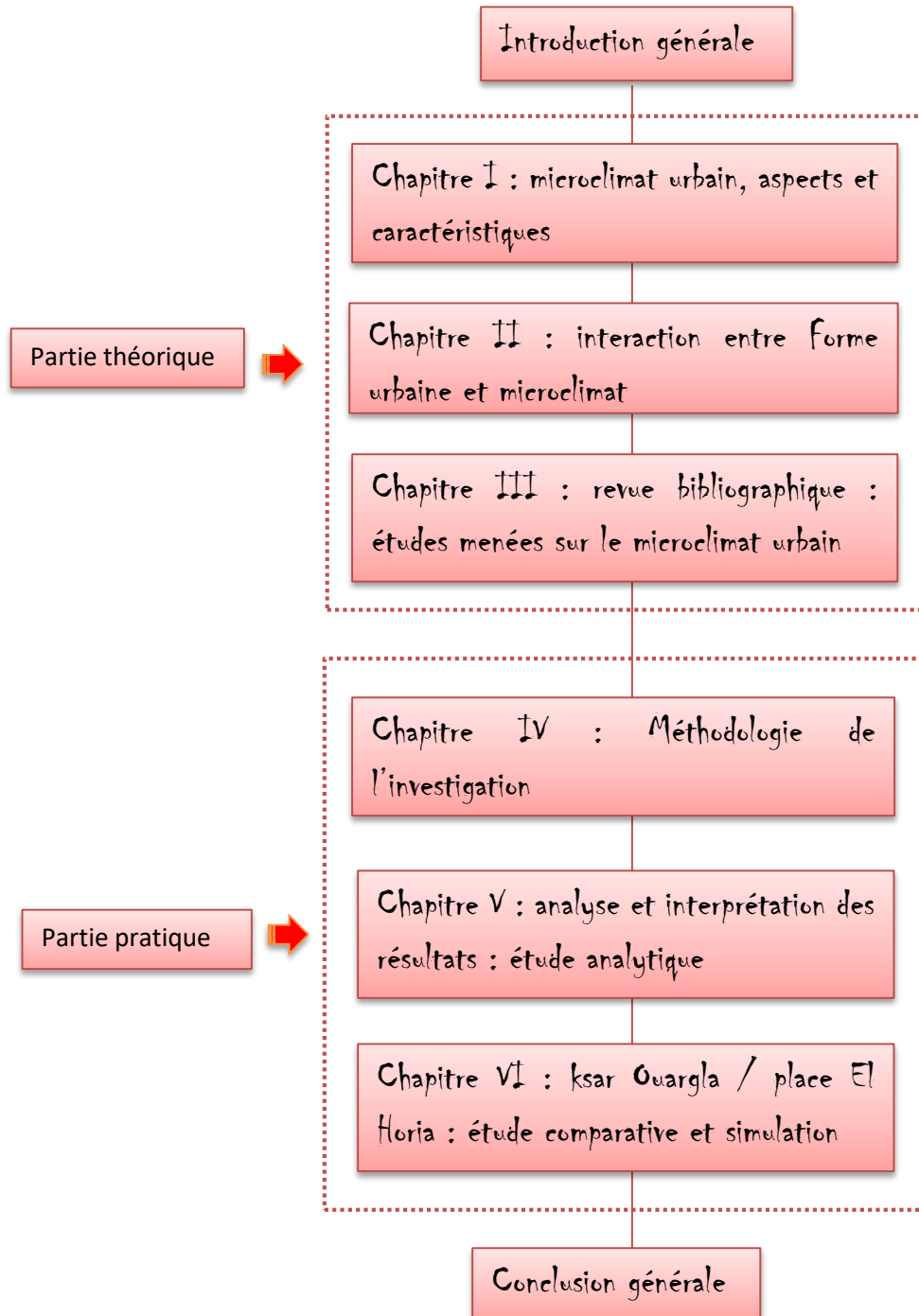
Ce travail est divisé en deux parties principales. La première partie se concentre sur l'approche théorique et se compose de trois chapitres qui portent sur la recherche documentaire de trois concepts clés : le microclimat urbain, les formes urbaines et les opportunités d'adaptation au climat des espaces urbains. La seconde partie de ce travail se concentre sur l'approche analytique. Cette partie est composée de trois chapitres, dont le premier décrira la méthodologie de l'enquête. Les deux derniers chapitres seront dédiés à l'exploration de l'application numérique et à l'analyse des résultats obtenus.

- Dans le premier chapitre, on explique des notions relatives au concept de microclimat urbain et la climatologie urbaine, la spécificité du microclimat urbain, les facteurs affectant le climat urbain, et les effets aérodynamiques en milieu urbain.
- Le deuxième chapitre porte sur la relation entre la forme urbaine et le microclimat. Il consiste à présenter les Formes urbaines au cours de l'histoire et leurs caractéristiques microclimatiques, l'influence de la forme urbaine sur la température, le rayonnement et la vitesse du vent, les facteurs morphologiques modifiant le microclimat. Il expose aussi des dispositifs et opportunités d'adaptation au climat urbain. il traite aussi des stratégies d'adaptation climatique anciennement utilisé dans l'habitat saharien. Finalement mis en évidence la problématique climatique dans l'espace public, particulièrement la place dans un milieu à climat chaud et aride.
- le troisième chapitre dévoile une revue bibliographique des études menées sur le microclimat. Il commence par le fondement de la micro-climatologie urbaine et son évolution. Puis il présente une analyse des études scientifiques effectuées sur le microclimat urbain. Ses études nous ont permet de d'identifier les axes de recherche abordés sur le microclimat urbain, faire des connaissance sur l'évolution de la recherche sur le microclimat urbain et même découvrir les outils et les méthodes d'observation du climat urbain dans la ville. Ensuite, il expose la modélisation numérique appliquée au microclimat urbain, et les modèles de simulation numériques qui s'appliquent à la climatologie urbaine.

- Le quatrième chapitre décrit le contexte d'étude qui est la ville de Biskra, qui se caractérise par un climat chaud et aride, elle a été choisie pour sa représentativité des villes sahariennes au Bas Sahara et pour des raisons d'ordre méthodologique. Cette étude sollicite des échantillons des espaces publics de formes variés, mais qui sont soumis, sous l'influence des mêmes conditions climatiques. Les places choisies pour cette expérimentation sont les suivantes : place El Horia, place Zouaka nommée : Gattari El Okbi), place de 726 logs et la place de Djebel Dhalaa. Cette étude traite les conditions thermiques à l'échelle urbaine dans les milieux sahariens, on a choisi la période estivale qui présente la saison chaude de l'année, où les conditions microclimatiques sont défavorables, parce qu'elle pose les problèmes de confort les plus extrêmes.
- Le cinquième chapitre est consacré à l'analyse et l'interprétation des résultats recueillis dans les campagnes de mesure, qui sont prises le long d'une journée représentative de la période estivale. Les mesures sont relevées sur quatre places, situées dans la ville de Biskra. Ces dernières présentent des caractéristiques morphologiques variées. Les mesures sont prises sur quatre paramètres climatiques qui sont la température de l'air, la température radiante, l'humidité relative et la vitesse de l'air. L'étude comparative des fluctuations climatiques de ses facteurs entre les différents points de mesure montre la variété microclimatique due à la diversité morphologique de chaque espace. Ce chapitre est réservé aussi à étudier la relation entre les facteurs morphologiques et l'environnement thermique dans chaque place
- Le sixième chapitre expose la comparaison des résultats obtenus dans la place El Horia à Biskra par les variations microclimatiques caractérisées la place située au Ksar Ouargla. Cette comparaison sera réalisée dans une tentative pour vérifier l'influence de la forme urbaine sur l'adaptation bioclimatique de cette place parce que les deux places appartiennent au même contexte d'étude (climat chaud et aride) mais la forme urbaine se diffère. La première est insérée dans un tissu urbain moderne et la deuxième est insérée dans un tissu traditionnel compact. On va étudier par la suite, l'influence des facteurs morphologiques sur la modification du microclimat urbain et l'amélioration de la qualité de l'environnement thermique dans la place El Horia. Par l'outil de simulation de microclimat urbain « Envi-Met », on va examiner l'effet d'aménagement de la place El Horia par deux scénarios différents, en expliquant dans chaque cas l'effet de la forme urbaine de l'espace public et la nature de ses surfaces sur l'amélioration du microclimat urbain.

- Enfin, la conclusion générale présente les résultats de cette recherche, les recommandations et les pistes de recherches à développer.

7- PLAN DE THESE



**CHAPITRE I : MICROCLIMAT URBAIN, ASPECTS ET
CARACTÉRISTIQUES**

INTRODUCTION :

Les grands centres urbains ont subi une modification de leur microclimat en raison de l'activité humaine : Les centres urbains ont vu leur microclimat évoluer sous l'impact de l'activité humaine, en raison de facteurs tels que les déplacements automobiles quotidiens, le chauffage et l'éclairage des bâtiments et des espaces publics. Ces éléments sont à l'origine de l'émission de chaleur et de divers types de pollution qui façonnent le microclimat urbain.

Les villes sont généralement critiquées pour leur contribution à des problèmes microclimatiques, notamment l'effet d'« îlot de chaleur urbain ». Cette augmentation importante des températures par rapport aux zones rurales environnantes engendre des désordres à la fois au niveau du confort et des besoins énergétiques (nécessité d'utiliser la climatisation) ainsi que des nuisances associées telles que la pollution. (Vinet Jérôme, 2000).

La minéralisation des villes, qui consiste à remplacer la végétation et les zones humides par du béton et de l'asphalte, aggrave ces problèmes. En effet, cela diminue la capacité du paysage urbain à réguler les excès thermiques.

Les villes connaissent une croissance rapide, avec une augmentation alarmante de la population urbaine. Cette croissance est accompagnée d'une industrialisation accrue, de l'agglomération des activités en milieu urbain et de l'augmentation du trafic automobile, ce qui entraîne une augmentation de la consommation d'énergie et de la pollution atmosphérique. En conséquence, la qualité environnementale et climatique est réduite, ce qui se traduit par une surchauffe des centres urbains.

Dans ce chapitre, nous explicitons la climatologie urbaine à travers un petit rappel de quelques définitions sur le climat, la climatologie et la météorologie, après nous entamons les échelles climatiques, les différents types de transferts de chaleur et de masse en milieu urbain. Ainsi, nous abordons successivement les types de rayonnement, la spécificité du microclimat en indiquant les causes de l'îlot de chaleur urbain, son intensité et ses impacts. Ensuite, nous passons aux facteurs affectant le climat urbain en citons l'effet de la morphologie urbaine, les activités humaines (anthropiques), les matériaux, l'albédo, la densité et taille de la ville sur la modification de ce dernier. Après, nous exposons l'importance de l'humidité et la qualité de l'air en milieu urbain ainsi les effets aérodynamiques dans la ville. Enfin, nous terminons en présentant le rôle de l'eau et la végétation en milieu urbain.

I. De climatologie urbaine au microclimat urbain

I.1. Climatologie urbaine

I.1.1. Terminologies et définitions

- **Le climat** : est une synthèse à long terme, couvrant plus de 30 ans, des conditions atmosphériques, incluant la moyenne et la variabilité. On peut utiliser la définition de Max Sorre qui décrit le climat comme l'ensemble des états atmosphériques successifs habituels au-dessus d'un lieu, formant une ambiance atmosphérique (G. Viers, J-P. Vigneau, 2001).

- **La climatologie** : implique la compréhension des caractéristiques de l'atmosphère, principalement sa température, son humidité (sous forme de vapeur d'eau, de nuages ou de précipitations) et sa dynamique (pression, mouvements verticaux et horizontaux). Elle nécessite une analyse régulière des multiples phénomènes regroupés sous le terme de météores.

- **la météorologie** : observe et cherche à expliquer les phénomènes météorologiques. Contrairement à la climatologie, qui est une science de synthèse, la météorologie est une science analytique et explicative qui s'appuie sur la première. Cela montre clairement que ces deux sciences sont étroitement liées et que leur évolution les rend de plus en plus interdépendantes.

En ce sens, **la climatologie** étudie les climats en tant que branche de la météorologie. Elle utilise des observations météorologiques comprenant diverses variables telles que la pression atmosphérique, la température, le vent, l'humidité, les précipitations et l'ensoleillement. Ces observations sont archivées sur de nombreux sites géographiques et sur de nombreuses années, fournissant ainsi des données statistiques permettant à la climatologie d'analyser l'état moyen de l'atmosphère et ses variations dans le temps et l'espace. Son objectif est d'étudier le climat global de la Terre, ainsi que de différencier, classer et décrire différents types de climats à différentes échelles.

I.1.2. Echelles de la climatologie urbaine

La classification des échelles urbaines est basée sur de nombreux critères météorologiques et géographiques. Dans un environnement urbain, la diversité des échelles spatiales est accompagnée d'une diversité des échelles climatiques. Pour différencier chacune d'elles, il est nécessaire d'observer les phénomènes en fonction de l'échelle temporelle et spatiale. Chaque échelle spatiale implique des interactions atmosphériques et climatiques qui lui sont propres.

Elles définissent trois échelles du climat plus restreintes que l'échelle climatologique, à savoir :

- **L'échelle des climats régionaux ou méso climats** : concerne des régions de plusieurs milliers de kilomètres carrés. Ces régions sont soumises à des phénomènes météorologiques spécifiques, tels que des vents régionaux, qui résultent de l'interaction entre la circulation atmosphérique générale et le relief. ¹
- **L'échelle des climats locaux** : concerne des sites s'étendant généralement sur plusieurs dizaines de kilomètres carrés. Les caractéristiques environnementales sont responsables des phénomènes tels que les vents locaux, les écarts de température et d'humidité, etc., qui peuvent être observés sur ces sites par rapport au climat général. Ces particularités peuvent être d'origine humaine, principalement liées au climat urbain, ou être maintenues par des éléments naturels tels qu'une côte maritime ou lacustre, une forêt ou une vallée.
- **En dernier lieu, l'échelle des microclimats** : représente la plus petite échelle où l'on observe des variations des paramètres climatiques à la surface du sol ou sur des objets en contact avec l'air. Cette échelle est appelée échelle micro. Les échelles spatiales caractéristiques du microclimat urbain en climatologie urbaine sont déterminées par les dimensions des zones d'influence des éléments isolés tels que les bâtiments, les arbres, les rues, les routes, les cours intérieures, les jardins, etc. Ces échelles sont généralement comprises entre 1m et 100m. Les interactions atmosphériques et climatiques spécifiques à chaque échelle spatiale peuvent être observées en fonction des échelles temporelles et spatiales. (Benzerzour M., 2004)

I.1.3. Les couches verticales associées aux échelles spatiales

Les effets microclimatiques se produisent dans une couche située entre le sol et le sommet des obstacles se trouvant à la surface. Cette couche est appelée couche de canopée urbaine, en référence à l'étage supérieur de la forêt tropicale, où la canopée est présente. De même, la canopée urbaine fait référence à l'étage supérieur de la ville. (Tiraoui Lamia, 2000). La couche de canopée urbaine, qui se situe entre le sol et le sommet des obstacles présents à la surface, a une hauteur qui correspond approximativement à la hauteur moyenne des éléments de rugosité, tels que les bâtiments et les arbres. Les effets microclimatiques de ces éléments se font sentir sur une distance limitée avant d'être combinés avec les effets à plus grande échelle (Benzerzour M., 2004).

¹ Article publié sur le site : http://www.meteo.pf/glossaire_meteo.php?mot=E-echelleclimat&lettr=E

La transition des effets microclimatiques vers ceux de l'échelle locale est conditionnée par l'intensité du microclimat urbain ainsi que par la vitesse et la stabilité du vent.

La canopée urbaine influence une couche verticale appelée « Roughness Sublayer », qui commence au niveau des toits et se termine à une hauteur où la canopée n'a plus d'effet sur la couche supérieure (échelle Méso, voir figure I.1). La hauteur de cette couche est en moyenne une fois et demie plus grande que celle de la canopée dans des ensembles urbains denses et homogènes.

Une couche supplémentaire située au-dessus des deux précédentes est également influencée par la surface urbaine. La hauteur de cette couche dépend des conditions générales de rugosité à l'échelle de la ville et de la stabilité des conditions atmosphériques. La couche limite urbaine est souvent utilisée pour évaluer l'impact des villes sur l'atmosphère. On parle de la couche limite urbaine (Urban Boundary Layer), qui correspond à la troisième couche au-dessus des deux précédentes et qui est influencée par la surface urbaine. Au-delà de cette couche, on retrouve les mêmes conditions climatiques que celles d'un site rural, sans influence des conditions de rugosité. Cela correspond donc aux conditions de la couche limite terrestre.

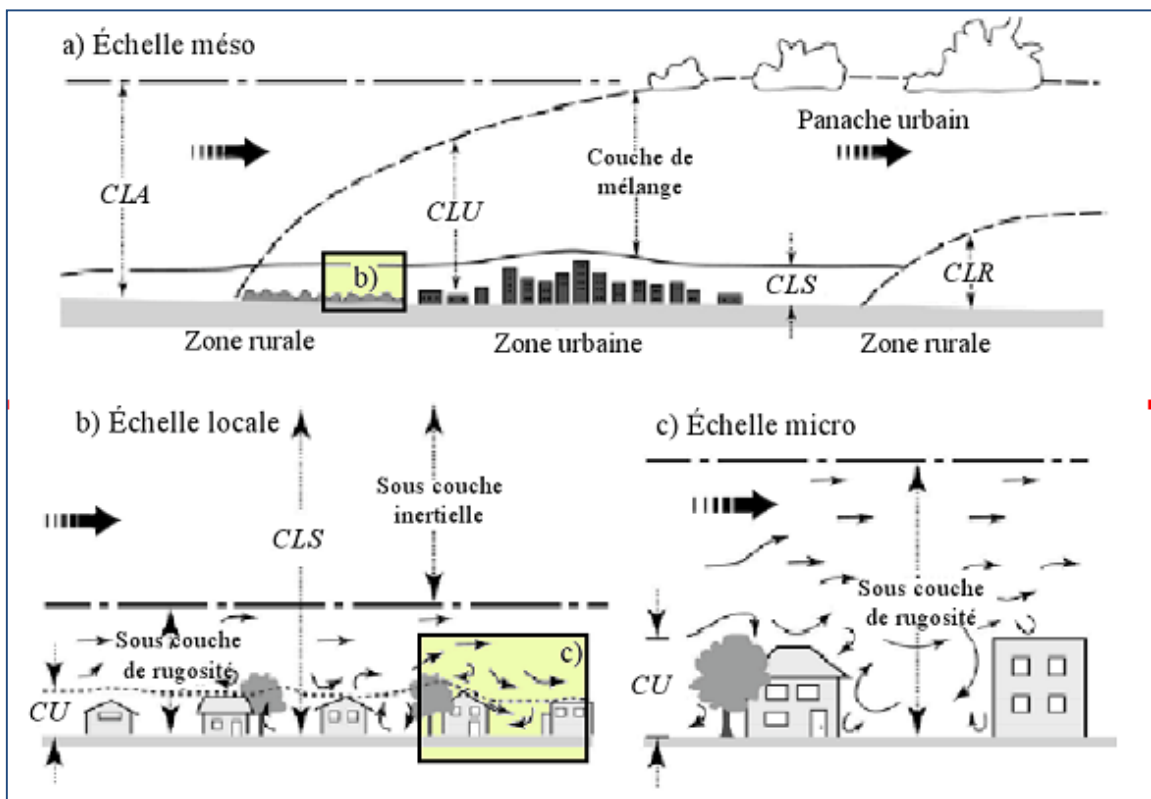


Figure I. 1: Représentation schématique des échelles climatiques et des couches verticales dans une surface urbaine (Bouyer Julien, 2009)

I.2. modes de transfert de chaleur et de masse

Le mécanisme de transfert de chaleur favorisant l'équilibre du système est communément utilisé pour exprimer l'équilibre thermique en milieu urbain. (Ahmed O. Fouad, 2007). Les échanges d'énergie et de matière sont à l'origine des phénomènes climatiques et microclimatiques. L'atmosphère peut être considérée comme une machine thermique dont l'équilibre énergétique est influencé par les bilans radiatifs, convectifs et conductifs (Vinet Jérôme, 2000).

Le calcul du bilan énergétique à l'échelle urbaine est difficile en raison de la diversité des formes urbaines et des propriétés physiques variées des revêtements de surface. (Athamena Khaled, 2012). Les parties opaques telles que les bâtiments et les rues sont les principaux accumulateurs d'énergie dans une ville. Le bilan énergétique d'une ville est généralement représenté par la somme algébrique des flux d'énergie échangés avec son environnement, exprimé sous la forme :

$$\textit{Gains énergétiques} = \textit{Pertes} + \textit{Énergie stockée}$$

La modélisation du bilan énergétique d'une surface urbaine est décrite par l'équation suivante (Benzerzour Mohamed, 2004) :

$$Q^* + QF = QH + QE + \Delta QS + \Delta QA$$

Où :

- Q^* représente le rayonnement net, qui englobe le bilan radiatif pour toutes les longueurs d'onde.
- QF correspond au flux de chaleur provenant des sources anthropogéniques, lié aux activités urbaines.
- QH représente le flux de chaleur sensible.
- QE représente le flux de chaleur latente.
- ΔQS désigne le flux de chaleur stocké dans les constructions et l'air du volume étudié.
- ΔQA représente le bilan des flux de chaleur échangés par advection avec les volumes construits voisins. Ce terme est généralement négligé dans les modèles de climatologie urbaine.

En règle générale, les valeurs de chaleur situées à gauche de l'équation représentent des gains de chaleur, tandis que celles situées à droite indiquent principalement des pertes de chaleur, ou une alternance entre pertes et gains de chaleur. (Bouyer Julien, 2009).

I.2.1. Le bilan radiatif

Le bilan radiatif d'une surface urbaine correspond à la quantité totale de rayonnement solaire (direct, diffus et réfléchi) et infrarouge en provenance du ciel qui est absorbée par la surface. Pour obtenir ce bilan, on soustrait de cette quantité totale l'émission de la surface en flux de grandes longueurs d'onde. (Athamena Khaled, 2012). Il est donné par l'équation :

$$Q^* = K_s(1-\alpha) + L\downarrow - L\uparrow$$

Où

- K_s : est le flux solaire global incident (W/m^2),
- α : est l'albédo² moyen de la surface urbaine (-)
- $L\downarrow$: représente le flux infrarouge atmosphérique (W/m^2)
- $L\uparrow$: représente le flux infrarouge émis par la surface (W/m^2).

Le flux solaire global incident s'écrit comme la somme de trois composantes :

$$K_s = K_{\text{solaire direct}} + K_{\text{solaire diffus}} + K_{\text{solaire réfléchi}}$$

Où

- $K_{\text{solaire direct}}$: est le flux solaire direct en provenance de la voûte céleste (W/m^2),
- $K_{\text{solaire diffus}}$: est le flux solaire diffusé par les particules atmosphériques (W/m^2).
- $K_{\text{solaire réfléchi}}$: est le flux solaire réfléchi provenant des autres surfaces urbaines (W/m^2).

I.2.2. Le flux de chaleur anthropique Q_F

La chaleur anthropique est la quantité totale de chaleur produite par les activités humaines telles que les véhicules, l'industrie, les bâtiments et les équipements urbains. La quantité de chaleur produite dépend de divers facteurs tels que la saison, les modes de déplacement utilisés par les habitants, la densité de population, le niveau d'industrialisation de la ville ainsi que sa topographie environnante. Il est à noter que la chaleur anthropique peut avoir un effet bénéfique en réduisant la demande de chauffage en hiver. Toutefois, en été, elle contribue à augmenter la température de l'air dans les zones urbaines et à favoriser la formation de l'îlot de chaleur urbain, ainsi que la pollution de l'air. (Athamena Khaled, 2012). À l'échelle de la ville, le flux thermique généralement ne dépasse pas $100 W.m^{-2}$. Cependant, dans les quartiers ou les bâtiments situés dans des zones densément peuplées et actives, il peut atteindre des valeurs locales beaucoup plus élevées. (Bouyer Julien, 2009).

² L'albédo d'une surface est le ratio entre le flux de courte longueur d'onde global réfléchi et le flux incident correspondant.

I.2.3. Le flux de chaleur sensible Q_H

Les transferts de chaleur sensible par convection thermique résultent des échanges de chaleur aérodynamiques entre les surfaces solides et l'air environnant, en raison de leurs différences de température.

Ce processus implique à la fois la convection naturelle et forcée, qui ne peuvent être considérées comme négligeables l'une par rapport à l'autre. La convection naturelle se produit lorsque la différence de densité de l'air due au gradient de température crée un courant d'air. La convection forcée se produit lorsque l'air est mis en mouvement par une force externe, comme le vent. Plus la vitesse de l'air est élevée, plus les échanges thermiques sont importants. (Bouyer Julien, 2009).

Dans les zones urbaines, la différence de température entre la surface (T_s) et l'air ambiant (T_{air}) entraîne le transport d'une partie de l'énergie thermique par convection turbulente, sous forme de chaleur sensible, vers l'atmosphère environnante. Cette dernière s'exprime par :

$$Q_H = hc (T_s - T_{air}) \text{ où}$$

hc : représente un coefficient d'échange convectif ($W m^{-2} K^{-1}$). Celui-ci dépend du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), du type de convection (naturelle, forcée ou mixte) et de la disposition spatiale et géométrique des surfaces (horizontales, verticales ou inclinées). On dénombre plusieurs La littérature présente de nombreuses corrélations empiriques qui dépendent habituellement de la température de l'air et de la vitesse du vent. Ces corrélations sont proposées en fonction des différentes configurations étudiées. (Athamena Khaled, 2012).

I.2.4. Le flux de chaleur latente Q_E

Le flux latent est causé par l'évaporation de l'eau à partir des sols naturels, des surfaces végétales et des surfaces poreuses. Cette évaporation peut induire une consommation importante d'énergie dans l'air car la chaleur latente nécessaire à la vaporisation de l'eau est très élevée. Les climatologues ont introduit un coefficient appelé rapport de Bowen pour évaluer l'importance du flux latent dans un site urbain. Ce coefficient correspond au rapport des flux verticaux (Bouyer Julien, 2009).

$$\beta = \frac{Q_H}{Q_E}$$

Lorsque le rapport entre l'évaporation et l'approvisionnement en eau est supérieur à 1 ($\beta > 1$), cela indique une disponibilité limitée en eau. La chaleur est alors principalement

transportée dans l'air par convection sous forme de chaleur sensible, ce qui caractérise principalement un climat chaud. En revanche, lorsque le rapport est inférieur à 1 ($\beta < 1$), cela indique une disponibilité abondante en eau. Dans ce cas, la chaleur transportée vers l'air est principalement sous forme latente, ce qui n'augmente pas nécessairement la température de l'air mais plutôt le taux d'humidité. (Athamena Khaled, 2012).

I.2.5. Le terme de stockage de la chaleur ΔQ_s

Les surfaces urbaines sont composées de divers matériaux de revêtement tels que l'asphalte, le béton, les briques, le bois, le verre, etc., ainsi que de géométries variées telles que des parois verticales ou horizontales, des toits plats ou inclinés, etc. En outre, l'ensoleillement de ces surfaces varie considérablement en fonction de nombreux paramètres météorologiques et morphologiques, ce qui rend difficile la mesure précise du flux de chaleur absorbé par une surface urbaine.

I.2.6. Le flux advectif ΔQ_A

Le flux advectif ΔQ_A est la quantité de chaleur transférée à la masse d'air circulant dans le volume fictif qui est associé à l'élément de surface urbain. Ce transfert de chaleur se produit parce que l'air atmosphérique entre et sort de ce volume à un débit quasi-constant, mais à des températures différentes. La valeur de ΔQ_A dépend de la différence de température entre l'air entrant et l'air sortant, ainsi que de la capacité calorifique de l'air. (Bouyer Julien, 2009).

I.3. Types de rayonnement

I.3.1 Le rayonnement solaire en milieu urbain

L'énergie solaire est un des facteurs majeurs qui influencent les caractéristiques thermiques du climat des espaces urbains. (Tiraoui Lamia, 2000). Le soleil est la principale source d'énergie, qui émet des rayonnements électromagnétiques sous forme de spectre continu, allant des ultra-violets à l'infrarouge en passant par le visible. Les gaz et les molécules de l'atmosphère absorbent certaines bandes de l'ultra-violet et de l'infrarouge, ce qui modifie le rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre. Ainsi, le rayonnement solaire qui atteint la surface de la Terre est composé de 5 % d'UV, 40 % de lumière visible et 55 % d'infrarouge, qui sont porteurs de l'énergie thermique.

Au niveau énergétique, la constante solaire de 1350 W/m^2 est l'énergie qui arrive aux couches supérieures de l'atmosphère.

De l'énergie interceptée par la terre, 60% sont réfléchit directement par l'atmosphère (voir figure I.2) ; 16% contribuent à l'évaporation des océans, à l'origine du cycle de l'eau et de l'énergie hydrique ; 11,5% sont réfléchis à la surface de la terre (selon son coefficient d'albédo), 9,5% seulement absorbés par la masse terrestre et les masses d'air, et environ 3% alimentent la photosynthèse (terrestre et aquatique). Une infime partie participe à la formation des réserves d'énergie fossile (0,02%).

☞ A la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire soit :

- diffusé par les molécules gazeuses ou par les particules en suspension
- absorbé par certains gaz ou certaines particules
- transmis directement.

Une fraction du rayonnement est renvoyée vers l'espace en raison de la diffusion, tandis que le rayonnement diffus est envoyé vers le sol. L'atmosphère absorbe une partie du rayonnement, ce qui conduit à un échauffement de celle-ci. (Tiraoui Lamia, 2000).

☞ A son arrivée au sol, le rayonnement est soit :

- réfléchi ou diffusé
- absorbé.

La partie du rayonnement solaire qui est réfléchi est renvoyée vers l'espace, bien qu'une partie de cette énergie soit absorbée par l'atmosphère. La partie absorbée par le sol et les océans génère une élévation de température et une évaporation considérable des eaux de surface. (Tiraoui Lamia, 2000).

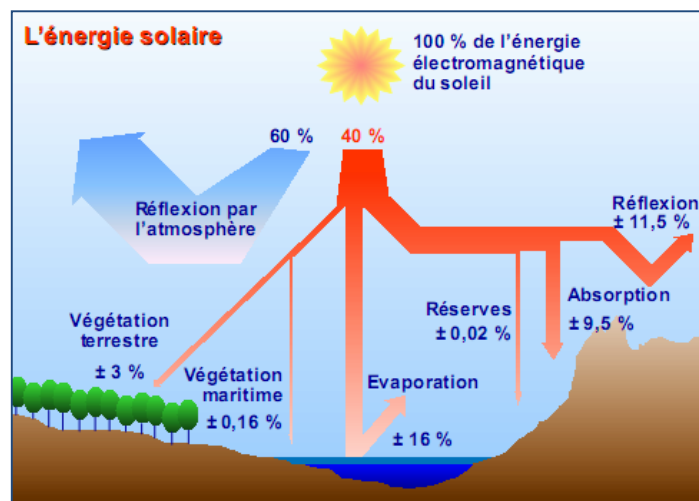


Figure I. 2: Balance énergétique terrestre. Source : Liebard A., DE Herde A., 2005

I.3.2. Le rayonnement thermique

Imaginons un corps à une température T . Ce corps émet de l'énergie par rayonnement thermique, sous forme d'ondes électromagnétiques émises dans toutes les directions et à toutes les longueurs d'onde. Lorsque deux surfaces ayant des températures différentes se trouvent proches, elles échangent de l'énergie thermique sous forme de rayonnement électromagnétique. La densité de flux radiatifs émise par un corps pour les grandes longueurs d'onde (E) est déterminée par la loi de Stefan-Boltzmann, qui s'exprime par l'équation suivante :

$$E = \epsilon \sigma T_s^4$$

Où

ϵ : L'émissivité

σ : La valeur constante de Stefan-Boltzmann

T_s : la température du corps

II. Spécificité du microclimat urbain

II.1. L'îlot de chaleur urbain

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain est largement étudié dans le domaine de la climatologie urbaine et constitue l'élément principal du microclimat des villes. Ces recherches interviennent à un moment où l'opinion publique est de plus en plus préoccupée par les conditions environnementales, tant locales que globales. Des problèmes tels que la pollution de l'air et de l'eau, ainsi que la menace d'un changement climatique mondial, nous obligent à réduire notre consommation d'énergie.

II.1. 1. Définition et caractéristiques de l'ICU

On peut décrire l'îlot de Chaleur Urbain (ICU) comme une élévation anormale de température causée par la présence de la ville, ce qui se traduit par une différence de température entre la zone urbaine et les zones rurales environnantes (voir figure I.3). Lorsque la température est plus élevée en ville, on parle d'îlot de Chaleur Urbain (ICU), tandis que si la température est plus basse en ville, on parle d'îlot de Fraîcheur Urbaine (IFU). (NAJJAR Georges et al., 2010)

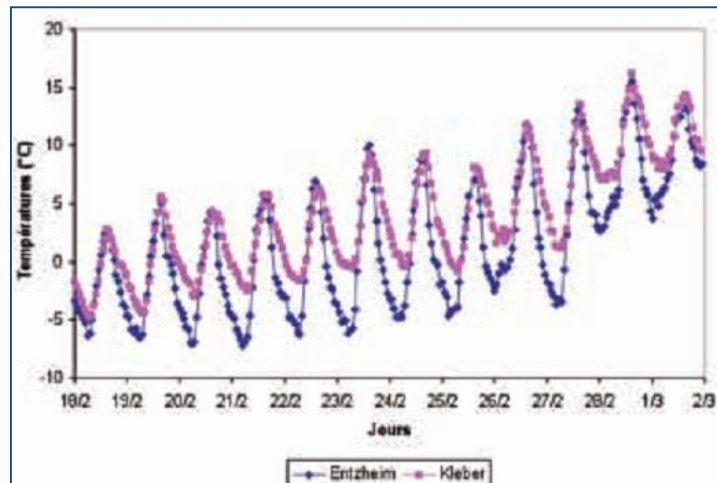


Figure I. 3: Définition de l'îlot de Chaleur Urbain : différence instantanée de température entre une station rurale (Entzheim) et urbaine (Kléber). Source : NAJJAR Georges et al., 2010

On entend par îlot de chaleur urbain un écart significatif de température entre les zones urbaines et les campagnes avoisinantes, tel qu'illustré dans la figure I.4. Dans certaines villes, ce phénomène spatial de température prend la forme d'un pic ressemblant à un îlot, étroitement lié à la densité urbaine. La différence de température entre le centre urbain et les zones périphériques est plus prononcée la nuit, atteignant parfois 10 degrés Celsius dans certaines agglomérations comme Paris (Marjory Musy, 2008).

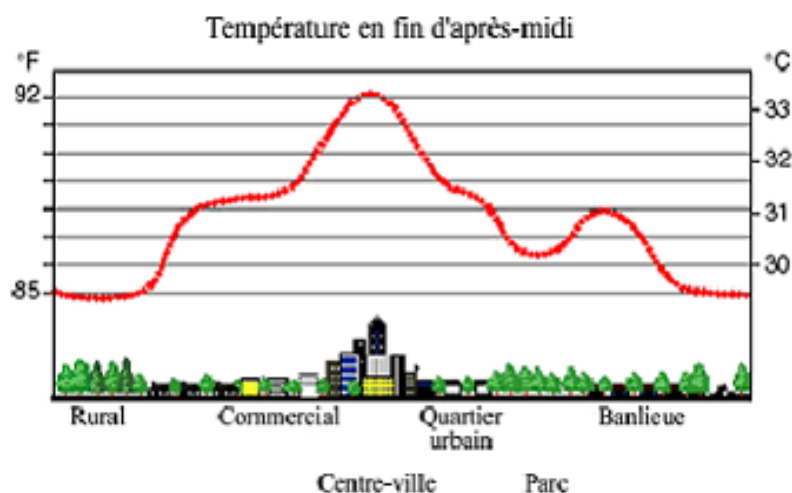


Figure I. 4: Schéma de l'îlot de chaleur urbain, source : Mélissa Giguère, M. Env., 2009.

Initialement, l'analyse de l'îlot de chaleur urbain reposait sur la comparaison de séries chronologiques de températures moyennes sur une longue période, dans le but de repérer les changements causés par la ville et son développement (figure I.5).

Autrefois, la comparaison des températures en ville et à la campagne était réalisée en utilisant la méthode des extrêmes journaliers. Toutefois, l'avènement des enregistrements automatiques a permis une comparaison simultanée des températures mesurées sur différents sites, ce qui a fait évoluer les études. Ainsi, la différence instantanée entre les températures mesurées est actuellement considérée comme la méthode de référence pour la définition et l'étude de l'îlot de Chaleur Urbain (Marjory Musy, 2008).

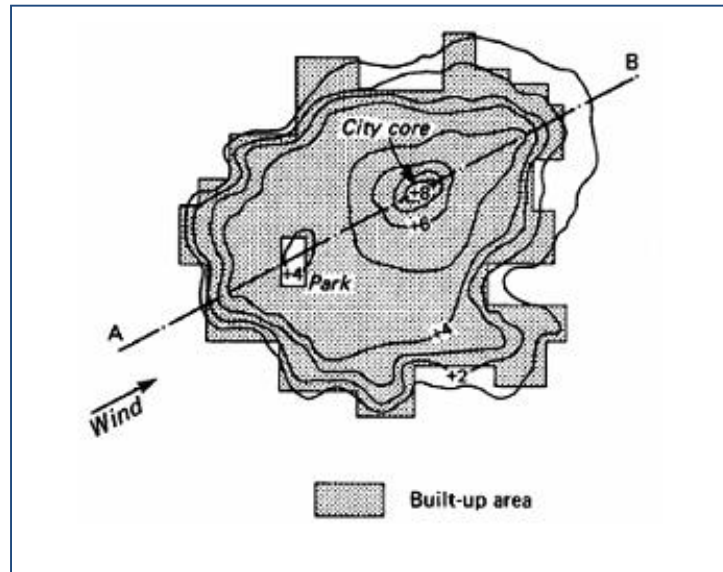


Figure I. 5: Représentations des isothermes traduisant l'îlot de chaleur urbain et l'influence de la direction du vent. Source : Benzerzour Mohamed, 2004.

En cartographie, l'îlot de chaleur urbain est souvent représenté en utilisant des lignes isothermes qui relient des points présentant la même température de l'air. La distribution de ces lignes isothermes dépend largement des caractéristiques de la surface urbaine, notamment la rugosité et la porosité de la canopée, qui influent sur la circulation de l'air et les échanges thermiques avec l'environnement (Benzerzour Mohamed, 2004).

II.1. 2. Son intensité

L'intensité des îlots de chaleur subit des variations quotidiennes et saisonnières en fonction de divers facteurs météorologiques et anthropiques. En règle générale, les îlots de chaleur urbains ont tendance à être plus intenses la nuit que pendant la journée, surtout ceux générés par la couverture végétale de la ville (Mélissa Giguère, M. Env., 2009). Les relevés effectués ont confirmé que les températures des zones urbaines peuvent être supérieures de 12°C à celles des régions avoisinantes.

II.1. 3. Ses causes et ses impacts

Les processus physiques qui contribuent à la formation de l'îlot de chaleur sont les suivants : (Vinet Jérôme, 2000) :

- Accumulation de chaleur dans les bâtiments.
- Modification du bilan hydrique (diminution de l'évapotranspiration due à la faible végétation et augmentation due aux rejets industriels).
- Altération du bilan radiatif, avec une production accrue de gaz à effet de serre.
- Modification du cycle diurne des flux de chaleur sensible, par rayonnement et conduction, en particulier pendant le refroidissement nocturne.
- Production de chaleur sensible d'origine anthropogénique (chauffage des bâtiments, voitures, industries).
- Réduction de la vitesse du vent (en raison de la présence des bâtiments).
- Topographie locale et circulation de l'air locale.

Il est difficile d'évaluer l'impact des sources anthropogéniques sur l'îlot de chaleur en raison de leur complexité. Ces sources comprennent la chaleur produite par les véhicules, les bâtiments, les industries et le métabolisme humain. Bien que la production de chaleur anthropogénique moyenne dans une ville soit généralement inférieure à 100 W/m², elle peut varier considérablement en fonction de la densité urbaine et atteindre des valeurs beaucoup plus élevées localement. Cependant, il est difficile de quantifier précisément l'impact de ces sources sur l'îlot de chaleur. (Marjory Musy, 2008).

En été, les îlots de chaleur urbains peuvent causer des effets préjudiciables sur la santé et l'environnement. (Mélissa Giguère, M. Env., 2009).

Parmi ses impacts, on cite :

- La hausse de la température peut impacter la qualité de l'air intérieur, en stimulant la prolifération d'acariens, de moisissures et de bactéries. De surcroît, les températures élevées peuvent causer la libération de substances toxiques, comme le formaldéhyde, qui se trouvent dans les colles utilisées pour la fabrication des meubles et des matériaux de construction.
- Les besoins en refroidissement pour maintenir une température confortable à l'intérieur des bâtiments peuvent entraîner une augmentation de la demande d'énergie, ce qui peut conduire à une augmentation des émissions de gaz à effet de serre selon la source d'énergie utilisée.

- La forte chaleur générée par les îlots de chaleur urbains peut causer diverses perturbations physiques et psychologiques, telles que l'inconfort, la faiblesse, les troubles de la conscience, les crampes, les syncopes et les coups de chaleur. Elle peut également aggraver les maladies chroniques existantes, telles que le diabète, l'insuffisance respiratoire et les maladies cardiovasculaires.

II.2. facteurs affectant le climat urbain

II.2.1. La morphologie propre à l'espace

On peut dire que la morphologie urbaine, qui comprend les formes, l'orientation et l'espacement des bâtiments dans une ville, joue un rôle dans la création des îlots de chaleur urbains. Les grands bâtiments et les rues étroites peuvent perturber la ventilation dans les centres urbains en créant des canyons qui emprisonnent la chaleur générée par le rayonnement solaire et les activités humaines. En effet, la diminution de la fraction du ciel visible limite les pertes radiatives des bâtiments et des rues (Mélissa Giguère, M. Env., 2009). Ainsi, du point de vue de la forme urbaine, nous sommes confrontés à des paradoxes : il faudrait trouver une forme qui permette de fermer la ville au rayonnement solaire pendant la journée en été et de l'ouvrir la nuit pour dissiper l'énergie stockée dans les matériaux, tout en faisant exactement l'inverse en hiver. L'orientation peut en partie résoudre certaines de ces contradictions, mais elle doit également répondre aux contraintes de la trame urbaine et ne peut donc être imposée que dans une certaine mesure. Il est possible de privilégier une conception urbaine optimisant les apports solaires en hiver à l'échelle de la ville, tandis que des dispositifs architecturaux peuvent être utilisés pour protéger les bâtiments à l'échelle individuelle (Marjory Musy, 2008).

II.2. 2. Les activités humaines (anthropiques)

La chaleur produite par les activités humaines, telles que les transports, l'industrie, le chauffage ou la climatisation, s'ajoute à la chaleur naturelle, perturbant l'équilibre thermique de la terre dont la température moyenne est de 15°C. Ces activités humaines émettent des gaz à effet de serre (GES) qui augmentent la capacité de l'atmosphère à absorber le rayonnement infrarouge et, par conséquent, augmentent sa température. En hiver, la chaleur anthropique joue un rôle important dans l'augmentation des températures et de la pollution, favorisant l'apparition d'un îlot de chaleur, mais aussi simplement en réchauffant la ville même en l'absence d'ICU. Le taux d'émission anthropique et le bilan radiatif net annuel de quelques villes sont présentés dans le tableau suivant (Giguère Mélissa et al., 2009).

Ville	Taux d'émission anthropique (W/m ²)	Flux radiatif net global (W/m ²)
Chicago	53	n.d
Cincinnati	26	n.d
Los Angeles	21	108
Fairbanks	19	18
St. Louis	16	n.d
Manhattan, New York City	117-159	93
Montréal	99	52
Moscou	127	n.d
Budapest	43	46
Osaka	26	n.d

Tableau I. 1 : Taux d'émission anthropique et bilan radiatif net annuel pour quelques villes américaines, européennes et asiatique. Source : Giguère Mélissa et al., 2009.

II.2.3. Les matériaux

La ville est un espace urbain qui présente des conditions de surface différentes de celles des espaces ruraux. Les rues asphaltées, les allées pavées et les matériaux de revêtement de façades utilisés dans la ville créent une importante couche imperméable appelée surface minérale qui recouvre la ville. Le choix des matériaux utilisés pour les espaces publics a une incidence directe sur la température des espaces urbains (voir figure I.6). Contrairement aux surfaces végétales, les surfaces minérales ont la capacité de stocker de grandes quantités d'énergie solaire, qui seront ensuite libérées dans l'environnement nocturne, contribuant ainsi à la formation de l'ICU".



Figure I. 6: Température de revêtement de l'espace public, le 1er Aout 2011 à 20h.
Source : Bigorgne Julien, 2012

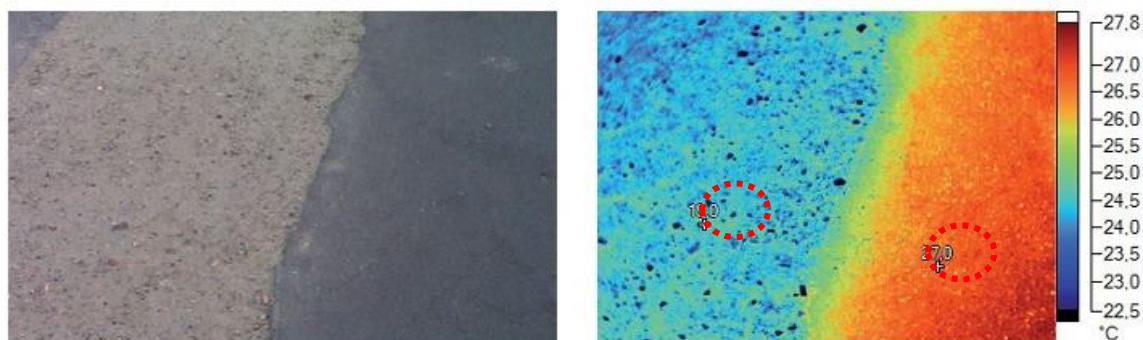


Figure I. 7: Comparaison de deux revêtements de trottoir 1 heure après le coucher du soleil, le 31 Juillet 2011. Le stabilisé (à gauche) est nettement plus frais que l'asphalte (à droite), c'est leur différence de couleur qui l'explique. Source : Bigorgne Julien, 2012

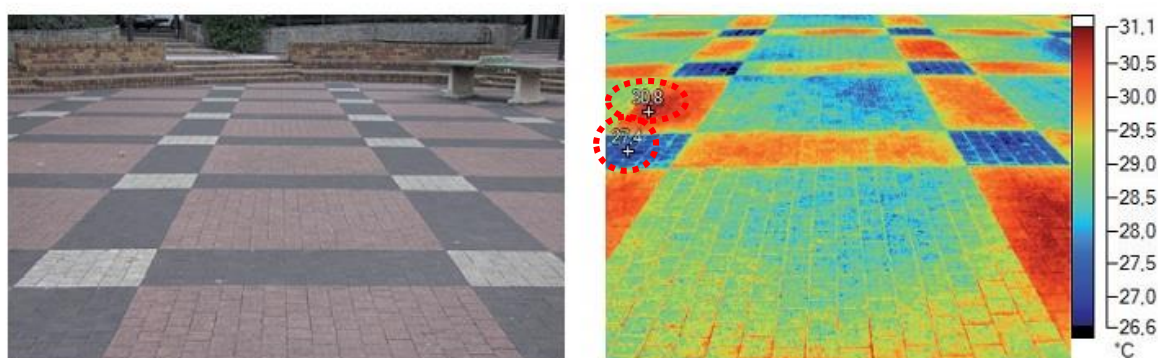


Figure I. 8: Signature radiative nocturne d'une composition de revêtement de sol à la ZAC de la Grange-aux-Belle, le 1er Aout 2011 vers 22h. Source : Bigorgne Julien, 2012

Le bilan thermique des matériaux est principalement défini par leurs propriétés optiques, radiatives et calorifiques. Certains auteurs considèrent que les propriétés de surface des matériaux, en particulier leur réflectivité solaire et leur émissivité, sont les plus importantes pour le microclimat urbain. En effet, les matériaux réfléchissants peuvent renvoyer la chaleur solaire, réduisant ainsi l'absorption de chaleur par la ville, tandis que les matériaux émissifs peuvent aider à dissiper la chaleur stockée dans les bâtiments et les surfaces urbaines. (Bouyer Julien, 2009). La diffusivité thermique mesure la capacité des matériaux à conduire la chaleur, tandis que l'inertie thermique se réfère à leur capacité à résister aux changements de température. Ces propriétés peuvent influencer la façon dont les matériaux absorbent, stockent et libèrent la chaleur dans les espaces urbains. Le tableau ci-dessous répertorie la capacité de réflectivité et d'émissivité des matériaux de couverture les plus répandus. La colonne « Élévation de la température » représente l'augmentation de degré de la température de surface vis-à-vis de la température de l'air ambiant qu'engendre le matériau utilisé (Anquez Philippe et al., 2011).

Surface de la toiture	réflexivité Solaire	émissivité infrarouge	Élévation de température (°C)
EPDM- noir	0,06	0,86	46
EPDM- blanc	0,69	0,87	14
TPO-	0,83	0,92	6
Bitume- surface lisse	0,06	0,86	46
Bitume- granulés blancs	0,26	0,92	35
Multi- gravier sombre	0,12	0,90	42
Multi- gravier clair	0,34	0,90	32
Acier - neuf, nu, galvanisé	0,61	0,04	31
Aluminium	0,61	0,25	27
Aluminium - revêtement blanc	0,59	0,85	21

Tableau I. 2: Caractéristiques de surface (la réflectivité solaire et l'émissivité infrarouge) des matériaux de surface de couverture les plus communes (Anquez Philippe et al., 2011).

II.2. 4. L'albédo

Les propriétés des matériaux, telles que leur albédo, ont un impact significatif sur leur capacité à réagir à la chaleur. L'albédo mesure la quantité d'énergie solaire réfléchiée par rapport à l'énergie solaire reçue (Energie réfléchiée / Energie reçue). Il est exprimé en fraction, allant de 0 à 1, où 1 représente une surface qui réfléchirait 100% de l'énergie et 0 une surface qui absorberait entièrement les rayonnements sans réflexion. Les surfaces ayant un albédo inférieur à 0,03 (ou 3%) sont considérées comme noires, tandis que celles ayant un albédo supérieur à 0,8 (ou 80%) sont perçues comme blanches. Une surface parfaitement blanche ou un miroir parfait réfléchissent 100% de la lumière et ont donc un albédo de 1, tandis qu'une surface parfaitement transparente ou noire a un albédo de 0 (Valette Emmanuelle et al. 2010).

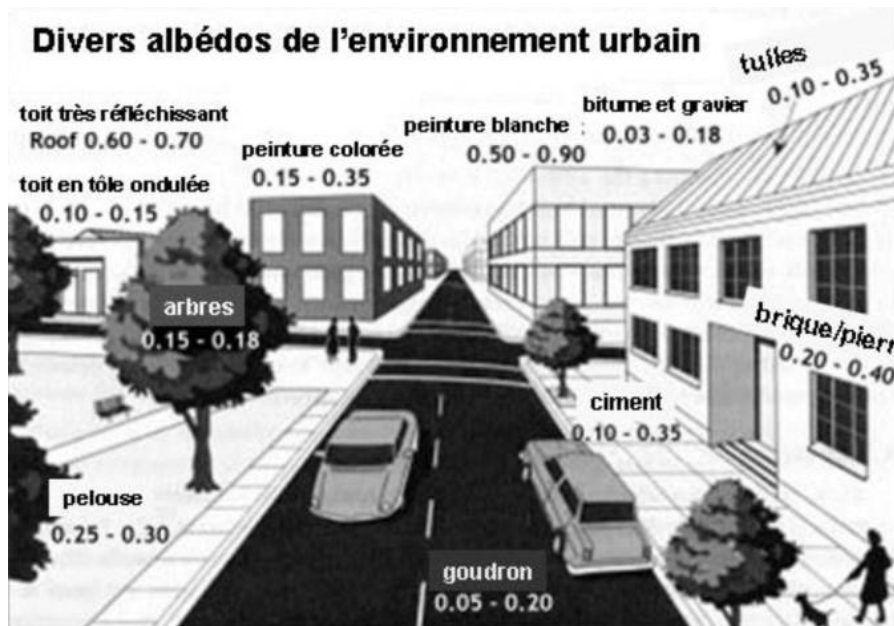


Figure I. 9: Divers albédos de la ville. Source : <http://www.notre-planete.info>

La propriété physique des matériaux urbains détermine leur capacité à absorber ou à réfléchir l'énergie reçue, ce qui affecte leur température. Un matériau à faible albédo absorbe davantage d'énergie et, par conséquent, sa température de surface est plus élevée. L'albédo moyen de la Terre est de 0,28 (0,34 pour les continents et 0,26 pour les océans). En milieu urbain, les albédos mesurés varient considérablement : 0,07 pour l'asphalte ou le goudron, 0,20 pour le béton brut, 0,4 pour les tuiles. Le tableau ci-dessous présente l'albédo de différents matériaux.

	Albédo
Matériaux de construction	
Pierre	0.2-0.35
Pierre - Granite, Gneiss	0.44
Gravier (vrac)	0.08 -0.18
Calcaire -clair	0.75
- Sombre	0.50
Grés - beige (quartzeux)	0.44
- Gris clair	0.38
- Rouge	0.27
Asphalte foncé	0.07
Béton neuf	0.45
Béton vieilli	0.1-0.35
Bois	0.40
Brique	0.05-0.2

Toitures	
Tuile en terre cuite	0.1-0.35
Feutre bitumé	0.12
Feutre bitumé avec surface Alumunisée	0.60
Etanchéité en feuilles bitumées,	
- Brun	0.13
- vert	0.14
Papiers goudronné, noir	0.07
Tuiles de béton :	
- Rouge	0.18
- Blanc	0.73
- Beige claire	0.63
- Marron claire	0.42
- Mauve	0.41
- Gris rose	0.41
Fibre de ciment :	
- Marron	0.26
- Gris étain	0.25
Bardeau d'asphalte	
- Blanc	0.21
- Argent	0.20
- Marron foncé	0.08
- Gris	0.08
- Vert	0.19
- Marron claire	0.19
- Noir	0.19
Sols	
Herbe haute et sèche	0.31 à 0.33
Gazon vert	0.33
Sol nu sans végétation	0.25
Sable humide	0.09
Sable sec	0.18
Marbre – blanc	0.66
- sombre	0.44
Toitures et façades	
Aluminium	0.6-0.85
Fer	0.10-0.12
Acier galvanisé oxydé	0.38
Argent	0.93
Cuivre	0.82
Zinc galvanisé	
Laiton	
Peintures	

Peintures cellulósique	
- blanc	0.82
- jaune	0.77
- Orange	0.63
- Rouge vif	0.66
- Rouge sombre	0.47
- Gris	0.25
- Vert brillant	0.21
- Vert claire	0.50
- Vert sombre	0.12
- Bleu	0.18
- Bleu foncé	0.09
- Marron	0.23
Verre transparent :	
angle zénithal <40°	0.08
angle zénithal 40° α <80°	0.09 à 0.52

Tableau I. 3: les différents albédos de plusieurs matières existant dans la ville, établi par auteur, 2013

II.2. 5. La densité et la taille de la ville

Une ville compacte engendre un phénomène d'îlot de chaleur urbain, notamment la nuit. Le résultat pour plus de 30 villes de latitudes moyennes montre que l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain est corrélée aux proportions des rues (rapport hauteur sur largeur).

