

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Architecture
Laboratoire de Génie Civil et Hydraulique

THÈSE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT EN 3^{ème} CYCLE

Domaine : Architecture, Urbanisme et Métiers de la Ville
Filière : Architecture Spécialité : Architecture

Présentée par

SAYAD Bouthaina

Intitulée

La contribution de la végétation et des plans d'eau pour améliorer le confort climatique dans les espaces extérieurs à Guelma

Soutenue le : 19.07.2021

Devant le Jury composé de :

Mr LAZRI Youcef	Professeur	Univ. de Guelma	Président
Mr ALKAMA Djamel	Professeur	Univ. de Guelma	Rapporteur
Mme HARIDI Fatma Zohra	M.C.'A'	Univ. de Guelma	Examinatrice
Mr REHAILIA Hassib	Professeur	Univ. D'Annaba	Examineur
Mr MAHIMOUD Aissa	M.C.'A'	Univ. de Constantine 3	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

A mes Parents Qu'Allah Les Protège et Les Garde pour moi

Remerciement

En guise d'avant-propos, je souhaite remercier vivement toutes les personnes qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail de recherche, ainsi que celles qui m'ont encouragé tout au long de mon cursus universitaire au sein de l'université 8 Mai 1945 Guelma.

Mes sincères remerciements et ma grande reconnaissance à mon directeur de thèse Professeur *ALKAMA Djamel*, d'avoir illuminer mon parcours de recherche par ses orientations, ses encouragements, et surtout sa patience et sa confiance.

Mes remerciements vont aussi aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce modeste travail : Dr *HARIDI Fatima Zohra*, Pr *REHAILIA Hassib*, Dr *MAHIMOUD Aissa* et Pr *LAZRI Youcef*.

Ma gratitude et mon profond respect à mes *PARENTS*, ma sœur *Feriel* et mes frères *karim* et *Raouf*, qui ont supporté mes humeurs et partagé les moments d'incertitude que cette thèse a dû connaître.

Mes plus grands remerciements vont à la famille de mon oncle *Hafid* pour l'aide et le soutien moral qui m'a été très précieux, avec une mention spéciale à ma tante *Moufida* qui m'a toujours encouragé et qui a cru en moi.

Enfin, mes remerciements vont également à toute l'équipe qui a contribué à la conduite de l'investigation in-situ et à tous ceux qui ont contribué à leur façon à ce travail de thèse.

ملخص

الراحة المناخية في المساحات الخارجية هي الجانب الذي يعكس حالة البيئة الحرارية الحضرية. وبالتالي، فإن الشعور بالراحة هو مجرد ترجمة للتناغم بين البشر وبيئتهم والعكس صحيح في حالات عدم الراحة التي غالبًا ما نخبرنا عن بيئة حرارية حضرية متأثرة بالمناخ. في فصل الصيف، السبب الرئيسي للشعور بعدم الراحة المناخية هو تأثير المناخ المحلي الحضري بظاهرة الجزر الحرارية الحضرية.

يركز هذا البحث على تقييم وتحسين الراحة المناخية الصيفية في المساحات الخارجية في قالمه. تم إجراء التحقيق على مسار حضري مكون من مجموعة كبيرة من المساحات الخارجية ومدعم بـ 41 موقعًا مختلفًا.

يقوم المنهج المتبع في هذه الدراسة على نهجين متكاملين؛ الأول نوعي، ويتساءل عن الإحساس الحراري في الأماكن الحضرية الخارجية خلال أيام الصيف الحارة، والثاني كمي ويستخدم لإدارة حملات القياس المناخية ولإجراء سلسلة من عمليات المحاكاة الجوية. يتلخص التحقيق في النقاط الرئيسية التالية: القياس الكمي لظاهرة جزيرة الحرارة الحضرية في قالمه، دراسة البيئة الحرارية الحضرية، تقييم وتحسين مستويات الراحة المناخية الخارجية.

تم إجراء تحسين في مستويات الراحة المناخية في جميع المساحات الخارجية التي تم تحديدها على أنها غير مريحة، وذلك باعتماد حلول طبيعية. إذ أنه قد تم محاكاة العديد من السيناريوهات ذات الأنواع المختلفة، والنسب والترتيبات للنباتات والتكوينات المختلفة للمسطحات المائية باستخدام النموذج الجوي Envi-met لتصوير مسارات حضرية منعشة بمستويات مثالية من الراحة المناخية.

يشير الاختلاف في درجات الحرارة الحضرية إلى أن مدينة قالمه متأثرة بظاهرة جزيرة الحرارة الحضرية وبشكل كثيف من الساعة 10:00 إلى 14:00. تكشف دراسة البيئة الحرارية الحضرية أن مستخدم المساحات الخارجية يخضع لأربع مراحل حرارية؛ مرحلة اعتدال في الصباح، مرحلة اجهاد حراري من الساعة 11:00 صباحًا حتى 5:00 مساءً، تليها مرحلة ارتفاع حراري ثم مرحلة اعتدال في المساء. تم تحديد أربع استراتيجيات للتأقلم مع البيئة الحضرية الحرارية خلال الصيف الحار في وسط مدينة قالمه؛ إستراتيجية نباتية، إستراتيجية مركبة تجمع الغطاء النباتي والارضية العاكسة، إستراتيجية هندسية حضرية وإستراتيجية مركبة تجمع الهندسة الحضرية والارضية العاكسة.

بشكل عام، تشير النتائج إلى أن العناصر الطبيعية كالنباتات والمياه تلعب دورًا رئيسيًا في تحسين مستويات الراحة المناخية في المساحات الخارجية وتجدر الإشارة إلى أن الأشجار هي الأكثر أهمية من حيث تنظيم المناخ المحلي. وبالتالي، من الممكن إنشاء مسارات منعشة في قالمه ويمكن أيضًا تحقيق مستويات مثالية من الراحة الحرارية، في حالة الجمع بين الغطاء النباتي والمياه كاستراتيجية للتحسين و التأقلم.

الكلمات المفتاحية: ظاهرة جزيرة الحرارة الحضرية، البيئة الحرارية الحضرية، الراحة المناخية، المساحات الخارجية، الغطاء النباتي، المسطحات المائية.

Résumé

Le confort climatique extérieur est la figure qui reflète l'état de l'environnement thermique urbain. Ainsi, la sensation du confort ce n'est qu'une traduction de l'harmonie entre l'humain et son environnement et vice versa dans les situations d'inconfort, qui renseignent souvent sur un environnement thermique urbain climatiquement affecté. En été, la cause principale des situations d'inconfort climatique est l'affection du microclimat urbain par le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Cette recherche porte sur l'évaluation et l'amélioration du confort climatique extérieur au centre-ville de Guelma. L'investigation a été menée le long d'un parcours urbain composé d'un ensemble important d'espaces extérieurs et supporté par 41 différents endroits.

La démarche méthodologique mise en œuvre est basée sur deux approches complémentaires ; la première est qualitative, questionne la sensation thermique en extérieur pendant la surchauffe estivale. La deuxième est quantitative sert à administrer des campagnes de mesures microclimatiques et à conduire des séries de simulations atmosphériques. Les principales étapes de cette investigation se résument dans les points suivants : quantification du phénomène d'ICU sur l'agglomération de Guelma, étude de l'environnement thermique urbain, évaluation et amélioration des niveaux du confort climatique en extérieur.

L'amélioration des niveaux du confort climatique a été effectuée sur un ensemble des espaces extérieurs repérés comme inconfortables, adoptant des solutions à base naturelle. En effet, une multitude de scénarios avec différents ratios, espèces et dispositions de végétation et différentes configurations des plans d'eau ont été simulés à l'aide du modèle atmosphérique Envi-met, pour y envisager des parcours de fraîcheur urbains avec des niveaux optimaux du confort climatique.

L'écart des températures urbaines indique que la ville de Guelma est affectée par le phénomène d'ICU avec une forte intensité de 10 :00 à 14 :00. L'étude de l'environnement thermique urbain révèle que l'usager des espaces extérieurs subi quatre phases thermiques ; phase modérée le matin, phase dure aux heures chaudes de 11 : 00 à 17 :00, suivi par une phase de soulagement thermique et puis une phase modérée le soir. Quatre stratégies d'adaptation ont été identifiées pour s'adapter à l'environnement urbain thermique pendant la surchauffe estivale au centre-ville de Guelma ; stratégie végétale, stratégie mixte ; végétation et sol réfléchissant, stratégie géométrique et stratégie mixte ; géométrie et sol réfléchissant.

En somme, les résultats indiquent que les éléments naturels jouent un rôle clé dans l'amélioration des niveaux du confort climatique dans les espaces extérieurs. Il s'avère que, les arbres sont les plus significatifs en termes de régulation microclimatique. Ceci rend possible la création des parcours de fraîcheurs à Guelma, des niveaux optimaux de confort climatique peuvent également être atteints, à moins que la végétation et l'eau soient mis en combinaison comme une stratégie d'amélioration et d'adaptation.

Mots Clés : Phénomène d'ICU, Environnement thermique urbain, Confort climatique, espaces extérieurs, Végétation, Plans d'eau, Guelma.

Abstract

Climatic outdoor comfort is the figure that reflects the state of the urban thermal environment. Thus, feeling comfortable is just a simple translation of the harmony between humans and their environment and vice versa in discomfort situations, which reflects often an affected thermal urban environment. In summertime, the main cause of climatic discomfort is the urban heat island phenomenon.

This research focuses in the assessment and the improvement of summer climatic comfort in outdoor spaces in Guelma. The investigation was carried out on pedestrian course, mainly composed of an important set of outdoor spaces and supported by 41 different locations.

The methodological approach implemented in this study is based on two complementary approaches; the first is qualitative, questions the thermal sensation outdoors during hot summer days, the second is quantitative used to conduct microclimatic field measurements and to conduct series of atmospheric simulations. The main steps of this investigation are summarized in the following points: quantification of the UHI phenomenon in Guelma's agglomeration, study of the urban thermal environment, assessment and improvement of outdoor climatic comfort levels.

Improvement the climatic comfort levels was carried out on a set of outdoor spaces identified as uncomfortable, adopting natural-based solutions. Indeed, a multitude of scenarios with different species, ratios and arrangements of vegetation and different configurations of water bodies have been simulated using the Envi-met atmospheric model to create cool pedestrian courses with optimal levels of climatic comfort.

The difference in urban temperatures indicates that the city of Guelma is affected by the UHI phenomenon with a high intensity from 10:00 to 14:00. The study of the urban thermal environment reveals that the user of outdoor spaces undergoes four thermal phases; moderate phase in the morning, hard phase in hot hours from 11:00 am to 5:00 pm, followed by a thermal relief phase and then a moderate phase in the evening. Four adaptation strategies have been identified to adapt to the thermal urban environment during the hot summer in downtown Guelma; vegetation strategy, mixed strategy; vegetation and reflective soil, geometric strategy and mixed strategy; geometry and reflective soil.

In general, the results indicate that the natural elements, vegetation and water play a key role in improving the climatic comfort levels in outdoor spaces. Whereas, trees are the most significant in terms of microclimatic regulation. Thus, it is possible to create cool pedestrian courses in Guelma and optimal levels of climatic comfort can also be achieved, unless vegetation and water are combined as an improvement and adaptation strategy.

Keywords: UHI phenomenon, Urban thermal environment, Climatic comfort, outdoor spaces, Vegetation, Water bodies.

Table des matières

Avant-propos	II
Résumé	IV
Table des matières	VII
Liste des figures.....	XVI
Liste des tableaux	XX
Liste des nomenclatures.....	XXII

Introduction générale

1. Introduction	1
2. Problématique.....	2
3. Hypothèses	4
4. Objectifs	4
5. Etat de l'art.....	4
5.1 Définition du contexte	4
5.2 Positionnement et approches d'étude	5
5.3 Le rôle des éléments naturels.....	10
5.4 Microclimat urbain et confort climatique en extérieur, quelle relation !.....	11
4.5 Acquisition des données	12
5.6 Evaluation du confort climatique à l'extérieur	12
6. Méthodologie de la recherche	16
7. Structure de la recherche	17
8. Contribution scientifique.....	18

Chapitre I : Climat et changement climatique et en milieu urbain

I.1 Introduction.....	19
I.2 Climat et climatologie.....	20
I.2.1 Concepts de base	20
I.2.1.1 Le climat	20
I.2.1.2 La climatologie	20

I.2.1.3	La météorologie	20
I.2.1.4	La biométéorologie	20
I.2.2	Paramètres climatiques.....	21
I.2.2.1	Le rayonnement solaire.....	21
I.2.2.2	La température de l'air.....	21
I.2.2.3	L'humidité relative	21
I.2.2.4	La lumière	21
I.2.2.5	Les précipitations	22
I.2.2.6	Le vent	22
I.2.3	Echelles du climat	23
I.2.3.1	Macroclimat	23
I.2.3.2	Mésoclimat.....	23
I.2.3.3	Topoclimat	23
I.2.3.4	Microclimat.....	23
I.2.4	Les zones climatiques dans le monde	24
I.3	Climat et microclimat urbain	26
I.3.1	Composition et interdépendance du climat urbain.....	26
I.3.1.1	Couche limite urbaine	27
I.3.1.2	Canopé urbaine	27
I.3.2	Paramètres affectant le climat urbain	27
I.3.2.1	Densité des villes	28
I.3.2.2	Morphologie et géométrie.....	28
I.3.2.3	Activité anthropique	29
I.3.2.4	Albédo.....	29
I.3.2.5	Couverture végétale	30
I.3.2.6	Surfaces d'eau	31
I.3.3	Microclimat urbain.....	32
I.3.3.1	Paramètres modifiants.....	33
I.3.3.2	Paramètres modifiés.....	35
I.4	Changement climatique en milieu urbain	36
I.4.1	Contexte général : Dynamique des villes et évolution du climat.....	36
I.4.2	Causes principales du changement climatique.....	37
I.4.2.1	Causes naturelles.....	37
I.4.2.2	Causes dues à l'activité anthropique.....	38
I.4.3	Principaux effets du changement climatique	38

I.4.3.1	La météorologie	38
I.4.3.2	Biodiversité et écosystèmes	38
I.4.3.3	La santé publique	39
I.4.4	Phénomènes dues au changement climatique en milieu urbain	39
I.4.4.1	Rugosité et vent	39
I.4.4.2	Pollution de l’atmosphère	41
I.4.4.3	Phénomène d’Ilot de chaleur urbain	42
I.4.5	Adaptation aux effets du changement climatique en milieu urbain	46
I.4.5.1	Stratégies d’atténuation.....	46
I.4.5.2	Stratégies d’adaptation.....	48
I.5	Conclusion	49

Chapitre II : Sensation thermique et confort climatique extérieur

II.1	Introduction.....	50
II.2	Environnement thermique urbain	51
II.2.1	Définition.....	51
II.2.2	Paramètres de l’environnement thermique urbain.....	51
II.2.2.1	Le métabolisme	51
II.2.2.2	L’habillement.....	51
II.2.2.3	La température de l’air.....	52
II.2.2.4	L’humidité relative de l’air	52
II.2.2.5	La vitesse de l’air	52
II.2.3	Confort climatique en extérieur	53
II.3	Méthodologies et outils pour évaluer le confort climatique en extérieur	54
II.3.1	Méthodes d’acquisition des données	54
II.3.1.1	Données subjectives.....	54
II.3.1.2	Données objectives	54
II.3.2	Méthodes et études bioclimatiques.....	56
II.3.2.1	Les études d’Olgyay	56
II.3.2.2	Les études de Givoni et de Szocolay	57
II.3.2.3	Les études bioclimatiques à l’air du développement durable	59
II.3.3	Indices thermiques et climatiques.....	59
II.3.3.1	PMV et PPD.....	59
II.3.3.2	UTCI – Universal Thermal Climate Index	60
II.3.3.3	SET– Standard Effective Temperature	60

II.3.3.4	WBGT– Wet Bulb Globe Temperature	61
II.3.3.5	PET– Physiological Equivalent Temperature	61
II.3.4	Outils numériques et modèles climatiques	62
II.3.4.1	L’Outil de confort thermique CBE	62
II.3.4.2	L’outil CitySim Pro	65
II.3.4.3	Modèle climatique par RayMan	65
II.3.4.4	Modèle atmosphérique par ENVI-met.....	65
II.3.4.5	Logiciel de simulation ANSYS	66
II.3.4.6	Meteodyn WT	67
II.3.4.7	Autodesk CFD	67
II.3.4.8	Les plug-in Honeybee et Ladybug.....	68
II.4	Stratégies d’adaptation à l’environnement thermique urbain	69
II.4.1	Végétation urbaine.....	69
II.4.1.1	Effet de la végétation sur la température de l’air.....	70
II.4.1.2	Effet de la végétation sur la température rayonnante.....	71
II.4.1.3	Effet de la végétation sur l’humidité relative.....	71
II.4.1.4	Effet de la végétation sur la vitesse de l’air	71
II.4.1.5	Effet de la végétation sur le confort climatique.....	72
II.4.2	Géométrie urbaine	72
II.4.2.1	Effet de la géométrie sur la vitesse de l’air.....	73
II.4.2.2	Effet de la géométrie sur la température rayonnante	73
II.4.2.3	Effet de la géométrie sur la température de l’air	74
II.4.2.4	Effet de la géométrie sur le confort climatique.....	74
II.4.3	Surfaces réfléchissantes	74
II.4.3.1	Effet des surfaces réfléchissantes sur la température rayonnante	75
II.4.3.2	Effet des surfaces réfléchissantes sur la température de l’air	75
II.4.3.3	Effet des surfaces réfléchissantes sur le confort climatique	76
II.4.4	Plans d’eau.....	76
II.4.4.1	Effet des plans d’eau sur la température rayonnante	77
II.4.4.2	Effet des plans d’eau sur la température de l’air	77
II.4.4.3	Effet des plans d’eau sur l’humidité relative	77
II.4.4.4	Effet des plans d’eau sur le confort climatique.....	77
II.5	Conclusion	78

Chapitre III : Présentation de l'environnement d'étude

III.1	Introduction.....	79
III.2	L'environnement semi-aride.....	79
III.2.1	Origine et répartition	79
III.2.1.1	Signification de l'aridité.....	79
III.2.1.2	Causes d'aridité	80
III.2.1.3	Degré d'aridité.....	81
III.2.1.4	Climats arides.....	81
III.2.2	Identification du climat semi-aride.....	82
III.2.2.1	Météorologie dans les zones semi-aride.....	83
III.2.2.2	Plantation et végétation	84
III.3	La ville de Guelma un cas témoin à étudier.....	85
III.3.1	Situation géographique	85
III.3.2	Contexte historique.....	86
III.3.3	Contexte géophysique	86
III.3.3.1	Relief et topographie	86
III.3.3.2	Hydrologie.....	87
III.3.4	Potentialités naturelles de la ville	87
III.3.4.1	Potentialités agricoles.....	87
III.3.4.2	Potentialités forestières	87
III.3.4.3	Potentialités hydrauliques	88
III.4	La ville de Guelma appartient-elle au climat semi-aride !.....	89
III.4.1	Climat et météo à Guelma	89
III.4.1.1	Température de l'air	89
III.4.1.2	Précipitations	90
III.4.1.3	Insolation.....	90
III.4.1.4	Vents.....	91
III.4.2	Etude Bioclimatique de La ville de Guelma.....	92
III.4.2.1	Indice d'aridité	92
III.4.2.2	Climagramme d'EMBERGER.....	92
III.4.2.3	Détermination du diagramme Ombrothermique	94
III.4.2.4	Détermination du diagramme psychométrique	95
III.4.2.5	Détermination d'isotherme de Guelma	96
III.5	De l'espace extérieur de Guelma à sa configuration	97
III.5.1	Genèse des espaces extérieurs	97

III.5.1.1	Logique militaire avant 1850	97
III.5.1.2	Logique coloniale entre 1852 et 1962	97
III.5.1.3	Logique populaire entre 1962 et 1966.....	97
III.5.1.4	Logique de l'Algérie indépendante 1966 et 1989	97
III.5.1.5	Logiques de 1990 jusqu'à nos jours	98
III.5.2	Aménagement des espaces extérieurs	99
III.5.2.1	Bâtiments environnants	99
III.5.2.2	Les édicules et les monuments	99
III.5.2.3	Mobilier urbain.....	100
III.5.2.4	Végétation	102
III.5.2.5	Plans d'eau	104
III.5.3	Typologies des espaces extérieurs	105
III.5.3.1	La place historique	105
III.5.3.2	La placette	105
III.5.3.3	Le boulevard.....	106
III.5.3.4	La rue.....	106
III.5.3.5	L'espace d'agrément linéaire	106
III.5.3.6	Le jardin public	107
III.5.3.7	Les plaines.....	107
III.5.3.8	Les espaces collectifs	107
III.6	Conclusion	108

Chapitre IV : Processus méthodologique et déroulement de l'investigation

IV.1	Introduction.....	109
IV.2	Exploration in-situ	110
IV.2.1	Enquête pilote	110
IV.2.1.1	Protocole d'enquête.....	110
IV.2.1.2	Présentation du questionnaire d'enquête.....	111
IV.2.1.3	Résultats de l'enquête pilote.	112
IV.2.2	Observation.....	114
IV.2.2.1	A propos de l'observation	114
IV.2.2.2	Résultats de l'observation	114
IV.2.3	Synthèse de la phase d'exploration	115
IV.3	Investigation in-situ	117
IV.3.1	Mesures in-situ	117

IV.3.1.1	Protocole de mesure	117
IV.3.1.2	Paramètres mesurés	118
IV.3.1.3	Instrumentation.....	118
IV.3.1.4	Résultats de la campagne de mesure	119
IV.3.2	Questionnaire et observation	122
IV.3.2.1	Déroulement du questionnaire	122
IV.3.2.2	Structure du questionnaire.....	123
IV.3.2.3	Traitement et analyse des données	124
IV.3.2.4	Résultats du questionnaire.....	125
IV.4	Simulation numérique.....	131
IV.4.1	Modèle de simulation	131
IV.4.2	Le progiciel envi-met.....	131
IV.4.2.1	Mise en fonction du programme Envi-Met	132
IV.4.2.2	Scénarios de simulation.....	133
IV.4.2.3	Données d'entrée.....	133
IV.4.3	Conditions de simulation	133
IV.4.4	Déroulement de la simulation.....	134
IV.4.5	Validation du modèle de la simulation	136
IV.5	Conclusion	138

**Chapitre V : Environnement thermique urbain et confort climatique en extérieur
durant la surchauffe estivale à Guelma**

V.1	Introduction.....	139
V.2	Observation du phénomène d'ICU sur l'agglomération de Guelma	140
V.2.1	Méthodologie de quantification de l'ICU	140
V.2.1.1	Approche in-situ	141
V.2.1.2	Approche statique	142
V.2.2	Quantification du phénomène d'ICU au centre-ville	142
V.2.2.1	Écart des températures urbaines.....	142
V.2.2.2	Echelle d'intensité d'ICU a Guelma	144
V.3	Evaluation de l'environnement thermique urbain durant la surchauffe estivale	145
V.3.1	Méthodologie de l'évaluation.....	145
V.3.2	Comportement thermique de l'espace extérieur.....	145
V.3.2.1	Première session de 09 :00 à 11 :00.....	146
V.3.2.2	Deuxième session de 11 :00 à 13 :00.....	147

V.3.2.3	Troisième session de 13 :00 à 15 :00.....	148
V.3.2.4	Quatrième session de 15 :00 à 17 :00	149
V.3.2.5	Cinquième session de 17 :00 à 19 :00.....	150
V.3.2.6	Dernière session de 19 :00 à 21 :00	151
V.4	Adaptation à l’environnement thermique urbain durant la surchauffe estivale..	152
V.4.1	Points stratégiques d’adaptation.....	152
V.4.2	Adaptation significative	153
V.4.3	Stratégies d’adaptation et niveaux du confort climatique	157
V.4.3.1	Stratégie végétale	159
V.4.3.2	Stratégie mixte végétation et réflectivité du sol.....	159
V.4.3.3	Stratégie géométrique	162
V.4.3.4	Stratégie mixte géométrie et réflectivité du sol	162
V.4.4	Anticipation du confort climatique extérieur en été.....	164
V.5	Conclusion	167

Chapitre VI : À la recherche des parcours de fraîcheurs urbains à Guelma

VI.1.	Introduction :.....	169
VI.2	Méthodologie de simulation	170
VI.2.1	Parcours et choix des stations.....	170
VI.2.2	Conditions de simulation.....	171
VI.2.3	Déroulement de la simulation.....	171
VI.2.3.1	Les stations de repos	172
VI.2.3.2	Scénarios de simulation	173
VI.2.3.3	Les stations de marche	176
VI.2.3.4	Scénarios de simulation	177
VI.3	Discussion et interprétation des résultats.....	180
VI.3.1	Ilots de fraîcheur.....	180
VI.3.1.1	Place 19 Mars – Station S2	180
VI.3.1.2	Rue El-Nakhlette – Station S2’	183
VI.3.1.3	Boulevard Boumaaza Said – Station S3	186
VI.3.1.4	Boulevard Souidani Boudjema – Station S6.....	189
VI.3.1.5	Placette 8 Mai 1945 – Station S8.....	192
VI.3.2	Parcours de fraîcheur et niveaux de confort	195
VI.3.2.1	Niveaux actuels du confort climatique	195
VI.3.2.2	Impact des éléments naturels sur le confort climatique.....	196

VI.3.2.3 À la recherche des niveaux de confort climatique optimal.....	199
VI.3.3 Parcours de fraîcheur urbain à Guelma	211
VI.4 Conclusion	212

Conclusion générale

1. Conclusions	214
2. Limites de la recherche et difficultés rencontrées	218
3. Perspectives et recherches futures.....	218