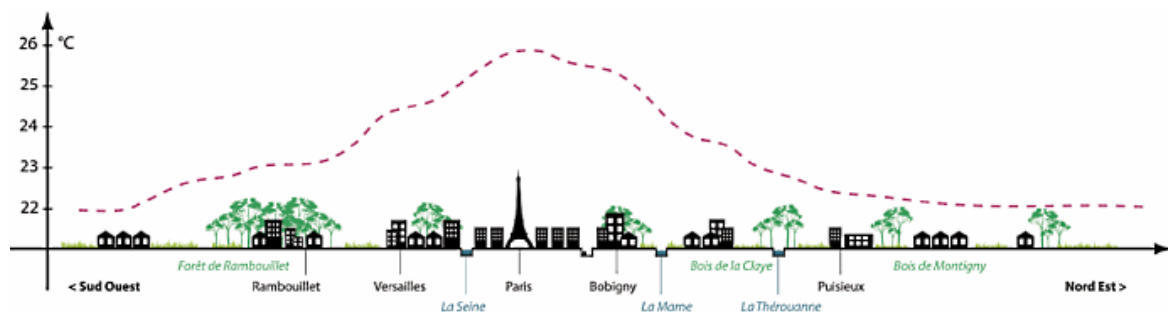


Figure I. 10: Coupe schématique de visualisation des températures en 2008 pour une nuit de canicule (type été 2003). Source : <http://www.notre-planete.info>

Lorsque la population d'une ville augmente, les activités urbaines s'intensifient, entraînant une pollution de l'air qui peut atteindre des niveaux dangereux. La densité de construction est également un facteur important. Les bâtiments ont des surfaces qui réfléchissent les rayonnements infrarouges et obstruent les écoulements d'air qui dissipent la chaleur. Ces facteurs ont pour conséquence d'accentuer l'effet d'îlot de chaleur urbain et de rendre l'air intérieur moins sain.

On observe une diminution de la vitesse du vent à proximité du sol, bien que la vitesse soit plus élevée au-dessus des bâtiments. Cette différence est due à la longueur de rugosité, qui représente le ralentissement de la circulation de l'air causé par les obstacles présents sur le sol. La longueur de rugosité dépend de la surface sur laquelle l'air circule : plus la surface est obstruée, plus la longueur de rugosité est grande. Ainsi, par exemple, la mer a une longueur de rugosité de 0,005 mètres, tandis qu'une forêt ou une zone urbaine peuvent atteindre plus de 1 mètre.

II.2. 6. Absence de végétation et d'eau

On observe une réduction des dispositifs de rafraîchissement naturels en ville par rapport à la campagne. En effet, la végétation et l'eau ont la capacité de rafraîchir l'air par évaporation et évapotranspiration, mais leur présence est beaucoup moins importante en milieu urbain, notamment en raison de l'évacuation directe des eaux pluviales dans les canalisations. Cette diminution de l'évapotranspiration en milieu urbain est due à une réduction de la végétation par rapport aux zones rurales, ainsi qu'à l'imperméabilisation des sols.

L'imperméabilisation du sol urbain a pour effet de réduire l'évaporation, car il y a moins d'eau disponible pour s'évaporer. Par ailleurs, il y a peu de végétation en zone urbaine, ce qui diminue également les phénomènes d'évapotranspiration. Cette dernière est responsable de la libération de la vapeur d'eau dans l'atmosphère grâce aux plantes. Par conséquent, l'humidité relative est souvent plus faible dans les zones urbaines (Colombert Morgane, 2008).

II.3. Humidité et qualité de l'air en milieu urbain

II.3.1. Humidité de l'air dans la ville

Le taux d'humidité de l'air varie en fonction de la température : l'air chaud a une plus grande capacité à contenir de la vapeur d'eau, ce qui favorise l'évaporation. En général, l'air urbain est plus sec pendant la journée et légèrement plus humide la nuit, phénomène qui est plus marqué en été par temps clair. Si l'humidité est excessive, cela peut créer un îlot d'humidité similaire à l'îlot de chaleur, dont la structure dépend de la configuration urbaine, mais qui diminue avec l'augmentation de la vitesse du vent. En revanche, en hiver, l'air des villes est souvent plus humide que celui des zones rurales en raison de la diminution de l'évapotranspiration des sols et de la végétation dans les zones rurales (sol gelé, absence de végétation) et de l'augmentation du taux de vapeur en ville due aux processus de combustion.

II.3.2. Qualité d'air et microclimat urbain

En milieu urbain, la qualité de l'air est influencée par des paramètres météorologiques, notamment la température de l'air. Un vent fort favorise la circulation de l'air, réduisant ainsi le réchauffement de l'environnement urbain par l'air chaud. En revanche, un vent faible entraîne la stagnation des masses d'air, ce qui permet à ces dernières de réchauffer les structures urbaines. Par conséquent, plus le temps est calme et dégagé, plus l'effet d'îlot de chaleur urbain est intense. De plus, la configuration urbaine a un impact sur les régimes de vents : une rue étroite et encaissée, créant un effet de canyon, entrave la circulation des vents, ce qui provoque la stagnation des masses d'air.

III. Les effets aérodynamiques en milieu urbain

III.1. Les couches atmosphériques près de la surface du sol

En milieu urbain, les mouvements d'air sont fortement perturbés par de nombreux obstacles de formes diverses (Bozonnet Emmanuel, 2006). Cette perturbation atmosphérique peut être abordée à différentes échelles, selon la représentation simplifiée de la figure suivante :

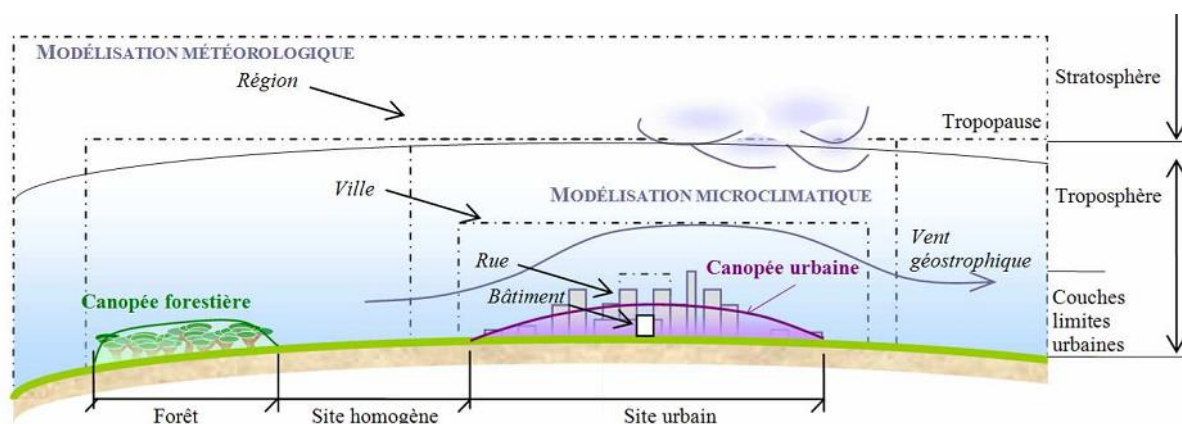


Figure I. 11: Modélisation météorologique des vents dominants à différentes échelles climatiques. Source : (Bozonnet Emmanuel, 2005).

Lorsque l'altitude est supérieure à plusieurs centaines de mètres, le vent est principalement déterminé par l'équilibre entre les forces de Coriolis causées par la rotation de la Terre et les forces dues au champ de pression atmosphérique. Ainsi, le vent est essentiellement parallèle aux isobares et sa turbulence est faible (Bozonnet Emmanuel, 2005).

Cependant, pour une altitude inférieure à environ 1000 mètres, qui englobe la plupart des constructions, les forces de frottement causées par la rugosité du sol et les phénomènes thermiques deviennent plus importantes. Cela entraîne des fluctuations de la vitesse du vent dans le temps et dans l'espace, qui peuvent exciter les structures les plus souples. Cette zone est appelée couche limite turbulente atmosphérique. Toutes les constructions, même les plus hautes, sont soumises à l'effet de la turbulence. À proximité du sol, les forces de frottement sont très élevées, la vitesse moyenne du vent est faible et la turbulence est importante. À mesure que l'altitude augmente, la vitesse moyenne du vent augmente tandis que la turbulence diminue.

III.2. comportement du vent autour d'un bâtiment

La présence d'un bâtiment perturbe le mouvement de l'air, créant trois zones de perturbation distinctes. Du côté exposé au vent, on observe une zone de suppression et un vortex turbulent généré par l'écoulement descendant sur la façade. Du côté à l'abri du vent, on constate une zone de dépression turbulente s'étendant dans la cavité de basse pression. Sur les côtés et la partie supérieure, on observe un détachement du flux d'air et une zone turbulente (Bozonnet Emmanuel, 2005). La figure ci-dessous illustre le contour d'un bâtiment montrant le profil vertical de la vitesse moyenne. Les différentes zones identifiées sont les suivantes :

1. Point de séparation
2. Rouleau tourbillonnaire
3. Zone tourbillonnaire latérale
4. Gradient vertical de vitesse

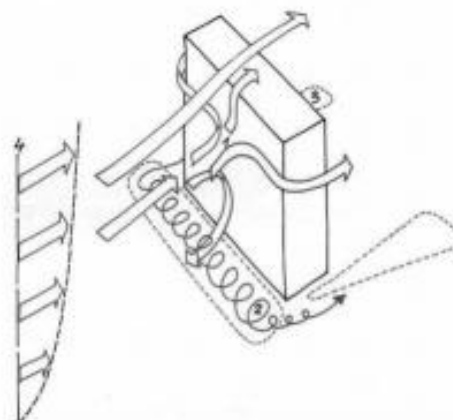


Figure I. 12: Ecoulements autour d'un bâtiment, source : Bozonnet Emmanuel, 2005)

III.3. comportement du vent dans une rue

Malgré la complexité des interactions des bâtiments en milieu urbain, on peut simplifier en deux types d'écoulements principaux : le longitudinal, lorsque la rue est dans la direction principale du vent, et le transversal, lorsque l'axe de la rue est perpendiculaire à la direction de la vitesse moyenne. Pour une ville, à l'échelle de la rue, les trois types d'écoulements définis en fonction de l'interférence de sillage et de la rugosité isolée sont illustrés dans la figure ci-dessous.

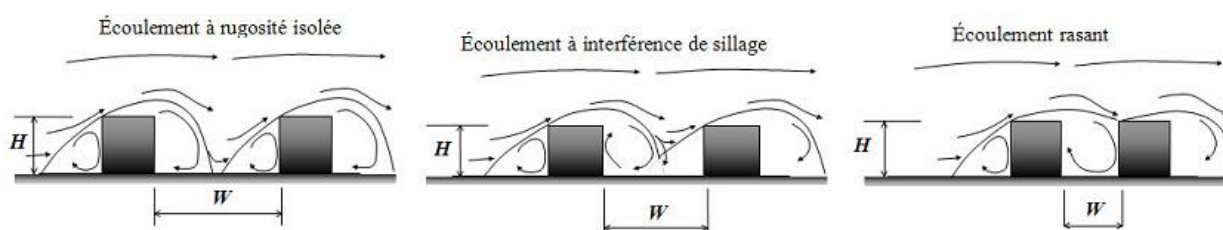


Figure I. 13: Rue de type canyon avec un rapport d'aspect W/H supérieur à 2,5 (rugosité isolée), compris entre 1,54 et 2,5 (interférence de sillage), et inférieur à 1,54 (rasant), source : BOZONNET Emmanuel, 2005.

III.4. Les effets aérauliques en milieu urbain

En milieu urbain, le mouvement du vent est perturbé par les structures et les formes de la ville, ce qui affecte son écoulement. Les principes de l'écoulement de l'air en milieu urbain ont été assez bien étudiés pour certaines configurations géométriques. Dans nos simulations à venir, nous examinerons les effets aérauliques qui peuvent être présents (voir figure I.14).

III.4.1. Effet Wise

Lorsqu'un bâtiment élevé est situé à proximité d'un bâtiment plus petit, disposé parallèlement, cela crée un phénomène de rouleau tourbillonnaire. L'effet Wise, caractérisé par une composante verticale importante de la vitesse du vent dans cette zone critique, pose un problème considérable pour les piétons.

III.4.2. Effet de coin

Ce phénomène est caractérisé par une accélération locale du vent à l'angle d'un bâtiment. L'augmentation de la vitesse du vent est due au gradient de pression très élevé entre la façade exposée et la façade en dépression. L'effet de double coin est une conséquence de l'effet de coin initial. La configuration de double coin se produit lorsque deux bâtiments

sont placés longitudinalement et séparés par un passage. La zone d'espace entre les deux structures est très critique en termes d'inconfort et peut même s'étendre à l'arrière des bâtiments.

III.4.3. Effet de barre

Le phénomène de l'effet de barre est marqué par une rotation de l'écoulement de l'air lorsqu'il rencontre une barre, avec une incidence d'environ 45 degrés. Ce phénomène ne se produit que si la hauteur moyenne de la barre, notée "h", est inférieure à 25 mètres et que la longueur minimale de la barre, notée "L", est supérieure à 8 fois la hauteur moyenne "h".

III.4.4. Effet et de canalisation

L'effet de canalisation apparaît lorsqu'un ensemble construit forme un couloir. Une canalisation n'est pas une cause de gêne en soi. Elle n'agit que si elle est associée à une anomalie aérodynamique qu'elle transmet sur toute sa longueur. L'association de phénomènes de canalisation et de Venturi peut être une source de gêne importante.

III.4.5. Effet Venturi

Lorsque le passage se rétrécit, la vitesse du vent augmente malgré un débit constant. La zone où cela devient critique pour le confort se trouve à l'étranglement.

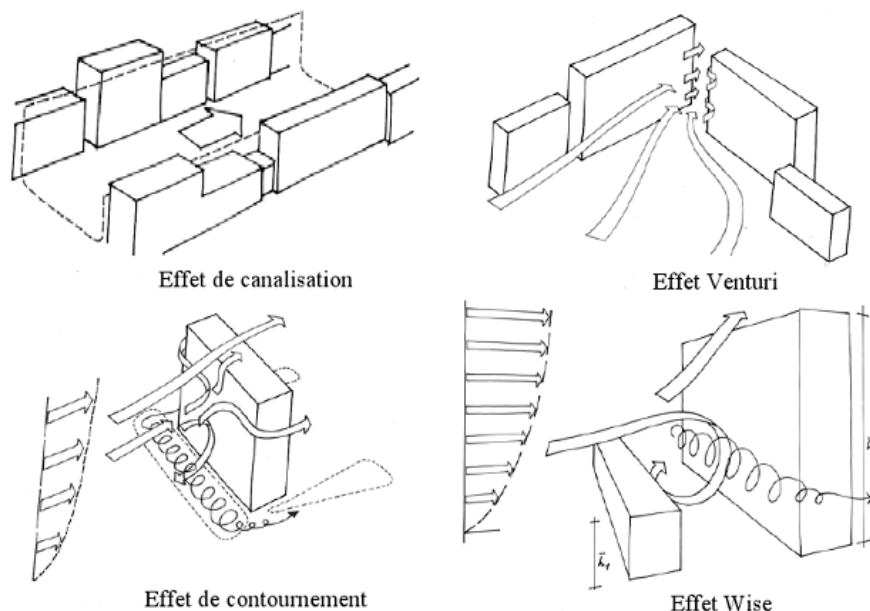


Figure I. 14: Configuration de quelques types des effets aérodynamiques en milieu urbain, établi par auteur, 2013

Conclusion :

L'étude du microclimat urbain a mis en lumière des phénomènes tels que l'îlot de chaleur urbain, qui peuvent causer des problèmes tels qu'une augmentation de la consommation d'énergie, une augmentation de la pollution et des risques pour la santé publique. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain désigne une importante différence de température entre les zones urbaines et les zones rurales environnantes.

En milieu urbain, les surfaces minérales telles que les revêtements et les bâtiments reçoivent directement l'énergie solaire, tandis qu'en milieu rural, la végétation l'absorbe. Cette particularité urbaine entraîne une absorption accrue d'énergie qui se traduit par une augmentation de la température au niveau des zones imperméables, réduisant ainsi la capacité de refroidissement nocturne. Ces facteurs contribuent à créer un déséquilibre thermique entre les milieux urbains et ruraux, connu sous le nom d'îlot de chaleur urbain. Ce phénomène se manifeste non seulement à la surface de la terre, mais également en altitude, sous forme de dôme de chaleur.

La morphologie des villes a un impact significatif sur la formation des îlots de chaleur urbains. Les grands bâtiments et les rues étroites peuvent affecter la ventilation des centres urbains en créant des canyons où la chaleur s'accumule et reste piégée, créant ainsi une augmentation de la température. Cette chaleur urbaine peut se propager rapidement en raison de l'ajout de chaleur directe et indirecte produite par le trafic urbain, ainsi que le rejet de la climatisation ou du chauffage. En outre, les matériaux de construction utilisés dans les bâtiments peuvent également influencer la température de la ville. Par exemple, les matériaux de construction tels que le béton et l'asphalte ont tendance à absorber et à retenir plus de chaleur que les surfaces végétales. Cela peut entraîner des températures plus élevées dans les zones urbaines où ces matériaux sont utilisés en abondance. Par conséquent, la conception et l'aménagement des villes doivent tenir compte de la gestion de la chaleur urbaine pour minimiser les effets négatifs sur la qualité de vie et la santé publique.

CHAPITRE II : INTERACTION ENTRE FORME URBAINE ET MICROCLIMAT

INTRODUCTION :

Le climat est un élément essentiel pour comprendre la dynamique et l'ambiance d'une ville. Les conditions microclimatiques en milieu urbain sont particulièrement critiques pour l'utilisation des espaces extérieurs, mais les réponses des individus à ces conditions sont souvent inconscientes. Le contrôle de l'environnement et la création d'un microclimat confortable pour les activités humaines ont été une préoccupation constante de l'homme. Malheureusement, les quartiers modernes ont rarement été conçus en tenant compte du microclimat, créant ainsi des espaces publics inconfortables pour les piétons et énergivores du point de vue des transports et de la consommation d'énergie du bâti.

La configuration des espaces publics urbains peut avoir une influence significative sur les paramètres microclimatiques tels que la température, l'humidité relative et la vitesse du vent. Les éléments bâtis du tissu urbain perturbent la distribution de l'écoulement du vent et amplifient les transferts de chaleur entre les surfaces, modifiant ainsi les paramètres microclimatiques à l'échelle locale. Le bilan énergétique thermo-radiatif des espaces extérieurs est étroitement lié à la nature et à la morphologie des arrangements de bâtiments. Les modes de vie des humains et la manière de construire les villes ont favorisé la création des îlots de chaleur urbains, en diminuant la végétation, en rendant les sols imperméables et en utilisant des matériaux qui absorbent la chaleur. Les activités humaines produisent également de la chaleur et des gaz à effet de serre qui contribuent à accentuer ces phénomènes.

Pour lutter contre les îlots de chaleur, il est possible de réaménager l'espace en ajoutant de la végétation. Les plantes sont essentielles pour créer de la fraîcheur dans les villes. Les mesures de végétalisation consistent à verdir l'environnement en y ajoutant des plantes, des arbustes et des arbres. Il est également possible de modifier l'infrastructure urbaine en adaptant l'architecture et la manière d'aménager le territoire. Ces mesures efficaces contribuent à créer dans les villes des espaces agréables, de véritables îlots de fraîcheur bénéfiques pour l'environnement et la santé des habitants.

I. Genèse de la relation forme urbaine / microclimat

I.1. Formes urbaines au cours de l'histoire et leurs caractéristiques microclimatiques

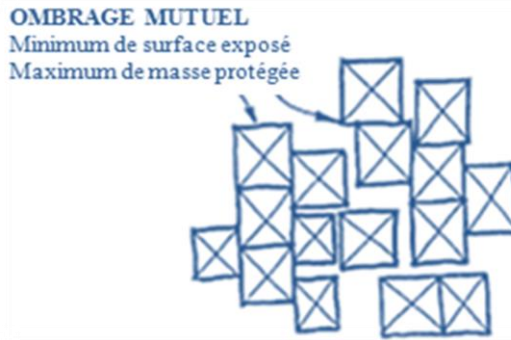
L'espace urbain d'une ville est le résultat de la combinaison de différentes formes urbaines qui reflètent différentes visions ou théories de la ville à différentes époques. On peut observer ces variations à la fois dans l'organisation des bâtiments et la configuration des parcelles, ainsi que dans les formes urbaines et les méthodes d'aménagement. Cette diversité spatiale et morphologique entraîne des modifications des paramètres climatiques qui affectent le confort extérieur.

I.1.1. Formes traditionnelles compactes

Les centres villes anciens se caractérisent par des formes urbaines compactes, avec une concentration dense de bâtiments sur un rayon urbain réduit (voir Figure II.1). Ce tissu urbain compact est généralement étroit et profond, (Athamena Kh., 2012) ce qui limite l'accès des rayons solaires aux espaces publics tels que les rues, les places et les cours intérieures. Cette configuration crée des zones ombragées qui contribuent à améliorer le confort de ces espaces (voir Figure II.2).



Figure II. 1: Schéma montrant un plan compact des maisons accolées les unes aux autres, typiques des climats chauds et arides. Source : Donnadiou C. et al., 1977



*Figure II. 2: Schéma montrant des surfaces ombragées résultant de bâti dense.
Source : Amos Rapoport, 1972*

I.1.2. Formes pavillonnaires

Le tissu urbain composé de maisons individuelles est beaucoup moins dense, avec des propriétés privées qui sont construites sur de grandes parcelles où une partie de l'espace est dédiée aux jardins. On observe deux modèles qui caractérisent cette forme : les cités jardins et les lotissements-parcs. (Athamena Kh., 2012). Hampstead, une banlieue de Londres, est l'un des exemples de cités jardins qui se distinguent par leur configuration appelée "Le close" : il s'agit d'un regroupement de maisons autour d'une impasse (voir figure II.3). Ce système est avantageux pour atténuer les effets aérodynamiques causés par les vents dominants et pour limiter l'emprisonnement de la chaleur dans les espaces environnants.

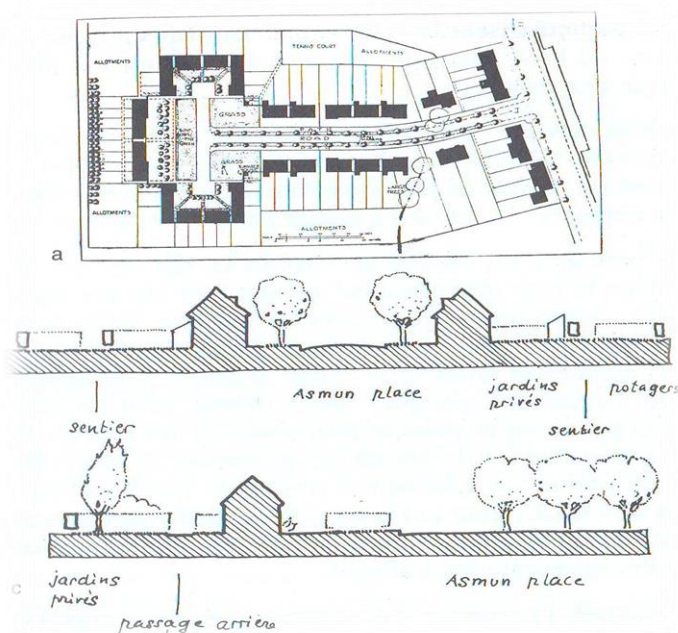


Figure II. 3: Plan et coupes schématiques montrant le découpage de l'espace entre les barres pour les jardins privés et collectifs. Source : Panerai Ph. et al, 1977.

I.1.3. Formes répétitives verticales

L'architecture des grands ensembles se caractérise par une forme verticale, avec des tours s'élevant vers le ciel et des barres de grande hauteur s'étirant horizontalement. Ces structures présentent une morphologie moins compacte que les îlots traditionnels. Dans ces environnements urbains, il y a de nombreuses surfaces exposées au rayonnement solaire. En effet, les immeubles de grande hauteur ont des formes isolées qui multiplient les surfaces soumises aux variations climatiques (voir figure II.4). Cependant, ces formes urbaines isolées et dispersées des grands ensembles créent des perturbations, générant des accélérations d'air et de nombreux mouvements tourbillonnaires, en particulier au niveau des pieds et des angles des immeubles. Ces courants d'air peuvent avoir un impact critique sur le confort des piétons et rendre certains espaces impraticables.

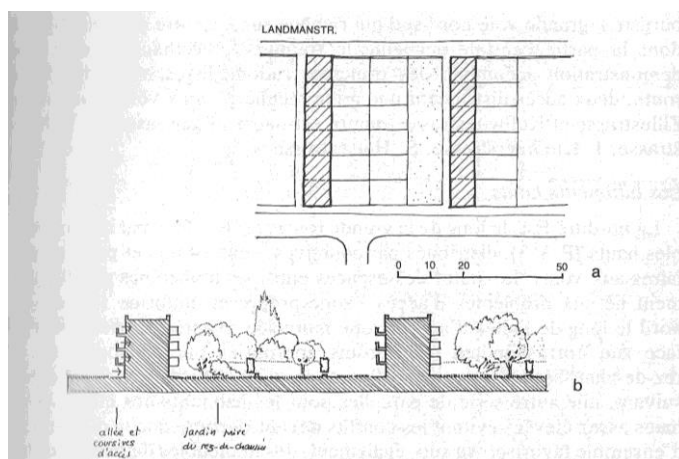


Figure II. 4: Morphologie de grands ensembles avec des espaces étendus et des immeubles de grande hauteur. Source : Panerai Ph. et al, 1977.

I.2. Influence de la forme urbaine sur la température, le rayonnement et la vitesse du vent

I.2.1. Influence de la forme urbaine sur la température de surface et le rayonnement

La configuration urbaine influence le rayonnement en modifiant son interaction avec l'environnement. La surface urbaine accrue et les multiples réflexions sur les parois des bâtiments entraînent une absorption plus importante du rayonnement solaire. De plus, pendant la nuit, le rayonnement infrarouge émis par les matériaux est emprisonné à l'intérieur de la zone urbaine en raison des réflexions multiples (Millier maya, 2006).

Les rues et les murs verticaux élevés créent ce que l'on appelle des "canyons urbains", qui agissent comme de incontestables pièges thermiques (voir Figure II.5). Tout d'abord, le rayonnement solaire, réfléchi par les différentes parois, ne parvient à s'échapper que partiellement vers l'atmosphère. Cela entraîne le réchauffement des surfaces exposées aux rayons du soleil. (Colombert M., 2008).

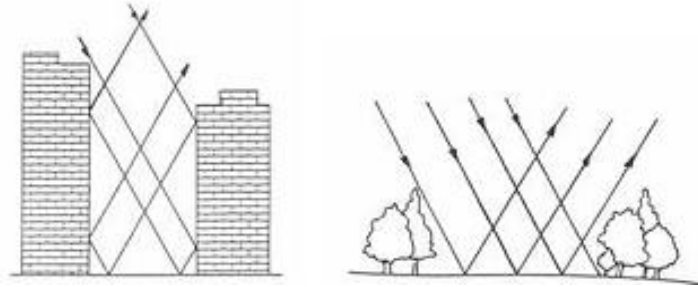


Figure II. 5: Le piégeage radiatif des rues. Source : Colombert M., 2008

I.2.2. Influence de la forme urbaine sur la vitesse du vent

Les mouvements d'air autour d'un bâtiment sont le résultat des interactions entre le vent et la structure construite. La forme et l'agencement d'un bâtiment modifient la répartition des zones de pression. Par conséquent, du côté exposé au vent, une zone de surpression se forme, entraînant la déviation de l'écoulement vers le haut et les côtés du bâtiment, ainsi que l'apparition d'un tourbillon en forme de rouleau résultant de l'interaction avec le sol (Athamena Kh., 2012). L'orientation des bâtiments joue un rôle crucial dans la détermination du régime des vents et dans la régulation de leur vitesse. Lorsque les structures sont orientées parallèlement au vent, la vitesse du vent augmente davantage par rapport aux cas où les structures sont perpendiculaires au vent. Cependant, lorsque l'écoulement d'air est perpendiculaire à la direction de la rue, il se forme un ou plusieurs vortex qui se caractérisent par un mouvement en spirale.

I.3. Facteurs morphologiques modifiant le microclimat.

La configuration urbaine influence l'accumulation ou la dissipation de chaleur, ainsi que le développement de propriétés de refroidissement ou de réchauffement. Il existe une corrélation entre les caractéristiques morphologiques telles que la rugosité, la densité des bâtiments, l'albédo des surfaces et la géométrie urbaine, et la présence de chaleur dans les environnements urbains. En particulier, la morphologie urbaine peut créer des canyons urbains où la chaleur et les polluants atmosphériques restent piégés.

I.3.1. Le facteur de vue du ciel

Le facteur de vue du ciel (SVF) est une mesure de l'angle solide sous lequel le ciel est vu depuis un espace urbain. Il exprime les échanges de chaleur par rayonnement entre la ville et le ciel (Nikolopoulou, M., 2004). Il est formulé par la relation suivante :

$$SVF = \frac{\text{L'angle solide de vision du ciel}}{\text{L'angle solide hémisphérique}}$$

Ses valeurs peuvent être obtenues aussi par l'équation suivante :

$$SVF = \frac{400 \cdot L \cdot W}{\pi (L^2 + H^2)} \quad \%$$

Où : **L** est la longueur de l'espace, **W** est sa largeur moyenne et **H** est la hauteur moyenne des bâtiments environnants.²

Le facteur de vue du ciel (SVF) dépend de la configuration géométrique des surfaces et varie en fonction des dimensions urbaines telles que la hauteur des bâtiments et la distance entre les façades. Il constitue l'un des concepts les plus importants à prendre en compte pour atteindre des objectifs de régulation climatique dans l'urbanisme. Le SVF joue un rôle crucial dans la quantité de rayonnement solaire reçue par les différentes parties de la rue, ainsi que dans l'effet de refroidissement nocturne de ces surfaces. Sa valeur est étroitement liée au degré d'urbanisation des terrains, atteignant une valeur maximale de 1 dans les espaces ouverts sans constructions, arbres ou obstacles (Figure II.6).

Wah Fu I SVF = 0,24	Wah Fu II SVF = 0,19	Taikoo IV SVF = 0,11	Taikoo XI SVF = 0,26	Repulse Bay 101 SVF = 0,28	Repulse Bay 109 SVF = 0,58	Ma Hang Estate SVF = 0,19	Heng On Estate SVF = 0,39	We Che Estate SVF = 0,21
Heng Fa Podium SVF = 0,39	Heng Fa Sea Front SVF = 0,32	Tsui Ning Garden SVF = 0,43	Siu Lun Court SVF = 0,22	Butterfly Estate SVF = 0,34	Wu King SVF = 0,30	Sunshine City SVF = 0,42	Newton Plaza SVF = 0,19	

*Figure II. 6 : Facteurs de vue du ciel de différents sites à Hong Kong (Chine).
Source : Colombert M., 2008*

I.3.2. Le profil de la rue (H/W) ou canyon urbain

Le profil de la rue fait référence à la relation entre la hauteur de la construction (H) et la largeur de la rue (W) (voir figure II.7). Cette relation peut également être exprimée en pourcentage grâce au facteur de vue du ciel (SVF – Sky View Factor), qui représente la proportion de la radiation solaire reçue par une surface plane par rapport à celle reçue par l’environnement radiatif sphérique, mesurée à l’aide de photographies prises avec un objectif grand angle orienté vers le point zénith dans le ciel.

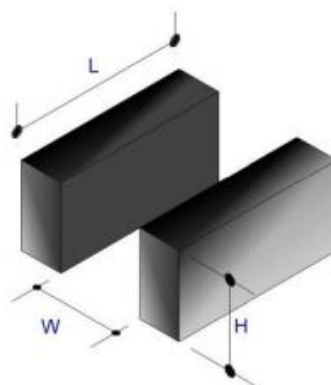


Figure II. 7 : Paramètres géométriques d'une rue canyon. (Athamena Kh., 2012).

D'après Athamena Kh., 2012, des études expérimentales réalisées par Aida (1982) et Aida et Gotoh (1982) ont observé que la proportion entre la hauteur (H) et la largeur (W) des rues canyon, également appelée rapport d'aspect H/W, avait un impact sur l'absorption de l'énergie solaire incidente. Lorsque le rapport H/W augmentait de 0,5 à 2, ils ont constaté une réduction de l'absorption de l'énergie solaire de 27% à 13% (figure II.8). Des résultats similaires ont été récemment obtenus par Bourbia et Awbi (2004) ; leur recherche a montré qu'une rue avec un rapport H/W de 0,5 recevait une quantité élevée d'énergie solaire directe, ce qui entraînait des températures de surface maximales atteignant 53°C. Cependant, cette capture thermique diminuait lorsque le rapport H/W atteignait 2, avec des pics de température ne dépassant pas 46°C.

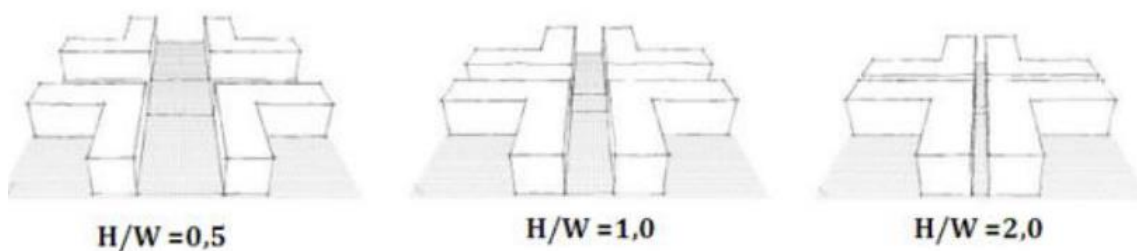


Figure II. 8: Différents rapports d'aspect H/W de rues canyon (Athamena Khaled, 2012).

I.3.3. L'orientation par rapport au soleil :

L'orientation d'un tissu urbain est un aspect spatial qui influence l'accessibilité à l'énergie solaire et à la lumière naturelle au sein de ce tissu. Elle crée des zones ombragées et ensoleillées, ce qui entraîne des variations de température dans l'environnement et sur les surfaces (Athamena Kh., 2012).

L'énergie apportée par un rayon de soleil dépend de plusieurs facteurs, tels que la taille de la zone d'impact, l'angle d'incidence du rayonnement solaire à chaque point, la durée d'exposition au soleil et les propriétés du matériau exposé (transmission, réflexion et absorption). L'importance de l'orientation par rapport au soleil se manifeste par la création de zones de protection ou d'exposition solaire au sein des espaces urbains. Ces protections sont généralement efficaces principalement aux heures matinales et vespérales, en fonction de l'orientation des bâtiments. En effet, lorsque le soleil est au zénith, les zones ombragées sont considérablement réduites (Athamena Kh., 2012).

I.3.4. La densité du bâti

La densité du plan joue un rôle crucial dans la détermination de la quantité de surfaces principales exposées au rayonnement solaire. Cette densité influence considérablement le niveau d'absorption et de réflexion du rayonnement solaire dans un environnement urbain donné.

I.3.5 La densité végétale (D_v)

La densité végétale se réfère à la répartition horizontale des espaces verts urbains tels que les parcs, jardins, arbres, etc., et leur proportion par rapport à la surface totale de la zone étudiée. Cet indicateur complète les deux précédents pour évaluer les caractéristiques internes de la texture urbaine, en particulier le type de surface (nature et proportion). La répartition des zones végétalisées dans le tissu urbain a un impact local sur le bilan des températures et l'humidité relative de l'air.

La densité végétale est déterminée par la présence et la quantité de tous les éléments végétaux, y compris les arbres, les pelouses, les buissons, les haies, etc. Pour obtenir sa valeur numérique, on peut utiliser une combinaison d'analyse d'images satellites et de l'équation suivante :

$$D_v = A_v / A_e$$

ou :

A_v : surface totale de l'aménagement vert

A_e : surface totale du périmètre de calcul

I.3.6. La géométrie des constructions

La géométrie des bâtiments présente trois aspects essentiels : la forme, la taille et l'espacement entre les bâtiments. La relation entre un bâtiment et son environnement extérieur, plus précisément le climat local, est principalement influencée par les caractéristiques de son enveloppe. La géométrie des constructions urbaines a diverses implications sur le climat de la ville. En effet, la réflexion et l'absorption des rayons solaires entre les bâtiments se produisent de manière complexe. Le refroidissement induit par le rayonnement net des ondes longues vers le ciel se produit principalement au niveau des toitures, tandis qu'une proportion plus faible provient des rues et des surfaces.

I.3.7. L'ombre des surfaces

Les structures urbaines et végétales jouent un rôle dans la création d'ombres, en fonction de la position du soleil (hauteur solaire) et de l'orientation des tissus urbains (paramètre spatio-temporel). Dans les configurations dispersées, seuls le sol et les façades masquées bénéficient de zones ombragées. En revanche, dans les configurations denses, plusieurs façades, voire toutes, peuvent être ombragées, offrant ainsi une protection contre les rayons solaires. Les espaces ombragés favorisent l'accumulation thermique (inertie ou stockage) et limitent les hausses de température de l'air dues à l'exposition directe au soleil. De plus, les surfaces ombragées dans les espaces extérieurs urbains offrent les meilleures conditions de confort.

1.3.8 Albédo moyen des surfaces

L'albédo représente la portion du rayonnement solaire incident qui est renvoyée par une surface sous forme de réflexion (Nikolopoulou, M. 2004), La réflectivité des surfaces joue un rôle dans leur capacité à renvoyer le rayonnement solaire. L'albédo est exprimé sur une échelle de 0 à 1. Un albédo élevé, tel que 0,70, indique que la surface reflète une grande quantité de rayonnement solaire (Giguère Méliissa, et al., 2009). D'après Athamena Kh., 2012, les études menées par Akbari et al. (2003) ainsi que Synnefa et al. (2007) ont démontré que l'augmentation de la réflectivité des matériaux utilisés sur les surfaces urbaines telles que les façades et les toitures est influencée par leur couleur, leur état d'utilisation et la nature de ces surfaces. Un matériau de couleur claire a la capacité de réfléchir jusqu'à 80% du rayonnement solaire incident, tandis qu'un matériau sombre ne réfléchit qu'environ 20% de ce rayonnement. (Tableau II.1).

	Albédo 0.1 – 0.3	Albédo 0.4 – 0.6	Albédo 0.7 – 0.9
Surfaces	Asphalte noir Béton sombre Pelouse Ardoise	Béton clair Cuivre oxydé Brique rouge Pierre	Pierre calcaire Marbre blanc Peinture blanche

Tableau II. 1: Classification des matériaux en trois catégories en fonction de leur albédo
source : Nikolopoulou, M. 2004.

Selon les recherches menées par Taha (1997) et Synnefa et d'autres chercheurs (2007), l'albédo des toitures de différentes couleurs a été mesuré. Les résultats ont révélé que les toitures peintes en blanc présentent une forte réflectivité pouvant atteindre 72 %, tandis que les toitures noires ont un albédo de seulement 26 %. En outre, une étude réalisée par Akbari et d'autres chercheurs (2003) a examiné l'impact de la couleur des façades sur la température des surfaces. Pendant les heures d'ensoleillement direct, les façades peintes en noir peuvent être jusqu'à 7°C plus chaudes que celles peintes en blanc, comme l'a souligné Athamena Kh. en 2012.

II. Dispositifs et opportunités d'adaptation au climat urbain

II.1 Rafraîchissement de l'air par la végétalisation

II.1.1 Végétation urbaine

La présence de végétation en milieu urbain apporte des changements aux conditions physiques (lumière, chaleur, vent, son, humidité) ainsi qu'à la perception et à l'appropriation des espaces urbains par les usagers. L'intégration de végétation permet de modifier le climat urbain et d'améliorer le confort environnemental. Les arbres, individuellement, jouent le rôle de parasols en bloquant le soleil, de brise-vent, de barrière sonore, de source d'humidité et de régulateur de la température de l'air et des surfaces environnantes. En effet, la végétation contribue à réduire l'effet d'îlot de chaleur urbain en absorbant le rayonnement grâce à la masse végétale. **Marjory Musy, (2008)**. Ainsi, la présence de végétation engendre de la fraîcheur grâce à divers processus, notamment :

- La création d'ombre saisonnière sur les infrastructures.
- L'évapotranspiration.
- La réduction des écarts de température à la surface du sol.

II.1.2 Végétalisation autour des bâtiments

La végétation influence la consommation énergétique des bâtiments de deux manières : directement par sa capacité à fournir une protection solaire, et indirectement par son impact sur le climat urbain, qui s'accumule au fil du temps (Marjory Musy, 2009). Pour optimiser l'ombrage sur le bâtiment, il est recommandé de positionner des arbres sur les façades est, sud-est, sud-ouest et ouest de la maison, de préférence d'une taille suffisante pour fournir une ombre partielle ou complète sur le toit. En outre, l'utilisation de treillis, de pergolas, de murs végétaux et de toits végétalisés adjacents aux bâtiments peut contribuer à maintenir une température intérieure plus fraîche (Giguère Mélissa, et al., 2009).

Les arbres d'ombrage interceptent les rayons solaires avant qu'ils n'atteignent les bâtiments et ne les réchauffent (figure II.9). La présence d'arbres d'ombrage en milieu urbain présente des avantages considérables, tels que la réduction des besoins de climatisation des bâtiments, la baisse des températures ambiantes et l'amélioration de la qualité de l'air urbain en réduisant la formation de smog (Akbari H. et al., 2001).



Figure II. 9: L'ombre procuré grâce à des arbres plantés autour des bâtiments

Il est préférable de planter des arbres à proximité des bâtiments. Cependant, des considérations de sécurité peuvent limiter l'implantation d'arbres de grande taille en raison de problèmes tels que les tempêtes et le développement des racines. Il est recommandé aussi de maintenir des arbres qui ne nécessitent pas d'élagage, car ils sont mieux adaptés pour résister au stress thermique et conserver une densité de feuillage maximale. Les arbres avec un feuillage dense isolent les feuilles internes des conditions extérieures en fermant leurs stomates, ce qui les aide à mieux faire face aux périodes de sécheresse prolongée. La capacité d'évapotranspiration varie selon les espèces végétales et est généralement liée à la taille de la plante : par exemple, une forêt de bouleaux transpire davantage qu'une prairie de taille équivalente pour une même quantité d'eau disponible.

II.1.3 Plantation ponctuelle d'arbres

La présence d'arbres matures favorise la fraîcheur grâce à leur capacité d'évapotranspiration et à l'ombre étendue qu'ils créent (Giguère Mélissa et al., 2009). Leur présence offre une protection solaire au sol, ce qui est particulièrement bénéfique lorsque les revêtements de sol sont de nature minérale, car cela empêche l'accumulation d'énergie diurne et sa libération nocturne (voir figure II.10). De plus, les arbres agissent comme des climatiseurs naturels pour l'environnement urbain pendant la nuit en évaporant de l'eau et en rafraîchissant ainsi l'air ambiant (J. Bigorgne, A. Mangold, 2014).

Plusieurs études mesurent la différence de température entre les parcs urbains et les zones construites environnantes. Elles constatent toutes une diminution de la température de l'air pouvant atteindre 6°C. Les résultats varient en fonction des conditions climatiques, de la taille des parcs et du type de végétation présente (Marjory Musy, 2009).

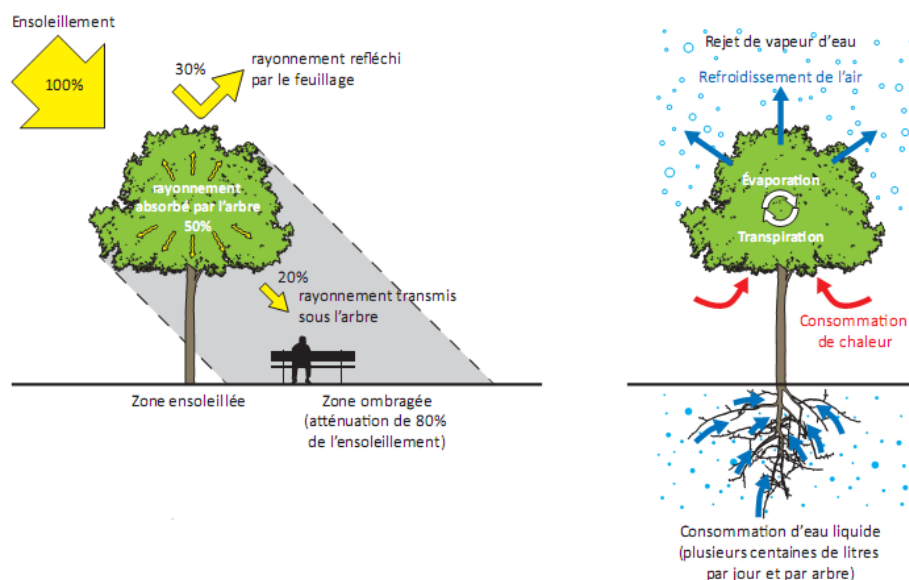


Figure II. 10: Le double effet de rafraîchissement et d'ombrage de l'arbre dans l'espace urbain. Source : J. Bigorgne, A. Mangold, 2014.

II.1.4 Murs végétaux et toits verts

Les toitures végétalisées jouent un rôle essentiel dans la réduction des îlots de chaleur urbains, elle augmente le coefficient de réflexion solaire (albédo) des toits des bâtiments, limitant ainsi l'accumulation de chaleur. De plus, elles contribuent à réduire la demande énergétique liée à la climatisation des bâtiments.

Les toitures végétalisées sont généralement classées en deux types en fonction de l'épaisseur du substrat utilisé : les toitures végétalisées extensives et les toitures végétalisées intensives (Figure II.11).

Les toitures végétalisées intensives ou semi-intensives sont de véritables jardins, mais elles nécessitent un investissement plus important en termes d'installation et d'entretien. En revanche, les toitures végétalisées extensives sont aménagées avec des végétaux de plus petite taille, ce qui les rend plus légères et plus faciles à mettre en place que les précédentes (De Munck Cécile, 2013).

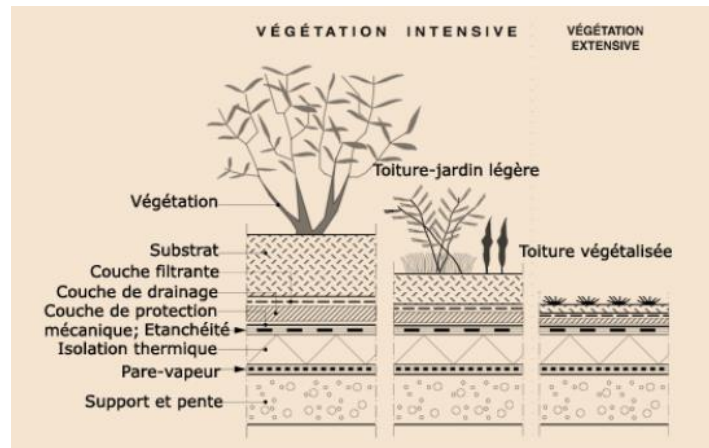


Figure II. 11: Différents types de toitures végétalisées. Source : DE Munck Cécile, 2013

Les types de végétation, leur poids et leurs coûts varient en fonction du choix entre les toitures végétalisées extensives et intensives. Le Tableau II.2 résume les avantages de chaque type de toiture, sachant que les avantages de l'un peuvent constituer les inconvénients de l'autre. (Djedjig Rabah, 2013)

Toiture extensive	Toiture intensive
<ul style="list-style-type: none"> - Faible épaisseur de substrat (5 à 15 cm) - Conditions difficiles pour les plantes - Limitation de la diversité des espèces végétales 	<ul style="list-style-type: none"> - Épaisseur importante du substrat (20 à 100 cm) - Conditions propices pour les plantes - Grande diversité de plantes adaptées
<p><u>Avantage :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Structure légère - Adaptées aux grandes surfaces - Inclinaison possible jusqu'à 30° - Faible besoin d'entretien et longue durée de vie - Nécessite peu d'expertise technique - Convient aux projets de réaménagement - Souvent pas besoin de systèmes d'irrigation ou de drainage spéciaux - Végétation pouvant se développer spontanément - Coût moindre 	<p><u>Avantage :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Excellente isolation - Rendu esthétique similaire à un jardin au sol - Souvent accessible : possibilité d'utiliser la toiture à des fins récréatives et de jardinage - Meilleure efficacité énergétique et capacité de rétention d'eau accrue - Durée de vie prolongée de la membrane

Tableau II. 2: Comparaison des toitures intensives et extensives. Source : Djedjig Rabah, 2013, d'après Peck et al., 1999)

En ce qui concerne les façades végétalisées, on distingue trois principales catégories : les revêtements de façade (plantes grimpantes comme le lierre, figure II.12 a), les brises-soleil (figure II.12) et les éléments de paroi (figure II.12 c), qui sont les plus similaires aux dispositifs utilisés pour les toitures végétalisées extensives.

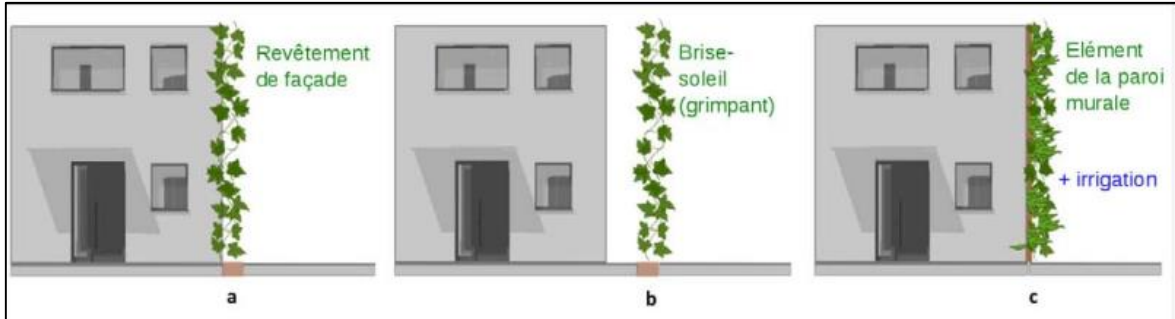


Figure II. 12: Différents types de façades végétalisées. Source : De Munck Cécile, 2013

Les plantes grimpantes (figure II.13) se fixent naturellement à la surface et se développent le long de la façade. Les avantages de ce type de végétation incluent l'isolation contre le froid en hiver et la chaleur en été, un effet d'atténuation acoustique, la protection des structures contre les rayons UV qui accélèrent leur dégradation, un espace requis minimal, une préparation pratiquement inexistante, ce qui se traduit par des coûts minimes, ainsi que l'absence de graffitis sur les murs recouverts.



Figure II. 13: Façade végétalisée recouverte de plantes grimpantes. New York, 2009.
Source : BERNIER Anne-marie, 2011

Dans une étude menée par Luxmore et al. (2005), des modèles ont été utilisés pour évaluer les effets rafraîchissants de la végétation sur les bâtiments situés dans les canyons urbains de la ville. Les résultats ont démontré que dans les climats chauds et secs, les gains de fraîcheur étaient plus importants (Giguère Mélissa, M. Env., 2009).

II.2. Aménagement urbain et structures urbaines durables

L'aménagement urbain et les structures urbaines durables jouent un rôle crucial dans la création de villes résilientes et favorables à la qualité de vie des habitants. Ces pratiques visent à concevoir des environnements urbains qui minimisent leur impact sur l'environnement et qui répondent aux besoins actuels sans compromettre les ressources pour les générations futures. L'aménagement urbain durable englobe des éléments tels que les aires aquatiques, les protections solaires et les pavés à haut albédo.

- Aires aquatiques

Les aménagements urbains tels que les bassins, les étangs, les fontaines et les jets d'eau utilisent le phénomène d'évaporation pour modifier l'état de l'air ambiant, ce qui entraîne un effet rafraîchissant. Lorsque l'eau s'évapore, elle absorbe la chaleur latente de vaporisation, ce qui abaisse la température de l'air environnant. De plus, la présence d'une étendue d'eau contribue à réguler les températures de surface extrêmes en raison de sa capacité élevée de stockage thermique. (Bouyer Julien, 2009). Les propriétés thermiques d'une masse d'eau diffèrent de celles des surfaces urbaines qui absorbent le rayonnement solaire et le convertissent en chaleur sensible. En agissant différemment, une masse d'eau atténue les fluctuations de température en retirant de la chaleur de l'air lorsqu'elle s'évapore, ce qui a pour effet de réduire la température ambiante.

- Protection solaire

L'exposition directe au rayonnement solaire augmente la sensation de chaleur ressentie par les individus et a un effet significatif sur leur confort thermique. (Watkins et al., 2007). Tout comme les constructions et les installations, l'utilisation de l'ombrage offre aux individus une protection partielle contre l'exposition directe aux rayons solaires et aux rayons UV, qui sont responsables du cancer de la peau.

- Pavés à hauts albédos

Plusieurs recherches ont été menées afin d'améliorer notre compréhension des propriétés thermiques et optiques des matériaux utilisés pour les pavés et leur impact sur le climat urbain (Doulos L. et al., 2004). Des températures de surface plus basses participent à réduire la chaleur ambiante, car la convection de chaleur provenant de surfaces plus froides est moins intense. De telles diminutions de température peuvent avoir des répercussions significatives sur la consommation énergétique liée à la climatisation dans les zones urbaines, ce qui revêt une importance particulière dans les villes à climat chaud.