Bibliographie

Annexes

Annexe 1 : Enquete pilote

Annexe 2 : Fiche d'observation

Annexe 3 : Questionnaire

Annexe 4 : Données de sorties du questionnaire /SPSS/

Annexe 5 : Photographies prises durant l'investigation In-situ

Annexe 6 : Nomenclature des arbres et des arbres d'alignement en Algérie

Annexe 7 : Ecart des températures urbaines

Annexe 8 : Cartes de l'indice du confort UTCI dans sept endroits stratégiques

Annexe 9 : Essences et caractéristique d'arbres utilisés dans la simulation

Annexe 10 : Ensoleillement et ombre le 22.07.2019

Annexe 11 : Réduction de UTCI et des températures de l'air

Liste des figures

Figure I.1: Le bilan du cycle d'eau	22
Figure I.2: Variation de la vitesse du vent selon l'altitude et la nature du sol	22
Figure I.3: Les différentes couches composantes de l'atmosphère	26
Figure I.4: Echelles et couches du climat urbain.....	27
Figure I.5: Paramètres affectant le climat urbain	28
Figure I.6: Diverses fonctions et effets des arbres urbains.....	30
Figure I.7: L'effet brise-vent des arbres urbains.....	31
Figure I.8: L'interrelation entre le microclimat et les trois composantes du lieu.....	32
Figure I.9: Interrelation entre les paramètres du microclimat urbain	33
Figure I.10: Contribution saisonnière d'un arbre à la création des microclimats confortable	34
Figure I.11: Types et causes du changement climatique.....	36
Figure I.12: Les principales causes du changement climatique.....	37
Figure I.13: Diminution de la vitesse du vent selon la rugosité du terrain.....	40
Figure I.14: Les différentes sources de pollution de l'air en France.....	41
Figure I.15: Profil schématique du phénomène d'Ilot de Chaleur Urbain.....	42
Figure I.16: Processus de formation du phénomène d'ICU	43
Figure I.17: Principaux effets du phénomène d'ICU.....	45
Figure I.18: Stratégies d'adaptation aux effets du changement climatique en ville.....	46
Figure II.1: Paramètres de l'environnement thermique urbain	52
Figure II.2: Les conditions affectant le confort climatique dans les espaces extérieurs	53
Figure II.3: Station météorologique.....	54
Figure II.4: Charte Bioclimatique d'Olgyay	57
Figure II.5: Diagramme climatique de Givoni	58
Figure II.6: Diagramme psychométrique de Szokolay.....	58
Figure II.7: Catégorisation et calcul de l'indice UTCI	60
Figure II.8: Page d'accueil de l'outil de confort thermique CBE.....	63
Figure II.9: Processus de simulation par Envi-Met	66
Figure II. 10: Exemple d'une modélisation par ANSYS.....	67
Figure II.11: Exemple du processus de simulation - Autodesk Simulation CFD	68
Figure II.12: Connexion des logiciels Grasshopper 3D et Rhino à des moteurs de simulation par le plug-in Honeybee	68
Figure II.13: Effet des stratégies d'adaptation à l'environnement thermique sur les paramètres microclimatiques.....	69
Figure II.14: Effet de l'arbre sur le bâtiment et sur l'individu.....	70
Figure II.15: Paramètres influant la morphologie urbaine	72
Figure II.16: Régimes d'écoulement d'air dans des différentes géométries urbaines.....	73
Figure II.17: Divers Albedos de l'environnement urbain	75
Figure II.18: Processus d'évaporation de l'eau	76
Figure II.19: Caractéristiques physiques des étendus d'eau.....	77

Figure III.1: Répartition du climat semi-aride dans le monde.....	82
Figure III.2: Plantes graminées et graminiformes	84
Figure III.3: Arbres à production régulière dans les zones semi-aride.....	84
Figure III.4: Situation géographique de la ville de Guelma	85
Figure III.5: Vue sud de la couverture forestière de Guelma.	88
Figure III.6: Barrage Bouhamdane à Guelma en état rempli	88
Figure III.7: Moyennes mensuelles des températures, décennie 2008-2017.....	89
Figure III.8: Moyennes des précipitations mensuelles, décennie 2008-2017.....	90
Figure III.9: Insolation moyenne, décennie 2008-2017	91
Figure III.10: Moyennes mensuelles des vitesses de l'air, décennie 2008-2017	91
Figure III.11: Indice d'aridité de la ville de Guelma, décennie 2008-2017.....	92
Figure III.12: Etage climatique de la ville de Guelma, décennie 2008-2017.....	93
Figure III.13: Diagramme Ombrothermique de la ville de Guelma, décennie 2008-2017.	94
Figure III.14: Diagramme psychométrique de la ville de Guelma	95
Figure III.15: Isotherme de la ville de Guelma.	96
Figure III.16: Evolution de la structure urbaine de la ville de Guelma.....	98
Figure III.17: Espaces publics urbains qui datent de l'époque coloniale.	99
Figure III.18: Quelques édifice de la ville de Guelma.....	100
Figure III.19: Plaques de signalisation au centre-ville de Guelma.....	100
Figure III.20: Candélabres et lampadaires au centre-ville de Guelma	101
Figure III.21: Bancs publics au centre-ville de Guelma.....	101
Figure III.22: Usage et fonctionnement des plans d'eau à Guelma auparavant.....	104
Figure III.23: Usage et fonctionnement actuel des plans d'eau à Guelma	104
Figure III.24: Situation et principales transformations de la place Saint augustin.....	105
Figure III.25: La place 8 Mai 1945 auparavant et aujourd'hui	105
Figure III.26: Vue générale et monument du boulevard Souidani Boudjemaa à Guelma.	106
Figure III.27: Situation et vue de la rue El-Nakhlette a Guelma.....	106
Figure III.28: Jardin Mustafa Séridi et jardin 19 juin 1956.....	107
Figure IV.1: Schéma du processus méthodologique comprend les différentes méthodes utilisées dans l'investigation.....	110
Figure IV.2: Les sites couverts par l'enquête avec le nombre de répondants	111
Figure IV.3: Classification des espaces extérieurs selon les usagers	113
Figure IV.4: Résultats de la superposition des délimitations fournis par les usagers	113
Figure IV.5: Résultats de l'observation chiffrée des espaces de détente.....	115
Figure IV.6: Le parcours d'investigation	115
Figure IV.7: Le déroulement de l'investigation in-situ	117
Figure IV.8: Instruments utilisés dans la campagne de mesures.....	119
Figure IV.9: Résultats de mesure des températures de l'air	120
Figure IV.10: Résultats de mesure d'humidité relative	121
Figure IV.11: Résultats de mesure des vitesses de l'air	121
Figure IV.12: Déroulement du processus de récolte de données	122
Figure IV.13: Interface du logiciel SPSS	124
Figure IV.14: Sensation du confort climatique par session.....	127
Figure IV.15: Appréciation de l'environnement thermique urbain par session.	128
Figure IV.16: Préférences thermiques des usagers par session.....	128

Figure IV.17: Sensation des températures de l'air par session	129
Figure IV.18: Sensation d'humidité relative par session.....	130
Figure IV.19: Sensation des vitesses de l'air par session.....	130
Figure IV.20: Mise en fonction du programme Envi-Met.....	132
Figure IV.21: La reconstruction de l'environnement physique de la station S2 par Envi-Met. (Envi-met V4.4.4).....	134
Figure IV.22: Les paramètres de simulation de la station S2 par Envi-Met	135
Figure IV.23: Calcul de l'indice PMV pour la station S2 par Envi-Met.....	135
Figure IV.24: Visualisation des résultats de simulation de la station S2 par Envi-Met....	136
Figure IV.25: Validation du modèle de simulation Envi-Met.....	137
Figure V.1: Schéma des étapes d'évaluation de l'environnement thermique urbain	140
Figure V.2: Cadre détaillé de l'approche de comparaison effectuées dans la canopée urbaine sur l'agglomération de Guelma	141
Figure V.3: Les deux modalités utilisées dans le recueil des données climatiques.....	142
Figure V.4: Écart des températures urbaine pendant la période de 20 au 22 juillet 2019.	143
Figure V.5: Corrélation des écarts de températures urbaines	144
Figure V.6: Croisement mesures in situ / vs. / sensation thermique, première session....	146
Figure V.7: Croisement mesures in situ / vs. / sensation thermique, deuxième session. ..	147
Figure V.8: Croisement mesures in situ / vs. / sensation thermique, troisième session...	148
Figure V.9: Croisement mesures in situ / vs. / sensation thermique, quatrième session...	149
Figure V.10: Croisement mesures in situ / vs. / sensation thermique, cinquième session	150
Figure V.11: Croisement mesures in situ / vs. / sensation thermique, dernière session....	151
Figure V.12: Résultats de l'application des critères de sélection sur les dix endroits	152
Figure V.13: Comparaison des résultats de simulation des sept endroits stratégiques.	158
Figure V.14: La stratégie végétale (P1) au niveau du rondpoint Houari Boumediene	159
Figure V.15: La stratégie mixte végétation et réflectivité de l'herbe (P15).....	160
Figure V.16: La stratégie mixte végétation et réflectivité des surfaces d'eau (P19).....	161
Figure V.17: La stratégie mixte végétation et réflectivité du pavé (P27).....	161
Figure V.18 : La stratégie géométrique (P37)	162
Figure V.19: La stratégie mixte géométrie et réflectivité du pavé (P10)	163
Figure V.20: Corrélation de l'acceptabilité thermique avec l'indice UTCI pour la stratégie végétale dans les endroits P1 et P35.....	164
Figure V.21: Corrélation de l'acceptabilité thermique avec l'indice UTCI pour la stratégie mixte végétation et réflectivité du sol dans les endroits P15, P19 et P27	165
Figure V.22: Corrélation de l'acceptabilité thermique avec l'indice UTCI pour la stratégie géométrique (P37) et dans la stratégie mixte géométrie et réflectivité du pavé (P10).	166
Figure VI.1: Stations retenues pour simulation avec deux propositions de les parcourir .	170
Figure VI.2: Situation des stations retenues pour simulation.....	171
Figure VI.3: Vue en plan de la place 19 Mars – Station S2	172
Figure VI.4: Vue en plan de la Rue EL-Nakhlette – Station S2'	172
Figure VI.5: Vue en plan de la placette 8 Mai 1945 – Station S8.....	173
Figure VI.6: Scénarios simulés de la place 19 Mars - station S2,.....	174
Figure VI.7: Scénarios simulés de la placette 8 mai 1945- station S8	175

Figure VI.8: Vue en plan du Boulevard Souidani Boudjemaa – Station S6	176
Figure VI.9: Vue en plan du Boulevard Boumaaza Said – Station S3.....	177
Figure VI.10: Scénarios simulés du Boulevard Boumaaza Said - station S3.....	178
Figure VI.11: Scénarios simulés du Boulevard Souidani Boudjemaa - station S6	179
Figure VI.12: Comparaison des résultats de simulation de la station S2	182
Figure VI.13: Comparaison des résultats de simulation de la station S2'	185
Figure VI.14: Comparaison des résultats de simulation de la station S3	188
Figure VI.15: Comparaison des résultats de simulation de la station S6.	191
Figure VI.16: Comparaison des résultats de simulation de la station S8	194
Figure VI.17: Niveaux de confort climatique (Indice UTCI) dans les cinq stations S2, S2', S3, S6 et S8	196
Figure VI.18 : Quantité du rayonnement globale ; directe et réfléchi dans la station S3 avec trois différents ratios.....	200
Figure VI.19 : Quantité du rayonnement réfléchi dans les stations S2 et S8.	208

Liste des tableaux

Tableau I.1: Les échelles du climat.	23
Tableau I.2: Les quatre zones climatiques dans le monde	24
Tableau I.3: Bonde d'Albédo de 0 à 1	29
Tableau II.1: Catégories et description des paramètres météorologiques.	55
Tableau II.2: Catégorisation de l'indice thermique PMV	59
Tableau II.3: Catégorisation de l'indice thermique SET	61
Tableau II.4: Catégorisation de l'indice thermique PET	61
Tableau III.1: Catégorisation et de degré d'aridité.	80
Tableau III.2: Limites des divers degrés de l'aridité.....	81
Tableau III.3: Cultures et superficies agricoles pour la région de Guelma	87
Tableau III.4: Précipitations moyennes à Guelma pendant la décennie 2008-2017	90
Tableau III.5: Végétation implantée dans les espaces extérieurs à Guelma.....	102
Tableau IV.1: Effectifs et caractéristiques personnelles des répondants.....	112
Tableau IV.2: Météo générale de la période d'investigation	120
Tableau IV.3: Effectifs et caractéristiques personnelles des répondants par session.....	125
Tableau IV.4: Résultats du questionnaire "usage et fréquentation"	126
Tableau IV.5: Cadre détaillé et paramètres initiaux du modèle Envi-met	134
Tableau V.1: Écart des températures urbaines relevées le 22 juillet 2019.....	143
Tableau V.2: Echelle d'intensité du phénomène d'ICU a Guelma.....	144
Tableau V.3: Echelles et niveaux de réponses utilisé dans le questionnaire.....	145
Tableau V.4: Types et albédo de la végétation et des matériaux du sol.....	154
Tableau V.5: Cadre détaillé et description du processus de simulation des endroits P1, P10, P15 et P19.....	155
Tableau V.6: Cadre détaillé et description du processus de simulation des endroits P27, P35 et P37.....	156
Tableau VI.1: Stations retenues pour simulation.....	170
Tableau VI.2: Cadre détaillé du processus de simulation de la station S2'.....	176
Tableau VI.3 : Réduction de UTCI, des températures de l'air et de T_{mrt} dans la présence des arbres.....	197
Tableau VI.4: Réduction de UTCI, des températures de l'air et de T_{mrt} dans la présence des plans d'eau.	198
Tableau VI.5: Echanges thermiques par rayonnement des différentes espèces d'arbres à 14 :00.....	202
Tableau 6: Echanges thermiques par rayonnement d'arbres dans la station S2' à 14 :00.	204

Tableau VI.7: Variations des vitesses de l'air en fonction de la disposition des arbres dans les stations S2, S6 et S8.....	205
Tableau VI.8: Qualité des ombres portées en fonction de la disposition des arbres dans la station S6.....	207
Tableau VI.9: Hygro-thermie de l'air humide dans les stations S2, S3, S6 et S8 à 14 :00.	210

Liste des nomenclatures

Nomenclature	Description	Unité
AI	Aridity Index / Indice d'aridité	-
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air-conditioning Engineers	-
AT	Acceptabilité Thermique	-
CLU	Couche Limite Urbaine	-
CU	Canopée Urbaine	-
ICU	Ilot de Chaleur Urbain	C°
PET	PET– Physiological Equivalent Temperature	C°
PMV	Predicted Mean Vote	C°
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied	%
HR	Humidité Relative	%
SET	Standard Effective Temperature	C°
ST	Sensation Thermique	-
STHR	Sensation Thermique de l'Humidité Relative	-
STTa	Sensation Thermique de la Température de l'air	-
STVa	Sensation Thermique de la Vitesse de l'air	-
SAT	Surface Agricole Totale	m ²
SVF	Sky View Factor	-
Ta	Température de l'air	C°
Tmrt	Température moyenne radiante	C°
Tur	Températures urbaines	C°
UTCI	Universal Thermal Climate Index	C°
Va	Vitesse de l'air	m/s
WBGT	Wet Bulb Globe Temperature	C°
ZHUN	Zones d'habitat urbain nouvelles	-

Introduction Générale

1. Introduction

L'urbanisation rapide et la croissance des villes peuvent créer une myriade de problèmes. Aujourd'hui plus de 55% de la population mondiale vit dans les villes, un pourcentage qui devrait augmenter à 68% d'ici 2050, des villes débordées vont alors naître (*United Nations Department of Economic and Social Affairs*). En cas de perte de contrôle, comment les villes peuvent-elles répondre aux besoins des citoyens ?

De plus cette problématique, les villes actuelles sont confrontées à la problématique du changement climatique et ses effets sur le confort humain dans les environnements intérieurs comme aux environnements extérieurs. Certains chercheurs l'ont décrit comme un défi pour les villes (Angeles et al., 2011; Tesselaar et al., 2020), tandis que (Eames et al., 2013) prédisent que le vrai défi est d'anticiper des solutions durables pour un environnement vivable. Les deux points de vue s'accordent à dire que l'environnement urbain se détériore constamment et que les zones urbaines doivent s'adapter aux effets du changement climatique (Djukic et al., 2016).

Du coup, le milieu urbain a passé d'un statut d'invulnérabilité en matière de croissance et de densité, à un statut plus complexe de vulnérabilité physique, qui cherche à lui assurer résilience et adaptabilité. Dans ce contexte la ville résiliente est définie par sa capacité de s'adapter aux effets dues au changement climatique, outre toutes les échelles d'action, du micro au macro, sont sollicitées et de nouvelles stratégies de régulations sont à développer.

Les espaces extérieurs urbains, de par leurs diverses fonctions, hygiéniques, sociales, culturelles, esthétiques, fonctionnelles, économiques et écologiques, sont de plus en plus reconnus comme des éléments centraux pour promouvoir la durabilité environnementale et la qualité de vie dans les villes (Hammadi., 2017). Ces dernières années, un intérêt accru a été associé au confort climatique extérieur afin de concevoir des espaces à la fois attrayants et confortables (Lai et al., 2014; Nouri et al., 2018; Tsitoura et al., 2017). De nombreux chercheurs ont également constaté que la fréquentation des espaces extérieurs urbains est directement liée aux conditions thermiques extérieures (Cocci Grifoni et al., 2011). L'environnement thermique est souvent le premier élément abordé par les chercheurs dans la conception de villes dites durables, par exemple (Huang et al., 2016) qui ont clarifié la relation entre la construction de la ville écologique et l'environnement thermique extérieur et (Shooshtarian, 2019) qui a souligné cette relation à travers une synthèse bibliographique sur le confort thermique extérieur.

Notre travail recherche s'intéresse à l'observation de la ville de Guelma, qui connaît des forts mouvements caniculaires, devenue l'une des villes très chaudes de l'est Algérien.

Toutefois, la présente recherche concerne la fréquentation des espaces extérieurs qui a toujours été lié aux conditions thermiques touchant à la fois le confort humain et la santé publique. La plupart des chercheurs ayant travaillé sur la thématique du confort climatique dans les espaces extérieurs avancent diverses causes aux situations d'inconfort climatique, mais l'affectation de l'environnement thermique urbain en reste la cause principale.

Dans notre recherche, on va essayer de mettre en cause les raisons possibles aux situations d'inconfort d'été et qui sont à l'origine cause de l'état d'abondant des espaces extérieurs, toute en évaluant les niveaux du confort climatique d'été dans les espaces extérieurs à Guelma. Puis, on va centrer notre intérêt sur l'amélioration des niveaux du confort climatique dans les espaces extérieurs à Guelma, en s'appuyant sur un processus de régulation microclimatique naturelle basé sur l'utilisation des éléments naturels.

2. Problématique

A l'ère actuelle, l'environnement thermique urbain est confronté à des conditions climatiques extrêmes, telles que la surhausse des températures et les canicules qui se tissent en été (Lee et al., 2019). Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) est l'un des principaux effets du changement climatique qui touchent à l'environnement thermique urbain, causé par les rejets de chaleur stockée dans les bâtiments et les routes pendant la journée, mais aussi par des sources anthropiques telles que la circulation automobile, le chauffage et la climatisation des bâtiments (Soltani & Sharifi, 2019). Il a été démontré que ces rejets de chaleur affectent négativement le confort climatique humain en été (Jendritzky & Tinz, 2009; Laschewski & Jendritzky, 2002), mais on en sait peu sur les mécanismes potentiels qui sous-tendent la relation entre la hausse des températures et le confort climatique dans les espaces extérieurs (Skoufali & Battisti, 2019).

Afin d'améliorer l'environnement thermique urbain et d'optimiser le confort climatique dans les espaces extérieurs, des stratégies d'atténuation et d'adaptation ont été développées (Shooshtarian et al., 2018). De nombreux articles scientifiques ont discuté l'effet de refroidissement de différentes stratégies dans les zones urbaines en été et à différentes échelles (Lai et al., 2019; Ojaghlou & Khakzand, 2017). A l'échelle locale et sur le plan climatique la stratégie de refroidissement en extérieur consiste à créer des microclimats

urbains, assurant un certain niveau du confort climatique aux usagers, soit par adoption d'éléments naturels ou par utilisation des surfaces et des matériaux à faible albédo.

Les éléments naturels de plus leur dimension symbolique, esthétique, et structurelle, ils offrent la possibilité de modifier le microclimat urbain en s'appuyant sur un processus de régulation naturelle. La végétation induit avant tout un rafraîchissement de l'air par effet d'ombrage et par effet d'évapotranspiration. Il est bien entendu que, l'ampleur de ces effets dépend considérablement du type de végétation concernée et de la quantité de la biomasse végétale présente. L'existence de l'eau à savoir sa configuration abaisse la température de l'air et contribue à atténuer localement le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Guelma une ville à climat semi-aride connue par la dureté de sa saison estivale, s'abriter dans sa maison sous climatisation est la stratégie adoptée par ses habitants contre le soleil chaud et ardent. À l'encontre, la fréquentation et l'usage des espaces extérieurs en été sont affaiblie le long de la journée avec un état d'abandon durant les heures de chaleur extrême.

De tout ce qui précède et dans une relation cause à effet, nous attribuons cet état d'abandon aux situations d'inconfort climatique générées par les conditions de chaleurs extrêmes que confronte l'environnement thermique urbain durant l'été chaud à Guelma.

Il faudra donc, mettre accent sur la composition formelle et végétale des espaces extérieurs urbains à Guelma, ce qui permettra ainsi de souligner la relation entre la régulation microclimatique des éléments naturels et les niveaux du confort climatique lors des situations de stress climatique du chaud.

Nous venons d'évoquer des éléments du contexte actuels auxquels notre recherche va se pencher, d'où le confort climatique est l'aspect à évaluer et à améliorer par un processus de régulation microclimatique naturel. Dans une perspective d'évaluation et d'amélioration, ce travail pose deux questions :

- **Comment peut-on s'assurer de la contribution de la végétation et des plans dans l'amélioration des niveaux du confort climatique dans les espaces extérieurs en été à Guelma ?**
- **Comment peut-on jumeler la végétation et les plans d'eau afin qu'ils puissent contribuer à la création des îlots et des parcours de fraîcheur urbains en été à Guelma ?**

3. Hypothèses

Les hypothèses de notre recherche répondent préalablement aux deux questions posées comme suivant :

- **La présence de la végétation et des plans d'eau dans les espaces extérieurs à Guelma améliore le niveau du confort climatique en été chaud.**
- **L'effet jumelé de la végétation et des plans d'eau contribue à la création des ilots et des parcours de fraîcheur urbains en été à Guelma ?**

4. Objectifs

- ✓ Quantifier l'intensité du phénomène d'îlot de chaleur urbain à Guelma.
- ✓ Evaluer l'environnement thermique urbain et le confort climatique durant le stress climatique du chaud dans les espaces extérieurs à Guelma.
- ✓ Démontrer le rôle de l'eau et de la végétation dans l'amélioration du confort climatique dans les espaces extérieurs à Guelma.
- ✓ Rechercher les typologies et les dispositions adéquates des éléments naturels (eau et végétation) pour le climat semi-aride qui caractérise Guelma.

5. Etat de l'art

5.1 Définition du contexte

Les travaux de recherche sur le confort climatique dans les espaces extérieurs réunissent et interpellent l'architecture et l'urbain avec les sciences du climat et les sciences humaines et sociales. Cette interdisciplinarité soulève généralement d'une manière collective par les chercheurs spécialisés dans une de ces sciences, ou d'une science naissant de l'interaction de deux sciences ou plus, toujours sous le cap des études de l'environnement urbain et son développement.

- Les recherches de (Benzerzour, 2004) issue du laboratoire CERMA, UMR-CNRS 1563 de l'École d'Architecture de Nantes, qui a mis en corrélation la climatologie et la morphologie urbaine pour étudier l'indicateur morphoclimatique dans les transformations urbaines sur l'agglomération de Nantes. L'auteur a conduit une analyse diachronique des interactions entre les paramètres physiques du microclimat urbain et les interventions qui ont été effectuées sur le tissu urbain du centre ancien de Nantes. L'étude s'est appuyée sur des simulations numériques à l'aide du modèle climatologique TEB. Les résultats de l'évaluation physique indiquent une augmentation considérable des flux de chaleur avec une

croissance progressive de la température de l'air et des surfaces, ainsi qu'une augmentation des vitesses de l'air et une déshumidification importante des espaces situés au centre-ville.

- La thèse de (Colombert, 2008) qui met en évidence la construction avec le climat à l'échelle urbaine et qui discute la prise en compte du climat dans les interventions urbaines, qui est à l'origine un sujet de génie urbain conduit à l'École Doctorale Ville et Environnement de l'université Paris-Est. L'étude consiste à effectuer un bilan d'énergie thermique à l'aide du schéma TEB pour appréhender les perturbations générées par la ville et pour paramétrer les échanges énergétiques entre les surfaces bâties et l'atmosphère, mettant en étude les cinq domaines d'actions : le bâtiment, l'espace public, l'organisation urbaine, les activités industrielles et les transports.
- Le travail de thèse de (Skelhorn, 2013) soutenu à la faculté des sciences humaines, université de Manchester, où l'auteur a évalué les impacts des espaces verts urbains sur le microclimat à Manchester à une échelle fine. L'auteur a utilisé une approche interdisciplinaire pour modéliser les changements à petite échelle des espaces verts pour une ville tempérée du nord du Royaume-Uni, reliant les changements du microclimat qui en résultent à la consommation d'énergie des bâtiments commerciaux. En utilisant le modèle de microclimat urbain ENVI-met, deux zones d'étude (une urbaine et une banlieue) ont été modélisées avec sept scénarios d'espaces verts différents ; un cas de base représentant les conditions actuelles sur le terrain, + 5% de nouveaux arbres, + 5% d'arbres matures, + 5% de haies, ajout d'un toit vert sur le plus grand bâtiment, changeant tous les espaces verts actuels en gazon uniquement et tous les espaces verts actuels en asphalte uniquement pour une journée d'été en juillet 2010.

5.2 Positionnement et approches d'étude

En général, le confort climatique dans les espaces extérieurs comme axe de recherche est positionné par rapport à deux grandes actuelles problématiques.

La première est celle du changement climatique et ses effets en milieu urbain. En effet, il est nécessaire d'aborder des phénomènes microclimatiques qui touchent à l'environnement thermique urbain et qui portent des anomalies aux espaces extérieurs urbains, tels que la surhausse des températures urbaines et le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU). Par la suite l'un des éléments physiques qui composent le microclimat urbain (végétation, forme urbaine, géométries etc.) doit être abordé comme objet de recherche pour apporter des solutions aux phénomènes évoqués et pour améliorer le niveau du confort climatique ou thermique à différentes échelles spatiales.

- Le travail de thèse de (Lebras, 2017) qui a mis en place une chaîne de modélisation de l'ICU à l'échelle de la rue, considérant que le confort thermique des habitants des trois agglomérations françaises ; Paris, Marseille et Toulouse est affecté par ce dernier. La modélisation a été effectuée sur deux étapes ; la première a permis de quantifier le phénomène d'ICU sur l'agglomération complète à partir des données provenant de la station rurale et du modèle de canopée urbaine TEB. La deuxième a permis d'obtenir la variabilité des températures au sein des quartiers à l'échelle de la rue à partir des données issues de la simulation de la première étape. En somme, les séries de modélisation ont reposé sur une relation statistique, mettant en croisement les indicateurs de morphologie et d'occupation du sol du tissu urbain et les données de température obtenues dans le cadre du projet EUREQUA lors de campagnes de mesures dans les trois villes mentionnées. Les résultats montrent que les indicateurs urbains les plus influents sont la végétation et les surfaces imperméables, alors que la morphologie est plus influente la nuit que le jour.

D'autres études ont tenté de mettre en place des solutions aux effets du changement climatique en ville. Ainsi, plusieurs recherches ont été guidées à priori par le confort thermique ou climatique comme finalité à atteindre, tout en étudiant plusieurs indicateurs pour atteindre les niveaux de confort climatique souhaités dans les climats chauds et arides.

- Le travail de recherche de (Ridha, 2017) qui a mis l'accent sur plusieurs stratégies pour réduire l'ICU et pour améliorer le confort thermique des piétons dans les climats chauds et arides. La recherche s'est concentrée sur l'étude des stratégies d'atténuation possibles pour déterminer comment le confort des piétons est affecté par le choix des matériaux de construction, en comparant un quartier traditionnel à un quartier moderne. L'étude s'est intéressée également à la manière dont la végétation et les motifs d'ombrage contribuent à réduire l'effet de l'UHI et à améliorer le confort thermique extérieur. Quatre différents scénarios ont été conçus pour évaluer le rôle des différentes configurations de la végétation telles que, les arbres, l'herbe et les différents modèles d'ombrage. L'évaluation a été réalisée le jour le plus chaud de l'été. Les paramètres microclimatiques ont été analysés à l'aide du logiciel ENVI-met. Un design a été proposé pour augmenter le confort thermique lors de la journée la plus chaude et une journée typique en été. L'étude montre comment les facteurs urbains tels que le rapport hauteur / largeur, la couverture végétale, les ombres et la géométrie du canyon sont des éléments cruciaux que les urbanistes et les municipalités

doivent prendre en compte, en particulier pour les nouveaux développements urbains dans les villes à climat chaud et aride.