II.3 limitation des sources de chaleur

II.3.1 Contrôle de la chaleur produite dans le bâtiment

La surchauffe des bâtiments pendant la période estivale est souvent causée par la combinaison de plusieurs facteurs tels que la production de chaleur interne, le rayonnement solaire direct et une isolation thermique insuffisante. Selon une étude de Taha (1997), la chaleur générée par les activités humaines peut entraîner une augmentation de 2 à 3 °C au sein des centres urbains. Les équipements électroménagers, les éclairages et les ordinateurs, par exemple, convertissent l'énergie qu'ils consomment en chaleur. Ces apports de chaleur internes ne sont pas synchronisés et se traduisent plutôt par une diffusion de chaleur dans les bâtiments.

II.3.2 Diminution du parc automobile en environnement urbain

Les voitures et les véhicules, contribuent à la production de chaleur dans les environnements urbains. L'accumulation de chaleur émise par ces véhicules peut être emprisonnée dans les canyons urbains mal ventilés, ce qui a un impact négatif sur le confort thermique des habitants de la ville. Des études ont démontré que la présence de diverses activités à proximité peut réduire la circulation automobile. Dans les zones résidentielles, les quartiers bénéficiant d'une accessibilité pédestre aux commerces connaissent moins de trafic routier que ceux qui en sont dépourvus, où les déplacements en voiture sont inévitables.

III. Stratégies d'adaptation climatique anciennement utilisées dans l'habitat saharien

Le souci climatique a occupé la pensée de l'homme primitif qui essayait durant des siècles à s'adapter au climat avec des matériaux et des techniques très limités. L'adaptation empirique dans l'habitat saharien se manifeste dans l'habitat ksourien. Les ksour sahariens répondent aux conditions climatiques difficiles par l'adaptation au milieu physique et la protection contre les facteurs climatiques indésirables. Cette adaptation relève de plusieurs niveaux.

III.1. compacité du tissu

Les ksour sahariens à travers leurs structures urbaines compactes ont réussi de protéger leurs constructions contre l'enselement et les vents nocturnes froids ; le ksar de Ouargla, Touggourt et Ghardaïa, sont des exemples qui ont répondu à leur environnement hostile par une structure urbaine très serrée (voir figure II.14).



Figure II. 14: Tissus compacts des différents ksour de sud algérien (de gauche à droite : Ouargla, Touggourt et Ghardaïa). Etabli par auteur, 2011

Construites sur un principe de compacité verticale ou horizontale, les ksour se caractérisent par des structures urbaines qui exposent une surface minimale au soleil d'été et aux vents froids d'hiver. Les maisons sont regroupées de manière compacte, avec des murs adjacents délimitant les zones exposées au soleil (voir Figure II.15). La haute densité et la propriété partagée offrent une protection accrue contre le vent et limitent les pertes de chaleur.

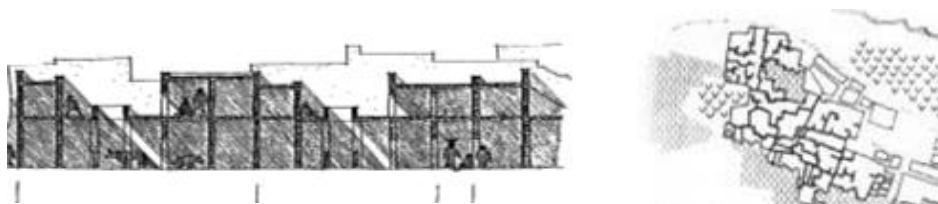
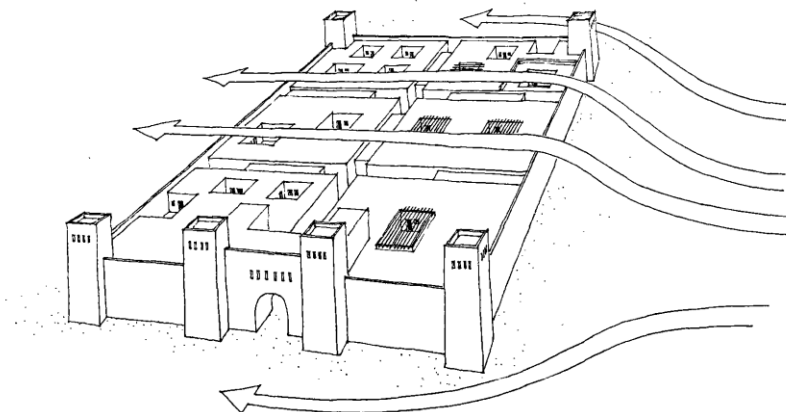


Figure II. 15: Texture urbaine horizontale et verticale compacte. Source : auteur, 2011

L'étude des flux énergétiques révèle que pendant l'hiver, la configuration dense de la structure urbaine crée des conditions relativement chaudes tout au long de la journée, en offrant une protection contre les vents froids et les vents de sable comme paramètre principal (figure II.16).



La masse compacte du ksar protège les maisons du vent de sable.

Figure II. 16: protection des habitations contre les vents de sable
Source : Alain M.Viario et Arlette Ziegler, 1983

En été, l'effet de surchauffe dans le canyon urbain est principalement ressenti la nuit. Pendant les heures de stress thermique diurne, les espaces urbains compacts ont le potentiel de créer un "îlot de fraîcheur" car un piéton dans une rue canyon absorbe moins d'énergie thermique que dans un environnement ouvert. Cet effet repose principalement sur les conditions thermiques du corps humain dans la rue plutôt que sur l'air ambiant. Il est attribué à plusieurs facteurs, tels que l'ombre offerte par la rue canyon pendant une grande partie de la journée, la réduction de l'exposition du piéton au rayonnement de longueur d'onde élevée et la forte inertie thermique de la rue (figure II.17).

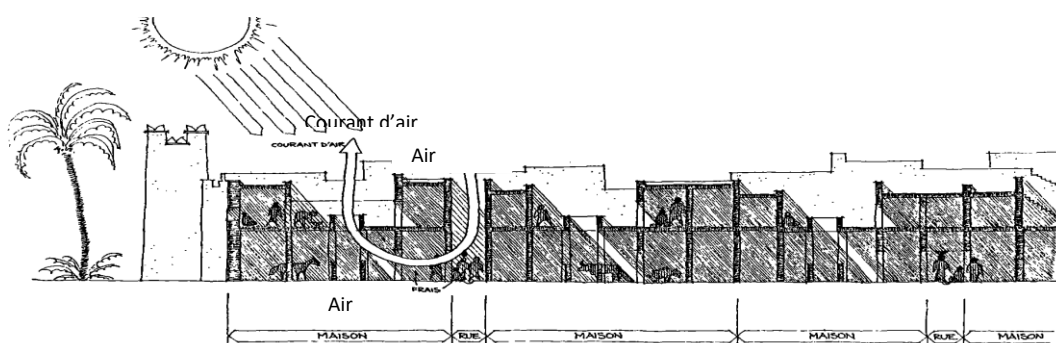


Figure II. 17: l'effet de l'ombre et contrôle de rayonnement solaire
Source : Alain M.Viario et Arlette Ziegler, 1983)

Pendant la journée, l'effet de la ventilation dans les conditions extérieures est limité par les températures élevées de l'air et les faibles vitesses de vent. Cependant, la ventilation joue un rôle crucial tôt le matin et en fin de journée, lorsque les vents sont plus forts et plus frais. Pendant cette période, l'orientation des rues devient importante.

Une combinaison d'ombre et de ventilation peut considérablement améliorer les conditions extérieures (Kitous Samia, 2011).

III.2. Diminution de la surface de l'enveloppe :

Les ksour se caractérisent par leur morphologie compacte, leur couleur terre et leur emplacement au sein d'un espace vert. Les maisons sont coulées de façon de limiter les murs exposés au soleil (figure II.18).

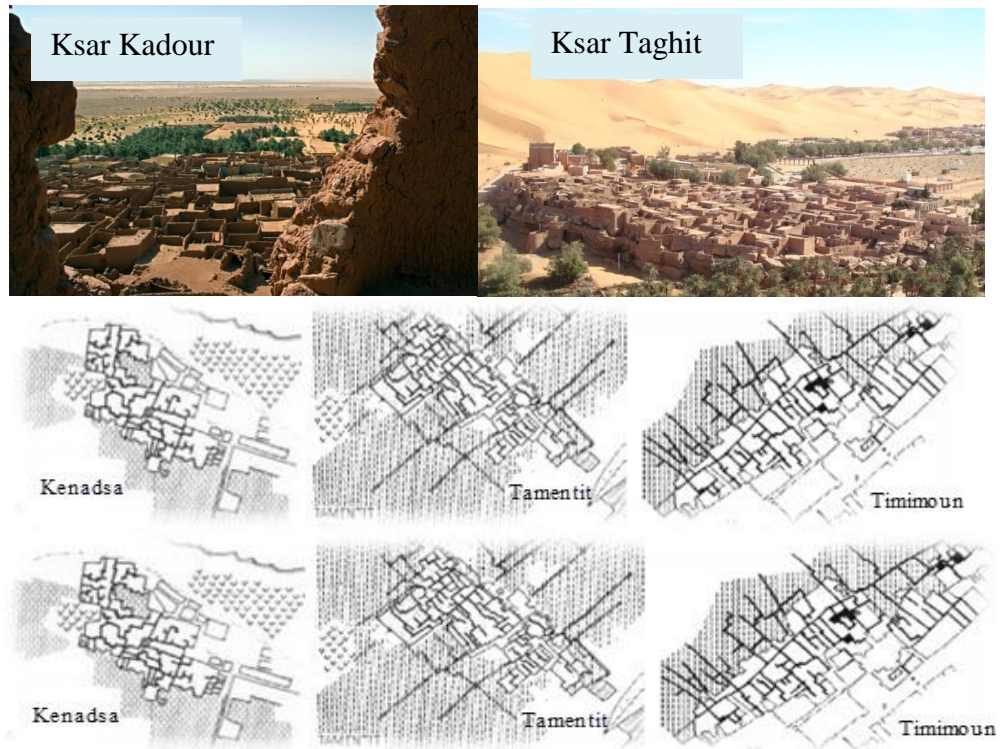


Figure II. 18: Ksour du Sahara occidental, établit par auteur, 2013

III.3. forme et orientation du bâti

Le système de division des parcelles est constitué d'une combinaison complexe de parcelles présentant un haut degré d'association entre elles. A l'associativité des parcelles, on peut ajouter d'autres concepts tels que la centralité, la linéarité, la hiérarchie spatiale, la distributivité interne, l'intériorisation de l'espace extérieur, et la façade comme entité urbaine.

L'orientation la plus favorable de l'îlot, qui constitue l'élément fondamental du tissu urbain, est de 45 degrés par rapport aux vents dominants (figure II.19).

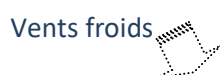




Figure II. 19: Le ksar de Tamacine, orientation des ilots par rapport aux vents dominants, établi par auteur, 2013.

La direction irrégulière des parcelles crée des coupes vents continues. La forte mitoyenneté des parcelles et leur accollement minimisent les surfaces exposées au rayonnement solaire. Donc l'effet de stockage sera réduit et de même la température radiante (voir figure II.20).

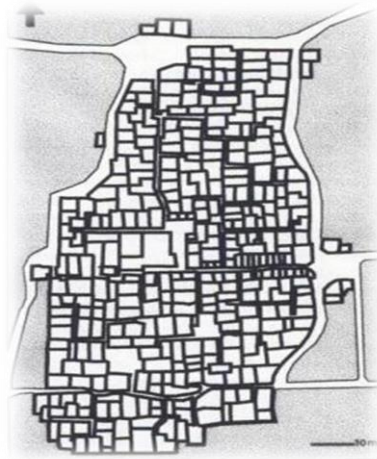


Figure II. 20: Mitoyenneté et direction irrégulière du parcellaire du ksar de Lichana à Biskra. Source marc Cote, 1988

III.4. forme et orientation de la voirie

Le réseau viaire des ksour est un système composé de voies organiques, sinueuses et irrégulières, qui sont étroites et ne possèdent pas de trottoirs. Ces voies sont parsemées de passages et interrompues par des voies perpendiculaires. La largeur des voies diminue près des entrées des habitations. Les rues suivent une hiérarchie spatiale allant de l'espace public à l'espace privé.

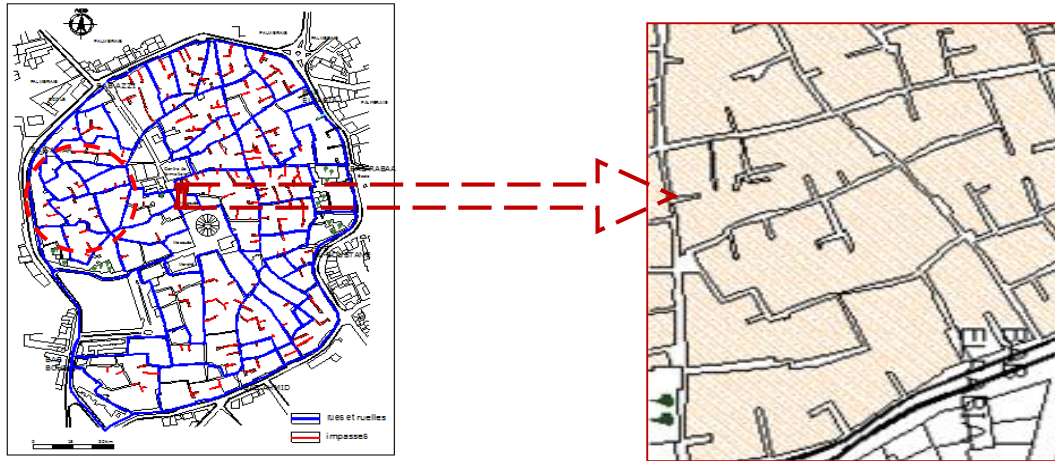


Figure II. 21: La hiérarchisation de la structure viaire du ksar Ouargla, établit par l'auteur, 2013.

L'orientation des majorités des rues est l'axe Est /Ouest. Les rues secondaires et les impasses sont orientées selon un axe Nord/Sud, ce qui crée une impression intime pour les résidents et limite l'accès aux étrangers.

Les rues sont principalement est-ouest, pour réduire leur absorption directe de rayonnement. Dans une rue très étroite, le soleil ne peut pas pénétrer et l'absorption est alors faible. La géométrie des rues et leurs couleurs, toujours claires, se rangent également dans cette direction.



Figure II. 22: L'effet de l'orientation des rues et ruelles pour empêcher la pénétration d'ensoleillement, source : auteur, 2013

En outre, le rétrécissement des voies crée un effet de Venturi. De cette façon la pression du vent se diminue et sa vitesse s'augmente tout on s'enfonçant vers l'intérieur du bâti, en provoquant une ventilation naturelle avec un flux important (voir figure II.23).



Figure II. 23: Le rétrécissement des voies et l'effet de venturi. Source : auteur, 2013.

III.5. l'ombrage

Les ruelles étroites et sinueuses réduisent la durée d'exposition au soleil des façades et entravent la capacité du vent à chasser l'air frais accumulé pendant la nuit. Selon leur orientation, ces rues étroites peuvent offrir de l'ombre pendant des périodes plus ou moins longues au cours de la journée (figure II.24).

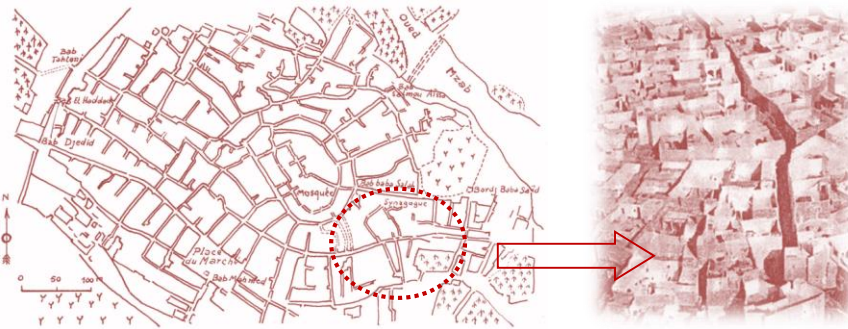


Figure II. 24: Ombrage procuré par la morphologie des rues selon axe Est-Ouest au village de Melika dans la vallée du Mزاب. Source : Bennadji amar 1999

En cas de manque d'ombre, les passages couverts servent de relais où les piétons peuvent se reposer avant de poursuivre leur chemin sous un soleil brûlant (Bennadji amar, 1999).



Figure II. 25: Passages couverts et impasse ombragés, source : auteur, 2013

Les chambres des étages supérieurs s'avancent dans les ruelles et sont parfois ombragées (voir Figure II.26). Ces encorbellements permettent d'ajuster l'aménagement des pièces de l'espace intérieur ou de l'agrandir au détriment d'une rue effectivement ombragée. (ALKAMA Dj., 2005)



Figure II. 26: L'effet d'ombrage résulté d'encorbellement, source : Auteur, 2013

III.6. matériaux de construction

La majorité des constructions traditionnelles se distinguent par leur recherche d'une importante inertie thermique et leur contrôle des rayonnements. Cette inertie thermique est obtenue en utilisant des matériaux de construction massifs disponibles sur place. Les matériaux de construction proviennent directement du site et varient d'une région à l'autre. Dans le Sahara algérien, on peut trouver différents matériaux, notamment :

- **La terre** : est le matériau de construction probablement aussi ancien que l'humanité, certains constituent des genres techniques majeurs :

1) **Le pisé** : la terre très sableuse en gravier et cailloux, à peine argileuse (10 à 20%), aérée après avoir été extraite, est déversée dans un coffrage, compactée à son humidité naturelle, jusqu'à constituer un béton maigre qui durcit en séchant.

2) **L'adobe ou la brique crue** : est fabriqué à partir d'un mélange de terre argileuse (jusqu'à 30%) et de sable, auquel on ajoute de l'eau jusqu'à obtenir une consistance semi-ferme (15 à 30% d'eau). Il est préfabriqué sous forme de blocs de taille similaire à celle d'un parpaing. Ils sont réalisés par des sols les plus argileux (appelés "le toub"), où la terre est humidifiée, pétrie, puis à nouveau humidifiée, avant d'être exposée au soleil pour sécher.

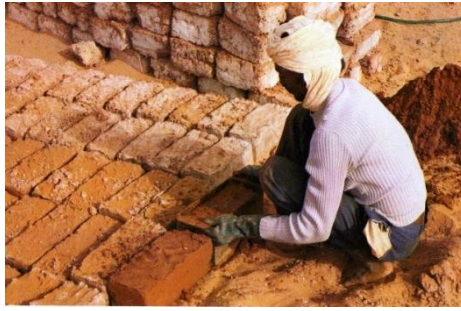


Figure II. 28: L'usage ancestral du Pisé. Source : Dethier J., 1986

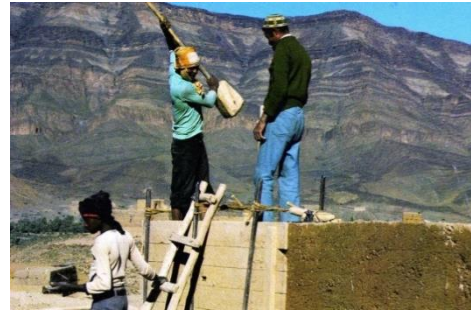


Figure II. 27: Séchage au soleil d'Adobes. Source : Dethier J., 1986

- **La pierre** : La pierre est le matériau de construction privilégié en raison de sa résistance élevée à la compression. Cependant, elle est relativement fragile face aux intempéries, certaines variantes étant peu résistantes à l'humidité et au gel. La pierre utilisée est généralement non taillée, avec des blocs de tailles variables subissant simplement une mise à niveau avant d'être posés sur un lit de mortier. Ces pierres proviennent principalement de lits d'oueds, qu'elles soient calcaires ou de type roulé, et sont liées ensemble avec du mortier de terre.

IV. La place et le microclimat dans un milieu saharien

IV. 1. Caractéristiques climatique du climat chaud et aride

IV.1.1. Un rayonnement solaire intense

Le rayonnement solaire est extrêmement intense dans les régions à climat chaud et aride, il dépasse les 800 ou 900 W/m² sur une surface horizontale. De plus, ce rayonnement est amplifié par la réflexion des surfaces arides. Les effets du rayonnement solaire sur les milieux arides sont dus aux éléments suivants :

- une longue durée d'exposition au rayonnement solaire (entre 9 heures et 16 heures).
- Un rayonnement solaire à intensité très élevée.
- Des angles d'incidence très importance, à la fois l'angle solaire et l'azimut.

IV.1.2. Des températures diurnes très élevées

Les régions arides sont caractérisées par de faibles précipitations, un ciel dégagé et une humidité réduite, ce qui entraîne des variations de température considérables. Pendant l'été, les rayons du soleil réchauffent la surface du sol jusqu'à atteindre des températures de 70 °C au milieu de la journée. Les températures diurnes en été varient généralement entre 40 °C et 50 °C, tandis que les températures nocturnes se situent entre 15 °C et 25 °C.

L'humidité relative est étroitement liée à la température de l'air et peut varier de moins de 20 % pendant l'après-midi à plus de 40 % la nuit. Un changement de direction du vent peut amener de l'air en provenance de la mer, ce qui entraîne une augmentation de l'humidité.

IV.1.3. Les vents de sable

Les régions arides sont caractérisées par des vents provenant du sud-ouest et du nord-ouest et se dirigeant vers l'équateur, ce qui entraîne des conditions de sécheresse. Il est fréquent d'observer des tourbillons et des épisodes de poussière.

IV.1.3. L'humidité relative

Dans les régions chaudes et arides, on observe une fluctuation de l'humidité relative qui est inverse à celle de la température de l'air (Givoni 1998), au cours de la journée, les taux d'humidité relative sont extrêmement bas dans ces conditions, pouvant descendre jusqu'à 4% en été.

IV.2. la place : un espace public en question

IV.2.1. Définition de la place publique

Dérivé du terme latin "platea" signifiant "place publique", une place désigne un espace ouvert au public composé d'une zone vide et des édifices qui l'entourent. Son importance et sa fonction diffèrent en fonction des cultures, des époques et de l'activité sociale qui s'y déroule (MERLIN. P et CHOAY. F 2000).

IV.2.2. la problématique climatique de l'espace public

Les paramètres clés du climat qui ont un impact direct sur la formation du microclimat urbain dans l'espace public comprennent le rayonnement solaire, la température ambiante, le vent et l'humidité de l'air. Dans les environnements chauds et arides, la durée d'exposition au soleil est le problème le plus préoccupant qui influence la qualité climatique de l'espace public. La qualité climatique de l'espace public en milieu urbain est également influencée par sa situation géographique, la configuration urbaine, la hauteur des bâtiments environnants et la surface de son revêtement.

La place publique, en tant qu'espace social, contribue à une meilleure qualité de vie lorsque les conditions climatiques y sont favorables. La principale préoccupation climatique consiste à créer des zones ombragées et à contrôler les paramètres climatiques afin de réduire les effets inhérents au climat.

CONCLUSION :

La morphologie urbaine d'une ville influence la qualité climatique de son environnement. Autrefois, la forme traditionnelle compacte offrait des conditions propices à un microclimat urbain favorable. Cependant, de nos jours, les immeubles de grande hauteur créent des canyons urbains qui agissent comme de véritables pièges radiatifs, augmentant ainsi les surfaces exposées aux variations climatiques.

Le rapport d'aspect (ou le facteur du profil de la rue), « H/W » et Le facteur de vue du ciel « SVF » sont des facteurs morphologiques qui obstruent la vue du ciel et influent sur le contrôle de la température des surfaces et de la température de l'air. Autres facteurs relatifs à la couverture des surfaces du sol et leurs natures comme l'albédo moyen des surfaces et la densité végétale « Dv » modifient aussi le microclimat urbain soit par leur absorption ou réflexion de rayonnement solaire.

La présence de végétation dans les espaces urbains se manifeste de différentes façons : végétation urbaine, aménagements végétaux autour des bâtiments, plantations d'arbres isolés, murs végétaux et toits verts. Ces éléments contribuent à l'adaptation au climat urbain en créant des zones ombragées grâce aux arbres et en procurant un effet de rafraîchissement par l'évapotranspiration. Des dispositifs et opportunités d'adaptation au climat urbain, tels que les aménagements urbains durables (espaces aquatiques, revêtements à haut albédo, protection solaire), la réduction des sources de chaleur en milieu urbain (trafic routier, activités humaines) et le contrôle de la production de chaleur dans les bâtiments, peuvent également contribuer à atténuer les températures extrêmes pendant la période estivale.

En retournant à l'habitat traditionnel saharien, les ksour manifestent depuis des siècles d'une adaptation climatique parfaite avec un environnement hostile. La compacité du tissu est la caractéristique principale qui assure une forme qui capte moins de rayonnement solaire et diminue la surface de l'enveloppe exposée à l'ensoleillement. Par sa forme et l'orientation de son bâti et ses voiries, l'espace ksourien assure l'adaptation climatique pertinente.

L'espace public, notamment la place publique dans un environnement saharien, pose un défi en termes d'exposition à un rayonnement solaire intense et à des températures diurnes très élevées. Une étude des caractéristiques morphologiques de cet espace est nécessaire afin de trouver des solutions d'adaptation climatique appropriées à ce climat.

**CHAPITRE III : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE : ÉTUDES MENÉES
SUR LE MICROCLIMAT URBAIN**

INTRODUCTION :

À l'heure actuelle, la climatologie urbaine est nt un domaine de recherche exploré par des climatologues, des géographes, des architectes et des urbanistes. Chacun de ces acteurs aborde ce sujet avec des échelles, des variables et des objets d'étude différents qui leur sont propres. (Colombert M., 2012).

L'étude du climat urbain et son intégration dans l'aménagement urbain sont des sujets relativement récents. Les premières études se sont penchées sur la corrélation entre la structure urbaine et les effets thermo radiatifs du microclimat urbain. Oke, 1987 a étudié l'influence de la densité urbaine sur la température de l'air, Kim Chuan Goh and Chew Hung Chang, 1999 ont étudié l'effet du rapport H/W sur les intensités d'îlot de chaleur urbain ; et d'autres recherches ont étudié plusieurs effets aérodynamiques du vent. Gandemer, 1976 ; Grimmond et Oke, 1999 ont étudié l'influence de la rugosité urbaine et la porosité des bâtiments sur la vitesse du vent.

À nos jours, les modélisations visent à évaluer comment le microclimat urbain et l'îlot de chaleur réagissent à diverses mesures, telles que la végétalisation des espaces, les variations des flux de chaleur d'origine humaine et l'augmentation de l'albédo des surfaces. Toutefois, il convient de souligner que les changements dans l'environnement urbain, qu'il soit construit ou non, ainsi que les émissions de chaleur d'origine humaine, ont un impact sur l'intensité de l'îlot de chaleur à la fois en été et en hiver.

Dans ce chapitre, nous examinerons l'évolution de l'étude du microclimat urbain, en commençant par les premières recherches sur le climat en milieu urbain et en poursuivant avec la prise en compte croissante du climat dans la planification urbaine. Ensuite, nous aborderons des études récentes sur le microclimat urbain, et enfin, nous présenterons les modèles de simulation numérique utilisés en climatologie urbaine.

I. Micro climatologie urbaine, fondement et évolution

I.1. prémices de la recherche sur le climat urbain

Les premières recherches concernant le climat urbain et les conditions climatiques des villes remontent à l'ère chrétienne, comme le souligne Yoshino (1990/91) dans son article traitant des différentes études en climatologie urbaine depuis les temps anciens jusqu'aux années 1980. Vitruve, également a abordé les relations entre l'aménagement urbain et les conditions climatiques. De même, Manasara Silpasatra, un Indien ayant vécu avant notre ère, a écrit sur l'importance de prendre en compte la luminosité et la ventilation dans la conception de l'aménagement urbain. L'étude du climat urbain est également étroitement liée à l'intérêt pour la pollution de l'air. Horace (65-68 av. J.-C.) décrit la situation de Rome à cet égard, tout comme Circa (3 av. J.-C. - 65). Au XVIIe siècle, Sir John Evelyn évoque la pollution de l'air, le vent, la température de la ville et le brouillard fumeux ou smog de Londres. C'est à la fin du XVIIIe siècle que la climatologie urbaine prend véritablement son essor, avec l'introduction progressive de mesures instrumentales. (Colombert M., 2012).

Les progrès des techniques de mesure ont progressivement conduit à l'identification du microclimat urbain, comme en témoignent les travaux suivants :

- ❖ en 1803, Luke Howard (1772-1864), a publié un ouvrage sur la classification des nuages, où il a également identifié le phénomène de "smog" urbain. Grâce à des relevés de températures mensuelles moyennes, il a déduit l'existence de zones urbaines plus chaudes, mettant ainsi en lumière le concept d'îlot de chaleur urbain.
- ❖ en 1855, Émilien Renou (1815-1902), a mené des observations à Paris, révélant une température supérieure de 1 à 2 °C par rapport aux zones environnantes, mettant ainsi en évidence les disparités de température entre les milieux urbains et ruraux. Dans une publication datant de 1868, après avoir analysé ces différences de manière critique, il a remarqué que les variations de température étaient plus prononcées en soirée par temps calme et dégagé, en raison du refroidissement radiatif.
- ❖ En 1917, Wilhelm Schmidt (1883-1936) a entrepris des campagnes de mesures à l'échelle du microclimat, utilisant notamment des véhicules motorisés pour effectuer des relevés à travers les environnements urbains (en 1927 et 1930), ce qui lui a permis d'établir des cartographies détaillées.
- ❖ En 1927, Geiger a publié un livre consacré aux microclimats, englobant également une partie dédiée à la climatologie urbaine.

I.2. Evolution de la prise en compte du climat en ville

Jusqu'à une période récente, les urbanistes accordaient peu d'importance au climat. L'amélioration de la qualité de l'air ou des conditions climatiques urbaines n'était pas un objectif clairement affiché. Avant le milieu du XXe siècle, les planificateurs urbains n'abordaient pas encore le concept de climat urbain, mais ils étaient conscients de leur capacité à effectuer des changements.

Durant le Moyen Âge, la fondation des villes était principalement motivée par des objectifs de protection, de survie et en réponse à des considérations militaires et économiques. Par conséquent, en plus des fortifications, les villes étaient entourées de larges fossés pour répondre à ces besoins de protection, ce qui engendrait un microclimat local plus humide. De plus, la ville intra-muros regroupait toutes les activités économiques qui nécessitaient une certaine humidité, ce qui créait des zones insalubres au sein de la cité. En l'absence de possibilité d'éliminer ces sources d'insalubrité, les populations s'adaptaient en s'éloignant dès que cela était possible. De cette manière, les espaces moins pollués étaient occupés par des religieux ou des personnes aisées, tandis que les ouvriers vivaient aux environs de ces sources de pollution. Avec la disparition des menaces militaires, l'amélioration des conditions économiques et les progrès scientifiques, les villes ont pu améliorer leur climat et, surtout, purifier leur air.

À partir du XVIIIe siècle, la qualité sanitaire de l'air urbain est devenue une préoccupation majeure. Il y avait désormais une volonté de réduire l'humidité et de favoriser l'accès à l'air, au soleil et à la lumière naturelle dans les habitations et les espaces urbains. Une amélioration de la salubrité des surfaces a été entreprise, comprenant la minéralisation des sols des rues, le ravalement des murs, le comblement des fossés, la canalisation des rivières et le drainage des eaux de surface en sous-sol. De plus, une meilleure ventilation des espaces urbains a été réalisée grâce à l'alignement des rues, l'élargissement et la création de nouvelles rues, ainsi que la normalisation de l'aspect visuel des rues.

Au cours du XIXe siècle, des propositions utopistes émergent concernant l'avenir des villes et leur conception. L'urbanisme moderne s'inspire de ces utopies sociales et propose de nouvelles formes urbaines, parfois en opposition avec les structures des anciennes villes. Selon Benzerzour (2004), deux types de solutions sont envisagés : la construction d'une nouvelle ville en combinant des éléments urbains et ruraux, ou la transformation (actualisation) de la ville existante afin d'obtenir une nouvelle configuration urbaine.

Bien que la première solution ait été préconisée au cours de la première moitié du XXe siècle, elle ne s'est pas imposée de manière généralisée. Des exemples de cette approche incluent la vision d'Ebenezer Howard de la "cité-jardin" dans son ouvrage de 1902 intitulé "Les cités-jardins de demain", ainsi que la proposition du Plan Voisin de Le Corbusier en 1925, qui impliquait la transformation et la destruction du cœur de Paris. Toutefois, de nos jours, c'est la deuxième solution qui prédomine.

La prise de conscience environnementale contemporaine s'inscrit dans la continuité des préoccupations hygiénistes du 19e et du début du 20e siècle. De nouveaux enjeux tels que l'environnement, le développement durable, le microclimat urbain, la pollution atmosphérique et le changement climatique émergent, donnant lieu à de nouvelles propositions d'interventions dans les milieux urbains. Selon Gauzin-Müller (2001), il est préconisé trois objectifs pour une ville répondant aux critères de qualité environnementale : compacité urbaine afin de réduire les distances à parcourir, densité de l'habitat pour économiser l'énergie de chauffage et les matériaux de construction, et verdissement des espaces urbains et des toits pour favoriser l'humidification de l'air, capturer les poussières, réduire les températures, stocker le carbone et libérer de l'oxygène, atténuer la propagation du bruit, diminuer la sensation de densité, et augmenter l'inertie thermique.

La connaissance en climatologie urbaine découle de différentes sources, notamment les mesures in situ, les simulations en soufflerie ou en tunnel aéraulique, ainsi que les simulations numériques. Grâce à l'observation du climat urbain, notamment à travers de nombreuses campagnes de mesures, ainsi qu'à la modélisation des phénomènes physiques impliqués, les climatologues ont pu décrire et comprendre avec une précision croissante la formation du climat urbain. Initialement, les premières études se focalisaient essentiellement sur l'îlot de chaleur urbain observé à l'échelle de l'agglomération. Toutefois, les climatologues ont progressivement élargi leur champ d'investigation à des échelles plus précises, ce qui a permis de mettre en évidence l'intérêt de la géométrie urbaine.

De nos jours, la compréhension du bilan d'énergie, qui englobe les échanges d'énergie entre l'atmosphère et la surface urbaine, constitue un élément central de nombreuses études axées sur la modélisation du climat urbain.

II. Des études récentes sur le microclimat urbain

II.1. Etudes sur l'îlot de chaleur urbain et le changement climatique

II.1.1. étude de Irina Tumini et Carlos rubio-Bellido, 2016

Cette étude évalue l'impact du changement climatique sur l'environnement urbain et en particulier sur la morphologie urbaine typique des villes d'Amérique latine au moyen de la modélisation et des simulations CFD.

Le cas d'étude de cette recherche est la place de Armas à Concepcion, au Chili. Concepcion est située à $36^{\circ} 50' S$ et $73^{\circ} 03' O$, avec une altitude moyenne d'environ 12m. Le climat régional est méditerranéen avec une influence océanique.

La place est caractérisée par la présence des espaces verts avec de grands arbres le long du périmètre et une fontaine circulaire au centre. L'espace piéton utilise du béton gris comme sol. Les bâtiments qui entourent la place sont de morphologie et des hauteurs différentes : de 2 étages à 12 étages (Figure III.1).

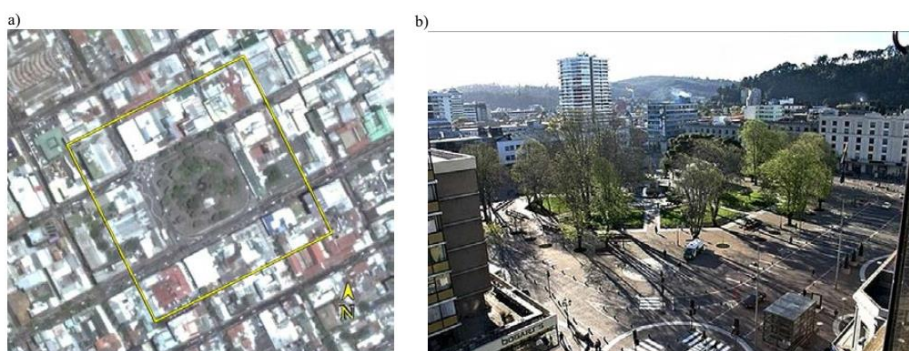


Figure III. 1 : La place de l'armas : a) Vue aérienne et b) photo de la place de l'armas
source : Irina Tumini et al. 2016.

Des simulations CFD ont été effectuées pendant une journée représentative en été, à 00h00 heure locale pendant 24h. Les résultats obtenus des simulations CDF présentent des températures plus basses en raison de la présence d'espaces verts, en particulier de grands arbres, qui assurent l'ombrage et l'atténuation de la température grâce à l'évapotranspiration. Alors que les rues, avec des matériaux de surface noirs, montrent des températures plus élevées en raison du stockage de chaleur, plus importantes en été (Figure III. 2a).

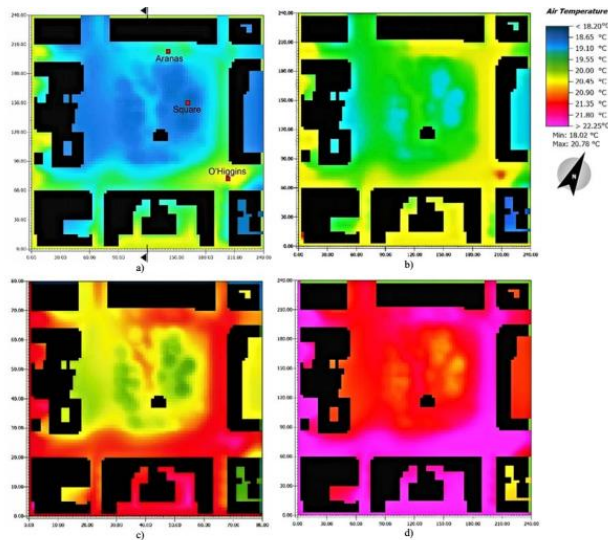


Figure III. 2 : Résultat de la simulation, carte de la température de l'air, vue horizontale a) état actuel, avec indication des trois stations et de la section verticale ; b) scénario 2020 ; c) scénario 2050 ; d) Scénario 2080. Source : Irina Tumini et al., 2016.

La comparaison de trois scénarios réalisés montre l'augmentation de la température. Les résultats des simulations montrent une augmentation de la température moyenne autour de 1,02 ° C, 1,60 ° C et 2,70 ° C pour les scénarios 2020, 2050 et 2080, respectivement. La réduction moyenne de l'humidité relative est égale à 0,91%, 2,89% et 4,11% pour 2020, 2050 et 2080, respectivement.

Le changement le plus important se produit dans le canyon urbain : en comparant les conditions actuelles et le scénario 2080, la différence de température est d'environ 3 ° C au niveau du sol et de 3,30-3,45 ° C jusqu'au niveau du toit (15m). Cela indique qu'en plus de l'augmentation de la température, l'environnement bâti produit un effet de stockage de chaleur, amplifiant ainsi les conditions défavorables dans les zones urbaines.

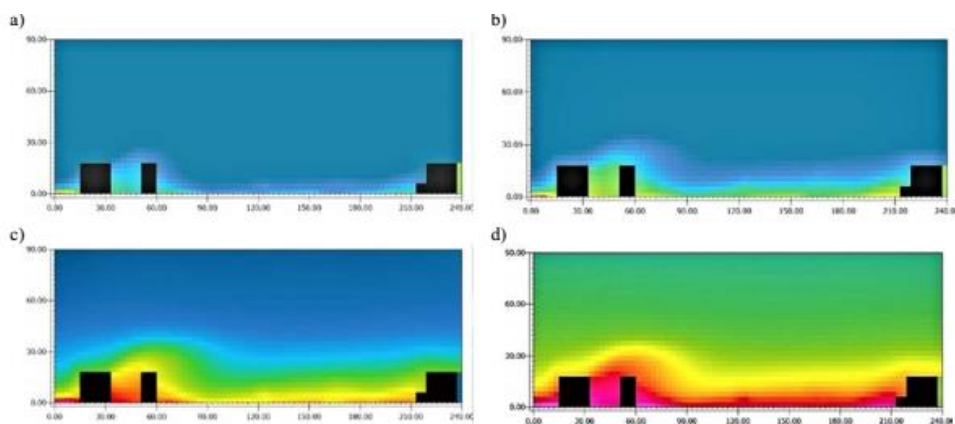


Figure III. 3 : Carte de la température de l'air, vue en coupe verticale (a) état actuel ; b) scénario 2020 ; Scénario 2050 ; (d) Scénario 2080. Source : Irina Tumini et al., 2016.

Les résultats de la simulation mettent en évidence l'effet d'atténuation produit par les espaces verts : la différence de température entre les espaces verts (la place) et la rue (O'Higgins) dans chaque scénario est d'environ -2°C à 14 heures, (Température max.) et environ $+1^{\circ}\text{C}$ à 5 heures du matin (température min.).

II.1.2. étude de Pattaranan Takkanon, 2016

Cette recherche a étudié l'effet des rapports hauteur / largeur (H / W) du canyon de rue sur les intensités urbaines dans différentes zones de Bangkok.

Bangkok est située à $13,44^{\circ}$ de latitude. C'est dans la région centrale de la Thaïlande couvrant une superficie totale de $1\,568,74\text{ km}^2$. La ville compte environ 5,7 million habitants et un 2,6 millions d'habitants (en 2010).

L'étude a été divisée en 3 étapes. Premièrement, il s'agissait de trouver des rapports H/W de diverses zones à Bangkok. Deuxièmement, il s'agissait de réaliser une mesure sur le terrain pour étudier les conditions d'îlot de chaleur urbain (UHI) par rapport aux rapports H/W des zones sélectionnées. Et enfin, il s'agissait de trouver une relation entre les ratios H/W et l'intensité UHI de Bangkok.

Il y a six zones urbaines sélectionnées comme représentatives des densités moyennes et élevées, du trafic moyen et élevé, ainsi qu'une gamme de températures de surface basses à élevées. Les conditions UHI de chaque zone ont été observées.

Les rapports H / W moyens ont ensuite été calculés en utilisant des hauteurs de bâtiment ajustées divisées par des largeurs de route pondérées. Les rapports pondérés H / W ont ensuite été liés aux températures de l'air à partir de la mesure sur le terrain pour trouver leur relation avec l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (tableau III.1).

Number	Area	H/W Ratio	
		Main road	Side road
1	Sala Daeng	0.95	0.81
2	Sam Yan	0.45	0.74
3	Asoke	0.61	0.91
4	Bang Chak	0.24	0.25
5	Don Mueang	0.06	0.47
6	Kasetsart University	0.09	0.29

Tableau III. 1: Rapports H / W de chaque zone. Source Pattaranan T., 2016.

Les températures minimales ont été trouvées à Don Mueang et Bang Chak pendant les saisons humides et fraîches, respectivement. Les températures maximales ont été trouvées à Sam Yan pendant la saison des pluies tandis que Don Mueang a donné les températures moyennes les plus élevées pendant la saison fraîche.

District	Average Temperatures (°C)		
	1-Jul-15	5-Nov-15	25-Dec-15
Sala Daeng (Main road)	31.93	30.46	29.87
Sala Daeng (Side road)	31.52	30.08	29.49
Sam Yan (Main road)	32.09	30.49	29.97
Sam Yan (Side road)	31.73	30.19	29.51
Asoke (Main road)	31.67	30.99	29.20
Asoke (Side road)	31.93	30.65	29.47
Bang Chak (Main road)	31.19	30.46	29.84
Bang Chak (Side road)	30.98	28.77	28.64
Don Mueang (Main road)	30.83	30.83	29.61
Don Mueang (Side road)	30.17	31.21	31.49
Kasetsart University (Main road)	30.55	29.70	29.92
Kasetsart University (Side road)	30.92	30.16	29.57
Min	30.17	28.77	28.64
Max	32.09	31.21	31.49

Tableau III. 2: Températures moyennes de l'air des zones étudiées. Source Pattaranan T., 2016.

Les températures maximales et minimales ont également été prises en compte dans une analyse plus approfondie pour trouver la relation entre les rapports H / W et l'intensité UHI. Pour chaque mesure, une intensité d'îlot de chaleur est égale à la différence de température des zones urbaines et rurales.

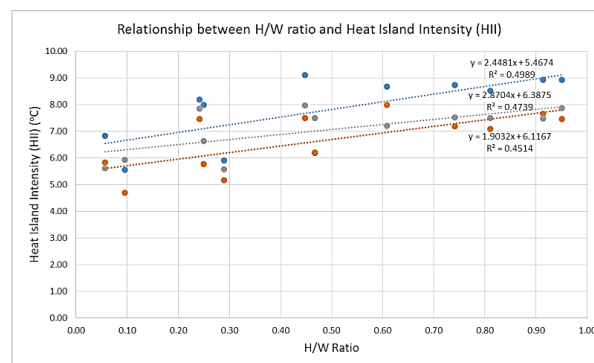


Figure III. 4 : Relation entre les rapports H / W et les intensités des îlots de chaleur Source Pattaranan T., 2016.

Il a été constaté que seulement 45,14% à 49,89% de la variation des intensités des îlots de chaleur peuvent s'expliquer par le rapport H / W moyen. Par conclusion, les rapports H / W ont certains effets sur l'intensité des îlots de chaleur urbains nocturnes de Bangkok. D'autres paramètres tels que la végétation, les plans d'eau, l'orientation et la taille de la ville devraient être intégrés dans les études futures.

II.2. Etudes sur la géométrie de l'espace public urbain

II.2.1. Etude de Samira Bouketta et Al. 2014

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence l'impact de la géométrie urbaine sur le confort et la qualité des conditions thermiques et aérauliques dans les espaces extérieurs de la ville de Jijel (Algérie). Durant la période estivale, une étude a été menée sur le terrain, impliquant la prise de mesures directes de la température de l'air, de l'humidité relative et de la vitesse du vent dans deux quartiers résidentiels collectifs.

Situé dans le centre-ville historique de Jijel, le premier cas se distingue par sa configuration en forme d'enclos (U) qui crée un espace central clos avec une végétation assez dense. Le deuxième cas se situe sur les hauteurs sud de la ville de Jijel, à une altitude de 101 mètres et à environ 3 km de la mer, il se distingue par son manque d'aménagements extérieurs, avec une prédominance d'asphalte et de béton au détriment des espaces verts.

En utilisant le logiciel ENVI-met 3.1, la simulation numérique a révélé que la disposition des bâtiments et son organisation sur le plan urbain ont une influence sur la circulation du vent. Ces zones ont enregistré des valeurs significativement plus élevées, que ce soit en termes de température de l'air, d'humidité relative ou de vitesse du vent.

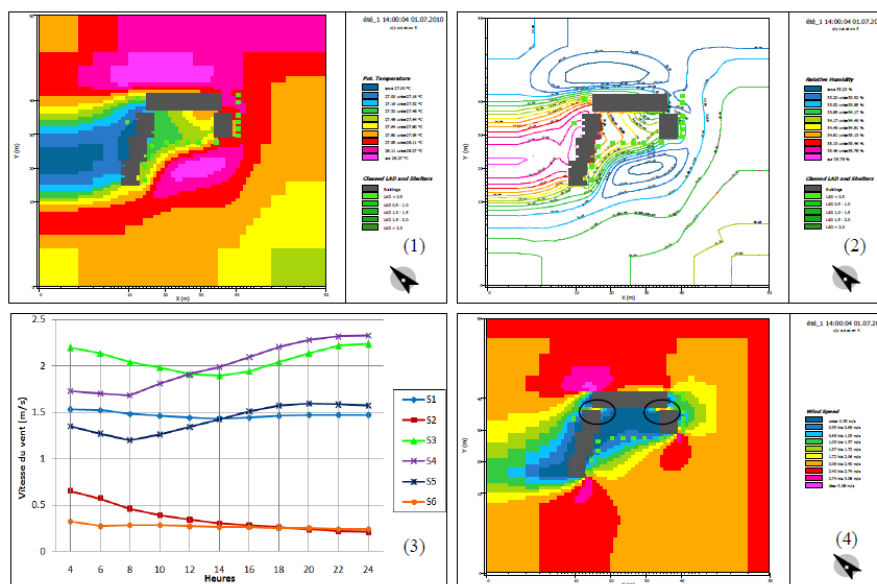


Figure III. 5 : (1) Les valeurs de températures de l'air à 14h, (2) les taux d'humidité, (03) et (04) vitesses du vent ; au cours d'une journée d'été. Source : Bouketta S. et Al., 2014

II.2.2. Etude de Shahab Kariminia et Al. 2015

Cette étude vise à chercher comment la géométrie d'une place urbaine affecte les conditions thermiques et quel est l'influence de l'environnement bâti à l'intérieur de cette place. Des simulations numériques ont été effectuées avec des mesures physiques sur une place urbaine pendant les périodes les plus chaudes de l'été à Ispahan, en Iran.

La place est flanquée de longs bâtiments de deux étages à faible élévation, à l'exception des espaces créés par deux rues à l'est et à l'ouest. Il y a deux fines lignes de petits arbustes à feuilles persistantes le long des côtés de la place. Une piscine, des fontaines et des bancs de pierre sont situés au centre de la place. La surface du sol est principalement pavée de pierre et d'herbe tandis qu'une petite partie seulement est recouverte d'asphalte.

Le premier scénario a pris en compte l'orientation de la place correspondant à l'orientation de l'axe longitudinal. On peut noter que la longueur de la place est plus de trois fois plus longue que sa largeur. La place est en réalité orienté -15° Nord /ouest-Sud/Est. La place orienté Est-ouest présente l'inconfort thermique le plus faible par rapport aux autres orientations, bien que la différence ne dépasse pas $1,5^\circ\text{C}$. De ce fait, le confort thermique au centre de la place n'est pas fortement affecté par l'orientation de son axe.

Le deuxième scénario s'est concentré sur la dépendance des situations microclimatiques de la place à son rapport H/W. Le rapport réel en largeur de la place est de 0,1 et il a été comparé au rapport de 0,2 et 0,3. L'écart le plus faible de la température moyenne radiante est observé à 17h00 lorsque la zone centrale de la place est protégée des rayonnements directs dans le modèle le plus profond.

Dans le troisième scénario, une place orienté Est-Ouest a été comparé au modèle réel (-15° Nord-Ouest/Sud-Est), tous les deux avec des rapports d'aspect de 0,1 et 0,3. L'orientation joue un rôle de modification plus important que le rapport d'aspect (Figure 6a). La place orientée -15° H/W=0.3 enregistre une basse température radiante au point central alors que la place Est -Ouest connaît une T_{mrt} supérieure à 55°C . En d'autres termes, l'orientation accentue visiblement l'effet positif du rapport d'aspect. Cependant, le soir, après 16h00, l'effet du rapport H/W fonctionne fortement lorsque le profil avec H/W = 0,3 subit la moindre contrainte thermique pour les deux orientations.

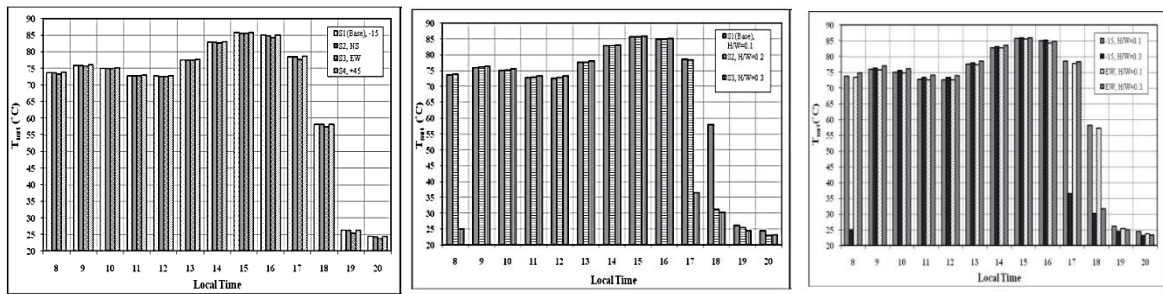


Figure III. 6 : Cours quotidien de température moyenne radiante (T_{mrt}) dans la zone médiane de la place : a) liés à l'orientation, b) affectée par le rapport H/W, c) affectée par l'orientation et le rapport H/W. Source : Shahab Kariminia et Al. 2015

II.3. Etude sur l'amélioration des conditions microclimatique

II.3.1. Etude de Niki Gaitani et al., 2011

Cette étude vise à développer un plan urbain intégré impliquant plusieurs techniques de modification microclimatique dans une zone ouverte majeure située dans une zone densément bâtie et peuplée du centre d'Athènes (place Messolongiou). Quatre techniques spécifiques d'amélioration du microclimat sont proposées : l'utilisation de matériaux frais dans les trottoirs, espaces verts, ombrage étendu et terre à échangeurs de chaleur à air. L'ensemble du plan a été évalué et optimisé grâce à l'utilisation de techniques de dynamique des écoulements informatisées.

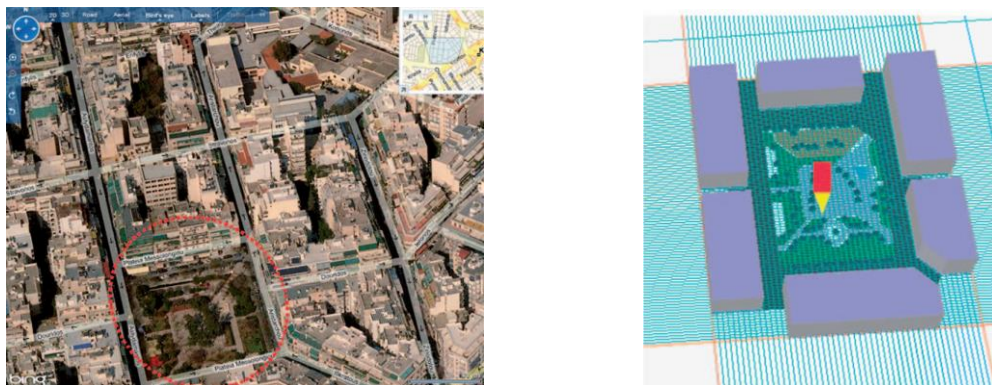


Figure III. 7 : Place Messolongiou (a) Image satellite de la zone en cours de réhabilitation, (b) Géométrie et domaine de calcul de la zone simulée. Source : Niki Gaitani et al., 2011

La place Messolongiou a été surveillée en mars 2009 sur plusieurs jours pendant heures de jour. Les principaux objectifs étaient d'identifier et analyser les caractéristiques climatiques de la région et recueillir des données sur le terrain pour la validation du modèle.

Les températures de surfaces pour l'espace ouvert et autour des bâtiments environnants ont été calculées à l'aide de TRNSYS.