- Le travail de thèse de (Ayyad, 2020), dont l'objectif était d'identifier les éléments clés pour améliorer le confort thermique extérieur et la circulation de l'air pour les piétons en milieu résidentiel dans le climat semi-aride d'Amman en Jordanie. Tout en étudiant les paramètres géométriques urbains et leurs effets sur le microclimat urbain. Le travail de recherche a suivi un processus d'optimisation qui a permis de tester et de simuler plusieurs propositions conçues en termes de flux d'air et de confort thermique. Le processus a analysé les éléments urbains à trois niveaux différents, la méso-échelle (tracé de la rue), la micro-échelle (tracé composé) et l'échelle du canyon urbain à l'aide du modèle Envi-Met. Les résultats de l'analyse de la direction du vent ont montré que les niveaux de PET sur la parcelle augmentaient lorsque l'angle du vent approchant était parallèle aux rues et montraient une diminution significative lorsqu'il était dirigé à 45 °. Les propositions de conception combinée ont montré que la conception avec la transition du flux de vent produisait des niveaux de PET plus élevés par rapport aux bandes de conception de bâtiments qui permettaient une meilleure ventilation et un ombrage contrôlé.

Plusieurs recherches ont été menées pour comparer le niveau de confort climatique offert par les éléments modifiants du microclimat urbain et des conditions thermiques, généralement étudiés comme stratégies d'adaptation à l'environnement thermique urbain ou stratégies d'atténuation des effets du changement climatique en milieu urbain.

- Le travail de (Morille & Musy, 2017) qui a été réalisé dans le cadre du projet EVA, des simulations ont été réalisées pour comparer l'effet de trois stratégies de rafraîchissement urbain sur le confort thermique en été. Différents types de végétation urbaine, des systèmes d'évaporation d'eau et des matériaux réfléchissants ont été appliqués dans trois quartiers de Lyon, en France. Des simulations ont été réalisées à l'aide du modèle microclimatique Solène qui a permis de calculer et d'évaluer l'évolution du microclimat urbain à l'échelle du quartier en considérant les paramètres physiques de manière totalement discrétisée. Des modules ont été introduits dans ce modèle pour représenter des différentes stratégies d'adaptation telles que la végétation (toits et murs verts, arbres, pelouses) et l'aspersion de l'eau. Pour chaque cas, les variations journalières des champs de températures de surface et de l'air sont obtenues et comparées. Enfin, le confort thermique a été évalué à l'aide de l'indice UTCI. Les résultats indiquent que les arbres sont les plus efficaces, en raison de leur effet d'ombrage. Même si l'évaporation de l'eau peut abaisser fortement les températures de surface, son effet sur le confort thermique est local et limité par rapport à l'effet de la

végétation. En raison des effets de réflexion, les matériaux à albédo élevé sont moins efficaces en ce qui concerne le confort thermique en extérieur.

Atteindre des niveaux souhaités du confort thermique extérieur par différentes stratégies d'atténuation et d'adaptation en été a été bien cerné par un nombre important de revues et de synthèses bibliographiques. Dont le sujet est toujours conduit en évoquant des problèmes dus au changement climatique, tels que le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

- L'étude critique de (Taleghani, 2018) qui a mis en exergue l'effet des stratégies d'adaptation sur le confort thermique humain dans les espaces extérieurs urbains et les comparé tout en étudiant l'apport de chacune à travers une lecture critique des recherches précédentes. Plus précisément, l'examen s'est concentré sur la végétation avec ses différentes formes ; parcs, arbres de rue, toitures vertes et de murs végétalisés et les matériaux hautement réfléchissants au niveau de la toiture et au niveau du sol, considérant que c'est les stratégies les plus courantes pour améliorer les conditions thermiques dans les villes. Plusieurs études réalisées par simulation ou par mesures in-situ dans différents pays ont été décrites. La conclusion la plus importante de la revue est la suivante : bien que les matériaux hautement réfléchissants réduisent la température de l'air dans les espaces extérieurs, ils augmentent le rayonnement solaire vers les piétons. Par conséquent, la végétation est le meilleur choix pour améliorer le confort climatique à l'échelle piétonne.

- La synthèse bibliographique de (Lai et al., 2019), les auteurs ont estimé que l'environnement thermique urbain est affecté par le réchauffement climatique et par le phénomène d'îlot de chaleur urbain. L'étude a examiné les mécanismes et les effets de rafraîchissement des principales stratégies d'atténuation, à savoir le changement de la géométrie urbaine, la plantation de végétation, l'utilisation de surfaces fraîches et l'incorporation des plans d'eau. La synthèse a révélé que ces quatre stratégies ont pu produire une réduction moyenne de la température de l'air, respectivement de 2,1° C, 2,0° C, 1,9° C et 1,8°C. En termes d'effet intégré sur le confort thermique, la modification de la géométrie urbaine a apporté la plus grande amélioration, avec la plus forte réduction de température physiologiquement équivalente (TEP) en été (Δ PET moyenne = 18,0° C). L'utilisation de la végétation et des plans d'eau a réduit le PET moyen, respectivement de 13,0° C et 4,6° C. Cependant, certaines études de simulation ont révélé que la surface réfléchissante conduisait à une augmentation du PET en été en raison de l'augmentation de la quantité de rayonnement solaire réfléchi. Les stratégies d'atténuation ont amélioré davantage l'environnement

thermique urbain dans les climats chauds et secs. La végétation, les surfaces réfléchissantes et les plans d'eau procuraient moins de refroidissement dans les espaces urbains compacts que dans les zones ouvertes.

La deuxième problématique est celle du développement urbain durable, qui est abordée à son tour sous deux angles. Le premier met l'accent sur la qualification de l'ambiance climatique et son rôle à améliorer la qualité des espaces extérieurs. Le deuxième traite les éléments du microclimat urbain comme étant au croisement de l'urbain avec le microclimat pour réussir la conception bioclimatique des espaces public urbains et pour prévoir un certain degré du confort thermique en milieu urbain.

- La thèse de doctorat de (BELLARA, 2013) qui a étudié l'impact de la végétation comme élément modifiant du microclimat urbain sur la qualité des ambiances thermiques dans les espaces extérieurs à Constantine, considérant que l'ambiance thermique ou climatique se traduit par les usagers en sensation du confort. L'auteur a essayé de mettre en évidence l'impact de la végétation sur les variations microclimatiques en été qui influent directement le niveau du confort thermique à l'extérieur et par la suite l'usage des espaces extérieurs. La méthodologie suivie consiste à évaluer l'ambiance thermique au niveau des différents espaces urbains de la ville, qui se caractérise par le climat semi-aride. Les résultats indiquent que l'ombre des arbres est le plus influant sur la qualité du cadre de vie, sur la création des ambiances urbaines et sur les niveaux du confort thermique.
- Les recherches de (Lai et al., 2014) qui traitent l'usage des espaces extérieurs et les niveaux du confort thermique comme dualité déterminante de la qualité de la vie urbaine. Il s'agit donc d'une étude sur le confort thermique extérieur et l'utilisation de l'espace dans une communauté résidentielle de Wuhan de la Chine, à travers l'étude des conditions microclimatiques, des entretiens avec les résidents et l'enregistrement des activités des occupants. Les données ont été utilisées pour développer un modèle de vote à sensation thermique (TSV) et un modèle de taux d'utilisation de l'espace. Une stratégie de conception alternative a été proposée pour tenir compte de l'environnement thermique et du taux d'utilisation. Les résultats montrent que le confort thermique est le facteur le plus important de la qualité des espaces extérieurs. D'autres facteurs importants comprennent la qualité de l'air, l'environnement acoustique, la fonctionnalité et la commodité. En somme, l'étude a fourni des informations précieuses pour la conception d'espaces extérieurs dans les communautés résidentielles.

- Le travail de thèse de (Hanafi, 2018) qui a étudié et analysé le rôle de la végétation dans les villes sahariennes, dont le cas d'étude est un ensemble des espaces publics urbains situés à Biskra, Algérie. L'effet de la végétation a été appréhendé en étudiant plusieurs paramètres microclimatiques, tels que la température de l'air, la température rayonnante moyennes à l'aide du modèle RayMan. La méthodologie de ce travail a mis en combinaison les résultats de la simulation issues du modèle mentionné et des mesures microclimatiques effectuées sur terrain. Les résultats indiquent que l'ombre des arbres est l'effet le plus influant sur le confort thermique dans les espaces publics urbains à Biskra.

5.3 Le rôle des éléments naturels

Le rôle de la végétation est bien plus attribuable dans l'amélioration du confort climatique dans les espaces extérieurs, tant comme stratégie d'adaptation à l'environnement thermique à l'échelle piétonne, tant comme stratégie d'atténuation des effets du changement climatique à l'échelle microclimatique. Cependant, les arbres sont la forme la plus répondue en termes de régulation microclimatique et en termes de rehaussement des niveaux du confort en été par effet d'ombrage.

Comme stratégie à base naturelle, l'eau vient en deuxième position en matière de régulation des conditions thermiques et d'amélioration des niveaux du confort climatique d'été. En ce qui suit quelques conclusions sur le rôle de la végétation et des plans d'eau :

- Pour LEBRAS (2017), la végétation est l'indicateur urbain le plus influant sur les conditions climatiques durant les journées chaudes d'été.
- De même pour RIDHA (2017), la couverture végétale et la qualité des ombres des arbres sont deux paramètres que les urbanistes et les municipalités doivent prendre en compte pour les nouveaux développements urbains dans les villes à climat chaud et aride.
- Dans l'étude de MORILLE et MUSY (2017), l'évaporation de l'eau peut abaisser fortement les températures surfaciques, son effet sur le confort thermique est local et limité par rapport à l'effet de la végétation.
- Pour TALEGHANI (2018a), en comparaison avec les matériaux réfléchissants à albédo élevé, la végétation est la plus significative en termes d'amélioration du confort climatique à l'échelle piétonne.
- Les études de LAI (2019) concordent fortement avec ces conclusions. D'où, les plans d'eau procuraient moins de rafraîchissement dans les espaces extérieurs pendant l'été que la végétation urbaine.

- Les études qui ont été mené dans le contexte Algérien dans le climat semi-aride par BELLARA (2013) et dans le climat aride par HANAFI (2018), ont montré que l'ombre des arbres est le paramètre le plus influant sur le niveau du confort thermique dans les espaces extérieurs et sur la création des ambiances urbaines en extérieur.

5.4 Microclimat urbain et confort climatique en extérieur, quelle relation !

Les études qui portent sur le microclimat urbain traitent en particulier, du premier niveau, les effets des éléments qui le composent sur l'environnement thermique urbain. De ce fait, l'interaction entre l'espace construit et les paramètres microclimatiques constitue toujours le point de départ dans ce genre des recherches pour atteindre des niveaux optimaux du confort thermique dans les espaces extérieurs. Pour la majorité des recherches y affèrent, les portées scientifiques incluent de telles interactions. Nous exposons en ce qui suit des travaux de recherche dont le fil conducteur a permis de présenter dans une relation causes à effets des phénomènes climatiques à l'échelle micro et leurs effets possibles sur le niveau du confort climatique en extérieurs.

- Le travail de recherche de (Yang et al., 2018) qui a étudié quantitativement les effets des matériaux du sol, de la végétation et des plans d'eau sur le microclimat urbain et le confort thermique dans une zone résidentielle de grande hauteur sous le climat tropical de Singapour par une simulation de plusieurs scénarios. Les résultats suggèrent que les sols à albédo élevé et les plans d'eau ne sont pas efficaces pour réduire le stress thermique dans des conditions climatiques chaudes et humides. Par ailleurs, la combinaison d'ombrage d'arbres et de l'herbe est la stratégie paysagère la plus efficace pour rafraîchir le microclimat et pour atteindre un niveau de confort thermique optimal.

Il existe un jeu de mots qui estampe ce champ de recherche, Nous constatons que les recherches y affèrent utilisent parfois « Thermal outdoor comfort », synonyme du confort thermique dans les espaces extérieurs, d'autres fois « urbain microclimate » qui signifie l'étude des paramètres thermique à l'échelle fine dite micro. En raison de son implication dans le climat urbain il est dit dans le contexte Français « le confort climatique ».

- De par sa recherche intitulé « *Theoretical dimension of outdoor thermal comfort research* » (Shooshtarian, 2019) a pu clarifier l'occurrence de ce flou, mais aussi de positionner les recherches sur le confort thermique en extérieur par rapport aux différentes théories utilisées. La théorie la plus appropriée est celle de la place qui positionne le

microclimat par rapport l'interaction des trois composantes d'un espace donné. Projetant l'influence qu'exerce chaque composante sur le microclimat on obtient une synoptique de paramètres interdépendants ; la fonction ou l'activité, les formes physiques de l'espace et la psychologie traduite en sensation thermique.

4.5 Acquisition des données

L'investigation et l'acquisition des connaissances relatives aux différents contextes climatiques est basée sur deux méthodes. La première est descriptive, prend ses ressources des campagnes de mesures climatiques ou des enquêtes auprès des usagers en milieu urbain. La deuxième est physique s'appuie sur la simulation et la modélisation des phénomènes microclimatiques à l'aide des systèmes experts et des modèles numériques à différentes échelles, parmi entre autres l'échelle locale.

5.6 Evaluation du confort climatique à l'extérieur

L'évaluation du confort climatique extérieur doit être menée en considérant les interrelations entre les conditions thermiques de l'environnement, les réponses psychologiques des usagers et les phénomènes physiologiques. La sensation thermique humaine peut être évaluée objectivement ou subjectivement, l'évaluation subjective consiste à explorer la sensation thermique des populations locales par voie de questionnaires ou d'interviews. L'évaluation objective peut être effectuée à l'aide des indices climatique et thermiques en utilisant des paramètres personnels et microclimatiques comme la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse du vent.

Evaluation subjective

L'acquisition des données relatives aux phénomènes physiologiques effectués par les usagers est nécessaire pour explorer la sensation thermique de la population locale. Elles sont recueillies par moyen de questionnaires ou d'entretiens, décrivant la satisfaction de ces derniers vis-à-vis les conditions thermiques extérieures.

- Le travail de recherche de (Neto, 2016) qui a considéré que la sensation du confort thermique est influencée par des facteurs environnementaux et personnels alors que le confort thermique doit être mesuré par le nombre de personnes se plaignant d'inconfort thermique. L'auteur a proposé une procédure pour évaluer le confort thermique, comprend la création d'une échelle de ratio et d'un ensemble de procédures statistiques pour traiter les données recueillies à partir de cette échelle. Cette méthode a été utilisée pour évaluer

l'influence des ventilateurs sur la sensation de confort thermique des occupants d'un petit bureau, elle s'est avérée utile et puis elle a été appliquée aux environnements extérieurs. Comme résultat, la méthode a montré de grandes facilités dans l'inclusion de l'humain dans la boucle de contrôle des systèmes de confort.

- Les recherches de (Cheung & Jim, 2019) qui a mis en œuvre un questionnaire d'enquête sur le confort thermique extérieur pour déterminer la plage des températures transitoires acceptables. Cette dernière n'est valide quand la réponse de plus de 80% des répondants est acceptable. L'étude a donc proposée une nouvelle évaluation de l'acceptabilité thermique extérieure : l'acceptabilité thermique en 1 heure. Il a été demandé aux répondants d'indiquer si l'environnement thermique urbain est acceptable au moment de l'entrevue et de rester sur le site de l'entrevue pendant une heure. Cette évaluation prédictive a été testée par rapport à l'évaluation transitoire à Hong Kong par un questionnaire d'enquête pour une année entière, auprès de 830 répondants. Les résultats à 80% sur 1 heure été de 22,6° à 25,4°C de température de l'air.

Evaluation objective

L'évaluation objective des niveaux du confort s'appuie quasi-totalement sur le calcul des indices thermiques et climatiques, qui impliquent initialement des données microclimatiques et météorologiques. D'où il existe des indices simples, qui marient souvent les températures de l'air avec un seul paramètre climatique, tels que l'indice HI (Heat index) et Humidex. D'un autre degré de complexité, ce sont les indices dérivés des modèles du bilan thermique, tels que l'indice PET, PMV, SET et UTCI.

- Les recherches de (Blazejczyk et al., 2012) ont classifié ces indices sous trois groupes ou catégories, certains sont basés sur des résultats généralisés de mesures (refroidissement éolien, puissance de refroidissement, température du bulbe humide) et d'autres sur les réactions empiriquement observées du corps humain au stress thermique (déformation physiologique, température effective). Les indices fondés sur des considérations du bilan thermique humain sont appelés « indices rationnels ». L'étude a comparé l'indice UTCI avec les indices thermiques les plus courants en se basant sur trois groupes de données : un ensemble de données mondiales, des ensembles de données synoptiques d'Europe et des données à l'échelle locale provenant de campagnes de mesures spéciales de l'action COST 730. Les résultats indiquent que l'UTCI représente bien mieux des climats, des conditions

météorologiques et des lieux spécifiques et il décrit la variabilité temporelle des conditions thermiques mieux que les autres indices.

L'indice UTCI est l'un des indices les plus populaires, nouvellement développé pour évaluer le stress climatique dans les espaces urbains extérieurs. De nombreuses recherches ont testé son application et sa fiabilité à mesurer le stress thermique dans les espaces extérieurs dans des différents climats.

- L'étude de (Staiger et al., 2019) qui a présenté des nombres exactes sur les indices thermiques et leur application dans le calcul des niveaux du stress thermique. D'où les auteurs ont déclaré que seuls douze des 165 indices de perception thermique humaine sont classés comme étant principalement adaptés à l'évaluation biométéorologique humaine du climat pour la planification urbaine et régionale. Cela demande que les indices thermiques fournissent une température de l'air équivalente d'une référence isotherme avec une vitesse du vent mineure. En outre, les indices thermiques doivent être traçables à des modèles complets du bilan énergétique humain consistant à la fois en un système passif contrôlé (transfert de chaleur entre le corps et l'environnement) et un système actif de contrôle, qui fournit une rétroaction positive sur les écarts de température par rapport aux conditions neutres du noyau corporel et la peau comme c'est le cas dans la nature. Sept des douze indices sont tout à fait appropriés, dont trois se chevauchent avec les autres. En conséquence, quatre indices ont été sélectionnés, décrits comme les plus convenables : indice de climat thermique universel (UTCI), température perçue, température physiologiquement équivalente (PET) et température effective standard rationnelle (SET).

- Dans le même contexte que (Zare et al., 2018) ont examiné la relation entre l'UTCI, d'autres indices de chaleur (SET, PET, PMV, PPD et WBGT) et les paramètres environnementaux. Les données quotidiennes, couvrant une période de 12 mois en 2016, de 06 :00 à 21 :00 pour chaque jour, ont été extraites de l'Organisation météorologique de Kerman. Les données ont été introduites dans SPSS 20, suivies de la corrélation des moments du produit Pearson et de la régression linéaire pour trouver l'association entre l'UTCI et d'autres indices de chaleur / paramètres environnementaux. UTCI était également corrélée de manière mesurable avec des paramètres environnementaux tels que la température sèche. Le coefficient de corrélation le plus élevé a été observé entre UTCI et PET. UTCI avait également de fortes corrélations avec WBGT, SET et la température sèche. Ainsi, les indices calculés sur la base de l'équation thermique corporelle, SET et PET sont fortement liés à l'UTCI, enregistrant une meilleure pente. En revanche, WBGT est plus proche de l'UTCI (que d'autres indices) en termes de sensation thermique.

A notre connaissance l'application de l'indice UTCI dans le contexte Algérien est encore restreinte, dont l'évaluation des niveaux de confort dans les travaux de recherche utilisent souvent les deux indices PET et PMV, quel que soit le climat mis en étude.

- Le travail de recherche de (Talhi et al., 2020), dont les auteurs ont testé la capacité de l'UTCI à évaluer le confort micro-météorologique estival dans le contexte climatique et socioculturel d'Alger en le comparant avec l'indice APCI (indice de confort perçu moyen). À partir des données recueillies, les deux indices ont été calculés pour 12 configurations urbaines. La corrélation entre l'UTCI et l'APCI montre que l'UTCI est capable à prédire et à évaluer correctement les niveaux du confort thermique humain extérieur dans le climat subméditerranéen. La comparaison entre UTCI et APCI a permis de proposer un modèle contextualisé de prédiction et d'évaluation du confort thermique extérieur perçu à partir d'une estimation APCI, à partir de laquelle la perception réelle des usagers peut être évaluée. Les concepteurs peuvent ainsi évaluer leurs propositions à l'aide d'outils de modélisation architecturale et urbaine numériques incluant le calcul de l'UTCI, en ajustant l'échelle d'évaluation du stress thermique pour qu'elle corresponde au contexte socioculturel du projet.

Revenons à l'évaluation du confort climatique en extérieurs, des recherches récentes ont opté pour une méthode combinée qui évalue le stress thermique de manière à la fois objective et subjective, en conduisant simultanément des questionnaires et des mesures microclimatiques.

- Le travail de recherche de (Elmira Othman et al., 2019) qui a évalué le niveau du confort thermique extérieur dans un campus universitaire en Malaisie. Des mesures sur le terrain et un questionnaire d'enquête ont été menées simultanément pour évaluer l'état microclimatique et la sensation thermique des piétons. Un échantillon de 3033 a été questionné à sept valeurs différentes de facteur de vue du ciel (SVF) allant de 0,2 à 0,9. La température physiologique équivalente (PET) a été estimée pour évaluer le confort thermique extérieur. Il a été observé que dans une zone très ombragée avec SVF <0,35, le vote de sensation thermique du répondant est neutre, acceptable pour le vote d'acceptation thermique et aucun changement pour le vote de préférence thermique. Les résultats suggèrent donc qu'à toutes les activités données telles que s'asseoir, marcher et se tenir debout aussi a eu des effets légèrement sur la façon dont les gens la perçoivent thermiquement pendant la journée dans les deux campus.

6. Méthodologie de la recherche

Ce travail de thèse s'appuie sur la combinaison de plusieurs outils de récolte de données relevant à la fois de méthode quantitative et qualitative.

Ainsi, pour dessiner le cadre théorique de cette recherche nous avons effectué nos recherches bibliographiques en partant de mots-clés relatifs au thème de recherche, à savoir confort climatique, végétation, plans d'eau, espaces extérieurs, sensation thermique ...etc. Puis la valeur scientifique des différents documents collectés (Livres, thèses, Articles scientifiques... etc.) a été analysée pour dresser un panorama des avancements sur le confort climatique d'été.

Le travail in-situ est organisé en deux principales étapes, la première « Exploration in-situ » consiste à effectuer une enquête pilote réalisée auprès d'un échantillon aléatoire de la population de Guelma pour définir une aire pour l'investigation à mener dans les étapes ultérieures.

La deuxième étape « investigation in-situ » implique à conduire, simultanément des campagnes de mesures microclimatiques avec un questionnaire d'enquête intitulé « le confort climatique dans les espaces extérieurs à Guelma » suivant un parcours urbain situé au centre-ville de Guelma le long de trois journées d'été chaudes et ensoleillées.

Des séries de simulation viennent pour supporter le processus méthodologique à l'aide du progiciel Envi-Met, tout en utilisant les conditions microclimatiques mesurés comme données d'entrée. Les données de sorties sont alors utilisées pour vérifier les résultats des méthodes déjà utilisées et pour rechercher de nouveaux résultats.

L'essentiel de notre travail qui est l'amélioration des niveaux du confort climatique réside dans la mise en combinaison des méthodes scientifiques susmentionnées. C'est dans ce sens que notre recherche implique à quantifier l'ICU, à évaluer l'environnement thermique urbain et à souligner les stratégies d'adaptation à celui-ci et à rechercher des ilots et des parcours de fraîcheur urbains au centre-ville de Guelma.

En effet, au bout de ces étapes nous avons pu souligner les mécanismes qui sous-tendent entre l'environnement urbain et le climat pour y atteindre des niveaux de confort climatique optimaux. L'investigation sur les effets des éléments naturels ; soit séparément végétation et plans d'eau ou jumelés, mettra en exergue leurs diverses contributions dans l'amélioration du confort climatique à l'extérieur, soit pour une architecture bioclimatique verte des espaces extérieurs à Guelma.

7. Structure de la recherche

Ce travail de thèse est scindé en six chapitres, implicitement en trois parties. Les deux premiers chapitres sont théoriques traitent du premier niveau de connaissance le cadre conceptuel de la recherche. Le troisième présente l'environnement d'étude, le quatrième chapitre expose le processus méthodologique utilisé dans la vérification des hypothèses de la recherche. Les deux derniers chapitres sont expérimentaux exposent les résultats de la recherche et leurs interprétations.

- **Le premier chapitre :** abordera les ABC du climat urbain ; sa composition, ses paramètres, ses échelles, ainsi que les paramètres qui l'affectent et qui sont à l'origine dues au changement climatique, parmi entre autres le phénomène d'îlot de chaleur urbain. Puis et dans un ordre hiérarchique, nous nous focaliserons sur le microclimat urbain, l'interdépendance de ses paramètres et la sous-jacente de l'environnement thermique urbain.
- **Le deuxième chapitre :** approchera dans un premier temps le confort climatique d'été comme aspect de l'environnement thermique urbain, dans un deuxième temps ce chapitre exposera les méthodologies et les outils disponibles pour étudier l'environnement thermique et pour évaluer le confort climatique en extérieur. Finalement, nous nous intéresserons à présenter les différentes stratégies d'adaptation à l'environnement thermique en se basant sur l'analyse des études qui traitent de la thématique du confort climatique.
- **Le troisième chapitre :** présentera la ville de Guelma comme cas témoin des environnements à climat chaud touchés par la surhausse des températures. Nous essayerons alors à démontrer son appartenance au climat semi-aride à travers une analyse climatique utilisant une multitude de méthodes et d'outils bioclimatiques. Nous investiguerons également la configuration de l'espaces extérieur urbain à Guelma en tenant compte des éléments naturels dans sa conception, sa construction et son usage.
- **Le quatrième chapitre :** établira la méthodologie scientifique optée pour répondre aux objectifs de la recherche. Ainsi, le processus méthodologique impliquera une enquête pilote réalisée auprès d'un échantillon restreint de la population de Guelma, des observation in-situ. Des campagnes de mesures microclimatiques seront conduits simultanément avec un questionnaire et finalement des séries de simulation atmosphérique.
- **Le cinquième chapitre :** portera sur l'étude de l'environnement thermique urbain à Guelma en été, mais aussi l'évaluation des niveaux du confort climatique à l'extérieur. Le chapitre mettra en évidence les endroits de repos climatique qualifiés de stratégies

d'adaptation à l'environnement thermique urbain et les endroits avec un stress thermique extrême et des niveaux du confort climatique inférieur.

- **Le sixième chapitre :** cherchera à envisager des parcours de fraîcheur urbains offrant un niveau de confort climatique optimal dans le centre-ville de Guelma. Plus précisément ce chapitre cherchera à améliorer les niveaux du confort climatique d'été d'un ensemble des espaces extérieurs à Guelma, répertoriées comme inconfortables, tout en optant pour des solutions à base naturelle telle que la végétation et les plans d'eau.