Les résultats des exercices de surveillance et de simulation ont clairement montré que les conditions climatiques dans la zone considérée doivent être améliorées. A travers la simulation le chercheur a essayé de surmonter les problèmes identifiés par un plan de rénovation complet a été décidé impliquant les interventions suivantes :

- Utilisation de chaussées fraîches dans toute la zone.
- Utilisation de vert et d'ombrage dans la zone ouverte : des pergolas ombragées par des plantes grimpantes et des surfaces recouvertes d'herbe ont été conçu dans la partie ouest et est de la place où des températures plus élevées ont été observées.
- Utilisation d'échangeurs de chaleur terre-air le long et à travers la zone considérée pour diminuer les températures ambiantes et augmenter la vitesse de l'air dans les parties sous le vent. L'air ambiant circule à travers six tuyaux enfouis à une profondeur de 3 m. Chaque tuyau enterré est sélectionné pour avoir une longueur de 30 m et un diamètre de 20 cm. Les tuyaux sont en PVC et sont placés dans une couche épaisse de sable pour améliorer le transfert de chaleur entre le sol et le tuyau. Des ventilateurs sont utilisés à l'entrée de chaque tuyau pour faire circuler l'air à travers les tuyaux avec une vitesse proche de 7 m / s.

Les résultats de simulation sont montrés dans la figure suivante :

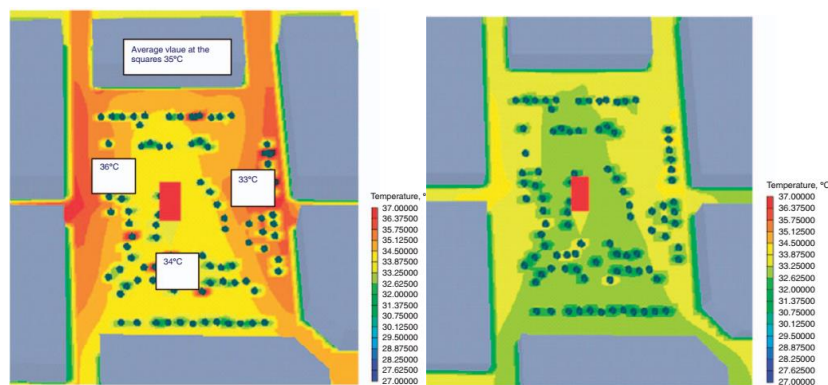


Figure III. 8 : *Température de l'air à 1,5 m de hauteur de la zone simulée pour des conditions d'heure d'été représentatives avant et après tenir compte des techniques d'amélioration du microclimat proposées. Source : Niki Gaitani et al., 2011*

Comme indiqué dans la figure 4, les températures ambiantes varient entre 32°C et 34°C, avec une moyenne valeur proche de 32,6°C. Cela correspond à une baisse de température d'environ 1 à 2° C par rapport à la situation actuelle. De plus, l'homogénéité spatiale de la température a été améliorée la plage entre les températures locales minimales et maximales sont passées de 3 à 2° C

II.3.2. Etude de Mirela Robitu, M. Musy, Christian Inard, D. Groleau, 2006:

Le modèle numérique présenté dans cette étude est basé sur le couplage du modèle de rayonnement avec la conduction thermique et le modèle de flux d'air. Les modèles de rayonnement et thermique, implémentés dans le logiciel SOLENE, utilisent des maillages de surface ; le modèle de flux d'air, implémenté dans FLUENT, utilise une grille de volume. Des simulations ont été effectuées pour une journée d'été chaude et ensoleillée, le 15 juillet, pour la place Fleuriot à Nantes, en France (47 ° de latitude nord).

C'est un espace minéral ouvert avec un étang d'eau et des magnolias (Figure III. 9). La température de l'air variait de 21°C à 32°C, l'humidité relative était réglée à 55% et un modèle de vent sud, conditions de vent obliques (2 m s⁻¹ à 10 m au-dessus du sol) a été utilisé. Les arbres sont censés être suffisamment approvisionnés en eau. Deux cas ont été enquêtés : Fleuriot Square sans aucun étang de végétation et d'eau, et le réel cas avec des arbres et un étang d'eau.

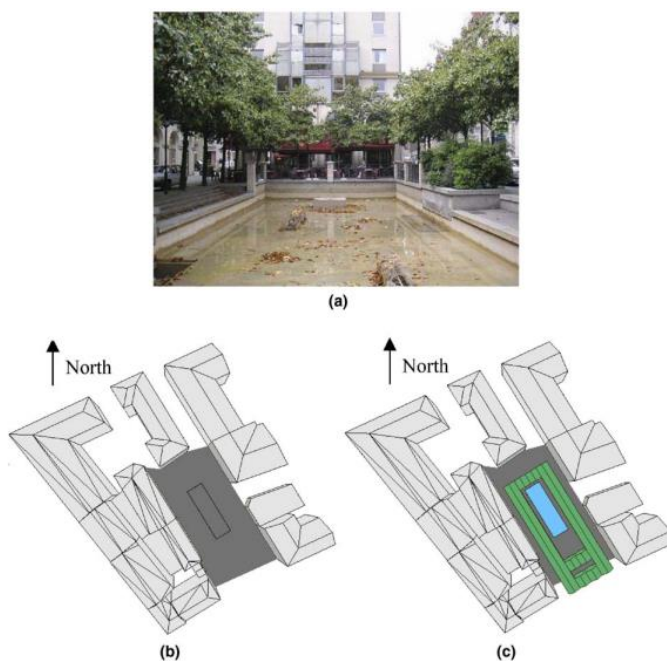


Figure III. 9 : Place Fleuriot (a) vue générale, (b) vide, (c) avec arbre et étang d'eau (cas réel). Source : Mirela Robitu et al., 2006

Les deux cas de simulation ont été réalisés de 8 h à 16 h. Les résultats de simulation correspondant à trois points du Fleuriot sont analysés. Les emplacements de ces points sont

indiqués sur la figure 7, où les points sont : P1, sur le mur du bâtiment ; P2, au sol, sous la cime de l'arbre ; et P3, au sol.

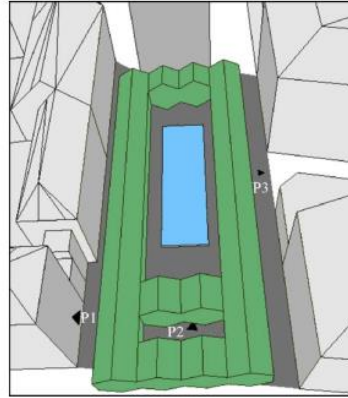


Figure III. 10: Positionnement des points. Source : Mirela Robitu et al., 2006

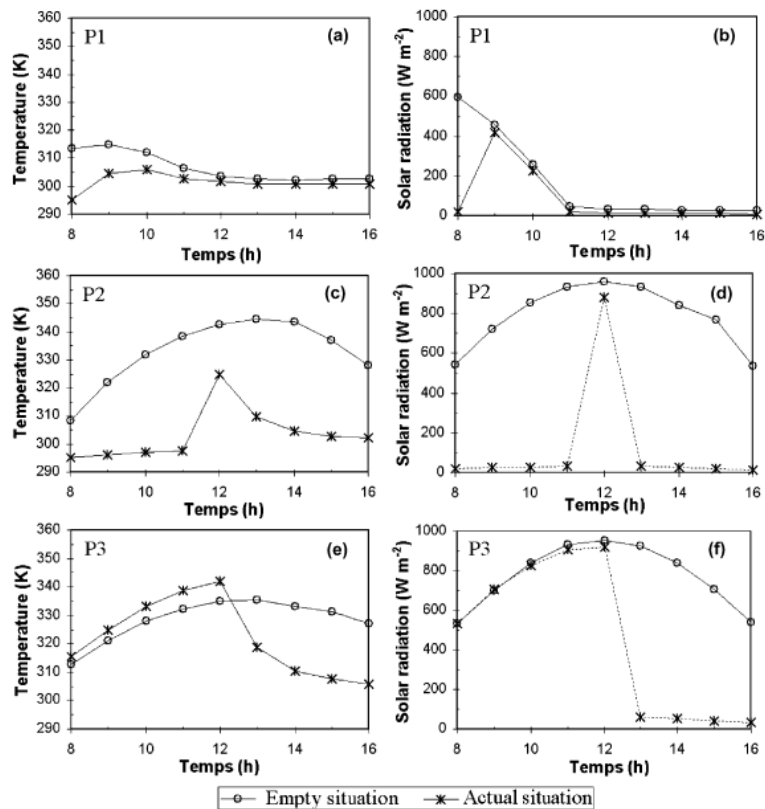


Figure III. 11 : Température de surface et rayonnement solaire dans la place Fleuriot : cas vide (Empty situation) et actuel (actual situation). Source : Mirela Robitu et al., 2006

Les résultats montrent l'effet des arbres sur la réduction du rayonnement solaire incident sur la surface et la température de surface. Une différence de température maximale est obtenue en P2 à 11 h pour une réduction de 96,5% du rayonnement solaire dû aux arbres.

La différence de température négative entre la place vide et la place réelle est obtenue jusqu'à midi lorsqu'une diminution importante du rayonnement solaire est enregistrée ; cela peut s'expliquer par un flux convectif important résultant de l'apparition du flux d'air dans la situation vide (Figure III.12).

Les résultats des vitesses d'air calculés à 1,5 m du niveau du sol pour les deux études de cas (la place de Fleuriot réel et vide) autour des bâtiments montrent une augmentation des vitesses sur le côté droit de la place et un effet de flux de canalisation dans les rues. Un tourbillon vertical et un tourbillon en spirale sont respectivement obtenus pour les cas vides et réels.

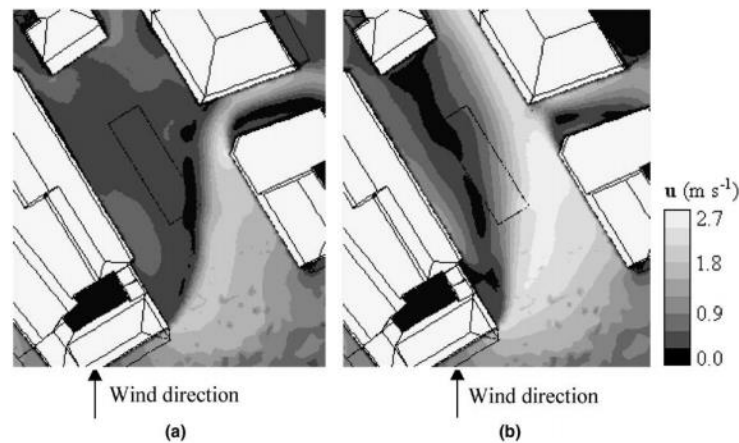


Figure III. 12 : Vitesse du vent sur la place Fleuriot à 12h $z = 1,5\text{m}$ (a) situation vide, (b) situation réelle. Source : Mirela Robitu et al., 2006

II.3.3. Etude de M. Santamouris et al., 2012

Le présent article se concentre et traite de l'évaluation des avantages thermiques découlant de l'utilisation des matériaux de pavage frais. (Près de 4500 m^2 de chaussées existantes dans le parc de Flisvos ont été remplacées par de nouveaux matériaux frais, présentant une réflectivité élevée au rayonnement solaire.)

Le parc urbain de Flisvos est une zone côtière située dans la partie sud-ouest d'Athènes, dans la municipalité de Paleo Faliro, Le climat de la région pendant l'été est déterminé par la chaleur transférée par les vents du nord.



Figure III. 13 : Vue satellite du parc Flisvos à Athènes. Source : Santamouris M. et al., 2012

La méthodologie comporte cinq étapes distinctes.

Étape 1. Suivi de la situation initiale

Étape 2. Développement d'un modèle de calcul pour la situation initiale

Un modèle thermique de la zone a été créé à l'aide de techniques CFD et des simulations ont été réalisées en utilisant les conditions aux limites mesurées lors de l'étape précédente.

Étape 3. Suivi de la situation finale

Étape 4. Développement d'un modèle de calcul pour la situation finale

Étape 5. Comparaisons théoriques pour une journée d'été typique

La variation temporelle de la température ambiante à 3,5 m de hauteur, telle que mesurée le 27 juillet, est donnée à la figure III.14. Comme prévu, des températures plus basses ont été mesurées près du front de mer (26°C et 28.2°C), tandis que les températures dans la partie intérieure du parc variaient entre $26,5^{\circ}\text{C}$ et $29,5^{\circ}\text{C}$. L'évolution de la température dans la partie intérieure du parc n'était pas uniforme au cours de la journée en raison des forts vents de mer affectant principalement la partie sud non protégée de la zone. Le gradient spatial maximal de température dans le parc était proche de $1,5^{\circ}\text{C}$.

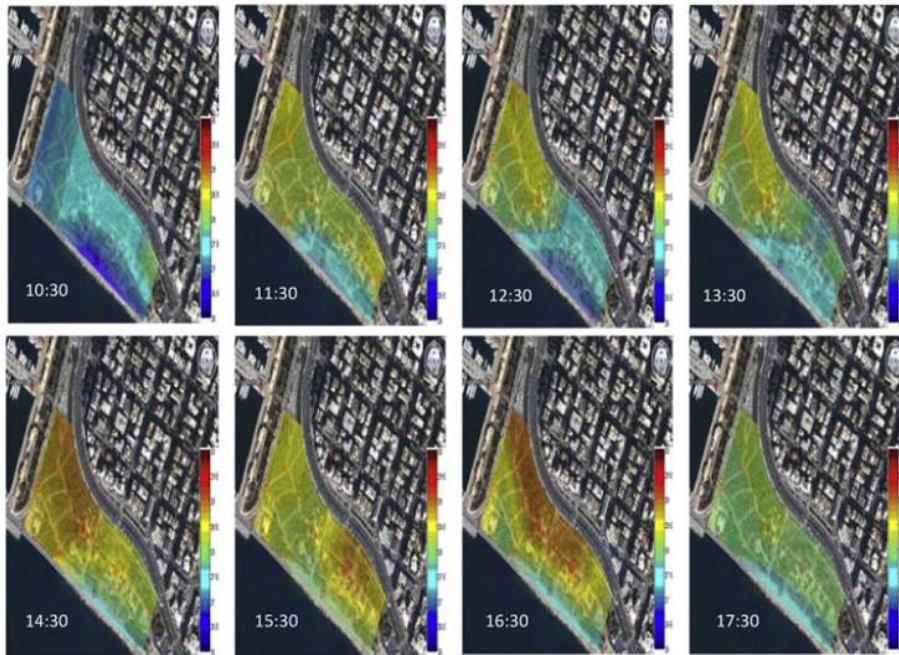


Figure III. 14 : Distribution spatiale de la température ambiante mesurée à 3. 5 m de hauteur pour le 4 août. Source : Santamouris M. et al., 2012

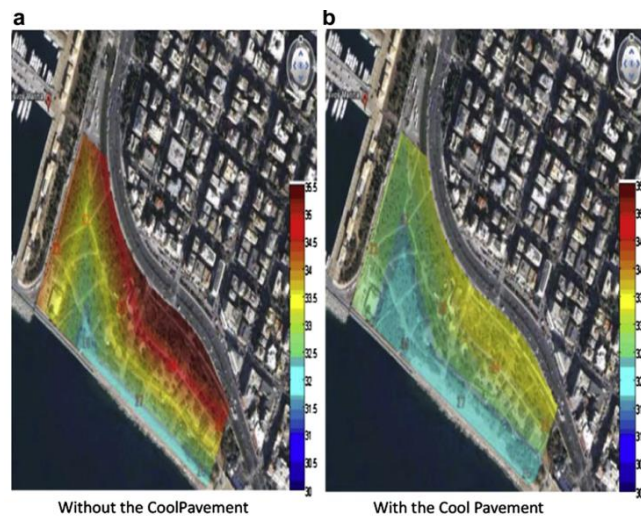


Figure III. 15 : Répartition spatiale de la température ambiante dans le parc pendant une journée d'été typique, (a) sans les trottoirs frais, et (b) avec les trottoirs frais. Source : Santamouris M. et al., 2012

Il a été constaté que l'utilisation de matériaux de pavage frais participe à la réduction de la température ambiante de pointe pendant une journée d'été typique, jusqu'à 1,9°C. Dans le même temps, la température de surface dans le parc a diminué de 12°C, tandis que les conditions de confort se sont considérablement améliorées. Les résultats indiquent que l'adoption de revêtements de sol réfléchissants est une approche extrêmement efficace pour atténuer les conditions thermiques dans les environnements urbains.

III. Modélisation numérique appliqué au microclimat urbain

Les logiciels de simulation permettent d'envisager la modélisation numérique des transferts thermiques dans les environnements urbains. Pour la climatologie urbaine à l'échelle de la canopée, deux méthodes distinctes sont utilisées pour prendre en compte la surface urbaine dans les modèles de simulation numérique. (Benzerzour M., 2004), soit : par discrétisation spatiale ou par paramétrisation.

III.1. Modélisations par discrétisation spatiale : Cette approche est généralement utilisée à des échelles spatiales restreintes qui se rapprochent davantage de l'échelle microclimatique que de l'échelle climatique locale. Ces modèles prennent en compte la dimension tridimensionnelle des espaces urbains en considérant la configuration et les hauteurs réelles des structures et des bâtiments. Ensuite, une grille fine est appliquée aux surfaces et aux éléments de la canopée urbaine afin d'analyser la propagation des phénomènes physiques d'une maille à l'autre (Benzerzour M., 2004).

III.1.1. ENVI-met (Environmental Meteorology)

III.1.1.1. Présentation :

Le logiciel ENVI-met (Environmental Meteorology) a été développé par Michael Bruse au sein du Groupe de Recherche en climatologie (GRC) du département de géographie de l'université de Bochum en Allemagne. Ce modèle permet de simuler les interactions entre différentes surfaces urbaines, la végétation et l'atmosphère, et offre ainsi la possibilité d'analyser l'impact des modifications à petite échelle de l'environnement urbain sur le microclimat, telles que la présence d'arbres ou de cours intérieures végétalisées (Colombert M. 2008).

L'interface utilisée pour configurer les paramètres de simulation, tels que le pas de temps, la disposition des bâtiments, leur hauteur, le type de végétation, les sources de pollution, etc., est conviviale et facile à utiliser (figure III.16). Elle permet de visualiser en deux dimensions la zone urbaine à modéliser. La simulation peut être effectuée sur un ordinateur de bureau et sa durée varie de quelques heures à quelques jours en fonction de la complexité de la modélisation. Par la suite, un outil de visualisation (LEONARDO) permet d'afficher les résultats de la simulation en 2D et en 3D (Colombert M. 2008).

Ce modèle est disponible gratuitement et accompagné de instructions détaillées (en anglais) sur son fonctionnement et son utilisation, accessibles sur le site web : www.envi-met.com/. Une communauté d'utilisateurs existe déjà, et plusieurs exemples d'applications d'ENVI-met sont disponibles.

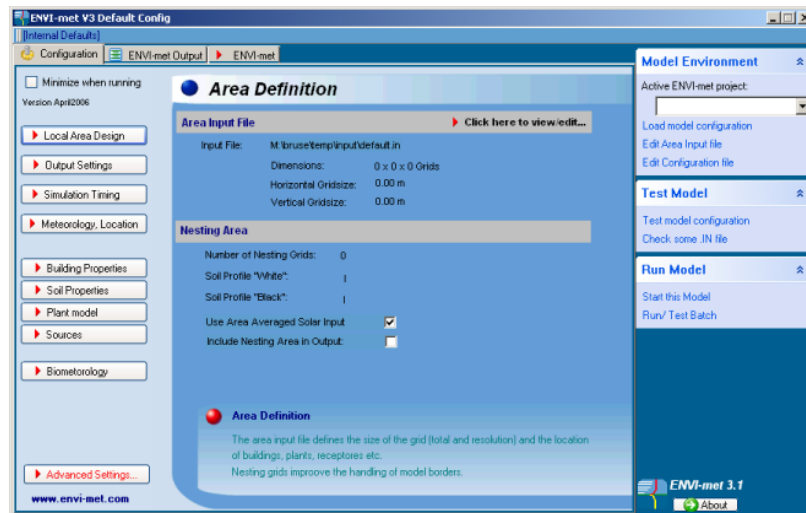


Figure III. 16 : Interface du logiciel de simulation, source : ENVI-met <https://envi-met.info>

III.1.1.2 Échelle d'application

ENVI-met est un modèle tridimensionnel de microclimat qui repose sur les principes fondamentaux de la dynamique des fluides et de la thermodynamique. Il permet de simuler les interactions entre les différents composants d'un environnement urbain, tels que la végétation, l'air et les surfaces urbaines variées (Urişescu, B. et al., 2019). Le modèle permet de modéliser des scènes urbaines avec une résolution spatiale ajustable de 0,5m à 10m, dans une grille pouvant atteindre 250 x 250, et une résolution temporelle minimale de 5 secondes.

Le modèle ENVI-met est composé de quatre principaux systèmes : sol, végétation, atmosphère et bâtiment.

- ENVI-met permet de modéliser différents profils de sol et différentes surfaces en utilisant des sols naturels ou des matériaux artificiels pour chaque cellule/pixel de la grille. La température de surface du sol est calculée à partir du flux radiatif net.
- le logiciel permet la modélisation en 3 dimensions des arbres de différentes formes et de différentes distributions spatiales des feuilles. Chaque cellule de la grille de végétations a sa propre énergie et son bilan de masse.
- Les éléments clés requis pour effectuer une simulation ENVI-met comprennent : les données météorologiques, les profils initiaux d'humidité et de température du sol, les caractéristiques et les propriétés des surfaces du sol, de la végétation et des bâtiments.

Elmira Jamei et al., 2017 étudient l'effet de deux configurations urbaines sur la variation de la température de l'air à Malacca, située dans la partie sud-ouest de la péninsule malaise. Il a utilisé le système de modélisation microclimatique tridimensionnel ENVI-met (version 3.1) pour simuler la variation de la température de l'air en été dans le cadre urbain typique d'un site patrimonial et d'une zone urbaine contemporaine. On a constaté que le rapport d'aspect avait une influence considérable sur la distribution de la température de l'air dans les deux zones. Les températures diurnes de l'air ont diminué avec l'augmentation du rapport d'aspect. Les résultats de la simulation ont montré que pendant la journée, le site patrimonial (rapport d'aspect de 2,6) était plus chaud que la zone urbaine contemporaine (valeur moyenne de $H/W = 1,6$), et que le refroidissement se produisait plus rapidement dans cette dernière.

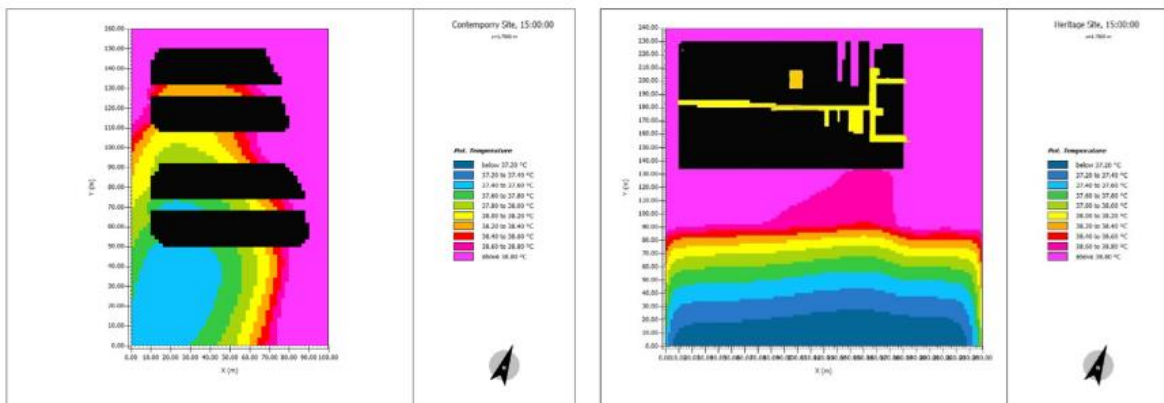


Figure III. 17 : Variation de température en site patrimonial (à droite) et en zone urbaine contemporaine (à gauche), la hauteur au-dessus du sol : 1,7 m à 15h00. (E. Jamei et al., 2017)

Dans une autre étude de Urişescu, B. et al., 2019; ont utilisé le logiciel ENVI met pour mettre en valeur l'environnement thermique local. L'analyse des données satellitaires a mis en évidence des valeurs plus élevées de la température de la surface terrestre dans les quartiers construits après 1977 par rapport à ceux construits avant cette année. Les résultats de la simulation mettent en évidence les différences d'ambiance thermique entre les deux catégories analysées, des valeurs plus faibles des températures de l'air et de surface pour les quartiers construits avant 1977.

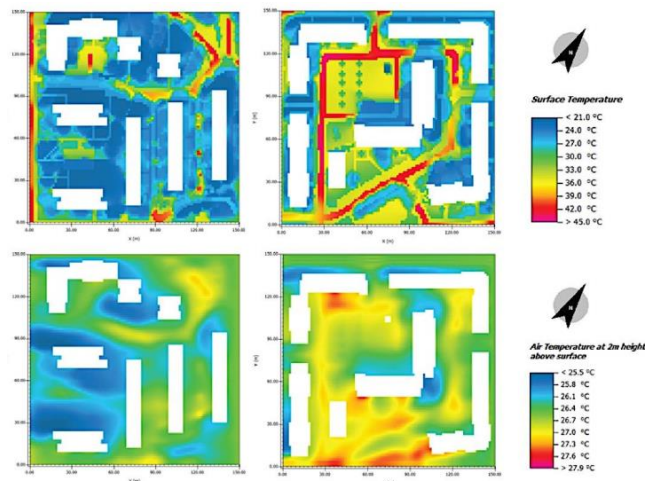


Figure III. 18 : Température de la surface du sol et température de l'air pour 12h00, Berceni (à gauche) et Berceni-Sud (à droite), en haut - les zones numérisées, au milieu - la température de la surface du sol, en bas - la température de l'air à 2 m de hauteur (Urișesc)

III.1.2. LE MODELE THERMO-RADIATIF « SOLENE »

III.1.2.1 Présentation :

Le modèle de simulation thermoradiatif SOLENE est un logiciel développé par le laboratoire CERMA (Centre de recherche méthodologique d'architecture) à Nantes à la suite de recherches sur les paramètres solaires, lumineux et radiatifs des projets architecturaux et urbains (Colombert M. 2008). Ce logiciel utilise un modèle 3D des volumes construits et intègre plusieurs modules de calcul pour tenir compte des aspects solaires, lumineux et thermiques dans les espaces urbains.

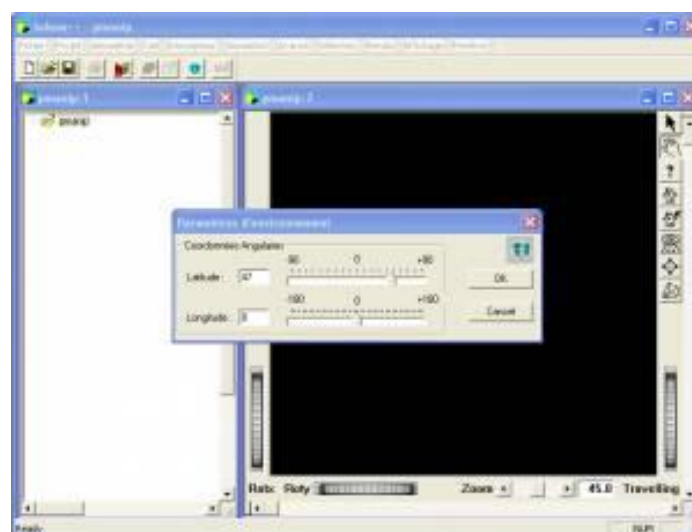


Figure III. 19 : interface du logiciel de simulation SOLENE, source : <https://groupes.renater.fr>

Solène est structuré autour de quelques objets interconnectés : le projet, les géométries, les ciels, les descripteurs et les matériaux, comme décrit par GROLEAU D. (2001). La géométrie de la scène à simuler peut être créée directement à l'aide de l'interface graphique du logiciel, ou importée à partir de logiciels de dessin assisté par ordinateur (DAO) tels qu'Autocad, Gambit ou SketchUp (Athamena, 2009).

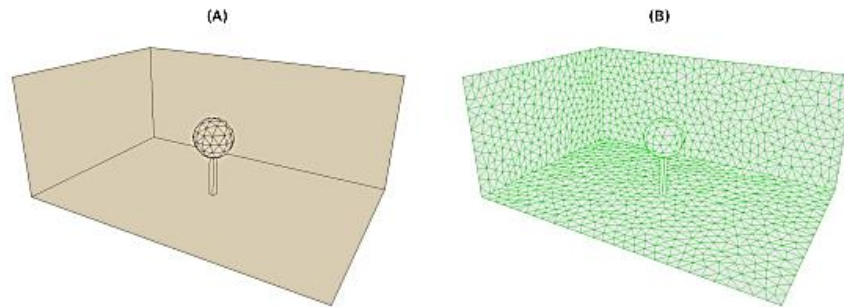


Figure III. 20 : *Modèle géométrique d'un arbre au centre d'une cour ouverte (A) et discrétisation de la géométrie en faces triangulaires (B) (BOUYER Julien, 2009)*

III.1.2.2 Échelle d'application

Solène-microclimat offre la possibilité de simuler le bilan radiatif, la circulation de l'air ainsi que les échanges convectifs et thermiques à l'échelle d'un quartier, permettant ainsi d'évaluer l'impact de cet environnement sur le confort extérieur et la consommation énergétique des bâtiments. L'échelle spatiale choisie peut être celle d'un bâtiment, d'une rue, d'un petit groupe de rues et de bâtiments (fragment urbain), voire même d'un quartier (BOUYER Julien, 2009).

Solène-microclimat présente l'avantage notable de pouvoir traiter des géométries urbaines réalistes, au lieu de se limiter à des formes prédéfinies dans une grille. De plus, la prise en compte de l'inertie thermique des surfaces constitue un autre point fort de ce modèle.

Le modèle offre la possibilité de simuler les grandeurs et phénomènes suivants (Athamena, 2009) :

- Le potentiel solaire des surfaces des bâtiments et leur luminosité.
- Le facteur de vue du ciel (SVF)
- L'ensoleillement en termes de trajectoire des ombres et de durée.
- Les différentes composantes du rayonnement solaire (flux direct et diffus incident), flux infrarouge, interrélflexions.
- Le facteur de forme.
- La température surfacique.

L'aspect thermique concerne l'analyse des températures des surfaces de l'enveloppe des bâtiments ; elles résultent des différents échanges produits au niveau de la surface externe avec l'air, le ciel, l'intérieur des murs et les autres surfaces environnantes. L'algorithme de calcul de la température de surface est basé sur une évaluation du bilan thermique appliqué aux différentes mailles du modèle géométrique représentant les espaces construits. Cette évaluation dépend donc de l'espace et du temps. Le modèle géométrique est composé de facettes planes formées par des polygones, qui représentent les surfaces extérieures des bâtiments, les toits, les façades, et le sol des cours intérieures et des rues. Le modèle géométrique est associé pour chaque surface à un modèle de matériau dont les propriétés physiques (albédo, émissivité...) sont fixées. Une application récente du modèle sur un îlot situé dans le centre de Marseille a permis de valider la pertinence du modèle quant aux aspects thermo-radiatifs.

Solene n'intègre pas encore les bilans hydriques qui relèvent comme on l'a vu dans les ajustements des villes anciennes de transformations majeures de la surface urbaine

III.2. Modélisations par paramétrisation : C'est une méthode qui peut s'appliquer à l'échelle climatique locale et à l'échelle Méso. Dans ces modèles, il s'agit de réduire la complexité morphologique de la surface urbaine à un certain nombre de paramètres représentatifs de l'influence de cette dernière sur les échanges sol-atmosphère. Ce sont donc des modèles qui donnent une évaluation globale et non discrétisée de la canopée.

III.2. 1. modèle Town Energy Balance (TEB)

III.2. 1. 1 Présentation :

TEB est un modèle développé pour ajouter une représentation de la ville dans les modèles météorologiques dans le but d'améliorer les prévisions dans les agglomérations. Jusqu'à son premier développement en 2000, la modélisation de ville était faite à partir d'une simple modification d'un modèle végétation/atmosphère, en remplaçant une surface naturelle par du sol nu ou du béton. (LE BRAS Julien, 2015)

III.2. 1. 2 Échelle d'application

TEB est un modèle conçu pour les études couplant microclimat urbain et ville, depuis l'échelle du quartier jusqu'à celle de l'agglomération urbaine. Son échelle d'application et les nombreux processus pris en compte, notamment ceux liés à la végétation urbaine et péri-urbaine jusqu'à l'échelle régionale, lui permettent à la fois d'être intégré à un modèle météo de prévision du temps (ce qui est

le cas à Météo-France), et de quantifier les effets des choix d'urbanisation comme stratégies d'adaptation au changement climatique.

Ce modèle décrit les échanges d'énergie et d'eau entre les diverses surfaces urbaines et l'atmosphère. Il prend en compte non seulement les spécificités du milieu bâti (ce que font aussi par exemple les modèles de thermique du bâtiment), mais aussi les interactions et rétroactions de celui-ci sur l'atmosphère. Les échanges sont reproduits en tenant compte des paramètres suivants :

- Évolution des températures des routes, toitures et murs.
- Flux solaires et infra-rouge, ombres, piégeage radiatif par la forme 3D.
- Flux convectifs sur les parois, mouvements turbulents de l'air.
- Jardins, effets d'ombrages, évaporation, ressource en eau.
- Photosynthèse, respiration des plantes et flux de CO₂ anthropiques.
- eau en surface et manteau neigeux (toits, rues, jardins) .
- Bilan interne des bâtiments, vitrages, ventilation, chauffage, climatisation.
- Toits végétalisés.
- Description du microclimat au-dessus de la rue et des toits.

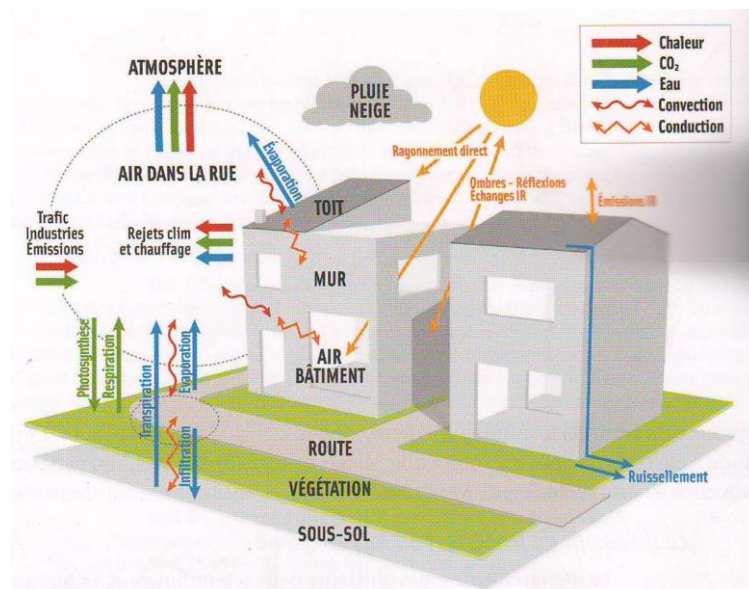


Figure III. 21 : Principes d'échanges eau/énergie - Modèle TEB (Town Energy Balance).
Source :TERRAIN Jean-Jacques(2015)

Le modèle de base suppose une grille de surface urbaine où les rues sont considérées comme étant infiniment longues, sans intersections, et où toutes les directions de rue ont la même probabilité. Les caractéristiques de la structure urbaine de chaque maille sont considérées comme homogènes, notamment la hauteur des bâtiments, le rapport d'aspect de la rue, ainsi que les propriétés radiatives

et thermiques des bâtiments. Malgré le caractère restrictif de ces hypothèses, elles sont appropriées pour des mailles d'une taille allant jusqu'à 200 mètres.

Le bilan d'énergie dans le modèle TEB, est basé sur une subdivision du canyon en trois composantes distinctes : le toit, les murs et la chaussée (Figure III. 22).

Les données requises par ce modèle comprennent des informations sur la géométrie, telles que la relation entre la hauteur des bâtiments et la largeur de la rue, ainsi que les caractéristiques des surfaces considérées, telles que l'albédo et l'émissivité, ainsi que les paramètres météorologiques (rayonnement solaire global, rayonnement atmosphérique, précipitations, pression, humidité spécifique, température, vitesse du vent).

Enfin. Il convient de préciser que TEB est issu du modèle ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere), qui est un schéma de surfaces naturelles végétalisées. Ce dernier calcule les bilans hydriques et énergétiques à la surface. Il complète TEB lors de certaines simulations en milieu urbain, comme lorsque des parcs urbains sont pris en compte.

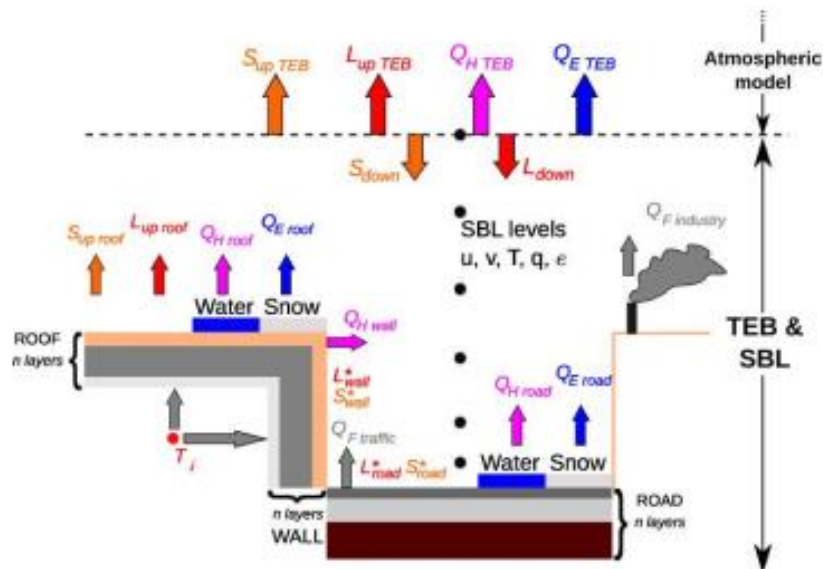


Figure III. 22: Explication de la physique de TEB et du modèle en rue canyon. Source : TERRAIN Jean-Jacques(2015)

Conclusion :

La micro climatologie urbaine est une discipline absolument nouvelle en plein essor, comme en témoigne le nombre croissant d'articles présentés lors des récents congrès. Elle implique une compréhension complexe des éléments constituant le bilan énergétique au niveau des surfaces, car des phénomènes localisés se produisent et les bilans doivent prendre en compte de nombreux paramètres qui sont étroitement interdépendants.

Dans ce chapitre on a présenté plusieurs recherches qui ont étudiés la forme urbaine et évalués ses impacts thermiques sur l'environnement. Certaines études ont analysé l'effet de l'îlot de chaleur urbain et le changement climatique (étude de Irina Tumini et Carlos rubio-Bellido, 2016, étude de Pattaranan Takkanon, 2016) ; autres études ont évalué l'influence de la géométrie de l'espace public urbain (Etude de Samira Bouketta et Al. 2014, étude de Shahab Kariminia et Al. 2015). et autres recherches ont étudié l'amélioration des conditions microclimatique (étude de Niki Gaitani et al., 201, étude de Mirela Robitu, M. Musy, Christian Inard, D. Groleau, 2006, étude de M. Santamouris et al., 2012)

Un grand nombre de modèles ont été créés dans le but de simuler les conditions thermiques dans les environnements extérieurs. Les modèles diffèrent principalement dans leur espace étendue (emplacement unique par rapport à grille 2D ou 3D), résolution spatiale et temporelle, intensité de calcul, exigences d'entrée, type de sortie mesures de la chaleur (par exemple, Température de l'air, Température moyenne radiante, indices de confort thermique) et calcul de conditions atmosphériques (empiriques ou basées sur la physique).

CHAPITRE IV : PRÉSENTATION DE CAS D'ÉTUDE ET PROCESSUS DE L'INVESTIGATION

INTRODUCTION :

Cette étude s'inscrit dans le domaine de la micro climatologie urbaine, plus précisément dans l'étude de la qualité thermique des espaces extérieurs urbains, en mettant l'accent sur les places publiques. On cherche à découvrir à travers l'étude de quatre places laquelle qui présente la bonne ou la mauvaise qualité en termes d'ambiance thermique tout en essayant à distinguer les conditions génératrices de cette qualité thermique ; de même on tente à trouver des solutions qui assurent des améliorations des caractéristiques microclimatiques dans les places.

Ce travail se base sur une étude comparative selon une méthode expérimentale, par l'acquisition des compagnes de mesures portées sur des échantillons des places situées dans la ville de Biskra qui sont choisis par leur représentativité. Les places concernées par cette étude sont : place El Horia, place Zwaka, place Iben Badis et celle de Dhalaa. La qualité thermique de ces espaces présente une importance capitale pour améliorer la qualité de vie en milieu urbain, en fonction de leur environnement physique inhérent.

Cette étude nécessite une analyse comparative des différents paramètres climatiques mesurés sur les différentes places. On utilise pour la prise de mesures un appareil de mesure portatif, en parcourant les points de mesure sélectionnés dans chaque place.

Les points de mesure sont sélectionnés sur la base de la variété des espaces trouvés dans chaque place (espace ensoleillé, espace ombragé, espace pavé, espace gazonné, ...)

Afin de préciser les résultats de l'étude expérimentale, la place offrant la meilleure qualité thermique sera soumise à une simulation à l'aide du logiciel Envi-Met.

I. Objectif de l'expérience

Cette étude a pour but général déterminer et évaluer les conditions microclimatiques dans les places, elle a aussi prévue pour les objectifs secondaires qui suivent :

- Déterminer la place qui présente la meilleure qualité thermique et saisir les conditions génératrices de cette dernière.
- Distinguer la places qui présent la mauvaise qualité thermique et voir comment on peut améliorer ses conditions microclimatiques.

II. Présentation du contexte d'étude

Comme toutes les villes sahariennes, la ville de Biskra se caractérise par un climat chaud et sec, on a choisi cette ville pour réaliser une expérimentation sur les caractéristiques microclimatiques dans les espaces urbains extérieurs des villes sahariennes.

II.1 Présentation de la ville de Biskra

Biskra, une ville saharienne, est située dans le sud-est de l'Algérie, couvrant une superficie totale de 509,80 km². Elle est géographiquement positionnée à une latitude nord de 34,34 et une longitude est de 5,44. La ville est limitée par les régions suivantes :

- Au nord, elle est bordée par Batna.
- Au nord-ouest, elle est limitrophe de M'Sila.
- Au nord-est, elle est contiguë à Khenchela.
- Au sud, elle est entourée par Djelfa, El Oued et Ouargla.

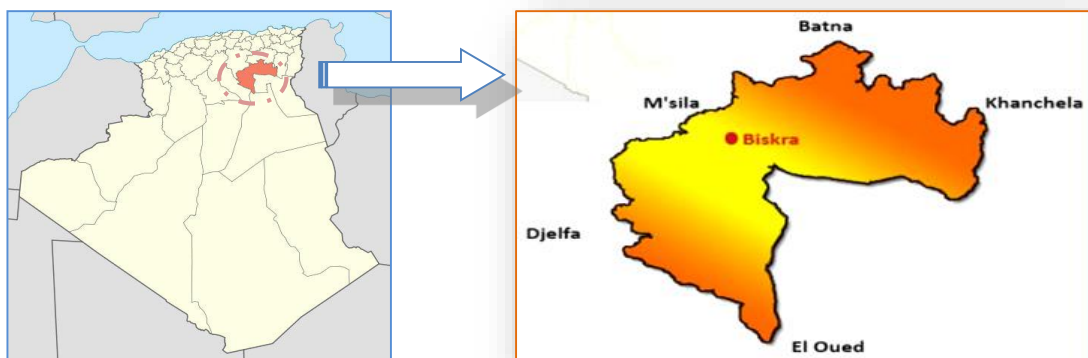


Figure IV. 1: Situation géographique de la wilaya de Biskra. Source monographie de Biskra, 2016

II.2 Etude climatique

Biskra est classée dans la zone du climat chaud et aride. Les fortes amplitudes de la chaleur présentent une grande partie de l'année variant de 26,5°C à 44°C. L'analyse des paramètres climatiques peut donner des informations approfondies sur les caractéristiques climatiques de la ville de Biskra.

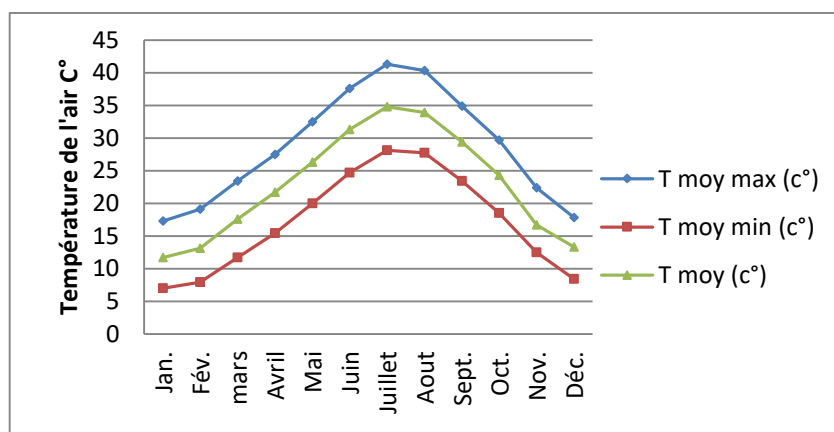
II.2.1. Température de l'air :

Le tableau suivant présente les variations mensuelle des températures de l'air moyenne (T_{moy}), maximales (T_{max}) et minimale (T_{min}) pendant une période de dix ans (2005-2015), ces valeurs sont prises de la station météorologique de Biskra.

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
T moy max (c°)	17,3	19,1	23,4	27,5	32,5	37,6	41,3	40,3	34,9	29,7	22,4	17,8
T moy min (c°)	7,0	7,9	11,7	15,4	20,0	24,7	28,1	27,7	23,4	18,5	12,5	8,4
T moy (c°)	11,7	13,1	17,6	21,7	26,3	31,3	34,8	33,9	29,4	24,3	16,7	13,3

Tableau IV. 1: Les variations mensuelles de la température d'air au cours de la décennie (2005-2015) dans la ville de Biskra. Source : les données de la station météorologique de Biskra, 2016.

A partir de graphe suivant, l'analyse des données montre une température maximale de 41,3°C au moins de juillet et une température minimale de 7,0°C enregistrée au moi du janvier. On trouve aussi un écart saisonnier important surtout entre les deux périodes chaude et froide qui arrive jusqu'à une valeur de 23,5°C.



Graphie IV. 1: Les variations mensuelles de la température d'air au cours de la décennie (2005-2015) dans la ville de Biskra. D'après les données de la météo de Biskra, 2016.

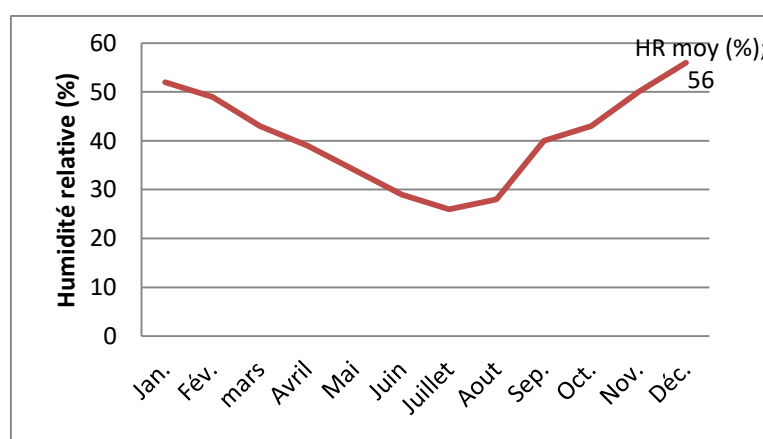
II.2.2. Humidité relative :

D'après les données recueillies auprès de la station météorologique de Biskra, le tableau ci-dessous présente les variations de l'humidité relative au cours de la décennie (2005-2015) dans la ville de Biskra.

Mois	Jan.	Fév.	mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
HR moy max (%)	52	49	43	39	34	29	26	28	40	43	50	56

Tableau IV. 2: Les variations mensuelles de l'humidité relative au cours de la décennie (2005-2015) dans la ville de Biskra. Source : : les données de la station météorologique de Biskra, 2016.

L'analyse de la courbe de l'humidité relative montre que la moyennes mensuelle maximale arrive jusqu'à 59% au mois de Décembre, tandis que la moyennes mensuelle minimale pris une valeur de 26% pour le mois de Juillet (Voir Graphe VI.2). On trouve aussi que durant la période hivernale l'humidité est importante, elle dépasse la valeur de 50% pendant que durant la période estivale l'humidité est inférieure de la valeur de 30%.



Graphe IV. 2: Variations mensuelles de l'humidité relative au cours de la décennie (2005-2015) Source : Auteur, d'après les données de la station météorologique de Biskra, 2016.

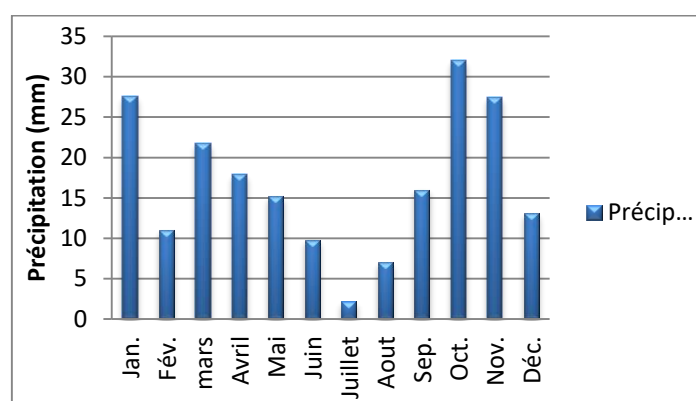
II.2.3. Précipitation

Le tableau et le graphique suivants exposent les moyennes mensuelles des précipitations pendant la période de 2005 à 2015. Ces données mettent en évidence une période de sécheresse entre les mois de février, avril, mai, juin, juillet, août, septembre et décembre, où les précipitations ne dépassent pas 20 mm.

La moyenne maximale atteint les 32,0 mm enregistrée au mois d'octobre. La quantité minimale est enregistrée au mois de Juillet avec une moyenne de 2,2 mm.

Mois	Jan.	Fév.	mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Précip moy (mm)	27,6	11,0	21,7	17,9	15,2	9,8	2,2	7,0	16,0	32,0	27,4	13,1

Tableau IV. 3: Moyennes mensuelles des précipitations pendant la période (2005 -2015)
Source : les données de la station météorologique de Biskra, 2016.



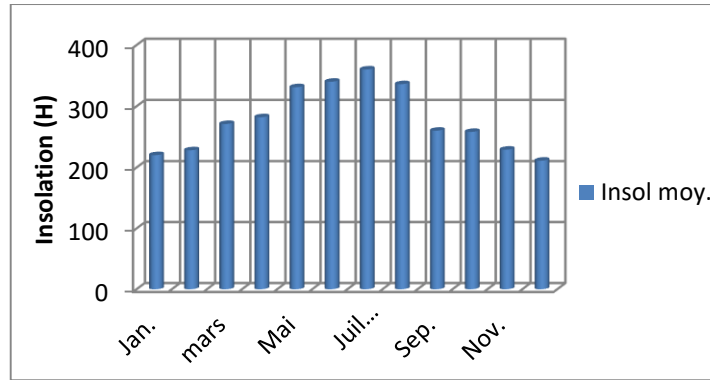
Graphe IV. 3: Moyennes mensuelles des précipitations pendant la décennie (2005 -2015)
Source : Auteur, d'après les données de la station météorologique de Biskra, 2016.

II.2.3. Insolation :

Les données des moyennes mensuelles d'ensoleillement pour la période de 2005 à 2015 révèlent une durée d'insolation significative tout au long de l'année. Les mois de mai, juin, juillet et août affichent les durées les plus élevées, dépassant les 300 heures par mois. Le mois de juillet enregistre la durée maximale avec 360 heures d'ensoleillement, tandis que la durée minimale est enregistrée en décembre.

Mois	Jan.	Fév.	mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Insol moy (h)	220	228	271	282	331	340	360	336	260	258	229	211

Tableau IV. 4: Moyennes mensuelles de l'insolation pendant la période (2005 -2015).
Source : les données de la station météorologique de Biskra, 2016.



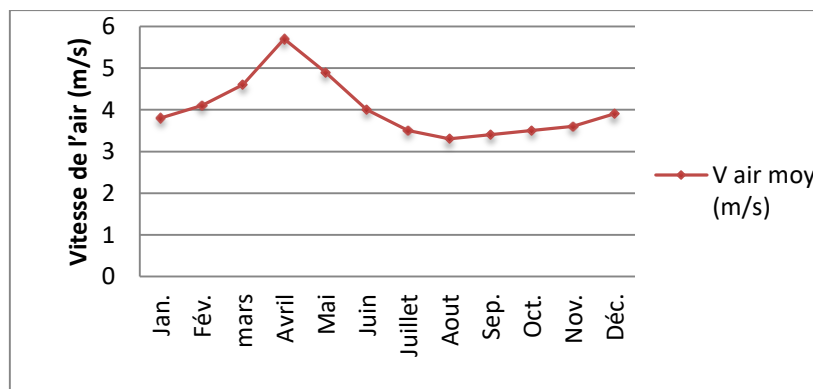
Graphe IV. 4: Moyennes mensuelles de l'insolation pendant la décennie (2005 - 2015)
 Source : Auteur, d'après les données de la station météorologique de Biskra, 2016.

II.2.4. Vents :

Les données présentées dans le tableau et le graphique suivants montrent que les écoulements mensuels de l'air sont faibles avec une vitesse élevée qui caractérise la saison du printemps, dont le mois d'avril on enregistre une valeur de 5,7 m/s. Dès le mois février jusqu'au mois du Juin la vitesse du vent reste plus que à égale de 4 m/s. La vitesse moyenne annuelle du vent est de 3,8 m/s. Les mois d'août et d'octobre enregistrent les vitesses de vent les plus faibles, avec respectivement 3,3 m/s et 3,5 m/s.

Mois	Jan.	Fév.	mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
V air moy (m/s)	3,8	4,1	4,6	5,7	4,9	4,0	3,5	3,3	3,4	3,5	3,6	3,9

Tableau IV. 5 : Moyennes mensuelles de la vitesse de l'air pendant la période (2005 - 2015) Source : les données de la station météorologique de Biskra, 2016.



Graphe IV. 5: Moyennes mensuelles de la vitesse de l'air pendant la décennie (2005 - 2015) Source : Auteur, d'après les données de la station météorologique de Biskra, 2016.

II.2.5. Conclusion de l'étude climatique

La ville de Biskra présente un climat caractérisé par les éléments suivants :

- Un été très chaud et sec, avec variation de température entre le jour et la nuit.
- Un hiver très froid, principalement la nuit, par rapport au jour.
- La température maximale moyenne atteint 45°C, tandis que les températures hivernales varient entre 20 et 30°C.
- Une variation saisonnière de température d'environ 20°C

III. ECHANTILLONAGE :

L'échantillonnage utilisé dans cette étude est un échantillonnage non probabiliste. Les échantillons sélectionnés sont représentatifs et choisis en fonction de leur degré de représentativité afin de permettre des comparaisons entre eux.

III.1 Choix des échantillons

Les espaces publics concernés par cette étude sont les places, qui préservent un espace important pour la récréation et la pratique des relations sociales des habitants, surtout dans les bonnes conditions microclimatiques. Dans la période estivale particulièrement, ces espaces sont vides des habitants parce qu'ils souffrent des conditions défavorables de la qualité thermique. Cela implique le recourt vers une étude comparative des paramètres climatiques dans des différentes places afin d'analyser et déduire les raisons de la mauvaise qualité thermiques et d'essayer à proposer des solutions raisonnables.

Cette étude sollicite des échantillons des espaces publics de formes variés, mais qui sont soumis, sous l'influence des mêmes conditions climatiques. Les places choisis pour cette expérimentation sont les suivantes : place El HOria, place Zouaka nommée : Gattari El Okbi), place de 726 logs et la place de Djebel Dhalaa.

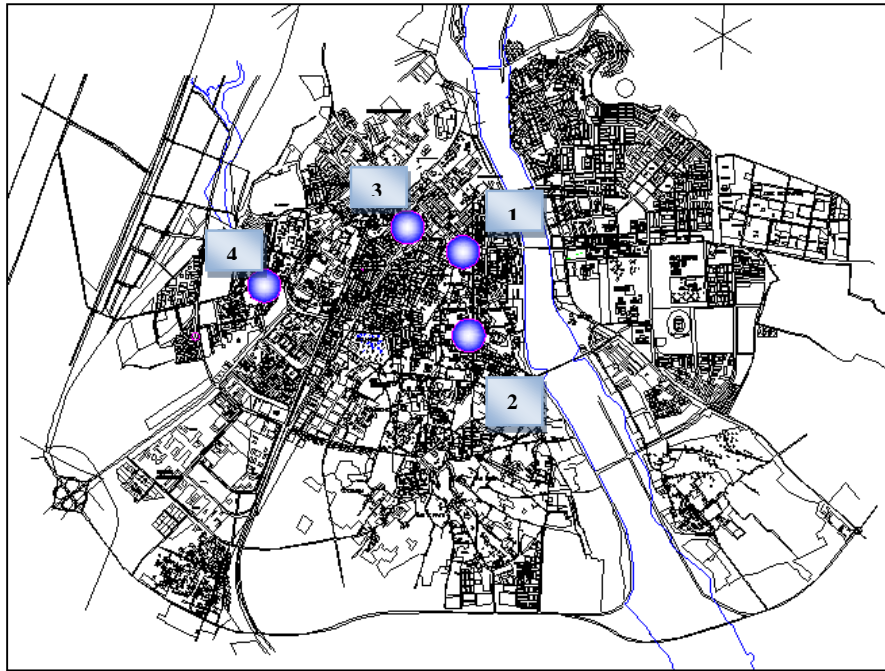


Figure IV. 2: Situation des différentes places choisies (1 : place El Horia, 2 : place zwaka, 3 : place Dhalaa, 4 : place Iben Badis), source : auteur d'après le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.

III.2. Présentation des échantillons

III.2.1 Premier échantillon : La place El-Horia

La place El-Horia occupe une position centrale dans la ville de Biskra et a toujours été un espace de loisirs depuis sa création jusqu'à aujourd'hui. Elle contribue à mettre en valeur le siège de la wilaya.



Figure IV. 3: Situation de la place El-Horia. le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.

La place EL-Horia est située au cœur de la ville de Biskra, elle est délimitée par :

- Au nord, elle est bordée par le Boulevard l'Emir Abdelkader.
- À l'est, on y trouve la Maison de la culture Rédha Houhou.
- Au sud, elle est délimitée par une rue reliant l'avenue Hakim Saadane à la rue Rras Gueria.
- À l'ouest, elle est entourée de propriétés privées.

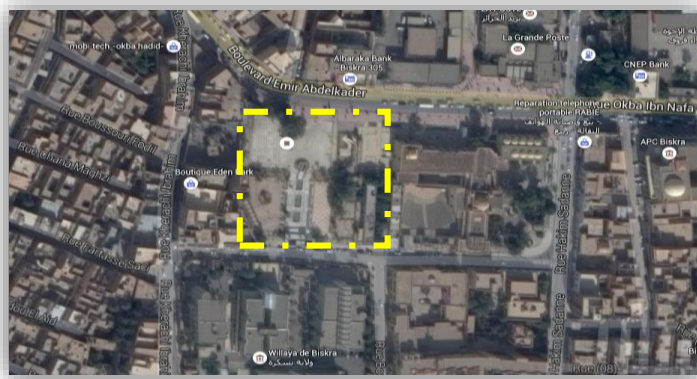


Figure IV. 4: Vue satellite présente la situation de la place de El-Horia. Source : établit par auteur, 2016.

Divers équipements entourent la place El-Horia : siège de la Wilaya, P.T.T, la maison de la culture, le théâtre à ciel ouvert, musée Moujahid, établissement scolaire et d'autres activités qui influencent et interviennent dans l'animation de la place plus que les équipements cités ; les cafétérias et Cyber café. (Voir figure IV.3)

Légende :

- 01 : Siège de la wilaya
- 02 : Cafétéria
- 03 : EEF
- 04 : Théâtre
- 05 : Maison de la culture
- 06 : Musée El moudjahid
- 07 : Direction de la culture
- 08 : Banque
- 09 : PTT
- 10 : APC

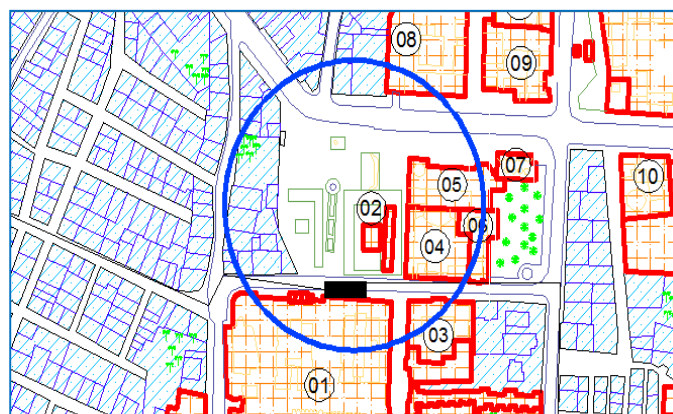


Figure IV. 5: Divers équipement à l'alentour de la place El Horia. Source le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.

La surface de cette place est 8000 m². Ses dimensions sont présentées sur la figure suivante.

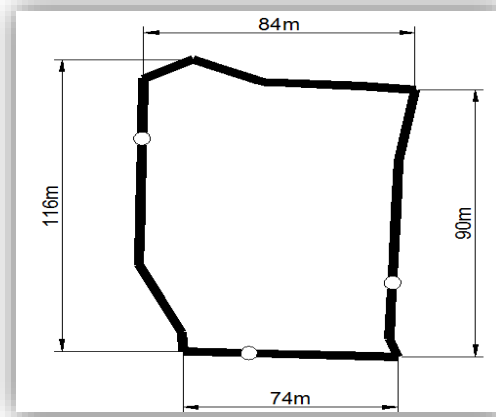


Figure IV. 6: *Forme et dimensions de la place El Horia. Source le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.*

La place se compose d'une grande esplanade qui contient un objet d'art et des panneaux publicitaires sur la partie haute, elle est divisée en deux cotés par un cours d'eau en cascade sur la partie basse (figure IV.7).

Données physiques :

Esplanade : 1970 m²

Place du gauche : 720 m²

Place de droite : 1150 m²

La surface totale : 5300 m²



Figure IV. 7: *Composantes de la place El Horia. Source : Auteur, 2016*



Figure IV. 8: *Vues Sur La Place El Horia. Source : Auteur, 2016*

III.2.2 Deuxième échantillon : La place de ZWAKA (Guattari El Okbi)

La place de Zwaka est située à RAS ELGUERIA, elle est une place d'agrément qui a été destinée à la récréation des habitants et qui sert au regroupement des étudiants du lycée Mohamed khireddine.

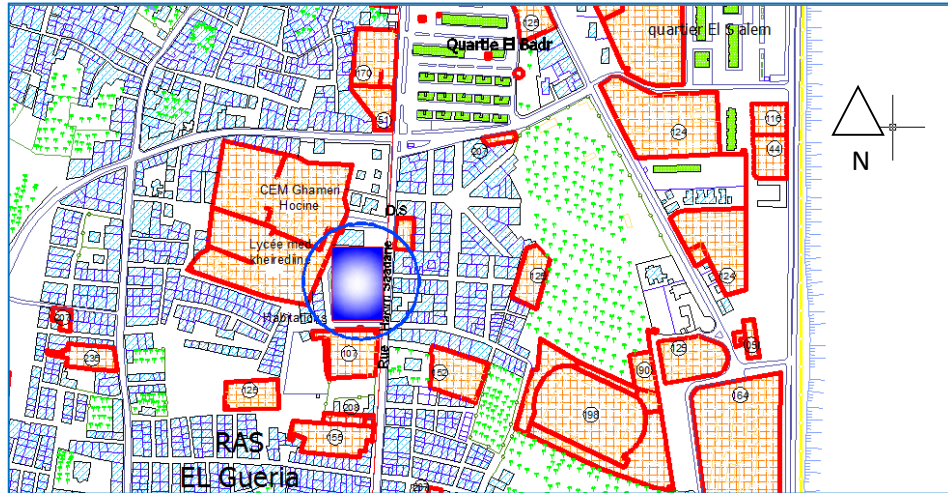


Figure IV. 9: Situation De La Place De Zwaka. Source le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.

La place Zouaka est située le long de l'avenue Hakim Saadane, elle est délimitée par une voie au nord, l'avenue Hakim Saadane à l'est, une voie menant au quartier au sud, et une voie, un lycée et des habitations à l'ouest.



Figure IV. 10 : vue satellite présente la situation de la place de Zwaka. Établi par auteur, 2016.

Les activités qui entourent la place sont : Des équipements ; lycée Med Khireddine, CEM : Hocine Ghamri et des habitations. De l'autre côté de l'avenue hakim saadane on y trouve : cabinet médical privé, diverses Activités (taxi phone, fast-food, épicerie ; une cafétéria (par fois prend la place comme étendue ou terrasse surtout le soir). En outre ; les occupations du sursol sont à dominance éducative.

Légende :

- 1 : Cabinet médical privé**
- 2 : Taxi phone**
- 3: Fast food**
- 4: Épicerie**
- 5: Cafeteria**
- 6 : Boulangerie**

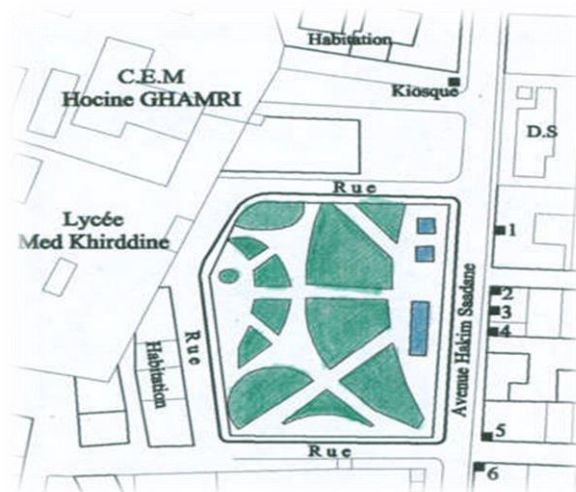


Figure IV. 11: Des activités commerciales et autres entourant la place Zouaka. Source : le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.

La configuration de la place est régulière, elle est entourée de routes de tous les côtés, permettant un accès facile et reliant la place à différents quartiers. Sa superficie est de 8000 m².



Figure IV. 12: vue sur la place Zouaka. Source : auteur, 2016.

III.2.3 Troisième échantillon : La place : DHALAA

La place Dhalaa prend situation au centre-ville de Biskra ; auprès du ‘Jebel Dhalaa’ ; dont elle porte le nom. Dans un premier temps elle était un arrêt des bus pour différentes destinations dans la ville de Biskra. Mais depuis l’année de 2008 elle a été transformée à une place de détente.

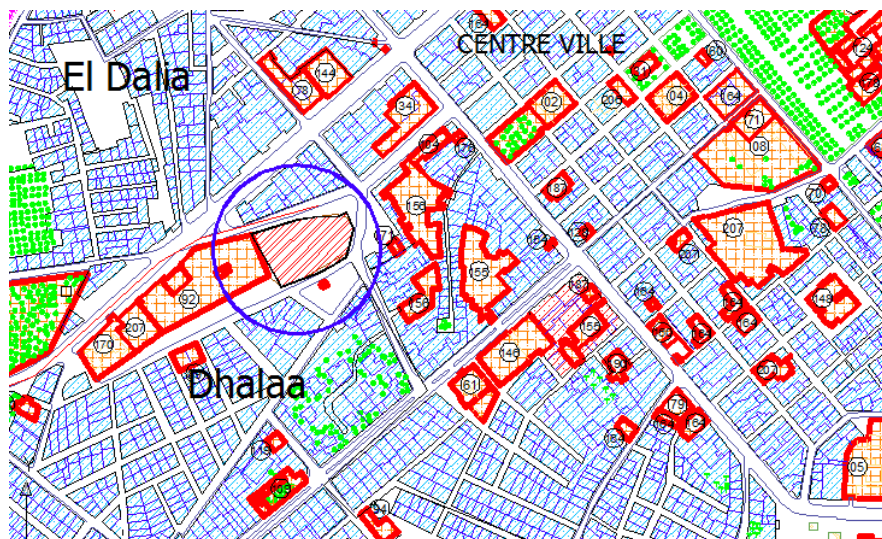


Figure IV. 13: Situation de La Place Dhalaa. Source : le Plan Directeur d’Architecture et d’Urbanisme de Biskra, 2016

La place Dhalaa est un point de convergence pour plusieurs routes qui mènent dans différentes directions. Au nord-est, elle est reliée au boulevard L'Emir Abdelkader, au nord-ouest à la rue Frères Saouli, et au sud à la rue Zaatcha.



Figure IV. 14: Vue satellite présente la situation de la place Dhalaa. Etabli par auteur, 2016.

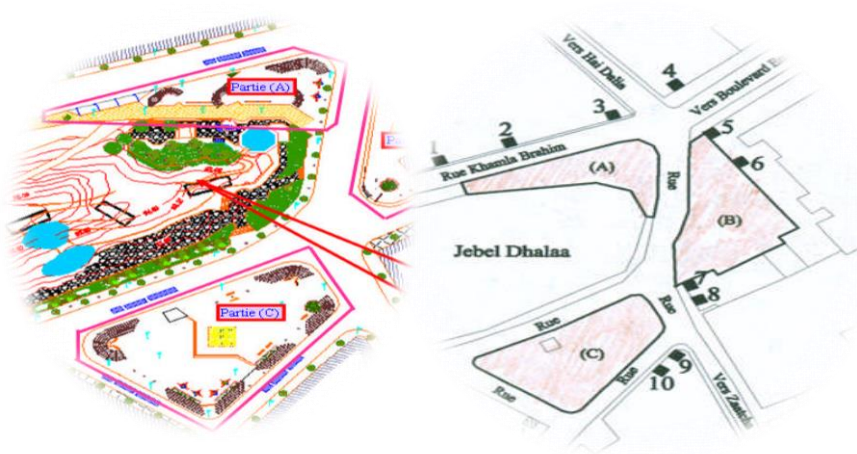
La place Dhalaa, dans ses composantes ; partie (A), (B) et (C) est une place d'agrément ; surtout avec la présence du monticule (djebel Dhalaa) à son centre, et sa situation au centre-ville de Biskra ce qui lui rehausse ses potentialités pour mieux jouer son rôle comme espace public.



Figure IV. 15: La place Dhalaa avec ses différentes parties (A), (B) et (C). Source Google Earth, 2016.

- La partie (a) située au nord du 'Jebel Dhalaa' avec une superficie de 573,00 m².
- La partie (b) située à l'est du 'Jebel Dhalaa' avec une superficie de 779,95 m².
- La partie (c) située au sud du 'Jebel Dhalaa' avec une superficie de 1782,31 m².

Les activités qui entourent la place Dhalaa et qui motivent son animation sont : la crémierie Dambri, et les cafétérias qui exploitent la place publique avec ses composants une étendue et extension (comme terrasse) à leurs salles.



Légende :

- 1 : crémierie Dambri
- 2 : vente article bébé
- 4 : épicerie
- 5, 6 et 8 : cafétérias
- 9 : vente cassettes
- 10 : cafétéria
- 11 et 12 : diverses activités non stables

Figure IV. 16: Divers activités entourant la place Dhalaa. Source : le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.

III.2.3 Quatrième échantillon : La place IBEN BADIS de 726 logements

La place IBEN BADIS se situe dans la zone ouest de la ville de Biskra. , elle est une place d'agrément et une aire de récréation pour les habitants.

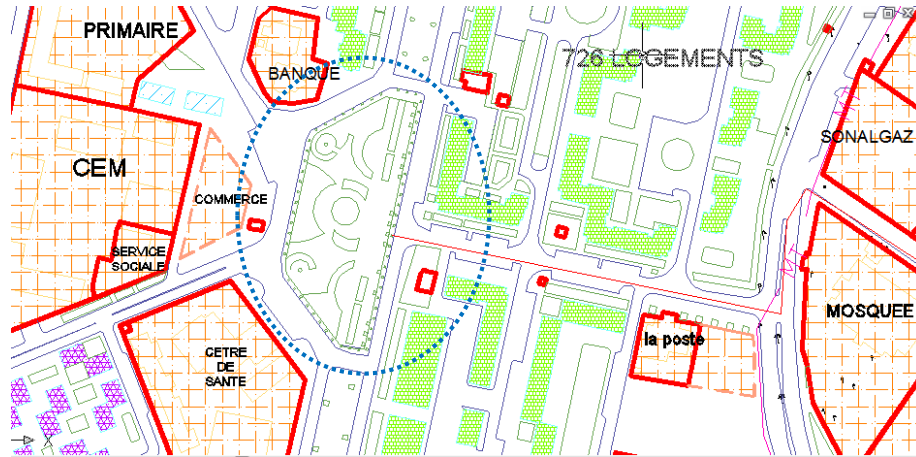


Figure IV. 17: Situation de la place Ibn Badis. Source : le Plan Directeur d'Architecture et d'Urbanisme de Biskra, 2016.

La place IBEN BADIS est un point de rencontre de plusieurs voies qui la relient aux directions suivantes : au Nord-est, le boulevard L'Emir Abdelkader ; au Nord-ouest, la rue frères Saouli ; et au sud, la rue Zaatcha.



Figure IV. 18: Vue Satellite Présente La Situation De La Place IBEN BADIS (726 Lgts). Etablit par auteur, 2016.

La place est limitée par des voies de tous côtés qui permettent l'accès à la place dans tous les sens et la relie aussi à divers quartiers. La surface de cette place est 6533,80 m².

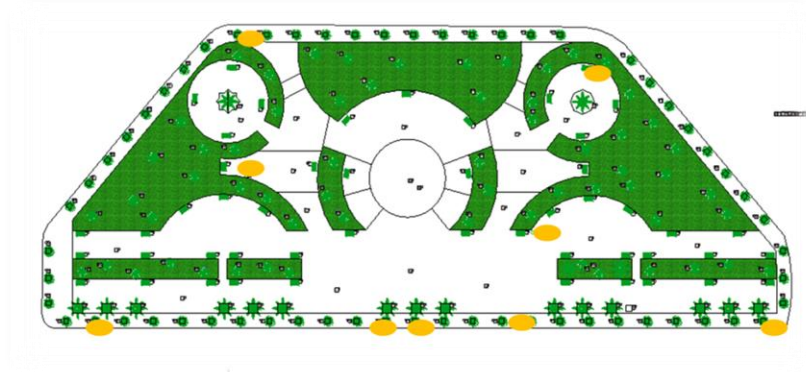


Figure IV. 19: Aménagement de a pace Zouaka, source auteur, 2016.

La place est aménagée d'une fontaine avec une position centrale et des espaces vert sur toute la surface, en adition d'un écran d'arbres au bord de la rue, mais elle reste en état abandonné.



Figure IV. 20: Vues sur a place Iben Badis, source : auteur, 2016

IV. Facteurs climatiques mesurés

Les mesures sont effectuées sur les paramètres climatiques suivants : la température de l'air, la température radiante, l'humidité relative et la vitesse du vent. Ces paramètres sont choisis en fonction de leur pertinence pour les objectifs de l'expérience et de la disponibilité des instruments de mesure.

IV. 1. La température de l'air

La température de l'air est un paramètre qui reflète le niveau d'énergie thermique présent dans l'atmosphère, résultant de l'équilibre des échanges de chaleur qui se produisent à l'endroit et au moment de la mesure.

IV. 2. La température radiante

Selon Matzarakis et al. (1999), la température moyenne radiante est définie comme une température uniforme d'une surface environnante, équivalente à la radiation d'un corps noir (avec un coefficient d'émission $\varepsilon = 1$), qui correspond au gain d'énergie reçu par le corps humain par le biais des flux de rayonnement prédominants (BOUKHABLA M., 2015).

Selon Potvin (1997), la température moyenne radiante (TMR) est définie comme la moyenne des températures des surfaces environnantes, prenant en compte l'effet du rayonnement solaire incident (AHMED OUAMEUR FOUAD, 2007).

IV. 3. L'humidité relative

Selon Szokolay (2004), l'humidité relative représente la quantité de vapeur d'eau présente dans une particule d'air. L'effet de l'humidité relative par rapport à la température de l'air et à la température moyenne radiante (TMR) est négligeable lorsqu'elle se situe entre 30 % et 50 % (AHMED OUAMEUR FOUAD, 2007).

IV. 4. La vitesse de l'air

Le mouvement de l'air est un élément essentiel du confort, car il influence le corps humain de deux manières distinctes. Tout d'abord, il influe sur les échanges de chaleur convectifs du corps, puis il impacte la capacité d'évaporation de l'air, ce qui à son tour affecte la production de sueur (Givoni, 1978).

V. Instrument de mesure

Dans cette étude les mesures sont prises à l'aide d'un instrument portatif : Anémomètre multifonctions TESTO 480 avec mesure des indices PMV/PPD (Réf. 0563 4800), pour des

lectures directes (in situ) des facteurs climatiques. Le dispositif fait partie de l'équipement du laboratoire "LACOMOFA" du département d'architecture et d'urbanisme de Biskra.

L'appareil de mesure TESTO 480 est doté de sondes numériques intelligentes munies d'une mémoire intégrée. Il est conçu pour recueillir les quatre grandeurs suivantes : la température de l'air (en degrés Celsius), l'humidité relative (en pourcentage), la vitesse de l'air (en mètres par seconde) et la température radiante (en degrés Celsius) en utilisant une sonde à boule noire d'un diamètre de 150 mm.



*Figure IV. 21: L'instrument de mesure TESTO 480 utilisé dans cette expérimentation.
Source : auteur, 2016*

VI. Campagne de mesure

La prise des relevées de mesures dans l'espace public nécessite une détermination préalable de la période de collecte des données, les horaires choisis ainsi que la méthode de déroulement des campagnes de mesures.

VI.1 Période et journée de collecte des données

Cette étude traite les conditions thermiques à l'échelle urbaine dans les milieux sahariens, donc on a choisi la période estivale qui présente la saison chaude de l'année, où les conditions microclimatiques sont défavorables, parce qu'elle pose les problèmes de confort les plus extrêmes.

Les campagnes de mesure sont menées en cinq moments d'une seule journée (le 05/08/2016). En se basant sur les prévisions météorologiques de dix jours pour observer les conditions climatiques afin de choisir une journée représentative de la saison estivale, qui présente un temps calme avec un ciel clair et une vitesse de vent plus réduite.

VI.2 Horaires de prise de mesure

Les moments sélectionnés sont associés au cycle thermique quotidien :

- Avant le lever du soleil : avant toute accumulation de chaleur.
- Après le lever du soleil : début de l'accumulation de chaleur.
- À midi : lorsque le soleil est au zénith.
- Avant le coucher du soleil : après une accumulation maximale de chaleur.
- Après le coucher du soleil : début de la dissipation de la chaleur emmagasinée.

Les données comparatives ont été extraites aux heures suivantes : 05h00, 09h00, 13h00, 17h00 et 21h00.

VI.1 Description du déroulement des campagnes de mesure

Le processus de travail implique la prise de mesures instantanées (sur place), où les valeurs sont directement enregistrées à l'aide de l'instrument utilisé. On a commencé la prise de mesure par la place de Zouaka puis à celle d'El Horia, en suite par la place de Dhalaa et enfin on a terminé par la place de Iben Badis. Le passage d'un espace de mesure à autre est réalisé en véhicule de façon que le temps estimé pour tout le parcours ne dépasse pas une heure.

Les mesures de quatre facteurs climatiques ont été pris parallèlement à une altitude de : 1.60 m du sol. Le temps estimé pour la prise de mesure n'a pas dépassé 10 mn. La durée estimée entre les espaces de mesure est varié entre 6 à 10 mn. L'équipe de travail est composé de trois personnes y compris le chercheur. Les mesures sont effectuées dans des conditions climatiques stables, caractérisées par un ciel clair, un vent faible et un fort ensoleillement.

CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous expliquons l'objectif de cette étude et la méthodologie utilisée pour la réaliser, c'est une étude comparative employant la méthode expérimentale. L'objectif de cette expérimentation est de vérifier les conditions favorables au microclimat urbain dans les espaces publics étudiés, en particulier les places, qui jouent un rôle essentiel dans la détente et les interactions sociales des résidents. L'accent est mis sur les conditions microclimatiques optimales.

Cette étude nécessite la mesure de quatre variables climatiques : la température de l'air ambiant, la température radiante, l'humidité relative et la vitesse du vent.

Cette étude sollicite des échantillons des espaces publics de formes variés, mais qui sont soumis, sous l'influence des mêmes conditions climatiques. Les places choisis pour cette expérimentation sont les suivantes : place El HOria, place Zouaka nomée : Gattari El Okbi), place de 726 logs et la place de Djebel Dhalaa.

**CHAPITRE V : ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES
RÉSULTATS D'INVESTIGATION : ÉTUDE ANALYTIQUE**

INTRODUCTION :

Ce chapitre présentera l'analyse et l'interprétation des résultats recueillis dans les campagnes de mesure, qui sont prises le long d'une journée représentative de la période estivale. Comme il a été avancé dans le chapitre précédent, les mesures sont relevées sur quatre places, situées dans la ville de Biskra et présentent des caractéristiques morphologiques variées.

Les facteurs climatiques examinés pour tous les espaces de mesure sont : la température de l'air, la température radiante, l'humidité relative et la vitesse de l'air. L'étude comparative des fluctuations climatiques de ses facteurs entre les différents points de mesure montre la variété microclimatique due à la diversité morphologique de chaque espace.

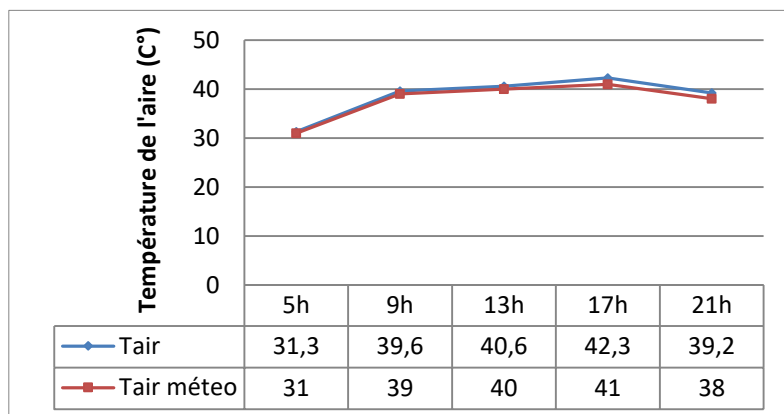
La méthode utilisée, pour évaluer la variabilité climatique entre les différentes places, est la comparaison des résultats recueillis dans les campagnes de mesure avec les relevés de la station météorologique (considérée comme un sol nu).

Cette expérimentation a pour objectif, montrer l'interaction entre les paramètres climatiques et les facteurs de la forme urbaine, voir comment les conditions microclimatique se présentent dans chaque place et distinguer l'influence des facteurs morphologiques sur la modification du microclimat urbain dans ces dernières.

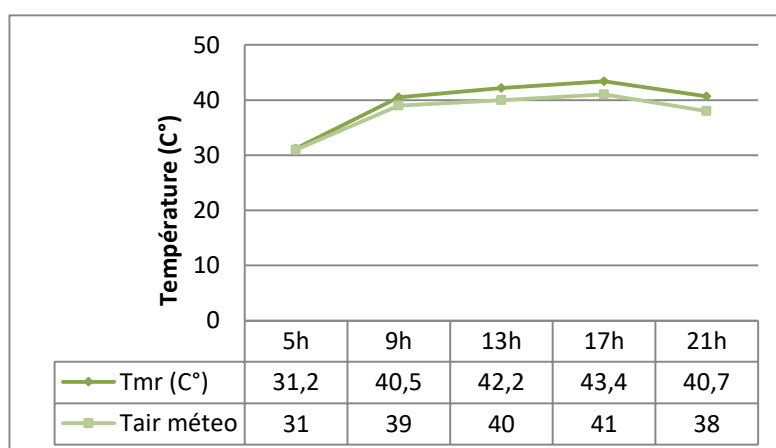
L'analyse de l'évolution journalière de la température de l'air ou du rayonnement exprime l'état de l'environnement thermique dans chaque place. L'étude parallèle des fluctuations climatiques de l'humidité relative et la vitesse d'air aide à caractériser les conditions favorables ou défavorables de microclimat urbain dans les quatre places.

I. Evaluation du comportement microclimatiques dans chaque place

I.1 Détermination des variations microclimatiques journalières de place EL HORIA



Graphe V. 1: Variation journalière de la température de l'air au cours d'une journée d'été (Place El Horia), établit par auteur, 2016.

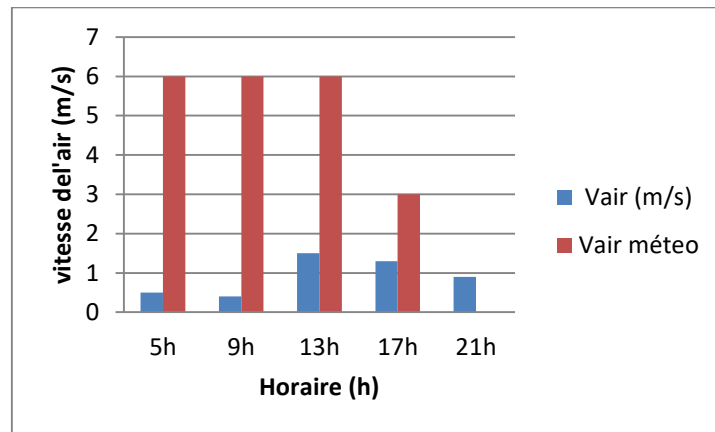


Graphe V. 2: Variation journalière de la température radiante au cours d'une journée d'été (Place El Horia), établit par auteur, 2016.

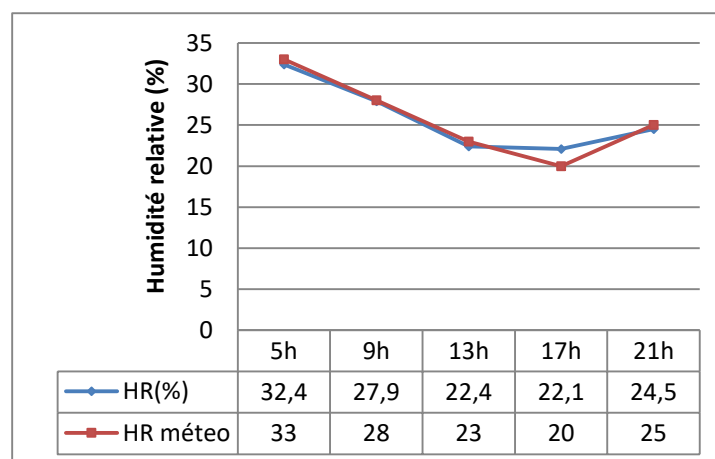
Les graphes (V.1), (V.2) présentent la variation journalière de la température d'air et de la température radiante dans la place El Horia au cours d'une journée d'été. L'analyse de l'évolution des températures pour cet espace montre que la valeur maximale est estimée de 42,3°C pour la température de l'air et de 43,4°C (à 17h) pour la température radiante, alors que la valeur minimale est estimée de 31,3°C (à 5h) pour les deux.

- Avant lever du soleil : les valeurs de la température d'air et radiante sont proche de celle de la station avec une différence de 0,2 °C

- Après le lever du soleil : les valeurs de la température d'air et radiante sont inférieures de celle de la station avec une différence de (0,6- 1,5) °C.
- A midi : la différence reste stable pour la température de l'air par contre celle de température radiante a été élevée d'une valeur qui atteint 2,2 °C.
- Avant le coucher du soleil : la différence continue sensiblement à élever à 1,3°C pour la température d'air, alors que la température radiante dépasse celle de la station météo avec une différence entre les deux mesures estimée de 2,4°C.
- Après le coucher du soleil : la température d'air est supérieure de celle de la station avec une différence de 1,2°C, c'est la même remarque pour la température radiante mais avec une différence de 2,7°C.



Graphe V. 3: Variation journalière de la vitesse de l'air au cours d'une journée d'été (Place El Horia), établi par auteur, 2016.



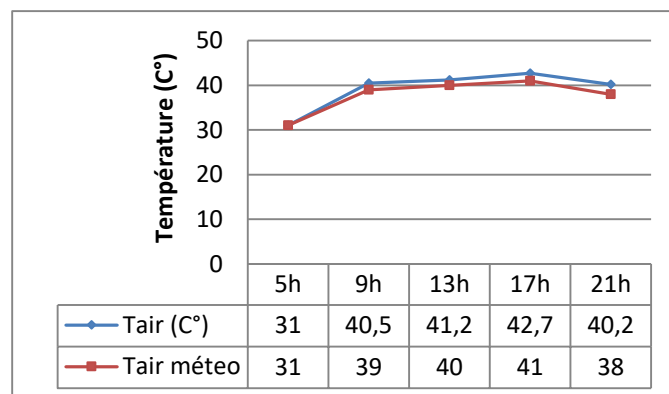
Graphe V. 4: Variation journalière de l'humidité relative au cours d'une journée d'été (Place El Horia), établi par auteur, 2016.

Les graphes (V.3), (V.4) présentent la variation journalière de la vitesse de l'air et de l'humidité relative dans la place El Horia au cours d'une journée d'été.

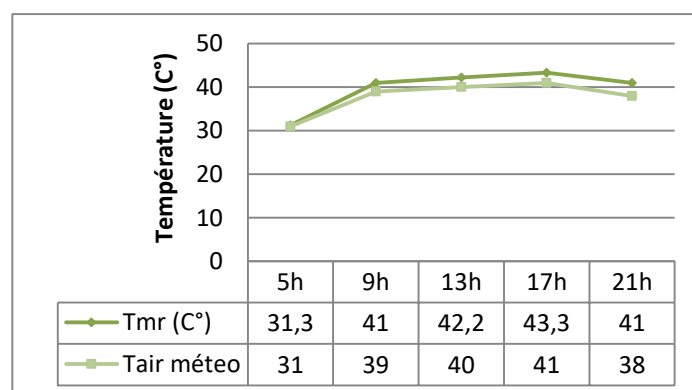
L'analyse de l'évolution journalière des valeurs de la vitesse de l'air dans la place El Horia ; on observe que pendant toute la journée, les valeurs mesurées de la vitesse de l'air sont très faibles par rapport celles de la station météo. La vitesse de l'air prend sa valeur maximale de 1,5 m/s à 13h, alors que sa valeur minimale de 0,4 m/s a été enregistrée à 9h.

L'analyse de l'évolution journalière des valeurs moyennes de l'humidité relative dans la Place El Horia montre la diminution des valeurs moyennes de l'humidité relative par rapport celle de la station durant toute la journée, mis à part la valeur mesurée à 17h qui dépasse celle de la station avec une différence de 2,1%.

I.2 Détermination des variations microclimatiques journalières de place DHALAA



Graphe V. 5: Variation journalière de la température de l'air au cours d'une journée d'été (Place Dhalaa), établi par auteur, 2016.



Graphe V. 6: Variation journalière de la température radiante au cours d'une journée d'été (Place Dhalaa), établi par auteur, 2016.

Les graphes (V.5), (V.6) présentent la variation journalière de la température d'air et de la température radiante dans la place Dhalaa au cours d'une journée d'été.

L'analyse de l'évolution des températures pour cet espace montre que la valeur maximale est estimée de 42,7°C pour la température de l'air et de 43,3°C (à 17h) pour la température radiante, alors que la valeur minimale est estimée de 31,3°C (à 5h).

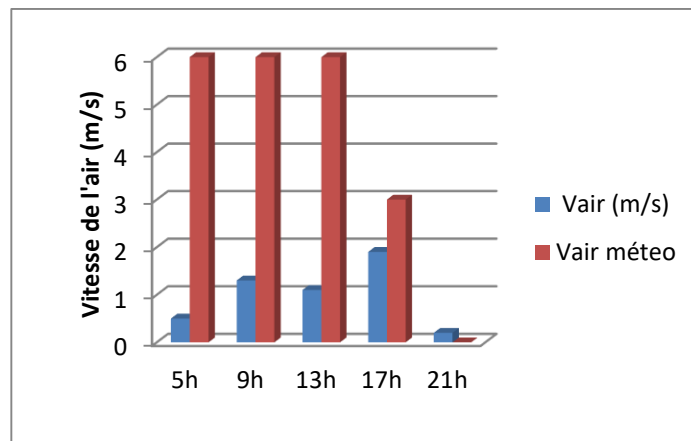
- Avant le lever du soleil : on a enregistré la même valeur de la température d'air enregistrée dans la station météo, mais la valeur de la température radiante est supérieure de celle de la station par une différence de 0,3 °C.

- Après le lever du soleil : les valeurs de la température d'air et de la température radiante sont supérieures de celle de la station par une différence de (1,5°C et 2°C).

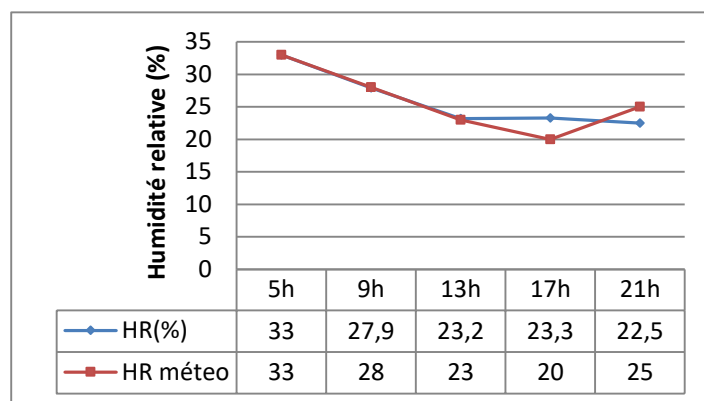
- A 13h : la différence a été élevée et atteint une valeur de 1,2°C pour la température d'air et 2,2°C pour la température radiante.

- Avant le coucher du soleil : la valeur de la température d'air est supérieure de celle de la station avec une différence de 1,7°C, alors que la température radiante est supérieure de celle de la station avec une différence de 2,3°C.

- Après le coucher du soleil : les valeurs mesurées dépassent celles de la station par une différence de 2,2°C pour la température d'air et de 3°C pour la température radiante.



Graphie V. 7: Variation journalière de la vitesse de l'air au cours d'une journée d'été (Place Dhalaa), établi par auteur, 2016.



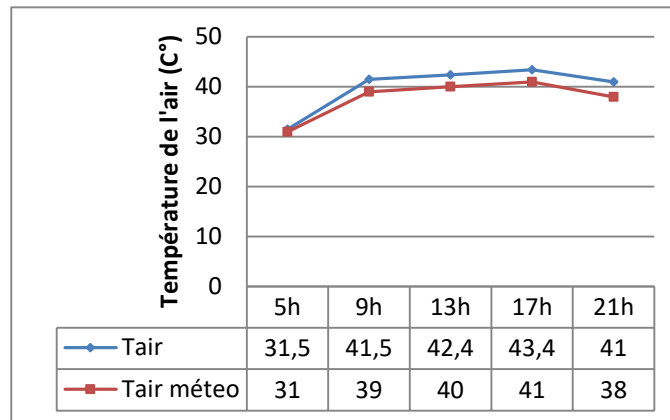
Grappe V. 8: *Variation journalière de l'humidité relative au cours d'une journée d'été (Place Dhalaal), établit par auteur, 2016.*

Les graphes (V.7), (V.8) présentent la variation journalière de la vitesse de l'air et de l'humidité relative dans la place Dhalaal au cours d'une journée d'été.

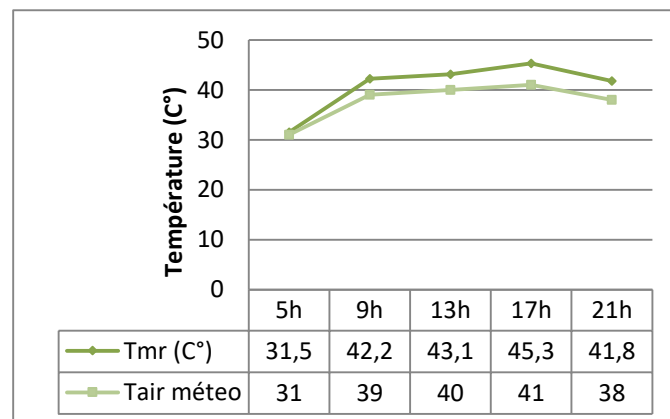
L'analyse de l'évolution journalière des valeurs de la vitesse de l'air dans la place Dhalaal ; on observe que pendant toute la journée, les valeurs mesurées de la vitesse de l'air sont très faibles par rapport celles de la station météo. La vitesse de l'air prend sa valeur maximale de 1,9 m/s à 17h, alors que sa valeur minimale de 0,2 m/s a été enregistrée à 21h.

L'analyse de l'évolution journalière des valeurs moyennes de l'humidité relative dans la Place Dhalaal montre la diminution des valeurs mesurées de l'humidité relative par rapport celle de la station durant toute la journée, mis à part la valeur mesurée à 17h qui dépasse celle de la station avec une différence de 3,3%.

I.3 Détermination des variations microclimatiques journalières de place ZOUAKA



Graphe V. 9: Variation journalière de la température de l'air au cours d'une journée d'été (Place Zouaka), établi par auteur, 2016.

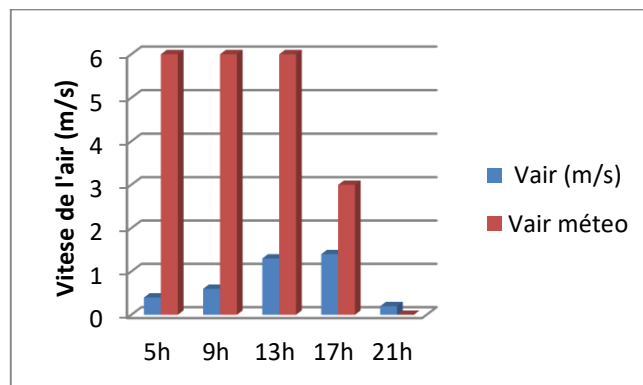


Graphe V. 10: Variation journalière de la température radiante au cours d'une journée d'été (Place Zouaka), établi par auteur, 2016.

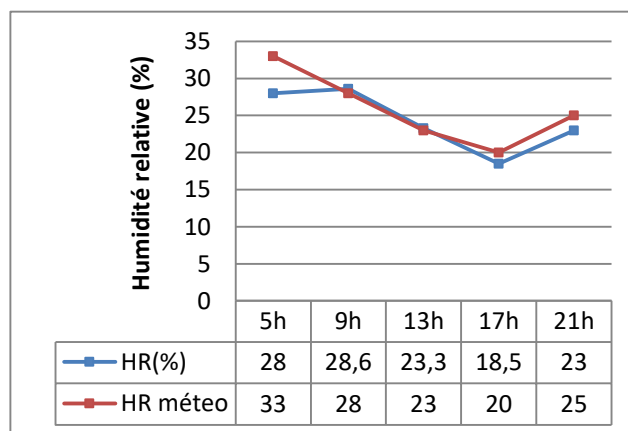
Les graphes (V.9), (V.10) présentent la variation journalière de la température d'air et de la température radiante dans la place Zouaka au cours d'une journée d'été. L'analyse de l'évolution des températures pour cet espace montre que la valeur maximale est estimée de 43,4°C pour la température de l'air et de 45,3°C (à 17h) pour la température radiante, alors que la valeur minimale est estimée de 31,5°C (à 5h) pour les deux.

- Avant lever du soleil : les valeurs de la température d'air et radiante sont proche de celle de la station avec une différence de 0,5 °C

- Après le lever du soleil : les valeurs de la température d'air et radiante sont supérieures de celle de la station météo avec une différence de (2,5 - 3,2) °C.
- A 13h : la température s'augmente avec une différence peu stable par rapport la station météo.
- Avant le coucher du soleil : la température de l'air a pris une valeur importante qui dépasse la valeur enregistrée par la station météo par 2,4 °C et, alors que pour la température radiante on trouve une différence de 4,3 °C.
- Après le coucher du soleil : la température d'air est supérieure de celle de la station avec une différence de 3°C, c'est la même remarque pour la température radiante mais avec une différence de 3,8°C.



Graphe V. 11: Variation journalière de la vitesse de l'air au cours d'une journée d'été (Place Zouaka), établi par auteur, 2016.



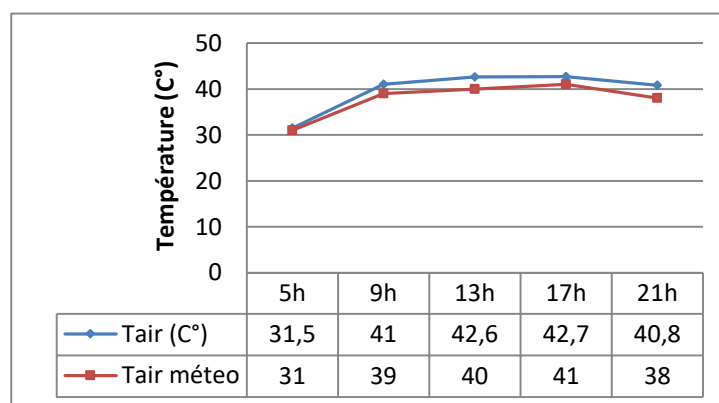
Graphe V. 12: Variation journalière de l'humidité relative au cours d'une journée d'été (Place Zouaka), établi par auteur, 2016.

Les graphes (V.11, (V.12) présentent la variation journalière de la vitesse de l'air et de l'humidité relative dans la place Zouaka au cours d'une journée d'été.

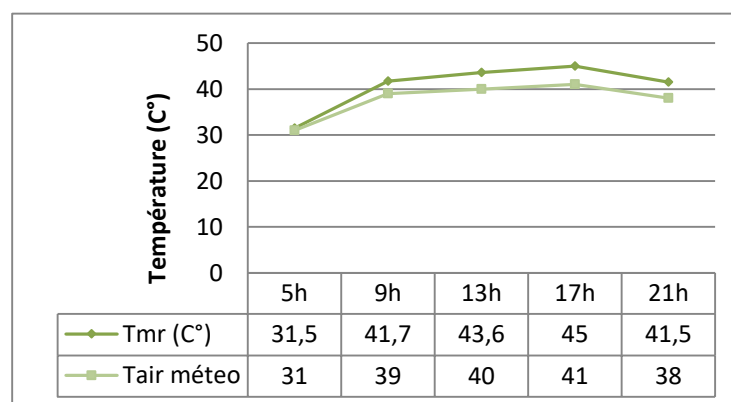
L'analyse de l'évolution journalière des valeurs de la vitesse de l'air dans la place Zouaka ; on observe que pendant toute la journée, les valeurs mesurées de la vitesse de l'air sont très faibles par rapport celles de la station météo. La vitesse de l'air prend sa valeur maximale de 1,4 m/s à 17h, alors que sa valeur minimale de 0,2 m/s a été enregistrée à 21h.

L'analyse de l'évolution journalière des valeurs moyennes de l'humidité relative dans la Place Zouaka montre la diminution des valeurs de l'humidité relative par rapport celle de la station durant toute la journée, mis à part la valeur mesurée à 9h qui dépasse celle de la station avec une différence de 0,6% et à 13h avec une différence de 0,3°C.

I.4 Détermination des variations microclimatiques journalières de place IBEN BADIS



Graphe V. 13: Variation journalière de la température de l'air au cours d'une journée d'été (Place Iben Badis), établi par auteur, 2016.



Graphe V. 14: Variation journalière de la température radiante au cours d'une journée d'été (Place Iben Badis), établi par auteur, 2016.

Les graphes (V.13), (V.14) présentent la variation journalière de la température d'air et de la température radiante dans la place Iben Badis au cours d'une journée d'été. L'analyse de l'évolution des températures pour cet espace montre que la valeur maximale est estimée de 42,7°C (à 17h) pour la température de l'air et de 45°C (à 17h) pour la température radiante, alors que la valeur minimale est estimée de 31,5°C (à 5h) pour les deux.

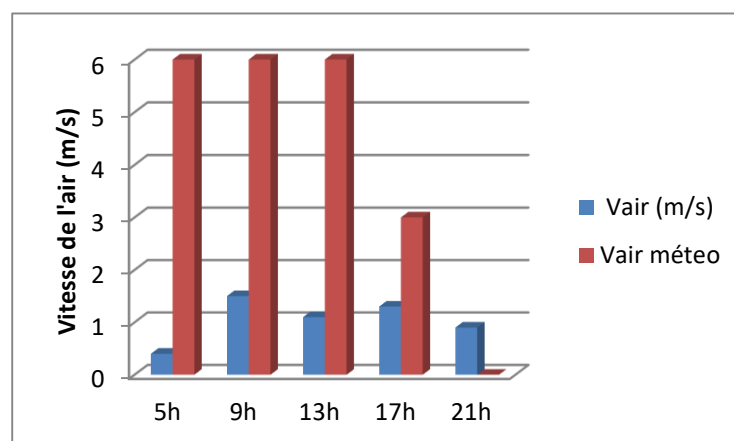
- Avant lever du soleil : les valeurs de la température d'air et radiante sont proche de celle de la station avec une différence de 0,5°C

- Après le lever du soleil : les valeurs de la température d'air et radiante sont supérieures de celle de la station météo avec une différence de 2°C pour la température d'air et 2,7 °C pour la température radiante.

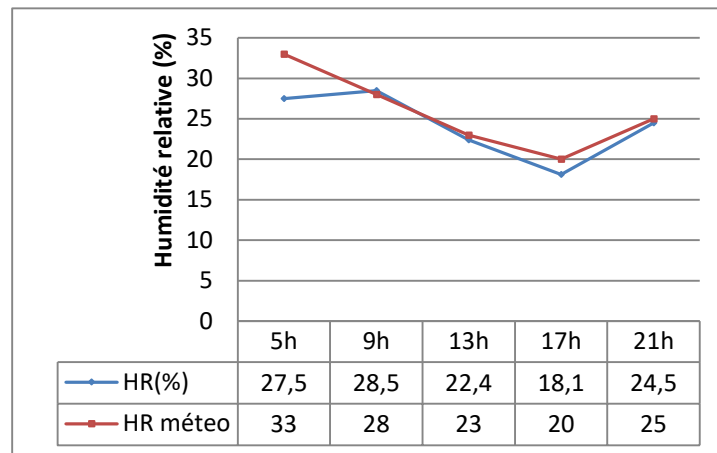
- A 13h : la température s'augmente avec une différence de 2,6°C par rapport la station pour la température de l'air et 3,6°C par rapport la station pour la température radiante.

- Avant le coucher du soleil : la température radiante a pris une valeur importante qui dépasse la valeur enregistrée par la station météo par 4°C, alors que pour la température de l'air on trouve une différence de 1,7 °C.

- Après le coucher du soleil : la température d'air est supérieure de celle de la station avec une différence de 2,8°C, alors que pour la température radiante on trouve une différence de 3,5°C.



Graphe V. 15: Variation journalière de la vitesse de l'air au cours d'une journée d'été (Place Iben Badis), établit par auteur, 2016.



Grphe V. 16: *Variation journalière de l’humidité relative au cours d’une journée d’été (Place Iben Badis), établit par auteur, 2016.*

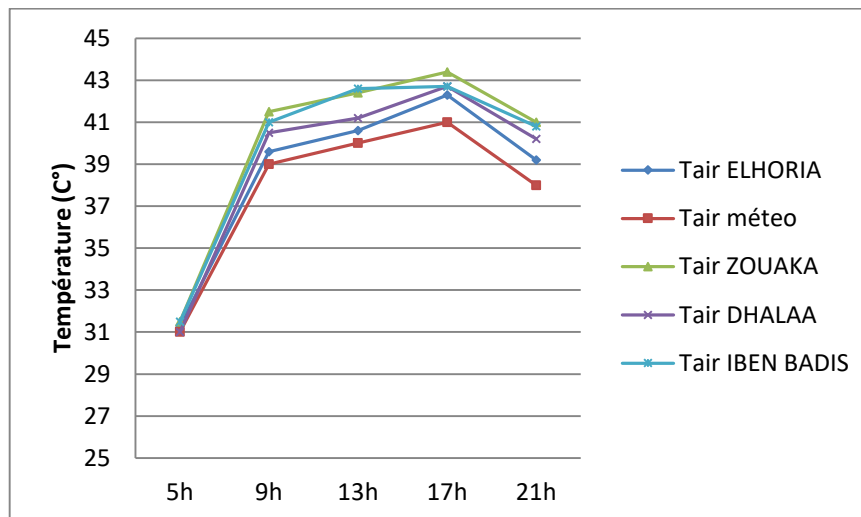
Les graphes (V.15, V.16) présentent la variation journalière de la vitesse de l’air et de l’humidité relative dans la place Iben Badis au cours d’une journée d’été.