La succession et la complémentarité des six chapitres de ce travail de recherche feront l'objet d'une étude, à la fois qualitative et quantitative de l'environnement thermique urbain.

8. Contribution scientifique

Notre travail de thèse s'inscrit dans la problématique générale du confort climatique extérieur et traite d'une façon particulière l'interaction des paramètres qui composent le microclimat urbain.

Ce que nous voulons apporter au champ des recherches y affèrent s'inscrit dans la définition des diverses contributions des éléments naturels dans les villes à climat semi-aride. Ainsi, pour souligner les mécanismes qui sous-tendent la relation entre la régulation microclimatique et le niveau du confort climatique dans les espaces extérieurs, une importance majeure s'est accordée dans notre investigation à l'étude de l'environnement thermique urbain durant la surchauffe estivale. En effet, il ressort que la végétation et les plans d'eau agissent comme facteurs modifiants du microclimat urbain, traités séparément comme stratégies d'adaptation à ceci ou en combinaison avec d'autres stratégies.

Dans notre recherche, nous avons utilisé plusieurs outils d'investigation pour rechercher des îlots et des parcours de fraîcheur urbains à Guelma. Nous avons alors sélectionné un ensemble d'espaces extérieurs situés au centre-ville de Guelma, repérés particulièrement comme espace inconfortables mais aussi comme espaces extérieurs structurants ; Place 19 Mars, Boulevard Boumaaza Saïd, Boulevard Souidani Boudjemaa, Rue El-Nakhlette et Placette 8 Mai 1945. Trente-quatre (34) scénarios avec différents ratios, espèces et dispositions de végétation et différentes configurations des plans d'eau ont été simulés pour y envisager des îlots et des parcours de fraîcheur urbains avec des niveaux optimaux du confort climatique pendant la saison estivale à Guelma et ça sera notre grain de sel que nous ajouterons tout naturellement aux plans de développement de la ville pour un usage et une fréquentation meilleure des espaces extérieurs en été.

Chapitre I :

Climat et changement climatique en milieu urbain

I. Climat et changement climatique et en milieu urbain

I.1 Introduction

Auparavant, les chercheurs donnaient des statistiques sur la population mondiale vivant dans les zones urbaines et prévoient des projections des décennies à venir de cette dernière pour accorder plus d'importance au climat et pour le prendre en compte dans les opérations d'urbanisation (Cleugh, 1995). D'ailleurs, ils recommandaient que toute discussion future ou étude à mener sur le milieu urbain devrait inclure une description du climat local des populations urbaines, dit climat urbain.

Aujourd'hui, nous sommes au cœur des discussions sur la croissance des villes, l'urbanisation effrénée et l'affection du climat urbain, nous sommes à la recherche de s'adapter aux effets du changement climatique en milieu urbain. Alors que les recherches actuelles se développent toujours en donnant des statistiques et des projections sur les populations urbaines et le développement des villes qui sont à l'origine causes de la détérioration de l'environnement urbain (Ignatius et al., 2015). Ainsi, l'urbanisation croissante et la planification urbaine à forte densité créent des structures urbaines plus risquées et contribuent à accentuer les effets du changement climatique urbain, notamment celui d'îlot de chaleur urbain (Nuruzzaman, 2015).

Ce premier chapitre vise à présenter le cadre général de la problématique du changement climatique en milieu urbain. Toutefois, le propos est organisé de sorte que la définition des éléments du climat et de la climatologie mène à la compréhension du climat urbain, ses composantes et ses échelles. La première partie définit les concepts de base relatifs au climat, ainsi que les grandes zones climatiques dans le monde. La deuxième partie présente le climat urbain et le microclimat urbain comme composante sous-jacente à celui-ci et explique les paramètres qui les affectent, tels que l'albedo, la végétation, la surface d'eau et autres. La dernière partie présente à la fois les impacts que le changement climatique est susceptible d'avoir sur le milieu urbain et les grandes stratégies d'adaptation à ceux-ci. Autrement dit comment les villes sont touchées par le changement climatique est comment leurs infrastructures contribuent à la diminution et l'atténuation de ses impacts.

I.2 Climat et climatologie

Dans cette première partie, nous nous intéressons à définir les ABC du climat et de la climatologie, qui servent de cadre référentiel à notre travail de recherche.

I.2.1 Concepts de base

I.2.1.1 Le climat

Ensemble des phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère en un lieu donné. (*Définitions : Climat - Dictionnaire de Français Larousse, n.d.*)

« Le climat d'une région donnée est déterminé par des régimes de variations de plusieurs éléments et par leurs combinaisons. Les principaux éléments climatiques à considérer, lors de la conception des bâtiments, sont le rayonnement solaire, le rayonnement de grande longueur d'onde du ciel, la température d'air, l'humidité, le vent et les précipitations » (Givoni, 1982; p: 27)

I.2.1.2 La climatologie

La climatologie est une science qui découle de la géographie, elle s'intéresse au climat. Elle traite des divers états de l'atmosphère en s'appuyant sur l'analyse de la distribution statistique de variables météorologiques (*Définitions : Climatologie - Dictionnaire de Français Larousse, n.d.*).

I.2.1.3 La météorologie

La météorologie est une science qui a pour objet l'étude des phénomènes atmosphériques tels que les nuages, les précipitations ou le vent dans le but de comprendre comment ils se forment et évoluent en fonction des paramètres mesurés tels que la pression et la température.

I.2.1.4 La biométéorologie

Étude des relations entre les divers phénomènes météorologiques et les processus biologiques intéressant l'ensemble des organismes vivants. (La biométéorologie est surtout appliquée à l'agriculture) (*Définitions : Biométéorologie - Dictionnaire de Français Larousse, n.d.*).

I.2.2 Paramètres climatiques (Liébard & Herde, 2006; p: 12-19)

La définition du climat d'une région donnée est faite en fonction des paramètres climatiques classés sous trois catégories :

- Paramètres énergétiques : le rayonnement solaire, la lumière et la température
- Paramètres hydrologiques : les précipitations et l'humidité
- Paramètres mécaniques : le mouvement d'air ou les vents

I.2.2.1 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil et exprimée en Wh/m². Le rayonnement est composé essentiellement de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible.

I.2.2.2 La température de l'air

La température est un état instable, pour un lieu donné la température dépend du voisinage environnant, du sol, du vent et du rayonnement solaire. Le premier facteur influant la variabilité de la température sur terre est le fait de stockage des rayonnements solaires par cette dernière et les emmètre dans l'atmosphère.

I.2.2.3 L'humidité relative

Elle présente le rapport entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température et la quantité maximale d'eau contenue à la même température, exprimée en pourcentage. Elle dépend des précipitations, de la végétation, de l'ensoleillement et du type de sol.

I.2.2.4 La lumière

La lumière naturelle est la première source d'éclairage, avec le rayonnement solaire, elle constitue un facteur très important en termes de gain solaire et d'énergie. La quantité de lumière reçue est influencée par les conditions météorologiques et le niveau de pollution, elle varie dans un endroit donné suivant l'heure et le jour.

I.2.2.5 Les précipitations

Les précipitations comportent tous les types des eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, pluie, grêle et neige. Elles constituent un élément très important pour le climat d'un endroit donné. Les précipitations représentent la troisième étape du cycle hydrologique.

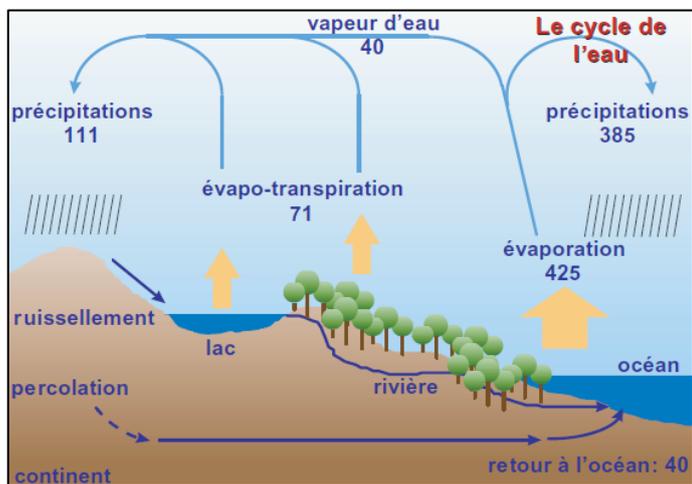


Figure I.1: Le bilan du cycle d'eau. (Liébard & Herde, 2006; p: 17)

I.2.2.6 Le vent

Il présente généralement le déplacement horizontal des particules d'air d'une zone de haute pression à une zone de basse pression. Il existe plusieurs paramètres qui agissent sur le régime des vents, la différence de température entre la zone de basse pression et la zone de haute pression, les éléments physiques qui peuvent contrôler leur mouvement et même les freiner, tels que la rugosité des surfaces et les écrans végétales. Les vents d'été sont la première source de rafraîchissement de l'atmosphère, donc elles sont les bienvenus.

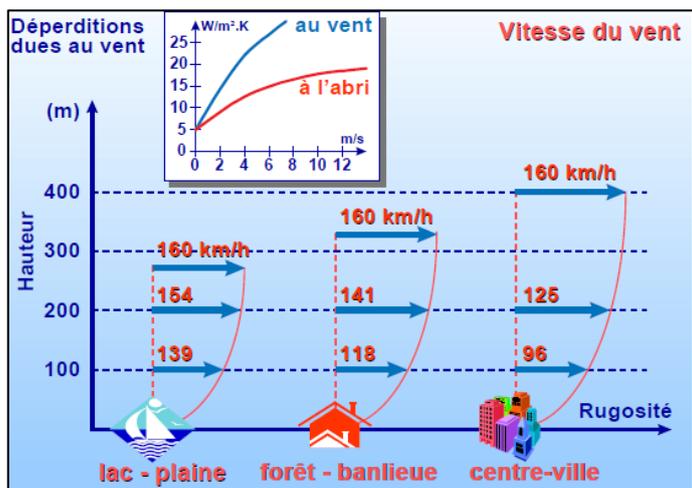


Figure I.2: Variation de la vitesse du vent selon l'altitude et la nature du sol. (Liébard & Herde, 2006; p: 18)

I.2.3 Echelles du climat

Les variabilités spatiales et temporelles de certaines grandeurs climatiques, telles que la température, les précipitations et autres, ont permis de dégager quatre échelles spatiales, dont la plus petite échelle dépend toujours de la plus grande (Cleugh, 1995). Le tableau I.1 présente les principales caractéristiques des quatre échelles.

Tableau I.1: Les échelles du climat.

Echelle	Dimensions approximatives		
	Echelle Horizontale	Echelle Verticale	Echelle Temporelle
Macroclimat	2000 km	3 à 10 km	1 à 6 mois
Mésoclimat	500 à 1000 km	1 à 10 km	1 à 6 mois
Topoclimat	1 à 10 km	0.01 à 0.1 km	6 mois à 24 heures
Microclimat	0.1 km	0.01 km	24 heures

I.2.3.1 Macroclimat

Cette échelle est la plus grande, elle correspond à des vastes espaces géographiques de plusieurs millions de kilomètres. Elle comporte l'échelle zonale et générale, influencée par les caractéristiques astronomiques de la terre, mais aussi les caractéristiques géographiques.

I.2.3.2 Mésoclimat

Cette échelle correspond à des espaces géographiques de plusieurs milliers de kilomètres., appelé aussi échelle régionale, influencée par les caractéristiques atmosphériques et géographiques de la terre, telles que la couverture végétale et les surfaces d'eau.

I.2.3.3 Topoclimat

Cette échelle correspond à des espaces géographiques de quelques kilomètres. Influencée par les caractéristiques naturelles et géographiques fines de la terre, comme les facteurs climatiques, le type du sol, le relief et les étendus d'eau.

I.2.3.4 Microclimat

Cette échelle constitue l'échelle climatique la plus fine, elle correspond à des espaces de quelques mètres, elle désigne généralement des conditions climatiques limitées à une région géographique très petite, significativement distinctes du Topoclimat.

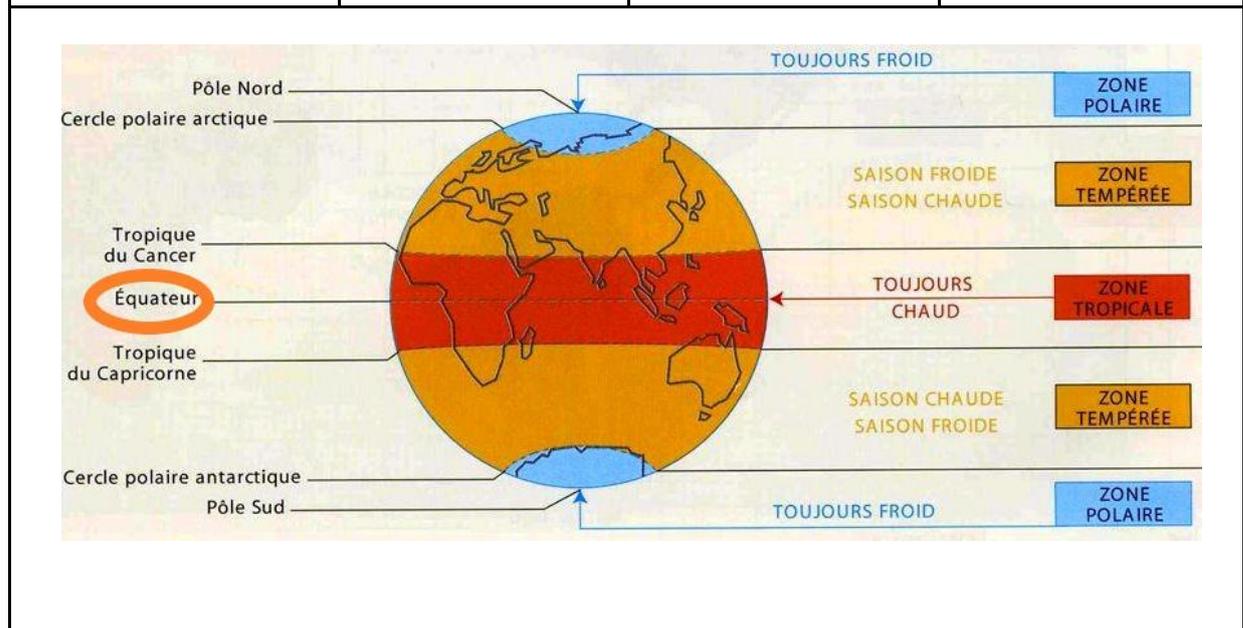
Le microclimat peut être définie comme étant la structure climatique fine de l'espace aérien qui s'étend même de la surface de la terre à une hauteur où les effets du caractère immédiat de la surface sous-jacente ne peuvent plus être distingués du climat général local (*Microclimate - Glossary of Meteorology*). Il est influencé par les conditions les plus fines comme, la rugosité, les ombres portées et la végétation.