L’analyse de l’évolution journalière des valeurs de la vitesse de l’air dans la place Iben Badis ; on observe que pendant toute la journée, les valeurs mesurées de la vitesse de l’air sont très faibles par rapport celles de la station météo. La vitesse de l’air prend sa valeur maximale de 1,5 m/s à 17h, alors que sa valeur minimale de 0,4 m/s a été enregistrée à 5h.

L’analyse de l’évolution journalière des valeurs moyennes de l’humidité relative dans la Place Iben Badis montre la diminution des valeurs de l’humidité relative par rapport celle de la station durant toute la journée, mis à part la valeur mesurée à 9h qui dépasse celle de la station avec une différence de 0,5%.

I.2. Comparaison des variations microclimatiques journalières dans toutes les places

I.2.1 Comparaison des variations microclimatiques journalières de la température de l'air



Graphie V. 17: Variation journalière de la température d'air dans les différentes places au cours d'une journée d'été, établit par auteur, 2016.

Le graphique (V.17) présente la variation journalière de la température d'air dans les différents points de mesure au cours d'une journée d'été.

La comparaison des résultats montre un accroissement remarquable des valeurs des températures enregistrée dans toutes les places par rapport les valeurs relevées par la station de météo.

On observe aussi que la place Elhoria présente les valeurs de la température de l'air les plus inférieures dans toute la journée que les autres places. Alors que la place Zouaka présente les valeurs de la température de l'air les plus supérieures dans toute la journée que les autres places. On remarque aussi à partir de la comparaison que :

- **Avant le lever du soleil :**

Les valeurs mesurées de température de l'air sont proches de celles relevées de la station météo avec une différence minimale entre les différentes places ; la valeur maximale est enregistrée dans les places Zouaka et Iben Badis avec 31,5°C, alors que la valeur minimale est enregistrée dans la place El Horia avec : 31,3°C.

- **Après le lever du soleil :**

Avec le début des gains thermiques, les valeurs mesurées de la température d'air sont élevées mais la différence entre eux reste faible pourtant que l'écart entre celles-ci et celle relevée par la station est important. La valeur maximale est enregistrée dans la place Zouaka avec un écart de 2,5°C par rapport la valeur relevée par la station météo, alors que la valeur minimale est enregistrée dans la place El Horia avec un écart de 0,6°C par rapport la valeur relevée par la station météo.

- **A midi :**

Avec l'augmentation du réchauffement qui augmente avec des gains thermiques. On observe que les valeurs de température d'air sont élevées dans toutes les places, la valeur maximale de la température est enregistrée dans la place Iben Badis qui dépasse la valeur relevée par la station météo avec une différence de 2,6°C, alors que la valeur minimale est enregistrée dans la place El Horia avec un écart de 0,6°C par rapport la valeur relevée par la station météo.

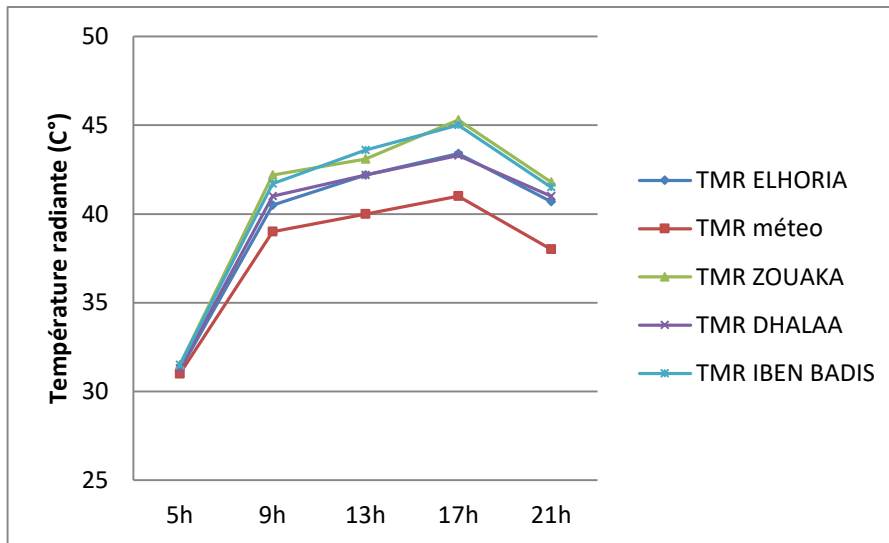
- **Avant le coucher du soleil :**

Après un cumul maximal de chaleur, on observe que les valeurs maximales de la température de l'air dans toutes les places sont enregistrées à ce moment. La valeur la plus élevée est enregistrée dans la place Zouaka avec un écart de 2,4°C par rapport la valeur relevée par la station météo, alors que la valeur la plus basse est enregistrée dans la place El Horia avec un écart de 1,2°C par rapport la valeur relevée par la station météo.

- **Après le coucher du soleil :**

Les valeurs de la température de l'air se diminuent sensiblement mais leurs écarts par rapport la valeur relevée par la station météo restent importants surtout pour la place Zouaka la valeur de la température de l'air dépasse la valeur relevée par la station par 3°C. La valeur de la température de l'air enregistré la plus faible a été enregistré dans la place El Horia avec un écart de 1,2 par rapport la station météo.

I.2.2 Comparaison des variations microclimatiques journalières de la température radiante



Graphie V. 18: Variation journalière de la température radiante dans les différentes places au cours d'une journée d'été, établi par auteur, 2016.

Le graphe (V.18) présente la variation journalière de la température radiante dans les différentes places au cours d'une journée d'été.

La comparaison des résultats montre un accroissement remarquable des valeurs des températures enregistrée dans toutes les places par rapport les valeurs relevées par la station de météo. On remarque une corrélation des valeurs mesurées dans la place EL Horia et la place Dhalaa et entre la place Zouaka et la place Iben Badis.

Les valeurs maximales de la température radiante sont enregistrées dans la place Zouaka et les valeurs minimales sont enregistrées dans la place El Horia.

On observe à partir de la comparaison des résultats que :

- **Avant le lever du soleil :**

Les valeurs de la température radiante se confondent dans la plupart des points avec les valeurs mesurées de la température d'air et la valeur relevée par la station météo. Cela revient à l'absence du gain thermique et tout effet de rayonnement.

- **Après le lever du soleil :**

On observe que, les valeurs de la température radiante s'augmentent avec le début du gain thermique. La valeur maximale est enregistrée dans la place Zouaka avec $42,2^{\circ}\text{C}$, alors que la valeur minimale est enregistrée dans la place El Horia avec $40,5^{\circ}\text{C}$.

- **A midi :**

L'excès de l'intensité de rayonnement solaire participe à l'augmentation des valeurs températures radiantes dans toutes les places, ce qui explique également l'accroissement des températures d'air mesurées. La valeur maximale est enregistrée dans la place Iben Badis avec $43,6^{\circ}\text{C}$ en dépassant la valeur relevée par la station par un écart de $3,6^{\circ}\text{C}$, alors que la valeur minimale est enregistrée dans la place El Horia et Dhalaa avec $42,2^{\circ}\text{C}$.

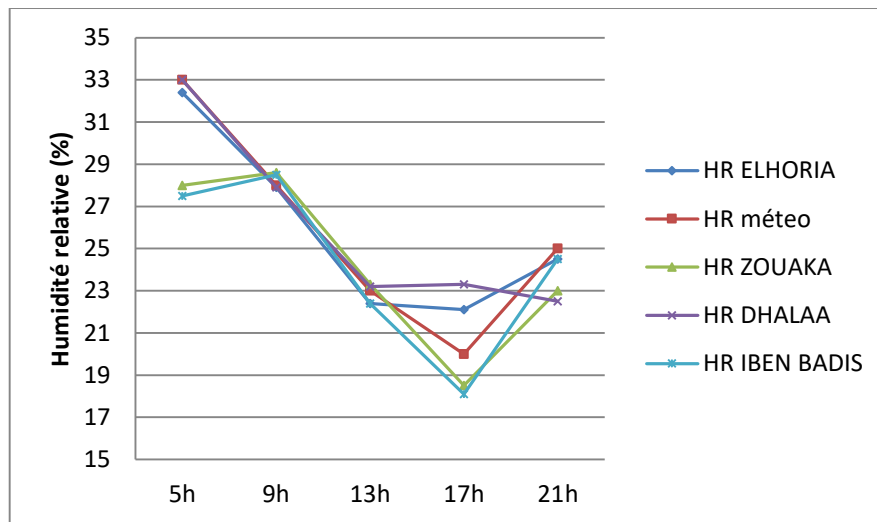
- **Avant le coucher du soleil :**

On observe l'augmentation des valeurs de la température radiante qui peut être expliqué par un effet de réchauffement résultant d'un cumul maximal de la chaleur. On enregistre un écart important entre les valeurs de la température radiante et la valeur relevée par la station météo dans toutes les places, surtout dans la place Zouaka où la température radiante arrive à $45,3^{\circ}\text{C}$ avec un écart de $4,3^{\circ}\text{C}$ par rapport la station météo.

- **Après le coucher du soleil :**

Les valeurs de la température radiante dans toutes les places sont élevées par rapport la valeur relevée par la station météo, cela revient sûrement au commencement de restitution de la chaleur emmagasinée. La valeur maximale est enregistrée dans la place Zouaka avec $41,8^{\circ}\text{C}$ en dépassant la valeur relevée par la station par écart de $3,8^{\circ}\text{C}$, alors que la valeur minimale est enregistrée dans la place El Horia avec $40,7^{\circ}\text{C}$.

I.2.3 Comparaison des variations microclimatiques journalières de l'humidité relative



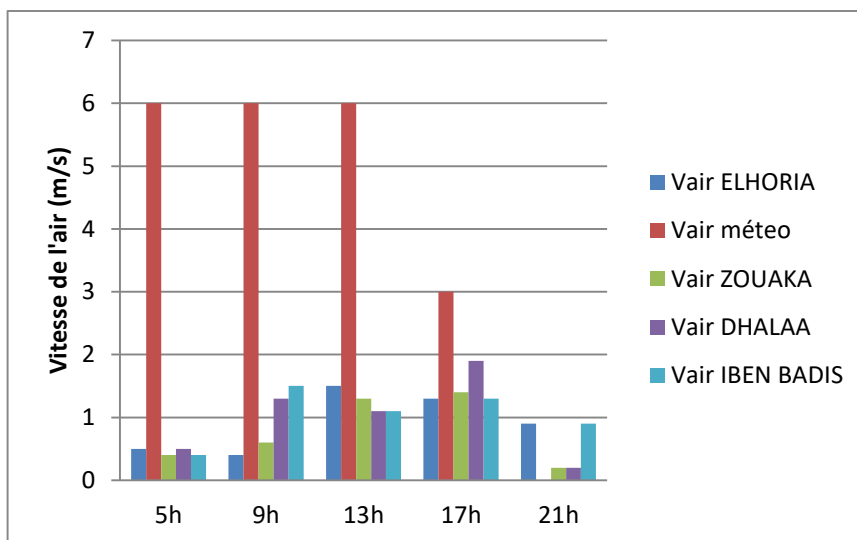
Graph V. 19: Variation journalière de l'humidité relative dans les différentes places au cours d'une journée d'été, établi par auteur, 2016.

Le graphique (V.19) présente la variation journalière de l'humidité relative dans les différentes places au cours d'une journée d'été.

On observe à partir de la comparaison des résultats la variation des valeurs mesurées de l'humidité relative dans toutes les places, on indique qu'il y a une corrélation entre les valeurs mesurées dans la place El Horia et la place Dhalaa ; ces valeurs correspondent avec les valeurs relevées par la station météo et une autre corrélation entre les valeurs mesurées dans la place Zouaka et la place Iben Badis.

Les valeurs les plus élevées de l'humidité relative sont enregistrées avant le lever du soleil, en enregistrant une valeur de 31,2% dans la place El Horia et une valeur de 33% dans la place Dhalaa. Alors que les valeurs les plus basses de l'humidité relative sont enregistrées à 17h, en enregistrant une valeur de 18,5% dans la place Zouaka et une valeur de 18,1% dans la place Iben Badis.

I.2.4 Comparaison des variations microclimatiques journalières de la vitesse de l'air



Graphie V. 20: Variation journalière de la vitesse de l'air dans les différentes places au cours d'une journée d'été, établit par auteur, 2016.

Le graphe (V.20) présente la variation journalière de la vitesse de l'air dans les différentes places au cours d'une journée d'été.

À partir de la comparaison des résultats, on observe que les valeurs de la vitesse de l'air mesurées sont plus faibles que la vitesse de l'air relevée par la station météo. La valeur maximale est enregistrée à 17h dans la place Dhalaa avec une valeur de 1,9m/s, en dépassant la valeur relevée par la station météo par un écart de 1,1m/s.

Durant toute la journée, sauf après le coucher du soleil, les valeurs de la vitesse de l'air sont minimales par rapport les valeurs relevées par la station météo.

Conclusion :

On distingue que la valeur minimale de la température de l'air est enregistrée dans la place El Horia avec un écart qui arrive à 2°C à midi par rapport les autres places étudiées. Dans la place Zouaka, on enregistre une valeur très élevée de température radiante à 17h avec 45,3°C en dépassant la valeur relevée par la station météo par un écart de 4°C et une valeur de 43,6 à 13h avec un écart de 3,6°C par rapport la station météo.

Dans la place Dhalaa et la place Iben Badis, on enregistre des valeurs importantes de la vitesse de l'air pendant toute la journée par rapport les autres places.

II. Relation entre les facteurs morphologiques et l'environnement thermique dans chaque place

L'étude de l'orientation pour les quatre places montre une orientation selon l'axe nord/sud (pour la place EL Horia et Dhalaa) et une orientation Sud-Est/Nord-Ouest (pour la place Zouaka et Iben Badis).

II.1 l'orientation du grand axe : Nord/Sud

Les places bénéficient d'une longue durée d'ensoleillement. La place Dhalaa est protégée des vents chauds par son relief (djebel). La place El Horia est protégée de l'ensoleillement direct de l'Est et l'Ouest par les constructions (figure V.1).

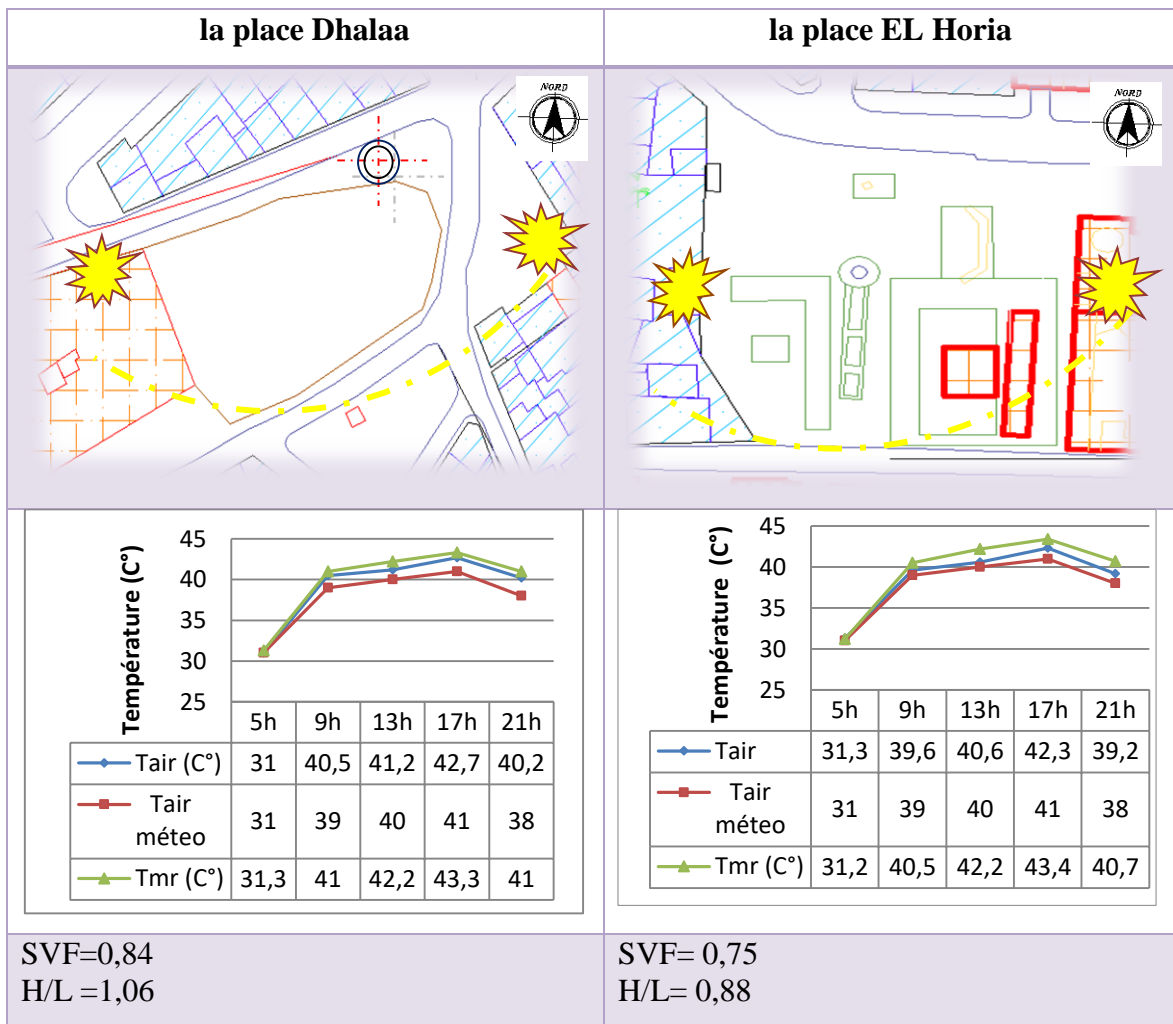


Figure V. 1: Comparaison des facteurs morphologiques et l'environnement thermique dans deux places, établit par auteur, 2018

La comparaison des valeurs des températures de l'air (T_{air}) et les valeurs des températures moyennes radiantes (T_{mr}) à la référence des valeurs des températures de la station de météo ($T_{air\ météo}$), nous montre que la place El Horia présente un environnement thermique plus frais que la place Dhalaa, comme nous estimons un phénomène de refroidissement nocturne plus rapide dans cette place par rapport la place Dhalaa (figure V.1).

La place El Horia jouit de l'ensoleillement pendant la journée mais l'ombre procuré par les constructions voisines aide à refroidir cette place rapidement bien que le facteur d'ouverture au ciel ($SVF = 0,75$) est plus moins de celui de la place Dhalaa ($SVF = 0,84$). Selon Oke, un faible SVF (Sky View Factor) entraîne la rétention du rayonnement à longue longueur d'onde, limitant ainsi le refroidissement nocturne.

Selon l'étude de Aida (1982) et Aida et Gotoh (1982) portant sur des rues canyon avec différents rapports d'aspect (H/W), il a été constaté une diminution de l'absorption de l'énergie solaire incidente de 27 % à 13 % lorsque le rapport H/W passe de 0,5 à 2. En comparant les rapports d'aspect des places El Horia ($H/W=0,88$) et Dhalaa ($H/W=1,06$), on observe que la place El Horia reçoit un pourcentage élevé d'énergie solaire directe, en particulier sur les surfaces verticales des bâtiments, par rapport à la place Dhalaa.

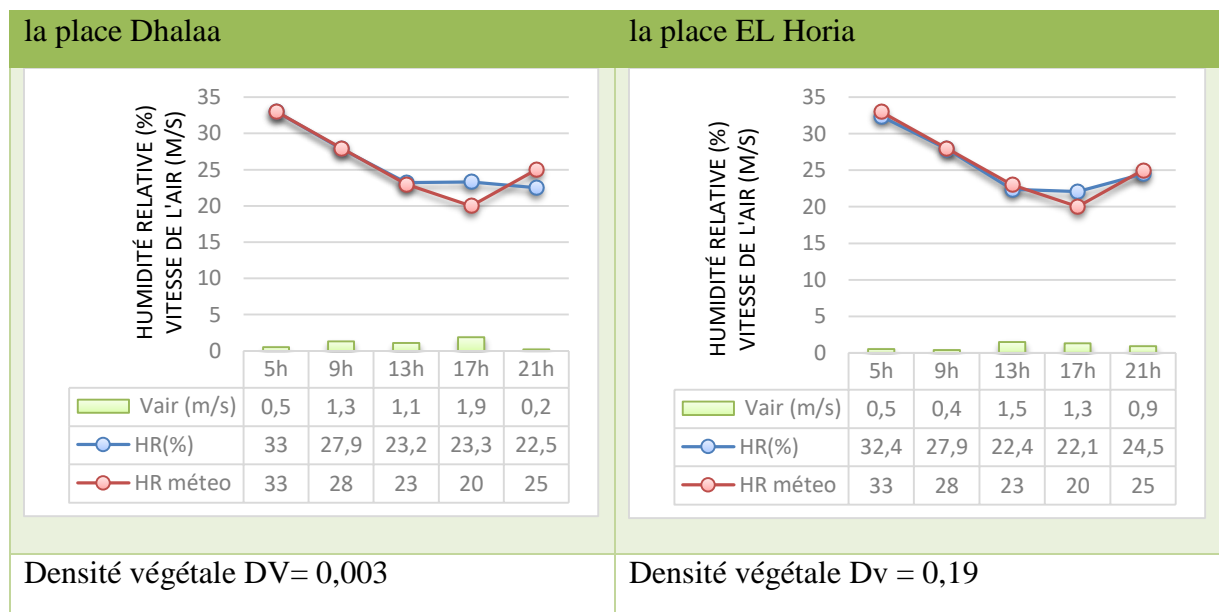


Figure V. 2: Comparaison de facteur de la densité végétale avec les valeurs de la vitesse de l'air et l'humidité dans deux places, établi par auteur, 2018

L'air le plus frais dans la place El Horia est expliqué par la présence de la végétation qui joue un rôle important dans le rafraîchissement de l'environnement, elle absorbe le rayonnement solaire, augmente l'humidité et filtre le vent de sable et de poussière. On trouve que le facteur de la surface végétale dans cette place (DV=0,19) est plus important que le facteur de la densité végétale dans la place Dhalaa (DV=0,003). On ajoutant l'effet d'évapotranspiration dans les deux places (avec la présence de jet d'eau) surtout dans la place Dhalaa à 17h avec une vitesse d'air de 1,9m/s et l'humidité relative qui atteint 23,3 %.

II.2 l'orientation du grand axe : Sud-Est/Nord-Ouest

L'orientation de deux places expose leur espace à un rayonnement direct ardent. La place Zouaka est ombragée du côté Ouest par les constructions, mais la place Iben Badis est plus exposée au soleil et au vent chaud. (figure V.3).



Figure V. 3: Comparaison des facteurs morphologiques et l'environnement thermique dans deux places, établit par auteur, 2018

La comparaison des valeurs des températures de l'air (T_{air}) et les valeurs des températures moyennes radiantes (T_{mr}) à la référence des valeurs des températures de la station de météo (T_{air} météo), nous montre que la place Iben Badis présente un environnement thermique plus frais que la place Zouaka, comme nous considérons un comportement thermique similaire dans les deux places à cause de rapprochement des valeurs des facteurs morphologiques (figure V.3).

La place Iben Badis reçoit un ensoleillement important pendant toute la journée avec un facteur d'ouverture au ciel ($SVF = 0,509$) qui est plus moins de celui de la place Zouaka ($SVF = 0,84$).

Les rapports d'aspect ($H/W=1,11$) dans la place Zouaka et ($H/W=1,05$) dans la place Iben Badis montrent que les deux places reçoit un pourcentage élevé d'énergie solaire directe.

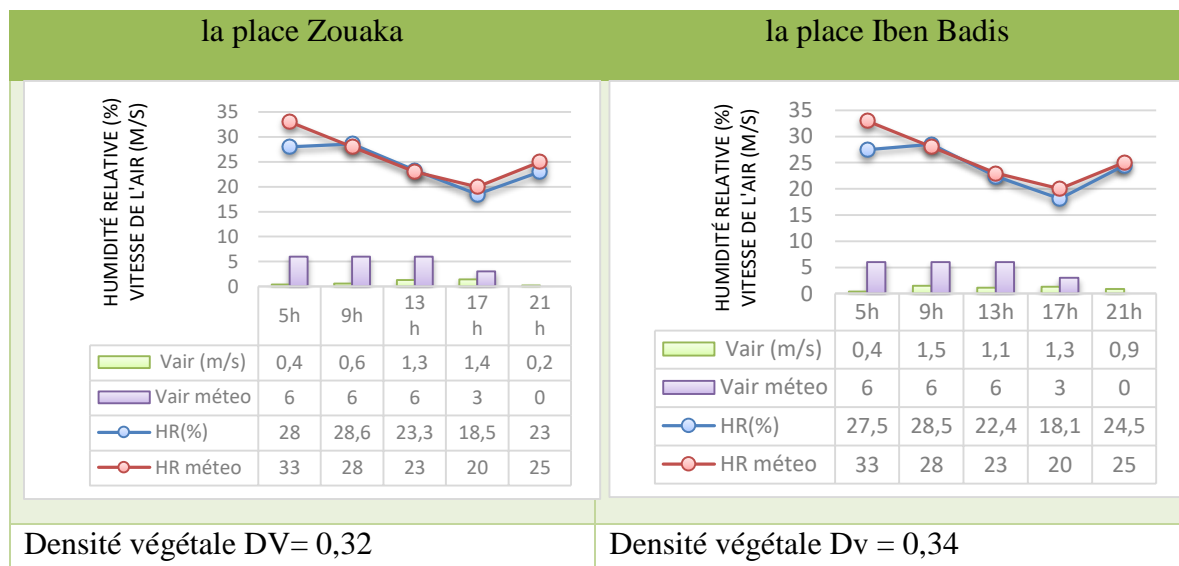


Figure V. 4: Comparaison de facteur de la densité végétale avec les valeurs de la vitesse de l'air et l'humidité dans deux places, établit par auteur, 2018

Les deux places bénéficient d'un ombrage important grâce à un nombre important d'écran d'arbre. Cela est traduit par les valeurs de facteur de la densité végétale élevé dans la place Iben Badis ($DV=0,34$) et dans la place Zouaka ($DV=0,32$). La présence de la végétation joue aussi un rôle essentiel dans le rafraîchissement de l'environnement.

II.3 Résultats obtenus :

Cette étude montre que l'orientation Nord-Sud de grand axe de la place publique est préférable, cette orientation diminue la durée d'exposition des façades des bâtiments entourant au rayonnement solaire et améliore les conditions thermiques dans la place publique. Une place orientée dans la direction Est-Ouest dans le climat chaud et aride l'a exposé à une grande quantité de rayonnement solaire. L'augmentation de rapport d'aspect H/W et la présence d'arbres et la végétation peut diminuer le rayonnement solaire réfléchi dans l'espace ouvert.

Le rapport d'aspect H/W est le facteur le plus important qui affecte l'environnement thermique dans l'espace public urbain dans un climat chaud et aride. Si sa valeur est élevée, il peut fournir de l'ombrage et réduire la quantité de rayonnement solaire. Il est préférable que le rapport d'aspect H/W ne soit pas inférieur à 1,0 pour fournir des zones d'ombrage au utilisateurs de l'espace et pas plus de 2,0 qui peuvent piéger le rayonnement solaire réfléchi dans le espace ouvert.

Conclusion :

L'étude comparative des variations microclimatiques journalières des paramètres climatiques dans les quatre placettes a permis de caractériser le microclimat dans chaque espace en considérant les facteurs qui améliorent ou modifient le microclimat urbain, on constate que les deux places « El Horia et Dhalaa » présentent les valeurs de la température de l'air les plus inférieures. Alors que les deux places « Iben Badis et zouaka » présentent les valeurs maximales de la température de l'air dans toute la journée que les autres places. Les valeurs maximal des températures d'air sont enregistrées après-midi avec un cumul de chaleur (on enregistre un écart de 2,4°C dans la place Zouaka et de 1,2°C dans la place Iben Badis par rapport la valeur relevée par la station météo).

On observe aussi, l'augmentation des valeurs de la température radiante dans toutes les places, surtout dans la place Zouaka, où la température radiante arrive à 45,3°C avec un écart de 4,3°C par rapport la station météo

On observe à partir de la comparaison des résultats la variation des valeurs mesurées de l'humidité relative dans toutes les placettes, on indique qu'il y a une corrélation entre les valeurs mesurées dans la place El Horia et la place Dhalaa ; ces valeurs correspondent avec les valeurs relevées par la station météo et une autre corrélation entre les valeurs mesurées dans la place Zouaka et la place Iben Badis.

Avant le coucher de soleil, les valeurs de l'humidité relative sont supérieures par rapport celles de la station météo dans les deux places : El Horia et Dhalaa. La présence de la végétation et des surfaces d'eaux explique l'élévation de l'humidité de l'air et par conséquent son rafraichissement par évapotranspiration durant la journée. L'ombrage des arbres fournit une diminution des températures d'air. Ce cas on le trouve dans les deux places « El Horia et Dhalaa » où la présence de l'eau joue un rôle important dans le rafraichissement de l'air.

Bien que des faibles facteurs d'ouverture au ciel (SVF) et rapport d'aspect (H/W) conduisent au piégeage du rayonnement et un pourcentage élevé d'énergie solaire, qui est le cas constaté dans la place El Horia ; on trouve que cette place présente les conditions les plus favorables de microclimat urbain parmi les quatre places étudiées. Cela revient à son orientation et la présence des végétations et d'eau qui aident à améliorer l'environnement thermique dans cette place.

**CHAPITRE VI : LA PLACE EL HORIA : ÉTUDE COMPARATIVE
ET SIMULATION**

INTRODUCTION :

L'analyse microclimatique exprimée dans le chapitre précédent montre que la place d'El Horia située au centre-ville de Biskra était celle qui présente les conditions les plus favorables de microclimat urbain parmi les quatre places étudiées.

Dans ce chapitre, tout d'abord, on va comparer les résultats obtenus dans la place d'El Horia à Biskra par les variations microclimatique caractérisée la place située au Ksar Ouargla. On a pris la place du ksar Ouargla comme référence de l'adaptation bioclimatique dans l'espace urbain saharien. C'est un exemple représentatif des milieux saharien à climat chaud et aride.

Cette comparaison sera réalisée dans une tentative pour vérifier l'influence de la forme urbaine sur l'adaptation bioclimatique de cette place parce que les deux places appartiennent au même contexte d'étude (climat chaud et aride) mais la forme urbaine se diffère. La première est insérée dans un tissu urbain moderne et la deuxième est insérée dans un tissu traditionnel compact.

On va étudier par la suite, l'influence des facteurs morphologiques sur la modification du microclimat urbain et l'amélioration de la qualité de l'environnement thermique dans la place El Horia. Par l'outil de simulation de microclimat urbain « Envi-Met », on va examiner l'effet d'aménagement de la place El Horia par diverses installations végétales afin d'augmenter le facteur de densité végétale (**Dv**) : **un pavé vert ou gravier, Végétation sur surfaces verticales, Toits verts, surfaces d'eau**. On va évaluer aussi l'utilisation des couleurs claires à **albédo élevé** pour les façades entourant la place et l'implantation des écrans d'arbres à taille moyenne (10 à 20m) pour réduire **l'ouverture au ciel**. Ces installations et d'autres peuvent améliorer l'environnement thermique dans la place et créer des conditions favorables de microclimat urbain.

I. Comparaison entre La place El Horia à Biskra et la place du ksar Ouargla : une tentative d'évaluation d'adaptation bioclimatique

La place du ksar Ouargla se présente comme une entité traditionnelle adaptée au climat chaud et aride, elle a été concernée comme une référence de l'adaptation bioclimatique de l'architecture traditionnelle au climat chaud et aride. Les résultats montrés dans l'étude de SEBTI M., ALKAMA Dj., BOUCHAIR A. (2013), qui ont évalué l'effet des transformations modernes sur l'adaptation bioclimatique de l'espace urbain du ksar Ouargla, montrent que le tissu traditionnel du Ksar Ouargla est un bon référence d'adaptation aux conditions climatiques difficiles et présente des conditions microclimatiques favorables. Ces résultats sont comparés par les résultats relatifs à la ville de Biskra. Parce que les deux villes (Biskra et Ouargla) sont deux villes sahariennes appartiennent au même contexte d'étude (zone à climat chaud et aride).

I.1 motivation du choix du place de Ksar Ouargla comme un référence d'adaptation bioclimatique dans un espace urbain saharien

Les ksour sahariens répondent aux conditions climatiques difficiles par l'adaptation au milieu physique et la protection contre les facteurs climatiques indésirables. Cette adaptation relève de plusieurs niveaux (la forme des habitations, le système viaire, le système parcellaire, la façade et les matériaux de construction). Le ksar d'Ouargla est le noyau urbain de la ville qui était choisie pour sa représentativité des villes sahariennes à climat chaud et aride en Algérie.

Le ksar d'Ouargla est composé de trois quartiers principalement résidentiels, qui abritent plusieurs équipements et infrastructures (Sebti M. et al. 2013). Ce ksar était choisi pour des raisons méthodiques parce qu'il présente une entité urbaine particulière, Une structure compacte très dense.



Figure VI. 1: *Le tissu traditionnel du ksar d'Ouargla, établit par l'auteur, 2013*

La place du ksar d'Ouargla est orientée selon l'axe Nord- Ouest à Sud- Est. Elle est insérée un tissu traditionnel compact, c'est un petit espace clos qui put être utilisé comme espace regroupement et d'assise qui contient seulement de petits bancs à la limite des murs.



Figure VI. 2: *Localisation précise du 5ème point de mesure, établit par l'auteur, 2013*

Cette placette a eu une forme presque rectangulaire, elle a 9,00 m de largeur et 11,20 m de longueur. Elle est formée par quatre façades d'une hauteur de (R+1) et constitue des locaux de commerce.



Figure VI. 4: Vue de la placette côté Sud- Est. Source : Auteur, 2011



Figure VI. 3: Vue de placette côté Nord- Ouest. Source : Auteur, 2011

I.2 Présentation des campagnes de mesure dans la place du Ksar Ouargla

L'ambiance thermique en milieu urbain est tributaire d'un ensemble de quatre grandeurs qui sont : la température sèche de l'air, l'humidité relative de l'air, la température moyenne de rayonnement et la vitesse de l'air. Pour cela la présente étude se base sur la prise de ses paramètres climatique dans la saison estivale. Dans cette étude les mesures sont prises à l'aide de deux instruments portatifs qui sont : un Environnement Mètre modèle 8820 et un Anémomètre à Fil Chaud (figure VI.5). Les moments choisis sont liés au régime thermique journalier : 05h00, 09h00, 12h00, 17h00 et 21h00. Les valeurs maximales et minimales de quatre grandeurs climatiques enregistrées dans cette étude se présentent en graphe dans la figure VI. 6.



Figure VI. 5: les instruments de mesure (A) Environnement Mètre 8820 et (B) Anémomètre à Fil Chaud. Source : Auteur, 2013

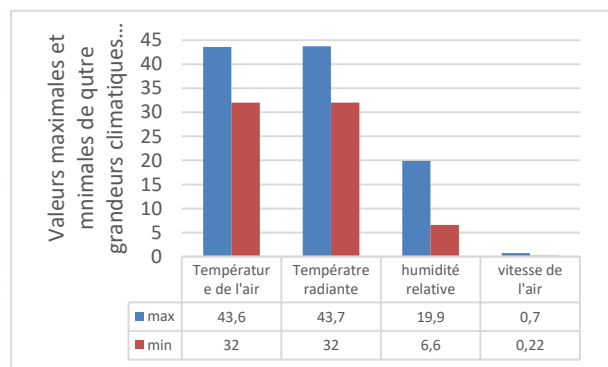


Figure VI. 6: valeurs Maximales et minimales de quatre grandeurs climatiques mesurées. Source : Auteur, 2013

I.3. Comparaison des variations microclimatiques journalières dans les deux places (place El Horia et place du ksar Ouargla)

L'étude comparative entre les deux places sera réalisée parce qu'on a considéré le ksar comme un témoignage d'une entité traditionnelle bien adapté au climat. La comparaison de la place El Horia avec la place du ksar peut affirmer l'adaptation bioclimatique de cette place au climat si elle manifeste d'un environnement thermique similaire ou proche de celui du Ksar. Les mesures de quatre paramètres climatiques sont représentées sous forme de graphes dans le tableau suivant :

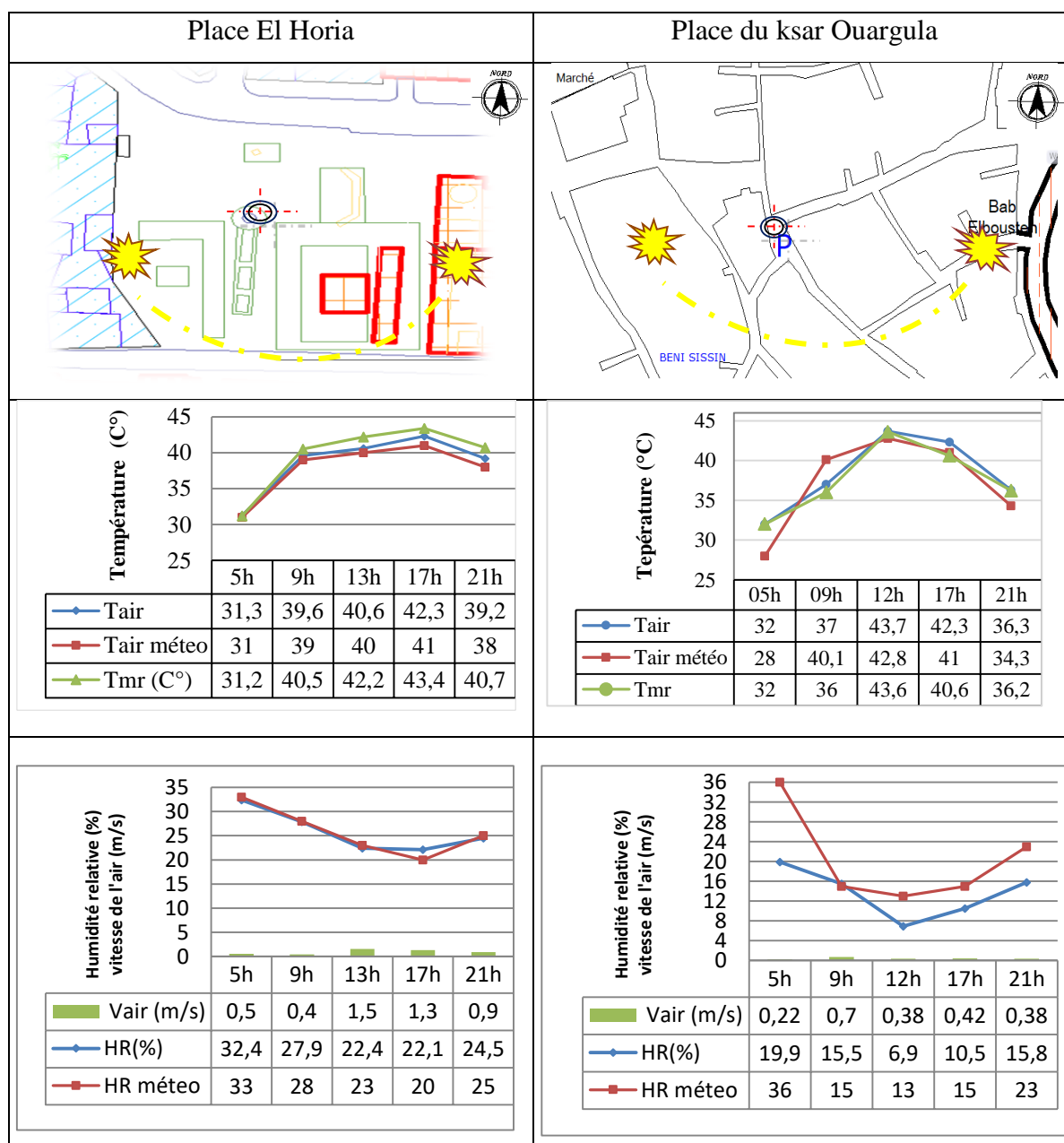


Tableau VI. 1: Comparaison des variations microclimatiques journalières dans la place du ksar Ouargla et la place El Horia. Source : Auteur, 2022

La comparaison des températures pour les deux places et la station météorologique dans la zone ouverte (terrain non urbanisé) montre des conditions thermiques relativement plus fraîches à l'intérieur de la place du ksar par rapport à la place El Horia à Biskra. Le schéma des courbes montre que l'effet de refroidissement se produit principalement le matin (avant midi) avant le réchauffement du tissu qui commence à émettre de la chaleur l'après-midi. Dans la place El Horia à Biskra, on identifie un effet thermique caractérisé surtout la période de l'après-midi, qui se traduit par l'augmentation des valeurs moyennes des températures de l'air qui dépasse celles de la station météorologique par une différence qui atteint 1,3°C à 17h. Alors que la différence moyenne de température radiante atteint 2,4°C dans le même moment de la journée. Cette augmentation des valeurs de températures est expliquée par le réchauffement de la chaleur transférée de la chaleur sensible stockée dans les matériaux de construction et l'asphalte au sol. Contrairement dans la place du ksar, on trouve un abaissement des valeurs des températures radiantes par rapport les valeurs moyennes de température de la station météorologique, cet effet revient au ombre provoqué par la compacité du tissu et l'inertie thermique des matériaux de construction qui empêche le stockage et la restitution de la chaleur.

Dans la place du Ksar, On remarque que l'humidité relative est relativement faible (moins de 20 %). Ceci est en fait dû à l'absence de végétation. Les vitesses de l'air sont aussi faibles dans toute la journée. La configuration organique urbaine et le système routier irrégulier réduisent la vitesse du vent et créent un faible flux continu de vents avec changement de direction, provoquant des coupes de vent qui augmentent les différences de pression atmosphérique autour des zones bâties améliorant la ventilation nécessaire. L'humidité relative dans la place el El Horia est importante par rapport celle de la station météorologique (plus de 20 %). Elle enregistre une valeur très élevée à 17h grâce à l'effet d'évaporation à ce moment (la fontaine commence à jeter l'eau). La vitesse de l'air à l'après midi aide humidifier l'air chaud.

I.4. Discussion du résultat :

Cette comparaison nous a permis de vérifier l'adaptation bioclimatique dans la place El Horia en fait référence à la place du ksar Ouargla. Malgré l'absence de l'eau et la végétation dans la place du ksar ; ceux-ci qui ont un effet remarquable dans l'humidification de microclimat dans la place El Horia ; on trouve que la place du ksar bénéficie d'un environnement thermique plus frais.

A cet égard, il est nécessaire de noter que le réchauffement climatique dans la place El Horia revient principalement à l'effet de la chaleur émise dans l'air. On ajoutant aussi l'effet de la restitution de la chaleur stockée dans les matériaux de construction. Cette chaleur augmente les valeurs de la température radiante en air.

Donc pour améliorer le microclimat urbain dans la place El Horia exige l'introduction raisonnable de l'eau, de la végétation et des matériaux froids surtout de pavé.

II. Simulation de l'amélioration de l'environnement thermique dans la place El Horia

L'amélioration de l'environnement thermique dans la place El Horia exige le recours à la modélisation par le logiciel de simulation de microclimat urbain Envi-Met. L'objectif de cette simulation est de proposer un aménagement adopté plusieurs stratégies de modification microclimatique dans cet espace ouvert situé au centre-ville de Biskra.

Plusieurs stratégies significatives d'amélioration du microclimat sont proposées : L'utilisation de matériaux froids dans les chaussées, espaces verts, espace d'eau et ombrage important.

II.1. Présentation et motivation du choix du logiciel de simulation « Envi Met »

ENVI-met est un modèle tridimensionnel de microclimat conçu pour simuler les interactions entre la surface, la végétation et l'air en milieu urbain, avec une résolution spatiale typique de 0,5 à 10 mètres et temporelle de 10 secondes. Ce modèle trouve des applications dans des domaines tels que la climatologie urbaine, l'architecture, la conception de bâtiments et la planification environnementale.

ENVI-met est un logiciel gratuit basé sur des projets de recherche scientifique et est constamment en développement. Il repose sur les lois fondamentales de la dynamique des fluides et de la thermodynamique. Le modèle permet de simuler divers aspects, surtout :

- Les flux d'air autour et entre les bâtiments.
- Les échanges de chaleur et de vapeur à la surface du sol et au niveau des parois.
- La turbulence.
- Les interactions avec la végétation et les paramètres de végétation.
- La bioclimatologie.
- La dispersion de particules.
- ENVI-met est accompagné de plusieurs logiciels supplémentaires, tels qu'un module d'édition et des outils de visualisation graphique pour les résultats du modèle.

Le choix du logiciel de simulation de microclimat « ENVI-met » est expliqué par son utilisation dans différents projets de recherche scientifique, il est donc en constante évolution. Il a été appliqué pour évaluer les impacts thermiques de la forme urbaine et des scénarios de conception (Kariminia Shahab et al., 2015, OTHMAN A. A. ET AL, 2020) et l'efficacité des stratégies d'atténuation de la chaleur telles que l'augmentation de la couverture arborée et les matériaux frais (M. Santamouris et al., 2012 ; Dimoudi, A., et Nikolopoulou, M., 2003).

De nombreux modèles ont été développés pour simuler les conditions thermiques dans les espaces extérieurs. Les modèles diffèrent principalement dans leur espace étendue (emplacement unique par rapport à grille 2D ou 3D), résolution spatiale et temporelle, intensité de calcul, exigences d'entrée, type de sortie mesures de la chaleur (par exemple, Tair, Tmr, indices de confort thermique) et calcul de conditions atmosphériques (empiriques ou basées sur la physique).

RayMan (Matzarakis et al., 2010) et ENVI-met (Bruse et Fleer, 1998) ont été les plus souvent utilisés pour évaluer les conditions thermiques dans des environnements urbains. Une recherche Scopus dans Juin 2020 au cours des 20 dernières années a produit 87 RayMan et 423 ENVI-met études. Bien que RayMan ait été spécialement conçu pour modéliser la densité de flux de rayonnement et la température moyenne radiante (Tmr) pour des points uniques dans l'espace, ENVI-met est un modèle numérique qui simule une suite complète de variables atmosphériques dans un domaine maillé. Les deux modèles ont été développés dans un climat tempéré (Allemagne), mais ont été utilisés dans environnements chauds et arides (Crank PJ, et al., 2020).

II.2. méthodologie de simulation

Dans la présente étude, nous recourons à la simulation à l'aide du logiciel Envi-met afin de vérifier l'effet de plusieurs stratégies d'amélioration du microclimat qui sont proposées dans l'aménagement du place El Horia au centre-ville de Biskra.

Tout d'abord on simule l'état initial de l'aménagement existant, les résultats obtenus seront étudiés et analysés en les comparant avec les résultats des paramètres microclimatiques mesurés et collectés lors de l'expérimentation.

L'importance de cette **première étape** se tient à considérer cette simulation comme modèle de référence de test (S0) pour évaluer la performance des stratégies d'aménagement proposes.

La deuxième étape de l'étude se base sur la simulation numérique et la comparaison de deux scénarios d'aménagement différents appliqués à la place. Le premier scénario impliquant l'utilisation de matériaux froids pour les trottoirs, les façades et les toits. Le deuxième impliquant en ajoutant l'espace vert et l'eau. Chaque scénario a été comparé avec la condition initiale utilisée comme modèle de référence de test (S0) pour évaluer la performance des stratégies d'aménagement.

- Les matériaux sont choisis selon leurs caractéristiques thermiques
- La sélection des arbres et de végétation doit assurer une densité végétale élevée qui peuvent fournir l'ombre nécessaire pour toute la surface de la place et doit être conforme avec le climat chaud et aride.

Nous avons choisi d'appliquer le matériau prédominant, ce sont des briques cuites pour les murs.

La simulation par le logiciel Envi-Met a été effectuée de 5h à 21h en dans une journée représentative de la période chaude (le 05 Aout 2016)

Les données climatiques « Input data » utilisés dans la simulation est dérivé des mesures qui sont pris dans la première étape d'investigation. On a introduit quatre paramètres climatiques qui sont la température de l'air (T_{air}), la température radiante (T_{mr}), l'humidité relative (HR) et la vitesse de l'air (V_{air})

L'implantation de l'espace vert est basée sur les résultats de l'analyse de la première étape de l'étude, qui montre une relation entre l'effet d'ombrage et les lieux d'implantation.

- Le premier scénario d'aménagement (S1) se base sur l'effet de refroidissement des matériaux de la chaussée et de pavé.
- Le deuxième scénario d'aménagement (S2) se rassemble l'effet de différents matériaux, les arbres, les surfaces végétalisées et les espaces d'eau.

Les données de simulation sont présentées dans le tableau ci-dessous.




Données	Modèle De Référence (S0)	Scénario S1	Scénario S2
Modèle 3D			
Latitude (°)	34.85	34.85	34.85
Longitude (°)	5.73	5.73	5.73
Date De Simulation	05/08/2016	05/08/2016	05/08/2016
Duré De Simulation (h)	24heures	24heures	24heures
Revêtement Du Sol	<ul style="list-style-type: none"> - Route : Asphalte. Chaussée : Trottoir En Béton Gris. - Surfaces Naturelles : Sol Sableux 	<ul style="list-style-type: none"> - Route : Asphalte. Voie : Route Asphaltée Avec Revêtement Rouge - Chaussée : Trottoir En Béton Blanc (Light). - Pavé De Granit (Pierre Unique) - Pavé De Granit Brillant - Passage : Terre Battue (Brique Brisée) Surfaces Naturelles : Sol Sableux 	<ul style="list-style-type: none"> - Route : Asphalte. Voie : Route Asphaltée Avec Revêtement Rouge - Chaussée : Trottoir En Béton Blanc (Light). - Pavé De Granit (Pierre Unique) - Pavé De Granit Brillant - Passage : Terre Battue (Brique Brisée) Surfaces Naturelles : Sol Sableux
Végétation	<ul style="list-style-type: none"> - Palmiers : Palmier Washingtonia - Arbre (10m) - Herbe : 50 Cm En Moyenne. Dense 	<ul style="list-style-type: none"> - Palmiers : Palmier Washingtonia - Arbre (10m Eu Dense) - Herbe : 50 Cm En Moyenne. Dense 	<ul style="list-style-type: none"> - Palmier A Grand Tronc, Dense, Moyen (20m) ; - Arbres A Feuilles Caduques (10m Très Dense) - Arbre Persistante (15m) - Herbe : 50 Cm En Moyenne. Dense
Matériaux Du Bâtiment	Mur : Mur En Béton Armé	Mur : Briques Cuite	Mur : Briques Cuite

Tableau VI. 2: les données d'entrée de simulation pour le modèle de référence (S0) et les deux scénarios (S1) et (S2). Source : Auteur

II.3. Résultats de la simulation :

II.3.1 résultats de la simulation de la condition initiale de la place (modèle de référence (S0.))

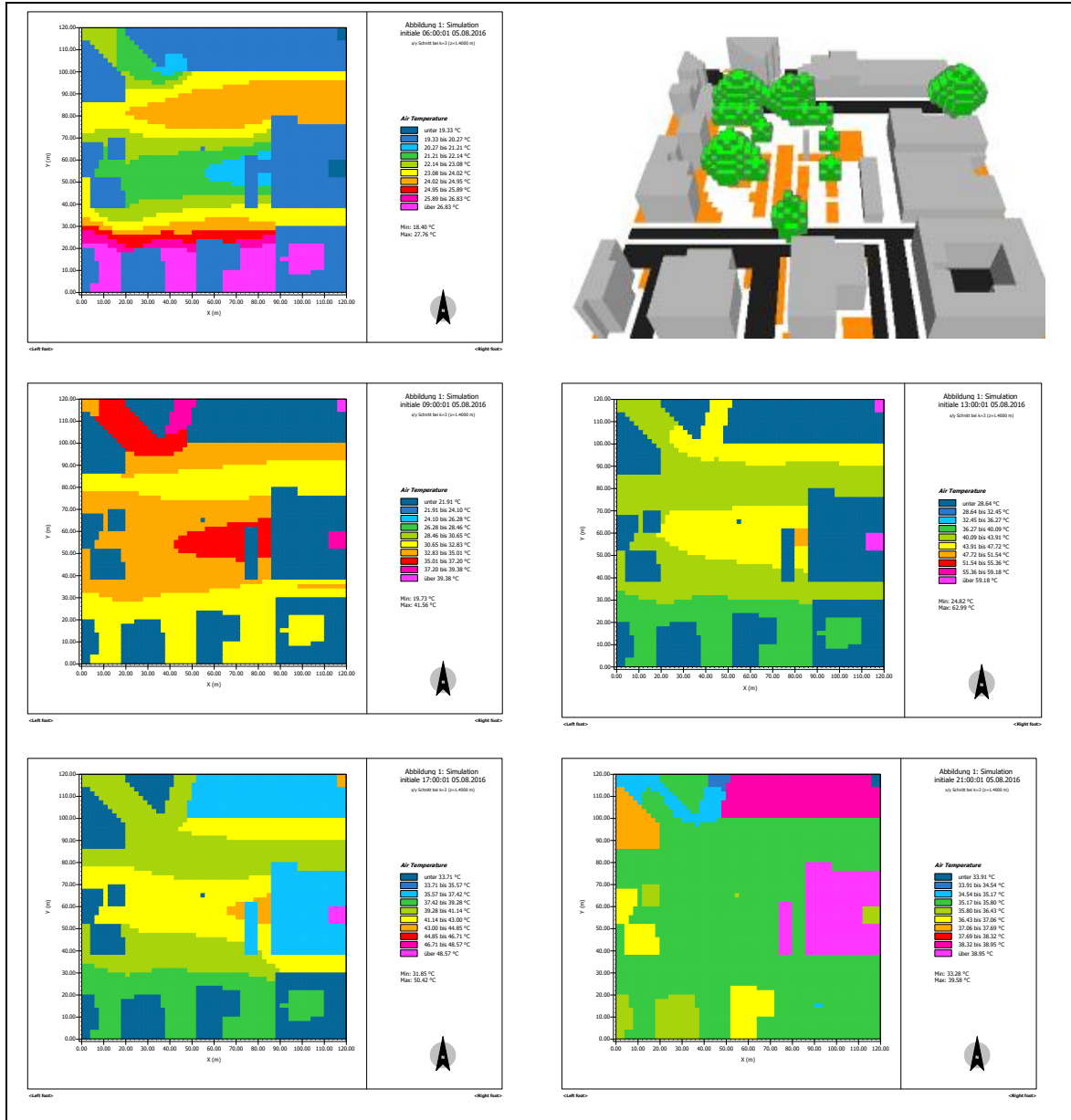


Figure VI. 7: Carte des variations journalières de la température de l'air enregistrées dans la place El Horia pendant cinq moments d'une journée d'été au scénario de référence (S0). Source : Auteur

Au cours de la journée d'analyse de la 1ère étape de l'étude, les résultats obtenus montrent une corrélation entre les résultats des paramètres climatiques mesurés et ceux qui sont obtenus par la simulation. Une différence importante avec la valeur mesurée de la température de l'air a été enregistrée par la simulation à 13h (égale à 5°C).

Cet écart peut être expliqué par l'augmentation des valeurs de la température radiante résultant d'un cumul maximal de la chaleur de 9h à 17h parce que le logiciel introduit tous les surfaces de réflexion de la chaleur qui peuvent être existé dans la place mais l'appareil de mesure reste peu sensible à toutes les réflexions (utilisation d'enceinte noire).

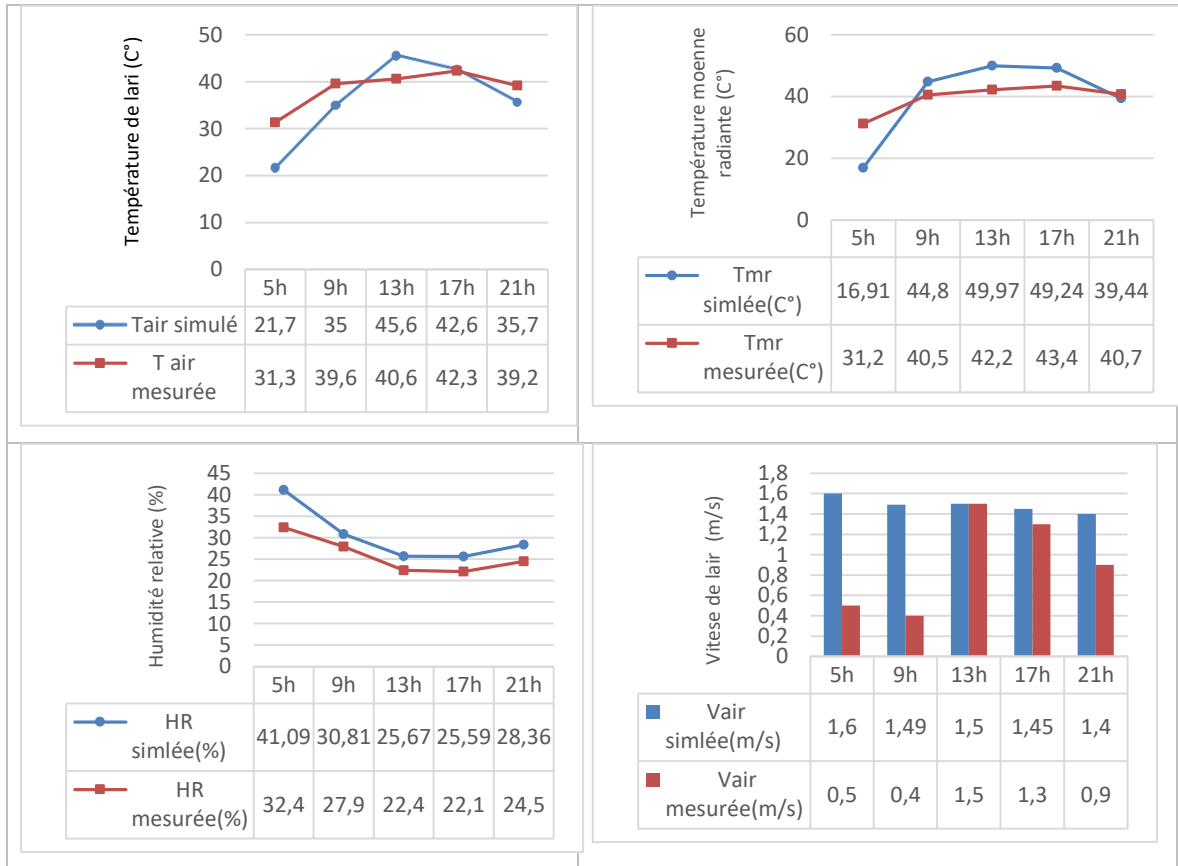


Figure VI. 8: Variation journalière de la température de l'air, de la température radiante, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air au cours d'une journée d'été (Place El Horia)
Source : Auteur, 2022

Les valeurs de de la température de l'air (Tair) simulées de 5h à 9h sont inférieurs de ceux de la température de l'air mesurée, cela peut être expliqué par la restitution de la chaleur emmagasinée dans les matériaux des surfaces (l'augmentation de la valeur de la température de l'air mesuré par rapport celle de la valeur simulé revient l'augmentation de la valeur de la température radiante).

Concernant les valeurs simulées de l'humidité relative (HR), on trouve une différence importante par rapport les valeurs mesurées seulement à 5h mais toute la journée les deux valeurs sont proches même des valeurs de la station météo avec l'absence des végétations et de l'eau.

Les valeurs de la vitesse de l'air (V_{air}) simulées sont très élevées par rapport les valeurs de la vitesse de l'air mesurées, cela revient à l'environnement restreint du modèle de simulation qui ne prend en considération que les obstacles environnantes de place (voir Figure VI. 8)

Les résultats obtenus par la simulation du modèle ENVI-met a été validée par une comparaison entre les données mesurées et simulées. Cette étape est essentielle pour créer un système numérique fiable, (d'après Matallah M. H., 2021).

Pour la validation de modèle de simulation, nous avons utilisé l'indice de l'erreur quadratique moyenne (**RMSE**), en anglais : « root-mean-square error » qui est une mesure fréquemment utilisée des différences entre les valeurs prédites par un modèle (simulées) et les valeurs observées (mesurées).

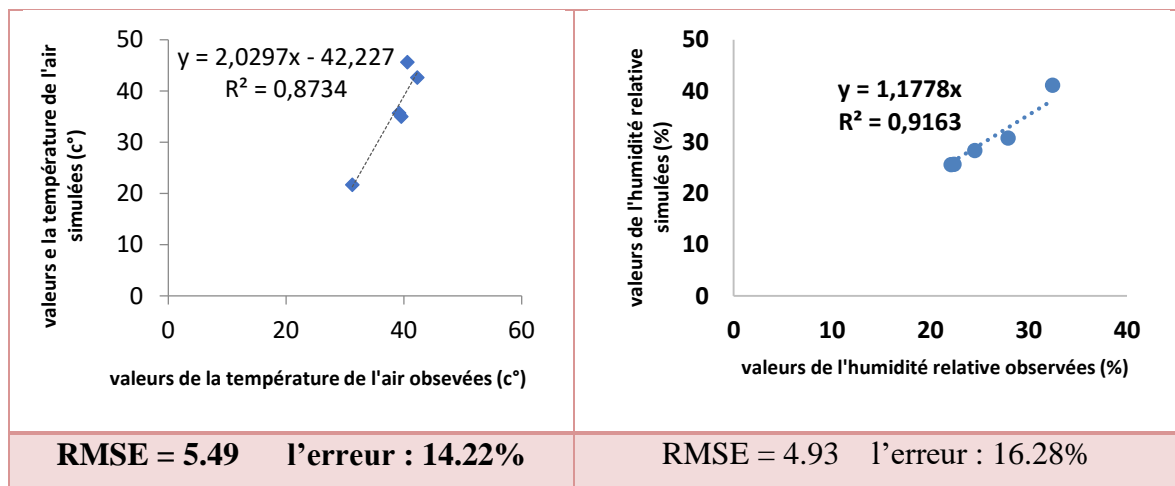


Figure VI. 9: Calcul de l'indice de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) pour valider les valeurs simulées de la température de l'air et de l'humidité relative. Source : Auteur (D'après Ghanemi Faten, 2022)

II.3.2 résultats de la simulation du premier scénario (S1)

Dans cette étape d'étude, la valeur minimale de la température de l'air de 21,7 °C a été enregistrée à 5h, tandis que la valeur maximale de 39°C s'est produite à 13h avec un écart de -6,6°C par rapport la température de l'air enregistré dans le scénario de référence. Cette valeur peut être expliquée par la diminution de la température moyenne radiante (T_{mr}) à ce moment de la journée avec une différence de -5,7°C par rapport la température moyenne radiante (T_{mr}) enregistré au scénario de référence (S0).

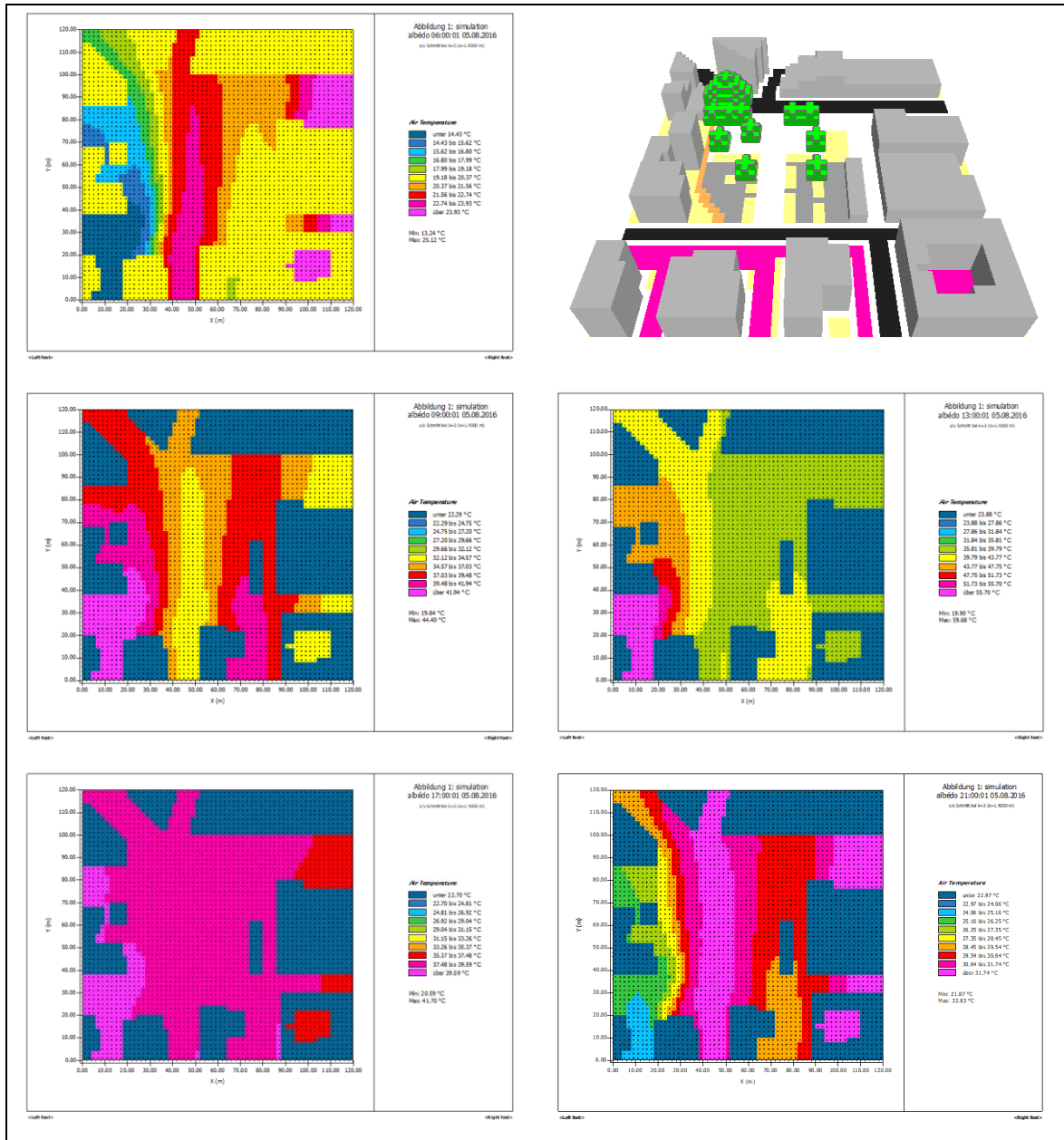


Figure VI. 10: Carte des variations journalières de la température de l'air enregistrées dans la place El Horia pendant cinq moments d'une journée d'été au premier scénario (S1).

Source : Auteur, 2022.

Durant toute la journée, un écart remarquable, surtout après-midi, entre les valeurs de la température moyenne radiante (T_{mr}) enregistrées au premier scénario par rapport celles du scénario de référence.

Les valeurs de l'humidité relative (HR) enregistrées au premier scénario (S1) sont sensiblement semblables à ceux qui sont enregistrées au scénario de référence (S0).

Les valeurs de la vitesse de l'air (V_{air}) enregistrées au premier scénario (S1) sont similaires aussi à ceux qui sont enregistrées au scénario de référence (S0).

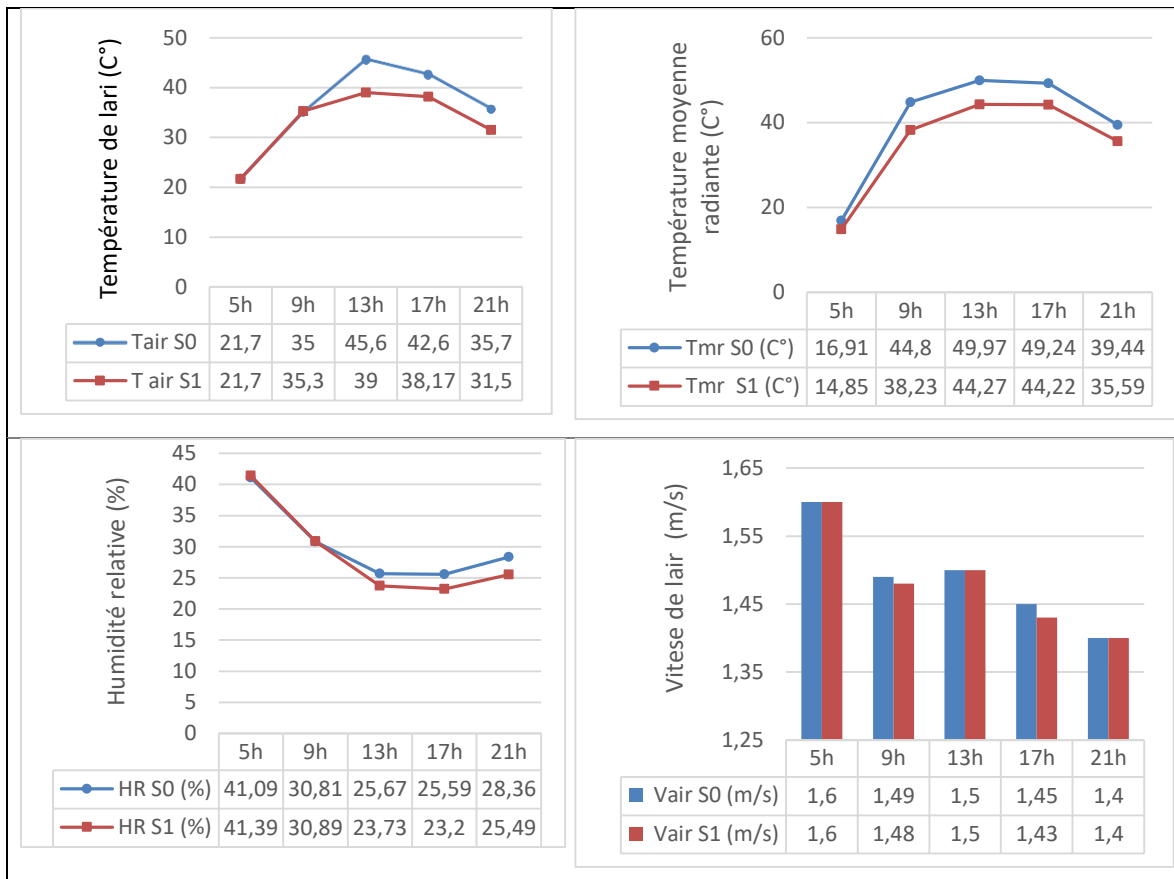


Figure VI. 11: Variation journalière de la température de l'air, de la température de radiante, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air enregistrée au premier scénario (S1) Source : Auteur, 2022.

II.3.3 résultats de la simulation de deuxième scénario (S2)

Au deuxième scénario (S2), on enregistre une valeur maximale de la température de l'air de 37,88°C s'est produite à 13h avec un écart de 7,72°C par rapport la température de l'air enregistré dans le scénario de référence (S0). A ce moment de la journée on enregistre un abaissement important de la température moyenne radiante (Tmr) avec une remarquable différence de 8,84°C par rapport la température moyenne radiante (Tmr) enregistré au scénario de référence (S0). A 17h, on observe une augmentation sensible de la valeur de la température moyenne radiante (Tmr), mais il reste toujours moins de celle enregistré au scénario de référence (S0) avec un écart important de 5,79°C. Cet écart s'augmente à 21h bien que la chaleur commence à se restituer après le coucher de soleil.

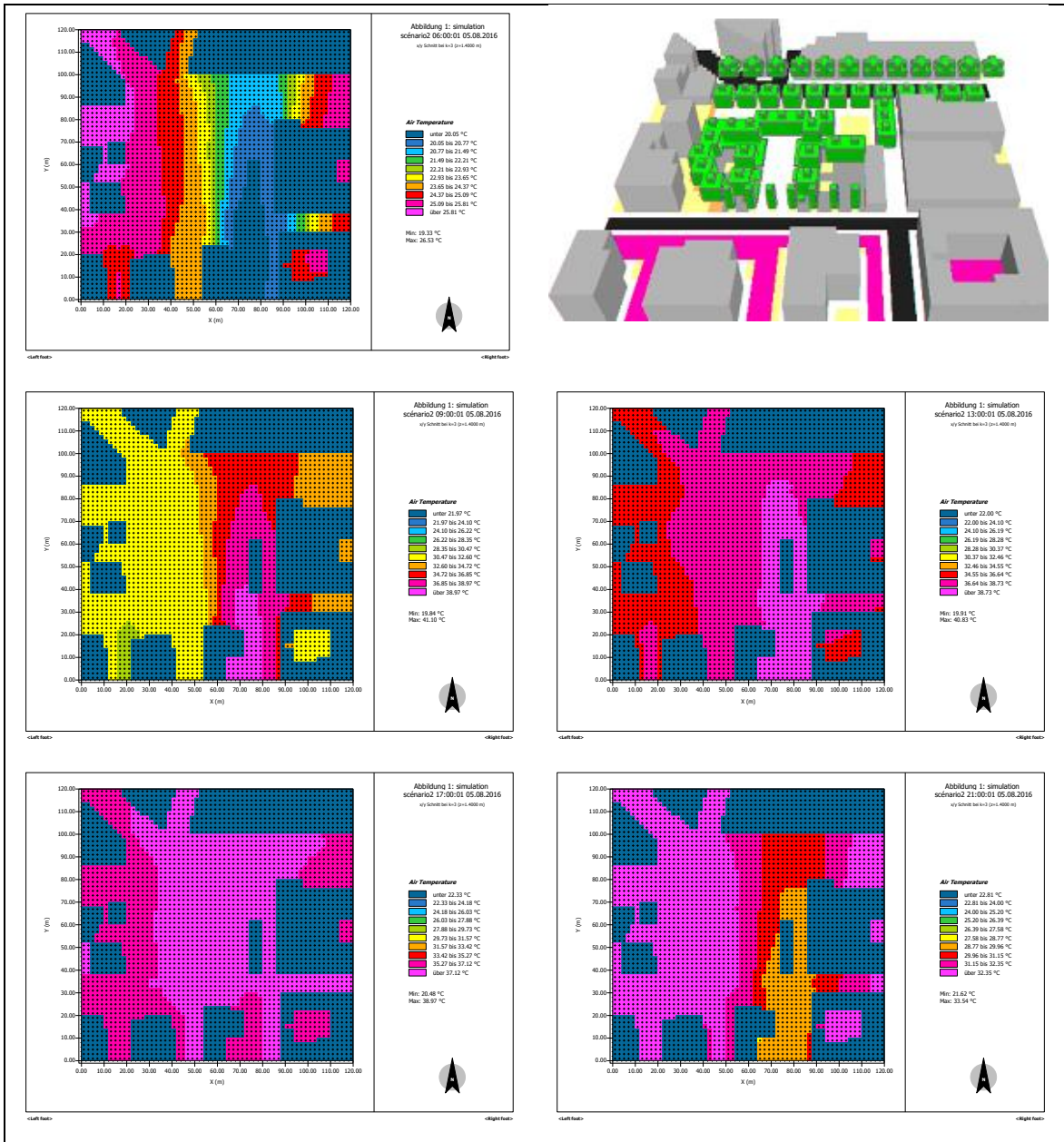


Figure VI. 12: Carte des variations journalières de la température de l'air enregistrées dans la place El Horia pendant cinq moments d'une journée d'été au deuxième scénario (S2). Source : Auteur, 2022.

Les valeurs de la vitesse de l'air (V_{air}) enregistrées au premier scénario (S1) sont diminués par rapport à ceux qui sont enregistrées au scénario de référence (S0) sous l'effet la végétation qui crée un obstacle devant les vents, par conséquence on trouve que les valeurs de l'humidité relative (HR) enregistrées au deuxième scénario (S2) s'abaissent légèrement par rapport celles qui sont s enregistrées au scénario de référence (S0).

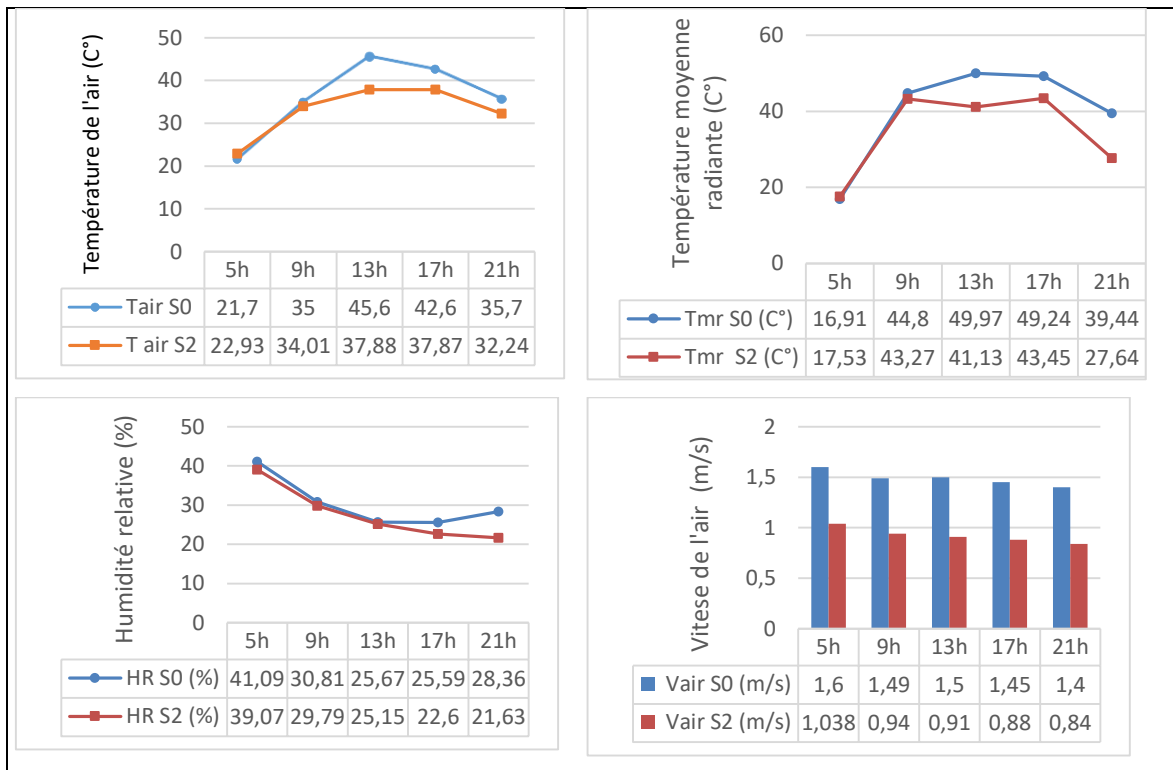


Figure VI. 13: Variation journalière de la température de l'air, de la température radiante, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air enregistrée au deuxième scénario (S2). Source : Auteur, 2022.

II.3.4 comparaison des résultats de simulation de deux scénarios (S1) et (S2)

La comparaison des résultats de simulation de deux scénarios montre un abaissement important des valeurs de la température de l'air (Tair) enregistrées au deuxième scénario (S2) par rapport les valeurs de la température de l'air (Tair) enregistrées au premier scénario (S1). On enregistre un écart qui atteint 1,29°C à 9h, bien que la valeur de la température moyenne radiante (Tmr) soit plus élevée au deuxième scénario (S2) à ce moment que celle enregistrée au premier scénario (S1) avec une différence de 5,04°C. Cela est peut être expliqué par un effet remarquable d'ombre et de rafraichissement (Le deuxième scénario d'aménagement (S2) se rassemble l'effet de différents matériaux, les arbres, les surfaces végétalisées et les espaces d'eau).

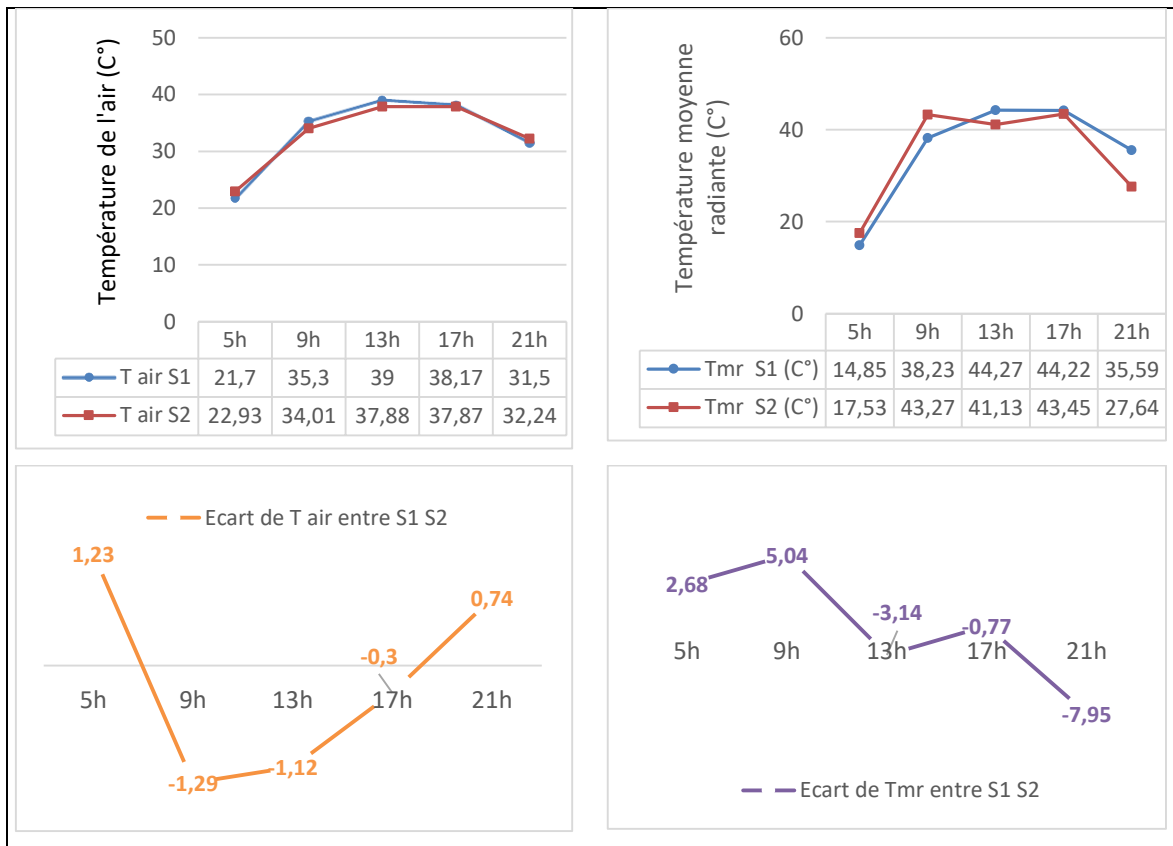


Figure VI. 14: Comparaison des variations journalières et les écarts enregistrés des valeurs de la température de l'air et la température radiante dans les deux scénarios (S1) et (S2).
Source : Auteur, 2022.

A 13h, on observe un écart de 1,12°C bien que la valeur de la température de l'air (Tair) au deuxième scénario (S2) est diminuée par rapport celle du premier scénario (S1), en enregistrant un écart de 3,14°C de la valeur de la température moyenne radiante entre les deux scénarios (S1) et (S2). Cela est peut être expliqué par la disparition d'effet d'ombrage parce que le soleil était au zénith.

Après un cumul de la chaleur, on trouve que la valeur de la température de l'air (Tair) enregistrées au deuxième scénario (S2) reste plus basse que celle enregistrée au premier scénario (S1) avec un écart qui atteint 0,3°C à 17h. De même on trouve aussi que la valeur de la température moyenne radiante (Tmr) est plus élevée au deuxième scénario (S2) à ce moment que celle enregistrée au premier scénario (S1), en enregistrant un écart de 0,77°C à ce moment de la journée.

A 21h, on remarque un abaissement lent des valeurs de la température de l'air (Tair) enregistrées au deuxième scénario (S2) par rapport les valeurs de la température de l'air (Tair) enregistrées au premier scénario (S1) ; tandis que un abaissement rapide des valeurs de la température moyenne radiante (Tmr) a été enregistré au deuxième scénario (S2) par rapport celles enregistrées au premier scénario (S1)

On enregistre un écart qui atteint 7,95°C des valeurs de la température moyenne radiante (Tmr) entre les deux scénarios, bien qu'une différence de 0,74°C soit enregistrée des valeurs de la température de l'air (Tair)

Ces derniers sont peuvent être expliqués par la disparition d'effet de rafraîchissement dû à la végétation qui traduit par l'abaissement des valeurs de l'humidité relative (HR) au deuxième scénario (S2) par rapport le premier scénario (S1) avec un écart de 3,86%.

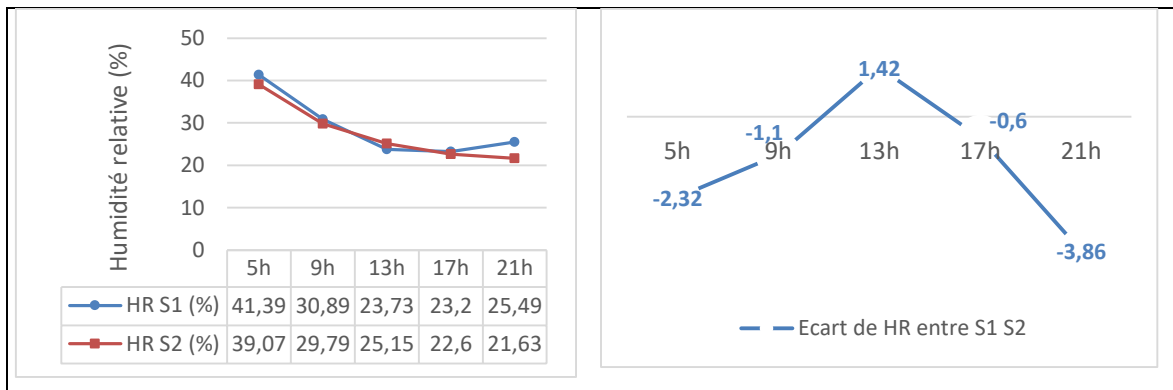


Figure VI. 15: Comparaison des variations journalières et les écarts de l'humidité relative enregistrés dans les deux scénarios (S1) et (S2). Source : Auteur, 2022.

A travers la simulation, on a réussi à réaliser l'amélioration du microclimat urbain dans la place El Horia par l'utilisation de matériaux froids qui ont participé à la diminution de la température de l'air pendant une journée d'été typique. On a trouvé que l'introduction raisonnable de l'eau, de la végétation et des surfaces perméables aide à la réduction de la température de l'air, on a trouvé aussi que l'effet des matériaux frais à albédo élevé ne sera plus efficace sans l'utilisation de l'ombrage et de la végétation au climat chaud et aride.

Conclusion :

Les ksour sahariens sont un témoignage d'adaptation bioclimatique d'entité traditionnelle qui répond aux conditions climatiques difficiles par l'adaptation au milieu physique et la protection contre les facteurs climatiques indésirables. L'étude comparative entre le ksar d'Ouargla et la place El Horia a été réalisée en vue d'évaluer l'influence de la forme urbaine sur l'adaptation bioclimatique de cette place ; Cette comparaison montre que la place du ksar bénéficie d'un environnement thermique plus frais malgré l'absence de l'eau et la végétation, ceux-ci qui ont un effet remarquable dans l'humidification de microclimat dans la place El Horia.

Il est considéré que, le réchauffement climatique dans la place El Horia revient principalement à l'effet de la restitution de la chaleur stockée dans les matériaux de construction. Cette chaleur augmente les valeurs de la température radiante en air.

Donc l'amélioration du microclimat urbain dans la place El Horia exige l'utilisation des matériaux froids qui présentent une réflectivité diffuse élevée au rayonnement solaire, on ajoutant l'introduction raisonnable de l'eau, de la végétation et des surfaces perméables.

Par la simulation, nous avons mis en place deux scénarios d'aménagement visant à résoudre les problèmes identifiés. Ces scénarios comprenaient les interventions suivantes :

- Utilisation de matériaux de pavage frais : Cette mesure a permis de réduire la température ambiante lors d'une journée d'été typique, avec une diminution allant jusqu'à 6,6°C.
- Intégration de la végétation et de surfaces d'eau, en plus de l'utilisation de matériaux rafraîchissants : Cette combinaison de mesures a contribué à réduire la température ambiante de pointe lors d'une journée d'été typique, avec une diminution allant jusqu'à 7,72°C.

Grâce à ces interventions, nous avons pu maîtriser les problèmes identifiés et améliorer les conditions thermiques de l'environnement étudié.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion :

Cette étude de recherche aborde la problématique de la qualité du microclimat urbain dans les espaces publics. Il a été constaté que plusieurs paramètres jouent un rôle significatif dans les conditions microclimatiques. La forme urbaine, y compris la géométrie, la morphologie de l'espace urbain, les activités humaines, la présence de végétation, les matériaux de construction et les surfaces d'eau, ont une influence sur la modification du microclimat urbain. Ces éléments contribuent à la création du microclimat urbain.

L'objectif de cette étude est de comprendre et d'analyser la relation entre la forme urbaine et l'environnement thermique dans les espaces publics. Cette relation a été examinée en comparant quatre places publiques situées dans la ville de Biskra, en évaluant les caractéristiques microclimatiques propres à chaque place.

A travers la comparaison de la place qui présente les meilleures conditions microclimatiques parmi les quatre places étudiées avec la place du ksar Ouargla ; Cette recherche traite la notion d'adaptation bioclimatique dans l'espace public en climat chaud et aride

Notre travail de recherche visait aussi à contribuer à la réflexion sur le développement d'un modèle à l'aide de la simulation numérique à démontrer l'effet de stratégies d'amélioration du microclimat urbain sur l'adaptation bioclimatique et de mettre en évidence les changements microclimatiques résultants. Ce travail est divisé en deux parties principales. La première partie aborde l'approche théorique, qui se compose de trois chapitres basés sur la recherche documentaire. Ces chapitres visent à définir les concepts liés aux hypothèses de recherche, afin de fournir le vocabulaire et les notions de base nécessaires sur le sujet.

Le premier chapitre de cette étude vise à définir les concepts relatifs au microclimat urbain et à la climatologie urbaine. Il aborde les échelles climatiques et les couches verticales spécifiques à une zone urbaine, ainsi que le bilan énergétique résultant des flux d'énergie dans une ville et du rayonnement solaire en milieu urbain. Une attention particulière est portée au phénomène de l'îlot de chaleur urbain, en explorant ses caractéristiques, ses causes et ses impacts. Les facteurs qui influencent le climat urbain sont également examinés, notamment la morphologie urbaine, les activités humaines, l'albédo, la densité et la taille de la ville, ainsi que l'absence de végétation et d'eau.

Enfin, les effets aérodynamiques en milieu urbain sont discutés, en décrivant le comportement du vent autour des bâtiments, dans les rues et les conséquences aérauliques en milieu urbain.

Le deuxième chapitre de cette étude examine le lien entre la forme urbaine d'espace urbain et le microclimat. Il présente les différentes formes urbaines au fil de l'histoire et leurs caractéristiques microclimatiques, ainsi que l'influence de la forme urbaine sur la température, le rayonnement solaire et la vitesse du vent. Les facteurs morphologiques qui modifient le microclimat sont également abordés. Ensuite, des dispositifs et opportunités d'adaptation au climat urbain sont exposés, tels que le rafraîchissement de l'air par la végétalisation, l'aménagement urbain et les structures durables, ainsi que la limitation des sources de chaleur. De plus, plusieurs stratégies d'adaptation climatique utilisées historiquement dans l'habitat saharien sont présentées, telles que la compacité du tissu urbain, la réduction de la surface de l'enveloppe des bâtiments, la forme et l'orientation des constructions, la configuration et l'orientation des voiries, l'ombrage et l'utilisation de matériaux de construction locaux.

Finalement, nous avons souligné la problématique liée au climat dans les espaces publics, en mettant particulièrement l'accent sur les places situées dans des environnements chauds et arides.

Une revue bibliographique des études menées sur le microclimat est explorée dans le troisième chapitre. Les études sur le microclimat ne sont pas récentes. En effet, les premières investigations sur le climat urbain et les conditions climatiques des villes remontent à une période antérieure à l'ère chrétienne. On a commencé ce chapitre par le fondement de la micro-climatologie urbaine et son évolution. Puis on a passée à analyser des études scientifiques effectuées sur le microclimat urbain, en distinguant des études menées sur l'îlot de chaleur urbain (étude de Irina Tumini et Carlos rubio-Bellido, 2016 et étude de Pattaranan Takkanon, 2016), d'autres études menées sur la géométrie et la morphologie de l'espace public urbain (Etude de Samira Bouketta et Al. 2014 et Etude de Shahab Kariminia et Al. 2015). Par la suite on montrant des études sur l'amélioration des conditions microclimatique (étude de Niki Gaitani et al. 2011 et Etude de Mirela Robitu, M. Musy, Christian Inard, D. Groleau, 2006). Ses études nous ont permet de d'identifier les axes de recherche abordés sur le microclimat urbain, faire des connaissance sur l'évolution de la recherche sur le microclimat urbain et même découvrir les outils et les méthodes d'observation du climat urbain dans la ville.

Les premières recherches se sont principalement concentrées sur l'observation de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle de l'ensemble de l'agglomération. Cependant, les chercheurs ont progressivement orienté leur attention vers des échelles plus fines, mettant ainsi en évidence l'importance de la géométrie urbaine.

Actuellement, les recherches récentes se concentrent de plus en plus sur la compréhension du bilan d'énergie, c'est-à-dire les échanges d'énergie entre l'atmosphère et la surface urbaine.

Ensuite, nous avons abordé l'application de la modélisation numérique dans le domaine du microclimat urbain. Nous avons commencé par examiner les modèles de simulation numérique en climatologie urbaine qui se concentrent sur l'échelle de la canopée et prennent en compte la surface urbaine selon deux méthodes distinctes : la discrétisation spatiale et la paramétrisation. Parmi les modèles de simulation numérique utilisant la discrétisation spatiale, nous avons présenté le modèle tridimensionnel de microclimat "ENVI-met" et le modèle thermo-radiatif "SOLENE". Quant à la simulation par paramétrisation, nous avons abordé le modèle "HIP" (Heat Island Potentiel) et le modèle Town Energy Balance (TEB).

La deuxième partie présente l'approche analytique, composée de trois chapitres relevant de l'étude pratique, dans le but de juger les hypothèses de cette étude. On a commencé la partie analytique par la méthodologie d'investigation dans le quatrième chapitre, cette investigation a pour but général déterminer et évaluer les conditions microclimatiques dans les places. Dans ce chapitre on a présenté le contexte d'étude qui est la ville de Biskra, qui se caractérise par un climat chaud et aride, elle a été choisie pour sa représentativité des villes sahariennes au Bas Sahara et pour des raisons d'ordre méthodologique. Cette étude sollicite des échantillons des espaces publics de formes variés, mais qui sont soumis, sous l'influence des mêmes conditions climatiques. Les places choisies pour cette expérimentation sont les suivantes : place El Horia, place Zouaka nommée : Gattari El Okbi), place de 726 logs et la place de Djebel Dhalaa.

Dans cette étude les mesures sont prises à l'aide d'un instrument portatif : Anémomètre multifonctions TESTO 480 avec mesure des indices PMV/PPD. Les mesures sont effectuées sur les paramètres climatiques suivants : la température de l'air, la température radiante, l'humidité relative et la vitesse de l'air. La sélection de ces variables est motivée par leur lien avec les objectifs de l'expérience ainsi que par la disponibilité des instruments de mesure.

Cette étude traite les conditions thermiques à l'échelle urbaine dans les milieux sahariens, on a choisi la période estivale qui présente la saison chaude de l'année, où les conditions microclimatiques sont défavorables, parce qu'elle pose les problèmes de confort les plus extrêmes.

Les prises de mesures sont effectuées à cinq moments distincts au cours d'une seule journée. Une journée représentative de la saison estivale est sélectionnée en se basant sur les prévisions météorologiques à dix jours, afin d'observer les conditions climatiques favorables telles qu'un temps calme, un ciel dégagé et une faible vitesse du vent.

Le processus de travail implique la réalisation de mesures instantanées sur site, où les valeurs sont directement enregistrées à l'aide des instruments utilisés. Nous avons commencé par effectuer les mesures sur la place Zouaka, puis sur celle El Horia, ensuite sur la place Dhalaa, et enfin nous avons terminé par la place Iben Badis. Le déplacement d'un site de mesure à un autre s'est effectué en véhicule, de sorte que le temps estimé pour l'ensemble du trajet n'a pas dépassé une heure.

Les mesures de quatre facteurs climatiques ont été pris parallèlement à une altitude de : 1.60 m du sol. Le temps estimé pour la prise de mesure n'a pas dépassé 10 mn. La durée estimée entre les espaces de mesure est varié entre 6 à 10 mn. L'équipe de travail est composé de trois personnes y compris le chercheur.

Les mesures sont effectuées dans des conditions climatiques stables caractérisées par un ciel dégagé, une faible intensité du vent et un fort ensoleillement.

Le cinquième chapitre se concentre sur l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus lors des campagnes de mesure, qui ont été réalisées sur une journée représentative de la saison estivale. Comme mentionné dans le chapitre précédent, les mesures ont été prises sur quatre places différentes situées dans la ville de Biskra, chacune présentant des caractéristiques morphologiques distinctes. Les mesures ont été effectuées sur quatre paramètres climatiques : la température de l'air, la température radiante, l'humidité relative et la vitesse du vent. L'étude comparative des variations climatiques de ces facteurs entre les différents points de mesure met en évidence la diversité microclimatique résultant de la variété morphologique de chaque espace.

La comparaison des variations journalières de la température de l'air dans toutes les places montre un accroissement remarquable des valeurs des températures enregistrée dans toutes les places par rapport les valeurs relevées par la station de météo.

On observe aussi que la place El horia présente les valeurs de la température de l'air les plus inférieures dans toute la journée que les autres places. Alors que la place Iben Badis présente les valeurs de la température de l'air les plus supérieures dans toute la journée que les autres places. A 13h, on observe que les valeurs maximales de la température de l'air dans toutes les places sont enregistrées à ce moment. La valeur la plus élevée est enregistrée dans la place Zouaka avec un écart de 2,4°C par rapport la valeur relevée par la station météo, alors que la valeur la plus basse est enregistrée dans la place El Horia avec un écart de 1,2°C par rapport la valeur relevée par la station météo.

La comparaison des variations journalières de la température radiante montre une corrélation des valeurs mesurées dans la place EL Horia et la place Dhalaa et entre la place Zouaka et la place Iben Badis. A midi, L'excès de l'intensité de rayonnement solaire participe à l'augmentation des valeurs des températures radiantes dans toutes les places, ce qui explique également l'accroissement des températures d'air mesurées. La valeur maximale est enregistrée dans la place Iben Badis avec 43,6°C en dépassant la valeur relevée par la station par un écart de 3,6°C, alors que la valeur minimale est enregistrée dans la place El Horia et Dhalaa avec 42,2°C.

La comparaison des variations microclimatiques journalières de l'humidité relative, indique que les valeurs les plus élevées de l'humidité relative sont enregistrée avant le lever du soleil, en enregistrant une valeur de 31,2% dans la place El Horia et une valeur de 33% dans la place Dhalaa. Alors que les valeurs les plus basses de l'humidité relative sont enregistrée à 17h, en enregistrant une valeur de 18,5% dans la place Zouaka et une valeur de 18,1% dans la place Iben Badis

A travers la comparaison des variations journalières de la vitesse de l'air, Dans la place Zouaka, on enregistre une valeur très élevée de température radiante à 17h avec 45,3°C en dépassant la valeur relevée par la station météo par un écart de 4°C et une valeur de 43,6 à 13h avec un écart de 3,6°C par rapport la station météo.

Dans la place Dhalaa et la place Iben Badis, on enregistre des valeurs importantes de la vitesse de l'air pendant toute la journée par rapport les autres places.

On trouve que la place El Horia présente les conditions les plus favorables de microclimat urbain parmi les quatre places étudiées ; bien qu'on enregistre des faibles facteurs d'ouverture au ciel (SVF) et rapport d'aspect (H/W) qui conduisent au piégeage du rayonnement et un pourcentage élevé d'énergie solaire. Cela revient à son orientation et la

présence des végétations et d'eau qui aident à améliorer l'environnement thermique dans cette place.

Le sixième chapitre comprend la comparaison des résultats obtenus dans la place El Horia à Biskra par les variations microclimatique caractérisée la place située au Ksar Ouargla. Cette comparaison sera réalisée dans une tentative pour vérifier l'influence de la forme urbaine sur l'adaptation bioclimatique de cette place parce que les deux places appartiennent au même contexte d'étude (climat chaud et aride) mais la forme urbaine se diffère. La première est insérée dans un tissu urbain moderne et la deuxième est insérée dans un tissu traditionnel compact.

Par la suite, nous avons examiné l'impact des facteurs morphologiques sur le changement du microclimat urbain et l'amélioration de la qualité de l'environnement thermique dans la place El Horia. À l'aide de l'outil de simulation du microclimat urbain "Envi-Met", nous avons étudié les effets de différents aménagements dans la place El Horia, tels que l'intégration de végétation variée, l'utilisation de façades de couleur claire avec un albédo élevé et l'installation d'écrans constitués d'arbres de taille moyenne (10 à 20 m) pour réduire l'exposition au ciel. Ces aménagements, ainsi que d'autres, peuvent améliorer l'environnement thermique de la place et créer des conditions favorables pour le microclimat urbain. Selon nos estimations, l'utilisation de revêtements de sol frais, la présence de végétation et la présence de zones d'eau contribuent à une réduction de la température ambiante pouvant atteindre 7,72°C lors d'une journée d'été typique.

Recommandations :

La forme urbaine de l'espace urbain extérieur ainsi que les caractéristiques de sa surface, tels que la hauteur des bâtiments, la largeur des rues adjacentes et l'orientation par rapport au soleil et aux vents dominants, ont une influence sur le microclimat urbain. Ces aspects morphologiques, combinés à d'autres facteurs, ont un impact sur la température ambiante et déterminent la qualité thermique de ces espaces urbains publics. Le contrôle de ces paramètres, peut réduire l'absorption d'énergie solaire et la réflexion du rayonnement solaire sur les surfaces urbaines. Notre étude vise à évaluer la qualité thermique des espaces urbains extérieurs, en analysant quatre places publiques à Biskra et à identifier l'impact des facteurs morphologiques sur la modification du microclimat urbain.

Nous formulons également des recommandations pratiques pour la conception d'espaces urbains extérieurs qui tiennent compte du climat local :

- **L'orientation par rapport au soleil** joue un rôle déterminant dans la durée d'exposition au soleil des espaces urbains. Cette exposition directe au soleil a un impact significatif sur l'augmentation des températures, principalement en raison des réflexions des matériaux présents dans l'environnement urbain. Ces matériaux ont la capacité d'emmagasiner de grandes quantités d'énergie solaire, ce qui entraîne une augmentation de leur température de surface. Par conséquent, cette énergie est ensuite libérée dans l'environnement, contribuant à l'élévation de la chaleur ambiante. Les surfaces urbaines claires et réfléchissantes peuvent aider à prévenir une surchauffe de la surface, mais elles peuvent également entraîner un éblouissement et une réflexion thermique gênants pour les utilisateurs ainsi que pour les surfaces et bâtiments avoisinants. En revanche, les surfaces sombres et absorbantes peuvent s'échauffer, mais seulement lorsqu'elles sont exposées au rayonnement solaire.
- **Pendant la saison estivale**, il est essentiel de contrôler la température pour créer des conditions favorables au microclimat urbain. L'ombre joue un rôle crucial dans ce contrôle et peut être créée grâce à l'utilisation de différentes formes de végétation. Ces espaces doivent être conçus de manière à optimiser soit un effet de refroidissement de l'air, soit une exposition au soleil pendant l'hiver.
- La plupart des surfaces végétales ne font pas que prévenir des réflexions mais contribuent aussi au refroidissement par évapotranspiration. Elles maintiennent la température du sol et élimine une grande partie de la chaleur et de la lumière réfléchi dans les espaces adjacents. Les installations horizontales, incluant le type "pergola", permettent d'offrir de l'ombre durant une plus grande période de la journée et sont utiles pour ombrager chemins ou espaces étendus en longueur tels des zones piétonnes.
- Anciennement, **la compacité de tissu urbain** visait à maximiser l'ombrage mutuel des bâtiments en utilisant des tracés étroits, sinueux et profonds, ainsi qu'une orientation adaptée au soleil et au vent, afin de s'adapter aux climats chauds et secs. Aujourd'hui, il existe **de nouvelles approches et opportunités pour l'adaptation au climat urbain**, telles que l'aménagement urbain durable (comprenant des espaces aquatiques, des pavés à haut albedo et des dispositifs de protection solaire), la réduction des sources de chaleur d'origine humaine et du trafic routier en milieu urbain, ainsi que le contrôle de la production de chaleur dans les bâtiments.

Toutes ces mesures peuvent contribuer à atténuer les températures extrêmes pendant les périodes estivales.

- **Le contrôle de la température des surfaces et de l'air** peut être réalisé en maîtrisant certains facteurs morphologiques qui limitent la visibilité du ciel, notamment le profil de la rue (rapport hauteur/largeur - H/W) et le facteur d'ouverture au ciel (SVF). Il est recommandé que le rapport H/W ne soit pas inférieur à 1,0 afin de fournir des zones ombragées aux utilisateurs de l'espace, mais pas supérieur à 2,0, car cela pourrait piéger le rayonnement solaire réfléchi dans l'espace ouvert. D'autres facteurs relatifs à la couverture du sol et la nature de sa surface, y compris l'albédo moyen des surfaces et la densité végétale (Dv), contribuent également à la régulation de la température des surfaces et de l'air en absorbant ou en réfléchissant le rayonnement solaire.

Limites de recherche

- Sur le terrain, nous rencontrons la difficulté de la complexité de la forme urbaine et l'impossibilité de délimiter les formes urbaines existantes en des catégories abordables. Cela nous impose à choisir quatre exemples représentatifs de l'ensemble mais ne peut plus remplacer ou englober les autres cas de figures qui s'étalent en espace urbain.
- En termes de modélisation, le problème qui nous oppose c'est la difficulté de simuler l'effet de chaque facteur morphologique en le séparant d'autres facteurs. Les résultats obtenus ne montrent pas seulement l'effet de facteur introduit mais l'effet commun de toutes les composantes de la forme urbaine. En ajoutant que la simulation est réalisée à une surface de l'environnement immédiat du place étudiée seulement en abondons l'influence de l'environnement lointain de l'espace urbain.
- Dans notre étude nous ignorons l'effet des caractéristique du cadre bâti sur le microclimat extérieur, en se basant seulement sur les matériaux de constructions des murs et toits, bien qu'il y a d'autres caractéristiques affectent sur les l'augmentation des températures extérieurs comme la chaleur produite par l'utilisation des énergies pour climatisation ou chauffage.

Recherches futures

Les résultats de cette étude nous a permis d'évaluer les conditions microclimatiques de quatre places publiques, de plus nous a aidé à prédire les opportunités d'optimiser les conditions favorables du microclimat urbain dans un espace urbain public à climat chaud et aride. Cette étude nous permet aussi de découvrir plusieurs pistes de recherches, nous citons quelques axes de recherche :

- Modéliser différentes formes urbaines des places publiques selon des différentes orientations par rapport au vent ou par rapport au soleil pour chercher la forme optimale climatiquement. Puis pour mieux caractériser la forme urbaine, on cherchera à trouver comment optimiser la qualité thermique dans ces places
- Étudier l'effet des facteurs morphologiques sur plusieurs périodes de l'année non seulement la période estivale et évaluer l'influence de la durée d'ensoleillement sur la qualité thermique dans une place publique.
- Étudier l'effet du vent sur le comportement thermique dans la place publique, la modélisation thermo aérodynamique peut aider à prédire une orientation favorable pour optimiser un niveau de confort optimal.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie :

- AHMED OUAMEUR Fouad (2007)**, Morphologie urbaine et confort thermique dans les espaces publics : Etude comparative entre trois tissus urbains de la ville de Québec. Mémoire présenté dans le cadre du programme de maîtrise en science de l'architecture pour l'obtention du grade de Maître des Sciences (M.Se.), école d'architecture faculté d'aménagement, d'architecture et des arts visuels, université Laval Québec
- AKBARI H, POMERANTZ M, TAHA H. (2001)**. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy* Vol. 70, No. 3, pp. 295–310, 2001.
- ALKAMA Djamel, (2005)**. Pour une nouvelle approche d'urbanisation dans les zones arides : cas du bas Sahara. Thèse de Doctorat en sciences en Architecture, Spécialité : Architecture et Urbanisme. Université Mohamed Khider. Biskra.
- ANQUEZ Philippe et HERLEM Alicia, (2011)**. Les îlots de chaleur dans la région métropolitaine de Montréal : causes, impacts et solutions.
- ATHAMENA Khaled, (2012)**. Modélisation et simulation des microclimats urbains : Etude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. cas des éco-quartiers. Thèse de doctorat, école doctorale : science pour l'ingénieur, géosciences, architecture. Ecole centrale de Nantes.
- BAUDOUI Remi et POTIE Philippe (2003)**. André Ravéreau, l'atelier du désert. Edition : parenthèses, Marseille. (192 page)
- BEAUD. Michel (2003)**. L'art de la thèse. Comment préparer et rédiger une thèse de doctorat, de magistère ou un mémoire de fin de licence. Edition : Casbah.
- BELLIL Rachid (1999)**. Les oasis du Gourara (Sahara algérien) : Le temps des saints. Edition : Peeters Publisher, Louvain, Paris. (307 pages)
- BENNADJI Amar (1999)**. Adaptation climatique ou culturelle en zones arides. Cas du sud-est algérien. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille I, Université de Provence, U.F.R. des sciences géographiques et de l'aménagement, France.
- BENZERZOUR Mohamed. (2004)**. Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d'un indicateur « morpho-climatique ». Thèse de doctorat. École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes. Université de Nantes.
- BERNIER ANNE-MARIE, (2011)**. Végétalisation du bâtiment en milieu urbain : bénéfices et perspectives. Mémoire présenté comme exigence partielle de la maîtrise en sciences de l'environnement. Université du Québec à Montréal.
- BIGORGNE Julien, (2012)**. Les îlots de chaleur urbains, cahier n°1, atelier parisien d'urbanisme, décembre 2012.
- BIGORGNE Julien, MANGOLD Adrien. (2014)**, Les îlots de chaleur urbains, cahier n°2, atelier parisien d'urbanisme, Mai 2014.

- BOUKETTA Samira et al. (2014).** Optimisation de la géométrie de l'espace urbain pour une qualité de l'ambiance thermo-aéraulique en été. Cas de la ville de Jijel-Algérie. In conférence IBPSA FRANCE-ARRAS-2014.
- BOUKHABLA Moufida, (2015).** L'influence des facteurs climatiques sur la modification de l'îlot de chaleur urbain dans une rue « canyon, dièdre et dégagée », Cas des lotissements Biskra. Thèse de Doctorat en sciences en Architecture, Spécialité : Etablissements humains en milieux arides et semi arides. Université Mohamed Khider. Biskra.
- BOUYER Julien, (2009).** Modélisation et simulation des microclimats urbains Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Thèse de doctorat, école doctorale : science pour l'ingénieur, géosciences, architecture. École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes. Université de Nantes.
- BOZONNET Emmanuel, (2005).** Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments. Cas de la rue canyon. Thèse de doctorat, laboratoire d'étude des phénomènes de transfert appliqués au bâtiment. La Rochelle. Université de la Rochelle.
- BOZONNET Emmanuel, (2006).** Les microclimats urbains et la demande énergétique du bâti, article publié dans les 24^{ème} Rencontres Universitaires de Génie Civil 2006 - Prix jeunes chercheurs.
- BOZONNET Emmanuel, BELARBI Rafik, ALLARD Francis (2003).** Impact du micro climat urbain sur les bâtiments : Circulation d'air et évaluation du rayonnement solaire à l'échelle d'une rue. In rencontres universitaires de génie civil, Université La Rochelle.
- CANTAT O., (2004).** L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps », Norois, n°191, février 2004
- COLOMBERT Morgane, (2008).** Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville. Thèse de doctorat, Spécialité : Génie urbain, École Doctorale Ville et Environnement, Université Paris-Est.
- COLOMBERT Morgane, SALAGNAC Jean-Luc, MORAND Denis et DIAB Youssef.** Le climat et la ville : la nécessité d'une recherche croisant les disciplines, Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement [Online], Hors-série 12 | mai 2012, posto online no dia 15 Maio 2012. URL : <http://vertigo.revues.org/11811> ; DOI : 10.4000/vertigo.11811
- COLONA Fanny (1989).** Timimoune, une civilisation citadine. Edition : OPU Alger.
- COTE marc (1988).** L'Algérie ou l'espace retourné. Edition Flammarion. France
- COTE Marc (2005).** La ville et le désert, le bas Sahara algérien. Edition : IREMAN-KARTHALA. (299 pages).

- CRANK PJ, MIDDEL A, WAGNER M, HOOTS D, SMITH M, BRAZEL A. (2020).** Validation of seasonal mean radiant temperature simulations in hot arid urban climates. *Sci Total Environ.* 2020 Dec 20; 749:141392. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.141392. Epub 2020 Aug 1. PMID: 32841854.
- DE MUNCK Cécile, (2013).** Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville. Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse. Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse).
- DETHIER Jean (1986).** Architectures de Terre ou l'avenir d'une tradition millénaire. Europe Tiers Monde .Etat Unis. Edition du centre Pompidou, Paris. (223pages).
- DJEDJIG Rabah, (2013).** Impacts des enveloppes végétales à l'interface bâtiment microclimat urbain. Génie civil. Université de La Rochelle, 2013.
- DIMOUDI A., NIKOLOPOULOU M., (2003)** Vegetation in the Urban Environment: Microclimatic Analysis and Benefits. *Energy and Buildings*, 35(1), 69-76. Doi: 10.1016/S0378-7788(02)00081-6.
- DONNADIEU C.et P. / Didillon H. et J.-M. (1977),** Habiter le désert, les maisons mozabites. Editions Pierre Mardaga. (254 pages)
- DOULOS L., SANTAMOURIS M., LIVADA I. (2004).** Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials, *Solar Energy* 77. Pp.231–249, 2004.
- ELMIRA Jamei, DILSHAN Remaz Ossen, PRIYADARSINI Rajagopalan, (2017).** Investigating the effect of urban configurations on the variation of air temperature. *International Journal of Sustainable Built Environment* 6 (2017) 389–399.
- ESCOURROU Gisèle (1991).** Le climat et la ville. Presses universitaires Nathan, Paris.
- FOUCHIER, V. (2007).** La densité à l'échelle de l'Ile-de-France. Les rendez-vous de l'AFTRP Aménager en Ile de France : la densité urbaine en question 16 octobre 2007
- GAITANI N., SPANOU A., SALIARI M., SYNNEFA A., VASSILAKOPOULOU K., PAPAIOANNOU K., PAVLOU K., SANTAMOURIS M., PAPAIOANNOU M. and LAGOUDAKI A., (2011).** Improving the microclimate in urban areas: a case study in the center of Athens, *Building Services Engineering Research and Technology* 32-53.
- GAUTHIEZ Bernard (2003).** Espace urbain, vocabulaire et morphologie, Paris, Monum, Éditions du patrimoine.
- GHANEMI Faten, Zemmouri Noureddine, et al., (2022),** A Study of the Vegetal Effect on the Thermal Comfort of Outdoor. Area in Hot Regions. *Int J Innov Stud Sociol Humanities.* 2022 ; 7(6) :202-215. DOI : <https://doi.org/10.20431/2456-4931.0706019>.
- GIGUERE Mélissa, M. Env., (2009).** Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains, in *Revue de littérature.* Institut national de santé publique du Québec. Juillet 2009

- GIVONI B. (1978).** L'homme, l'architecture et le climat. Traduction d'Izard J. L. Edition de Moniteur, paris, France.
- HADJ MOHAMED Naima et MADANI Mohamed, (2015).** Renouveau des espaces habités spécifiques aux régions sahariennes, l'exemple de Béchar, Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée [En ligne], 138 | décembre 2015, mis en ligne le 16 décembre 2014, consulté le 24 janvier 2017. URL : <http://journals.openedition.org/remmm/8914>
- HUFTY André (2001).** Introduction à la climatologie, Edition : Les Presse de l'Université Laval. (542 pages).
- IZARD et al, (1979).** Archi-bio, Édition Parenthèse, Paris, 1979.
- KAUCHE Imane et Al. (2015).** A la recherche des qualités du vécu des espaces publics ; cas des places publiques en Algérie, Revue : Courrier du Savoir – N°20, Décembre2015, pp.109-118.
- KARIMINIAA Shahab, Sabarinah Sh. Ahmada,b, Ahmadrza Saberi. (2015).** Microclimatic Conditions of an Urban Square: Role of built environment and geometry. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 170 (2015) 718 – 727
- KIM Chuan Goh and CHEW Hung Chang, (1999).** The relationship between height to width ratios and the heat island intensity at 22:00 h for Singapore. International journal of climatology 19: 1011–1023.
- KITOUS Samia (2011).** Forme urbaine et environnement thermo aéraulique en climat chaud et sec : Cas du ksar de Ghardaïa dans le Sahara algérien. Thèse de Doctorat. Option : Architecture et Environnement. Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme
- KOUZMINE Y. (2007).** Dynamiques et mutations territoriales du Sahara Algérien, Vers de nouvelles approches fondées sur l'observation. Thèse en vue de l'obtention du titre de docteur en Géographie, Université de Franche-Comté, Ecole doctorale « Langages, espaces, temps, sociétés »
- LAÏLLE Pauline, PROVENDIER Damien, COLSON François, (2013).** Les bienfaits du végétal en ville – Synthèse des travaux scientifiques et méthode d'analyse, une étude publié le 1er juillet 2013.
- LE BRAS Julien (2015).** Le microclimat urbain à haute résolution : mesures et modélisation, Thèse En vue de l'obtention du doctorat de l'université de Toulouse.
- LIEBARD Alain, DE HERDE André (2005).** Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable. Edition Le Moniteur, Paris.
- MARJORY Musy, (2007).** Le rôle climatique de la végétation urbaine », Culture et Recherche n°113 – automne 2007, pp. 15-17.

- MARJORY Musy, (2008).** Approches physiques des ambiances urbaines : caractérisation et conception, Chercheur HDR, CERMA. In document technique consultable sur www.envirobat-med.net.
- MARJORY Musy, (2009).** Le végétal en ville, un régulateur de climat ? IN 11ème colloque scientifique de la SNHF : Jardins, environnement et santé 15 Mai, 2009
- MARJORIE Musy, coord, (2014).** Une ville verte : les rôles du végétal en ville. Edition Quae, Paris, France. (195 pages)
- MATALLAH Mohamed Elhadi (2021).** Characterization of urban forms within the oases settlements and their long-term impact on the outdoor thermal comfort in Tolga territory. Thèse de Doctorat en Architecture. Spécialité : Architecture, environnement et patrimoine. Université Mohamed Khider – Biskra
- MELIOUH Fouzia et TABET Aoul Kheira (2001).** L'habitat espaces et repères conceptuels. In Courrier du Savoir – N°01, Novembre 2001, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie. pp. 59-64
- MERLIN pierre et CHOAY Françoise (2000).** Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement. Edition : Presse universitaire de France, paris. (902 pages)
- MILLIER maya (2006).** Modélisation micro-météorologique en milieu urbain : dispersion des polluants et prise en compte des effets radiatifs, Thèse de doctorat, Spécialité : Sciences et techniques de l'environnement, Ecole national des ponts et chaussées.
- NAJJAR Georges, KASTENDEUCH Pierre et GRUSSENMEYER Pierre, (2010).** Topographie et climatologie urbaine in revue XYZ • N° 123 – 2e trimestre 2010.
- NIKOLOPOULOU M. (2004).** Concevoir des espaces extérieurs en environnement urbain : une approche bioclimatique. Center for Renewable Energy Sources, 64 p.
- OLGYAY Victor et al. (1978).** Design with climate, bioclimatic approach to architectural regionalism. Edition: Princeton, New Jersey, USA. Page: 89.
- OTHMAN A. A., ABDIN A. R., AMIN A. A. AND MAHMOUD A. H. (2020).** A bioclimatic design approach for the urban: open space design at business parks. Journal of engineering and applied science, vol. 67, NO. 8, DEC. 2020, PP. 1883-1901.
- PANERAI Ph. et al, (1977).** Formes urbaines : de l'îlot à la barre. Edition bordas, paris.
- PATTARANAN Teknion, (2016).** A study of height to width ratios and Urban Heat Island Intensity of Bangkok. In 4th International Conference on Countermeasures to Urban Heat Island, 30-31 .National University of Singapore, Singapore.
- RAPPOPORT Amos (1972).** Pour une anthropologie de la maison, Edition : Bordas, Paris, France. (207 pages)
- RAVEREAU André (1981).** Le M'Zab, une leçon d'architecture. Edition: Sindbad, Paris. (278 pages). AR8/ 836

- RINGENBACH Nicolas (2004).** Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur Strasbourg, thèse de doctorat, université Louis Pasteur Strasbourg 1.
- ROBITU Mirela, MUSY M., INARD Christian, GROLEAU D., (2006).** Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate. *Solar Energy*, Elsevier, 2006, 80 (4), pp.435-447.
- SANTAMOURIS M. A., Gaitani N., Panou A. S., Saliari M., Giannopoulou K., Vasilakopoulou K., Kardomateas T. (2012).** Using cool paving materials to improve microclimate of urban areas e Design realization and results of the flisvos project. In *Building and Environment* 53, 128-136
- SEBTI Moufida, ALKAMA Djamel, (2011).** Le ksar entre adaptation bioclimatique et transformation au Bas Sahara. Cas d'étude : ksar d'Ouargla. Mémoire de Magistère en architecture. Option : établissements humains en milieux arides et semi arides. Université de Biskra.
- SEBTI Moufida, ALKAMA Djamel, BOUCHAIR Ammar (2013).** Assessment of the effect of modern transformation on the traditional settlement 'Ksar'of Ouargla in southern Algeria. Review: *Frontiers of Architectural Research*, - Elsevier
- SOARES Béatrice Isabelle, VANDROUX Nicolas MAGALON (2010).** Lutte contre les îlots de chaleur urbains, référentiel conception et gestion des espaces publics 2010
- TABEAUD Martine,** La climatologie, Edition ARMAND COLIN, Paris, 2000, p 156-157.
- TIRAOUI Lamia (2000).** Propositions pour une analyse radiative thermique des espaces urbains, Thèse de doctorat, Spécialité : ambiances architecturales et urbaines. Discipline Sciences pour l'Ingénieur option Architecture, école d'architecture de Nantes, l'Université de Nantes.
- TERRAIN Jean-Jacques(2015).** Villes et changement climatique, Ilots de chaleur urbains. Edition parenthèse. (285 pages)
- TUMINI Irina et RUBIO-Bellido Carlos, (2016).** Measuring Climate Change Impact on Urban Microclimate: A Case Study of Concepción, October 2016. *Procedia Engineering* 161 (2016) 2290 – 2296.
- URÎTESCU B., GRIGORAȘ G., IONAC, N. (2019).** The Influence of Urban Morphology on the Urban Microclimate. 2019"Air and Water – Components of the Environment" Conference Proceedings, Cluj-Napoca, Romania, p. 311-322, DOI: 10.24193/AWC2019_31.
- VALETTE Emmanuelle et CORDEAU Erwan (2010).** Les îlots de chaleur urbains - Répertoire de fiches connaissance, Novembre 2010
- VIARO Alain M. et ZIEGLER Arelette (1983).** Habitat traditionnel dans le monde : Éléments pour une approche. In *Etablissements humains et environnement socio-culturel*. Document de l'UNESCO.

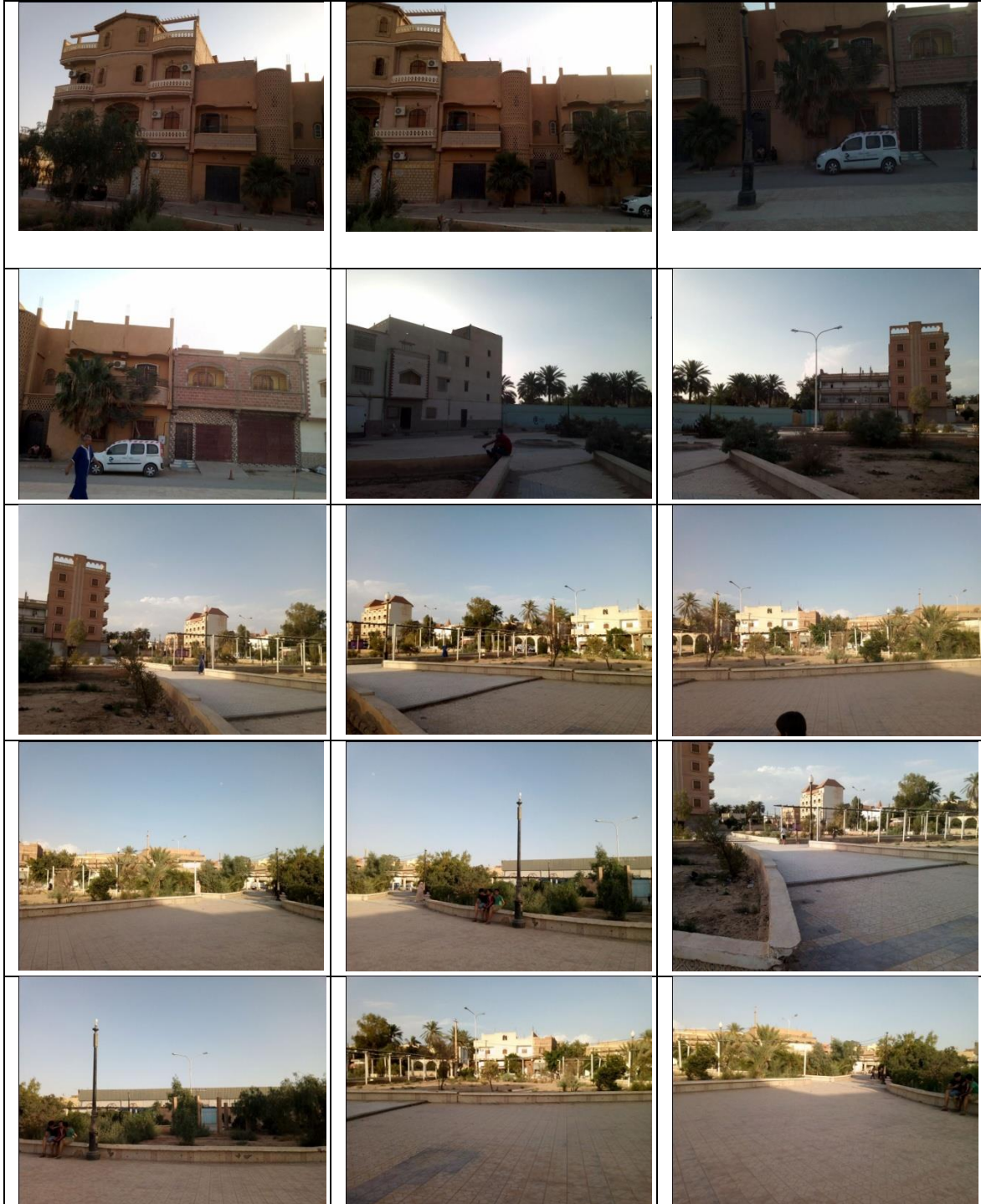
VINET Jérôme (2000). Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Thèse de doctorat, Spécialité : Sciences pour l'Ingénieur option Architecture, A l'Ecole d'Architecture de Nantes, Université de Nantes.

ZEKRI Elyes (2010). Caractérisation environnementale et comportementale des parcours piétonniers en milieu urbain. Thèse de doctorat. Discipline : Sciences pour l'ingénieur. Spécialité : Architecture. Ecole polytechnique de Nantes, l'Université de Nantes.

ANNEXES

1. PRESENTATION DE L'ENVIRONNEMENT BATI DES PLACES ETUDIEES

1.1 Placette Zouaka



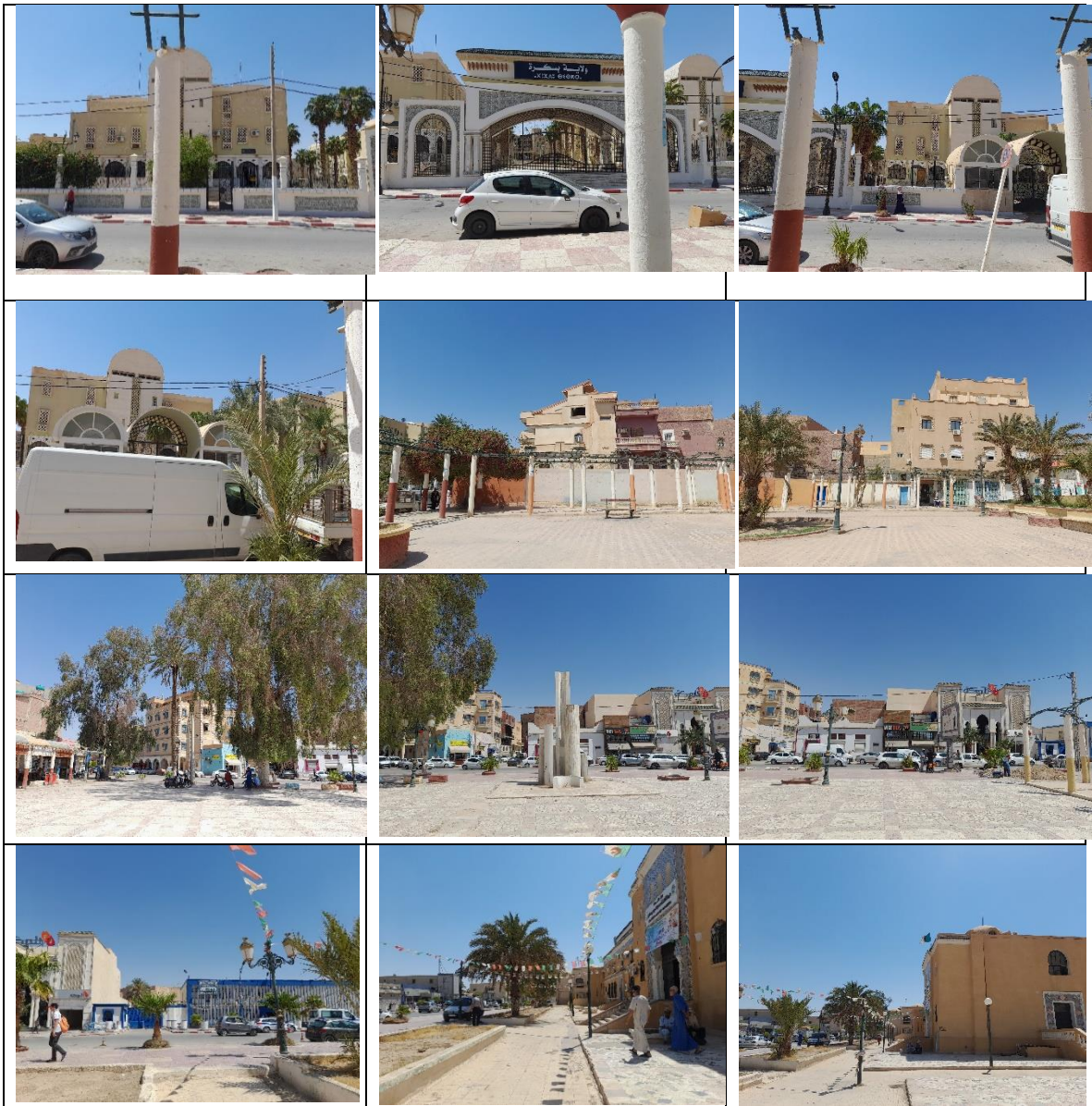
H/W= 1,11

Albedo = 0,20

Densité végétale (Dv) = 0,32

SVF=0.892

1.2 Placette El Horia



H/W= 0,88

Albedo = 0,2

Densité végétale (Dv) = 0,19

SVF=0,75

1.3 Placette Iben Badis

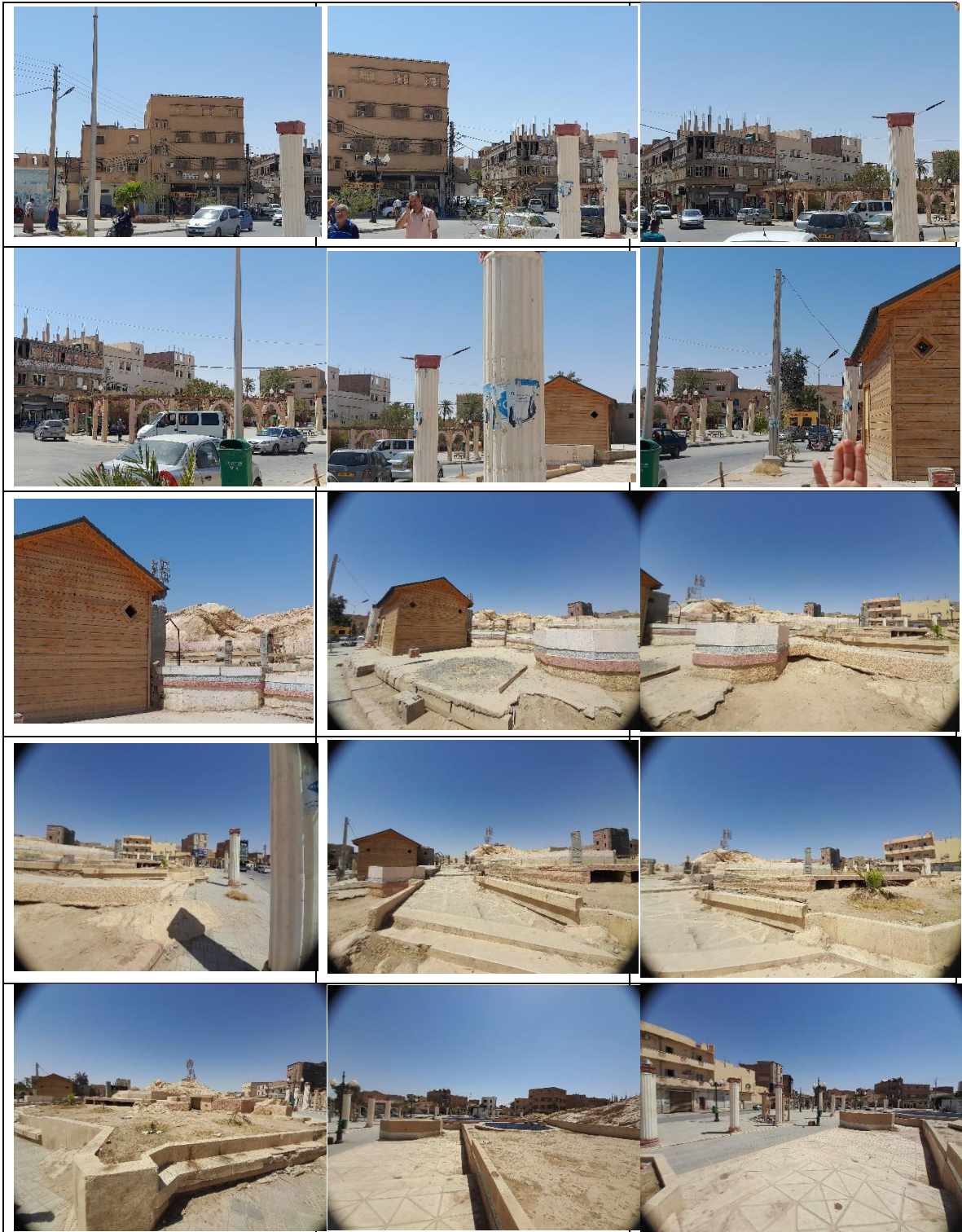




H/W= 1,05
 Albédo = 0,3
 Densité végétale (Dv) = 0,34
 SVF=0.509

1.4 Placette dhalaa





$H/W = 1,06$
 Albédo = 0,30
 Densité végétale (D_v) = 0,003
 $SVF = 0.84$

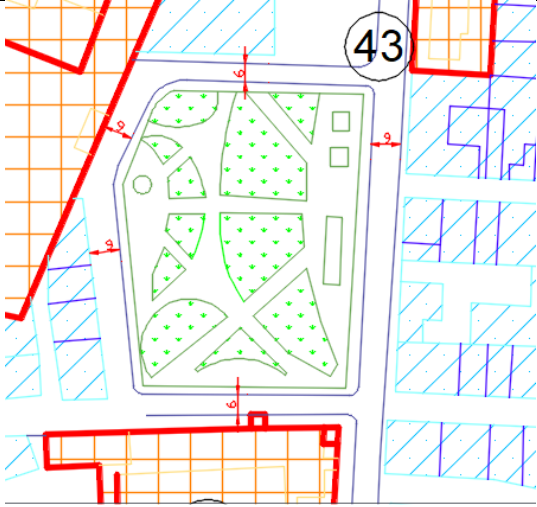
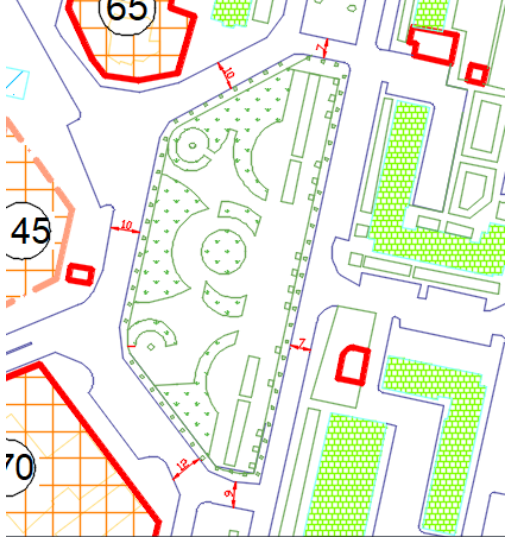
2. LA DENSITE VEGETALE DES PLACETTES ETUDIEES


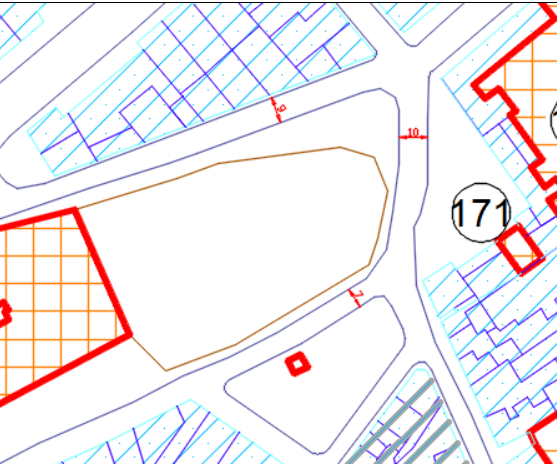
Comme nous abordons dans le chapitre 02, La valeur numérique de la densité végétale est fonction de tous les aménagements végétaux. Toutes essences confondues (arbres, pelouses, broussailles, haies, ...etc.). Elle peut être obtenue en combinant l'analyse d'images satellites et l'équation est :

$$Dv = Av / Ae \quad \text{ou :}$$

Av : surface totale de l'aménagement vert

Ae : surface totale du périmètre de calcul

Place	Densité végétale (Dv)	Présentation
Zouaka (nommé Guattari elokbi)	Dv= 0,32 Av=2 123 Ae=6479.90	
Iben Badis	Dv= 0,34 Av= 2 260 Ae=6533.80	

<p>El Horia</p>	<p>Dv= 0,19 Av= 1 055,03 Ae=5300</p>	
<p>Dhalaa</p>	<p>Dv= 0,003 Av=10 Ae=3024.34</p>	

3. FACTEUR DE VUE DU CIEL (SVF)

Comme nous abordons dans le chapitre 02, le facteur de vue du ciel (SVF) détermine les échanges de chaleur par rayonnement entre la ville et le ciel (Nikolopoulou, M., 2004). En conséquent on va utiliser ce facteur pour notre cas d'étude pour juger et classer les quatre placettes selon la quantité de rayonnement solaire que reçoivent les différentes façades.

Les valeurs de ces facteurs peuvent être obtenues par l'équation suivante :

$$SVF = \frac{400 \cdot L \cdot W}{\pi (L^2 + H^2)} \quad \%$$

Où : **L** est la longueur de l'espace, **W** est sa largeur moyenne et **H** est la hauteur moyenne des bâtiments environnants.

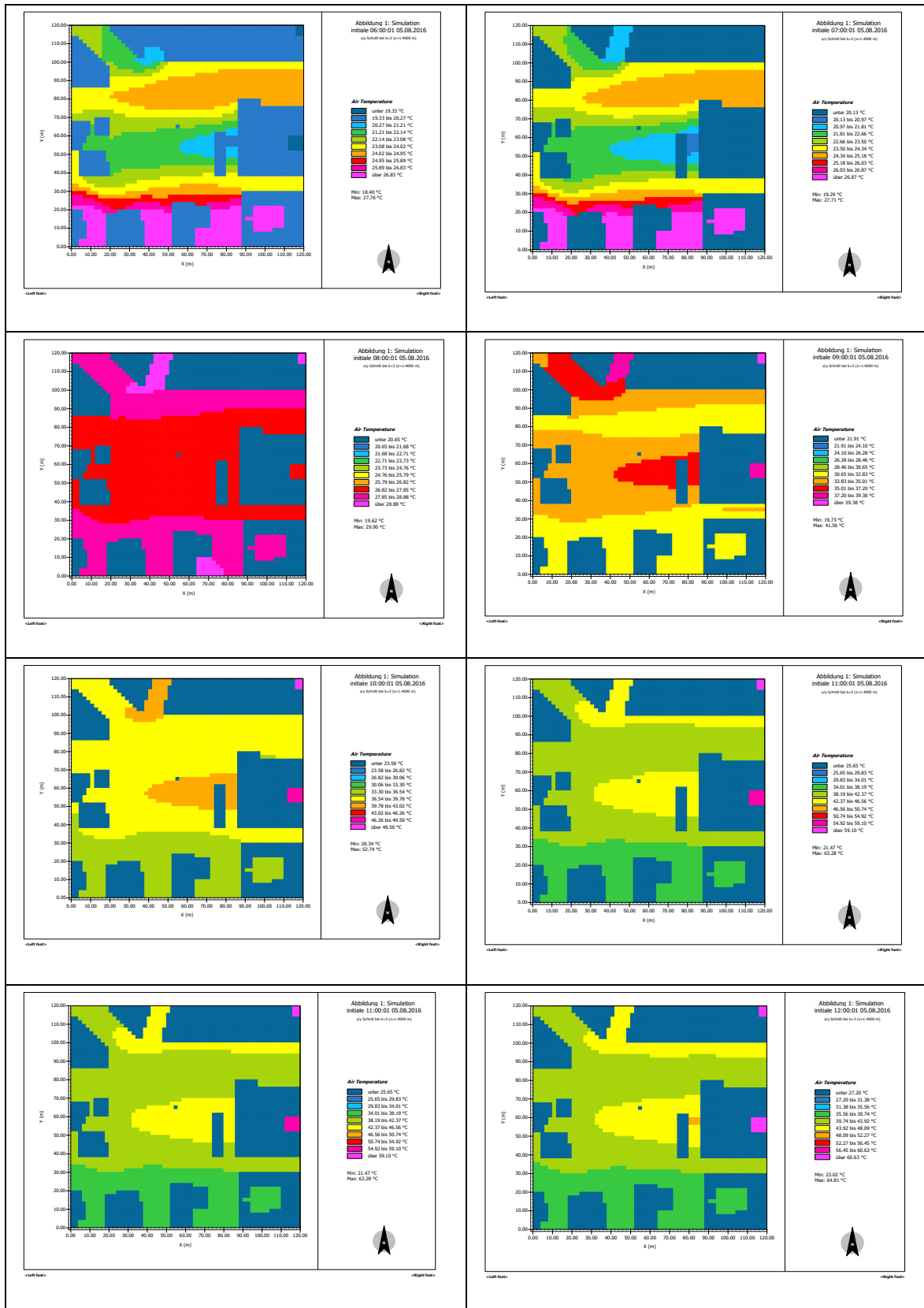
Elle atteint une valeur maximale égale à 1 dans les espaces ouverts dépourvus de toute construction, arbre, obstacle.

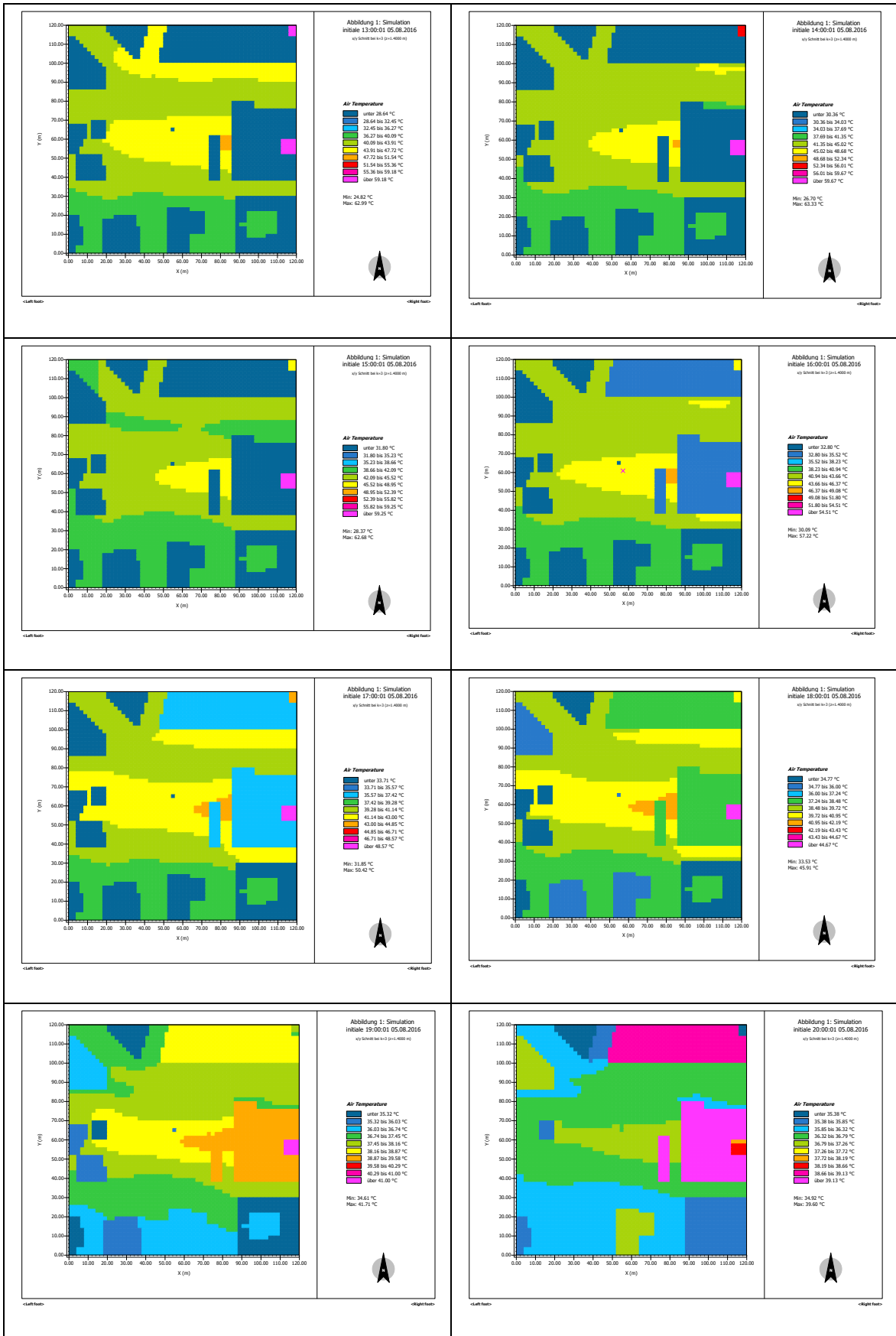
4. ALBEDO MOYEN DES SURFACES

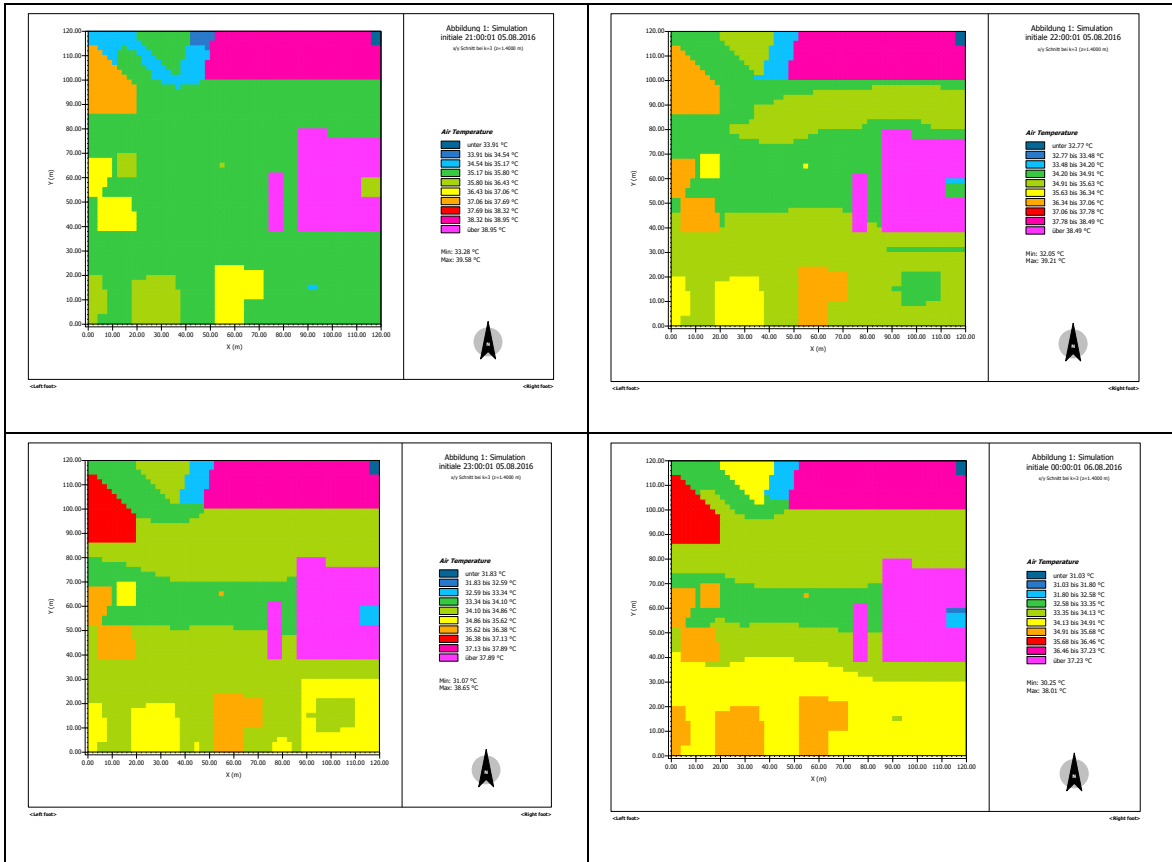
L'albédo est une fraction du rayonnement solaire incident réfléchi par une surface (Nikolopoulou, M. 2004), la réflectivité des surfaces détermine la capacité des surfaces à refléter le rayonnement solaire. L'albédo est représenté sur une échelle de 0 à 1. Un haut albédo, par exemple 0,70, signifie que la surface réfléchit une grande quantité du rayonnement solaire (Athamena Kh., 2012). Un matériau clair réfléchissant 80% du rayonnement solaire incident et un matériau sombre ne réfléchissant que 20%.

	Albédo 0.1 – 0.3	Albédo 0.4 – 0.6	Albédo 0.7 – 0.9
Surfaces	Asphalte noir Béton sombre Pelouse Ardoise	Béton clair Cuivre oxydé Brique rouge Pierre	Pierre calcaire Marbre blanc Peinture blanche

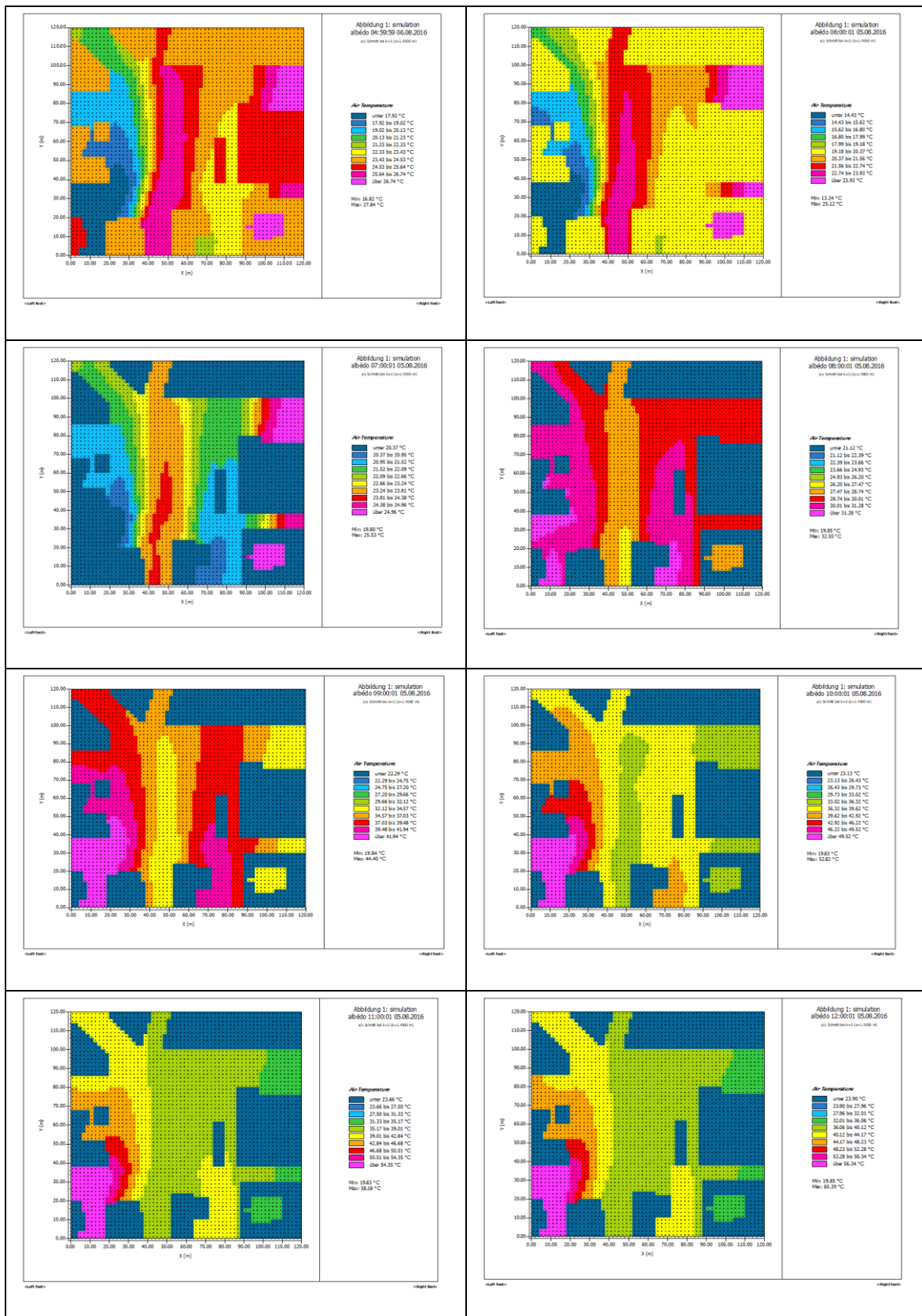
5. Présentation des cartes de la température de l'air (Tair) enregistrée au scénario de référence (S0) de la simulation au cours de 24h d'une journée typique d'été (le 05/08/2016)

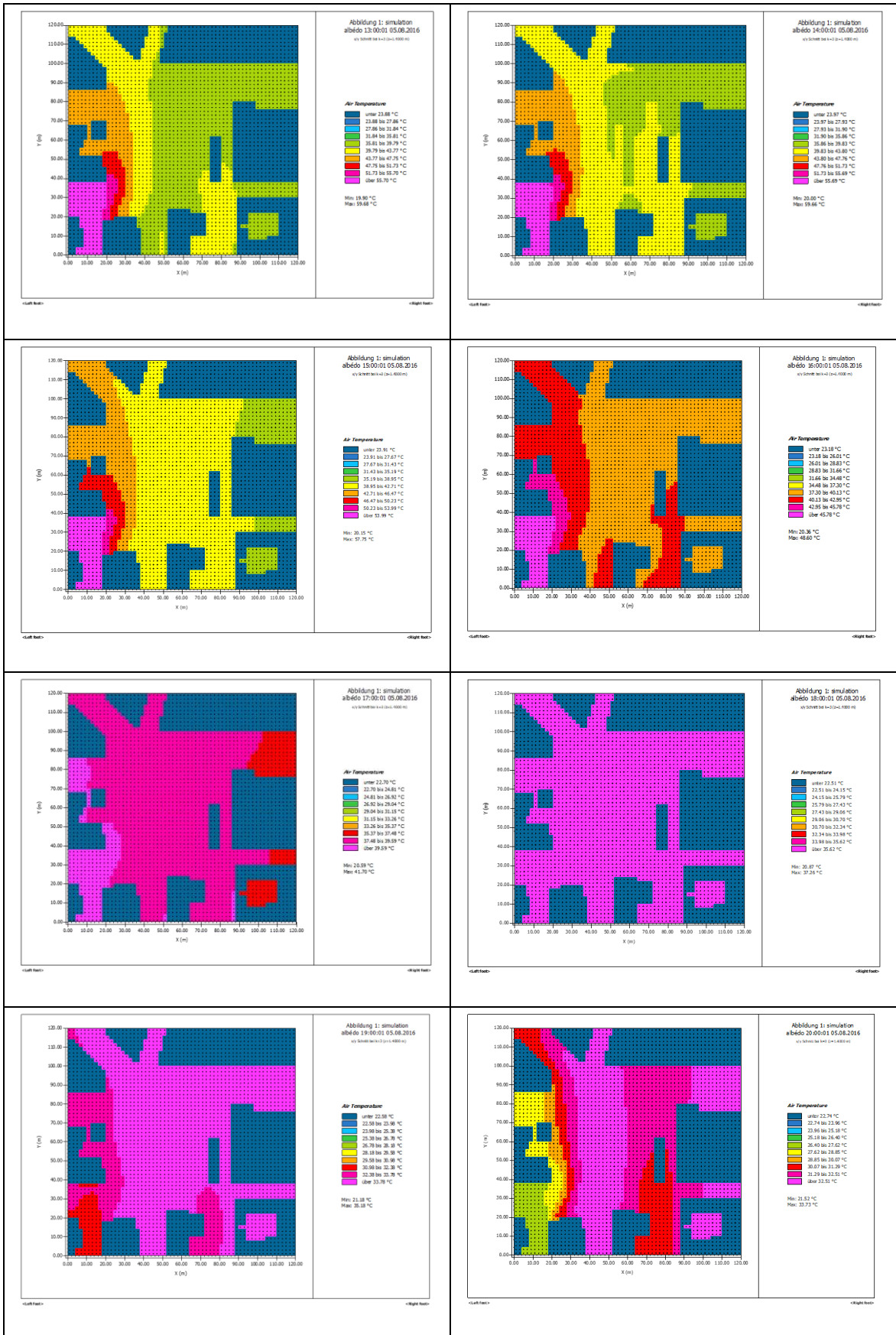


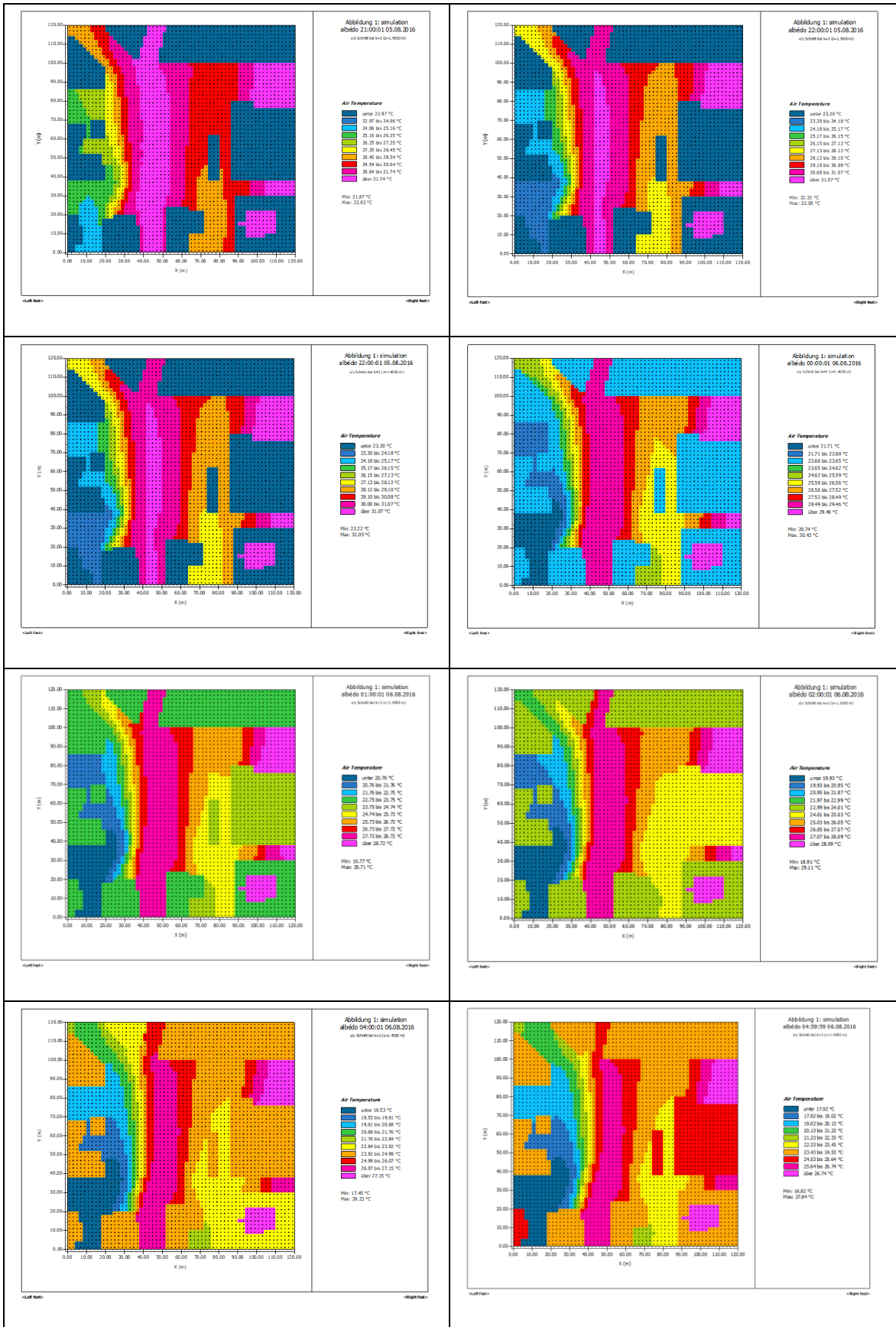




6. Présentation des cartes de la température de l'air (Tair) enregistrée au premier scénario de (S1) de la simulation au cours de 24h d'une journée typique d'été (le 05/08/2016)







7. Présentation des cartes de la température de l'air (Tair) enregistrée au deuxième scénario de (S2) de la simulation au cours de 24h d'une journée typique d'été (le 05/08/2016)