I.2.4 Les zones climatiques dans le monde

Le climat mondial est composé de plusieurs zones climatiques, selon la classification du Köppen, Geiger. Il existe quatre zones principales comme montre le tableau.

Tableau I.2: Les quatre zones climatiques dans le monde. Auteur, 2016

La zone équatoriale	La zone tropicale	La zone tempérée	La zone polaire
Elle se situe entre 5° de latitude Nord et 5° de latitude Sud. Elle s'étend des longitudes Est et Ouest.	Elle est comprise entre 5° et 20° de longitude Est et Ouest, et de latitude Nord et Sud intercalée entre les zones équatoriales et tempérées	Elle est localisée entre la zone polaire au Nord et la zone tropicale au Sud. Dite tempérée parce qu'elle est dotée d'un mélange de température chaude et froide.	Elle est circonscrite aux extrémités de la planète Terre.



<p>Dans cette zone, le climat est de type équatorial avec plusieurs variantes.</p> <ul style="list-style-type: none"> -Les précipitations sont abondantes et régulières (1600 mm d'eau / an en moyenne) -L'existence de 4 saisons dont deux sont sèches et deux sont pluvieuses. - Des températures élevées et constantes en moyenne 24° C. -Une humidité constante et une amplitude thermique annuelle faible inférieur à 4°C. -La faiblesse des vents 	<p>Dans cette zone, on y trouve 3 sous types de climat :</p> <p>Le climat tempéré méditerranéen est caractérisé par des hivers pluvieux et des étés chauds. Il est localisé au Nord de l'Afrique, en Afrique du Sud et au Sud de l'Europe.</p> <p>Le climat tempéré océanique et continental sont assez différentes l'un de l'autre.</p> <p>La proximité océanique favorise le transport des masses d'eaux chaudes et froides qui modifient la température et les précipitations.</p>	<p>Les nuances du climat tropical nous permettent de dégager 3 sous climats :</p> <p>Le climat tropical humide se caractérise par une pluviométrie entre 500 et 1500 mm d'eau / an.</p> <p>Le climat tropical sec ou sahélien</p> <p>La pluviométrie est inférieure à 500 mm d'eau /an. L'amplitude thermique est élevée supérieure à 10°.</p> <p>Le climat tropical désertique se caractérise par une saison sèche qui englobe toute l'année et lorsqu'il tombe des pluies qui sont très rares la pluviométrie ne dépasse guère 100 mm d'eau /an.</p>	<p>Les températures sont en deçus de la normale (-30 ° C) et atteignent rarement 5°.</p>
--	---	---	--

I.3 Climat et microclimat urbain

I.3.1 Composition et interdépendance du climat urbain

Comme tous les climats, le climat urbain est le composite statistique de nombreux événements météorologiques quotidiens d'une région donnée. En tant que telles, les conditions à n'importe quelle localité sont régies par les modèles météorologiques à grande échelle évidents sur une carte météorologique synoptique (Versus & Scale, 1981).

Chaque environnement modifie plus ou moins les conditions locales sous une couche d'air mince au-dessus du sol appelée couche limite atmosphérique (Cleugh, 1995). C'est parce que les définitions de ces termes sont vagues et que les échelles des dimensions horizontales et verticales changent, il est nécessaire de définir les différentes couches composantes de l'atmosphère (Atmo Hauts-de-France - Composition de l'atmosphère, n.d.).

- La troposphère entre le niveau de sol jusqu'à 15 km d'altitude.
- La stratosphère comprise entre 15 et 50 km.
- La mésosphère comprise entre 50 et 85 km.
- La thermosphère, de 85 jusqu'à 500 km.
- L'exosphère à partir de 500 km et plus.

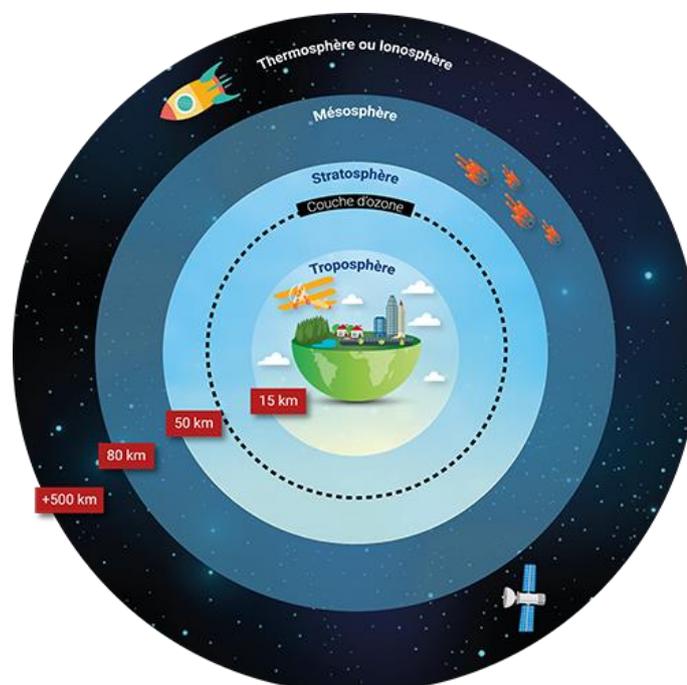


Figure I.3: Les différentes couches composantes de l'atmosphère. (ATMO HDF, 2020)

I.3.1.1 Couche limite urbaine

La couche limite urbaine (CLU ou UBL, Urban Boundary Layer) est la partie de l'atmosphère dans laquelle vit la population de la planète. Due à son importance dans les études urbaines, des progrès considérables ont été accomplis dans l'observation et la modélisation de la couche limite urbaine. Dont la synthèse du progrès réalisés dans les études de la CLU couvrant sa structure et son évolution a été élaborée par (Barlow, 2014).

I.3.1.2 Canopé urbaine

La relation entre la canopée et la couche limite urbaine est une relation d'assimilation, ce qui est bien rapproché dans les études climatologiques (Mills, 1997; Oke, 1976). La canopée urbaine (CU ou UCL, Urban Canopy Layer) est la couche atmosphérique urbaine qui est déterminée principalement par les sommets des bâtiments et les hauteurs des arbres (Oke, 1988). Deux échelles climatiques sont couvertes par la canopée urbaine, l'échelle locale et l'échelle micro (Figure I.3), chose qui lui fait susceptible d'être affecté par la distribution spatiale des températures atmosphériques et surfaciques. D'où de nombreuses et récentes études sont accentués sur les différents effets microclimatique dans la canopée urbaine (Huang et al., 2020; Skoufali & Battisti, 2019).

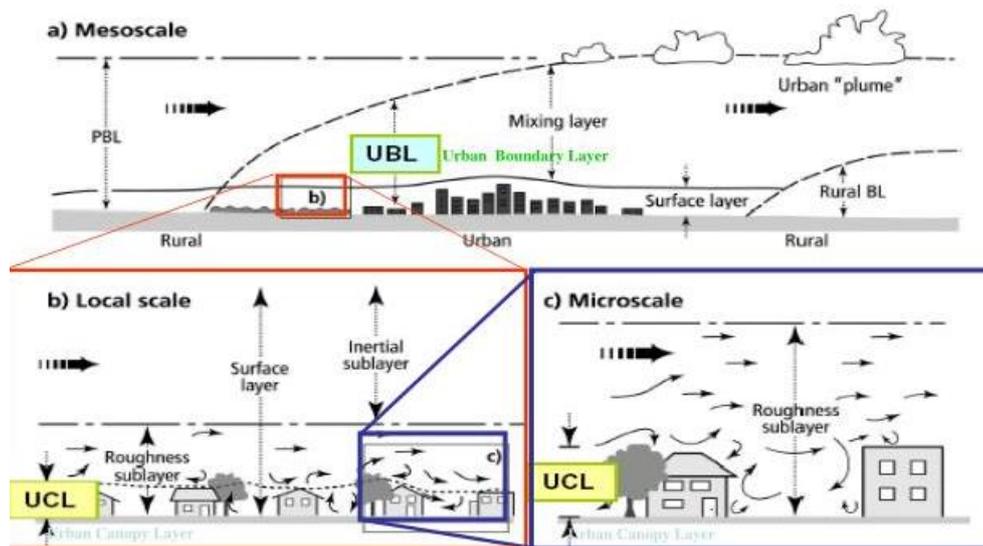


Figure I.4: Echelles et couches du climat urbain, la couche limite et la canopée urbaine. (Ignatius, 2015)

I.3.2 Paramètres affectant le climat urbain

Le climat urbain est affecté par plusieurs paramètres, tels que la morphologie et la densité urbaines, les propriétés des surfaces urbaines et la couverture végétale. Il est devenu

aujourd’hui plus qu’indispensable de concevoir avec le climat, dont les paramètres affectant le climat urbain sont à prendre en considération tout au long du processus de construction, allant de la phase conception jusqu’à la phase post occupationnelle (McEvoy, 2007).

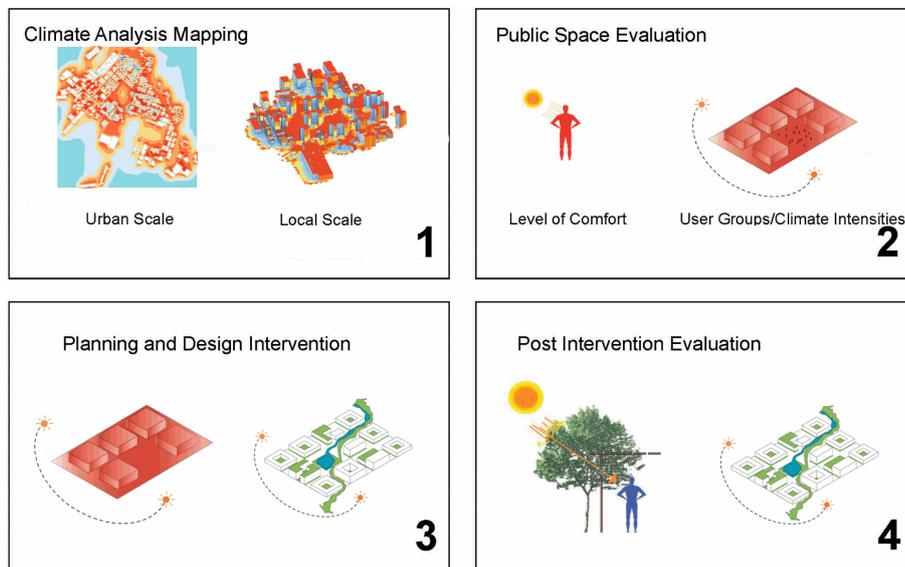


Figure I.5: Paramètres affectant le climat urbain. (McEvoy, 2007)

I.3.2.1 Densité des villes

La densité de la ville est en relation de proportion directe avec les surhaussements des températures et la chaleur en milieu urbain. Il a été démontré que l’affectation du climat urbain est conditionnée par la concentration de la population dans les agglomérations urbaine, plus la ville est dense plus les effets sur le climat urbain sont accentués, tels que la pollution, le ruissellement et le réchauffement (Cho & Choi, 2014; Hameed, 2017).

I.3.2.2 Morphologie et géométrie

La morphologie urbaine fait référence aux études de la forme urbaine, elle se concentre sur la formation et la transformation des formes des villes au fil du temps, leurs modèles spatiaux à différentes échelles, et leurs caractéristiques physiques, telle que la géométrie urbaine. Des études ont confirmé que la morphologie affecte les paramètres climatiques, ainsi le bâtiment peut contrôler l’écoulement d’air en milieu urbain (Elnabawi et al., 2013).

La géométrie urbaine est un paramètre de prime importance en matière de modification des conditions microclimatiques. Les bâtiments, de par leur disposition, leur orientation et leur taille, peuvent influencer le climat urbain négativement ou positivement selon la saison et la période (Lau et al., 2015).

I.3.2.3 Activité anthropique

L'activité anthropique est toute activité humaine capable à modifier le climat urbain, soit avec différentes sources ; domestique, industrielle, mobilité et transport.

Des études actuelles (Reichle, 2020) indiquent que l'activité anthropique entraîne une augmentation des niveaux atmosphériques de dioxyde de carbone (CO₂), de méthane (CH₄), d'ozone (O₃), de dioxyde de soufre (SO₂), de chlorofluorocarbone (CFC) et de dioxyde d'azote (NO₂), collectivement connus sous le nom de gaz à effet de serre. Comme résultat, la terre devient de plus en plus chaude.

I.3.2.4 Albédo

L'albédo est défini comme la fraction de l'énergie de rayonnement incidente qui est réfléchie ou diffusée par un corps, une surface ou un milieu (*Définitions : Albédo - Dictionnaire de Français Larousse, n.d.*).

Les recherches urbaines recommandent l'utilisation des matériaux à albédo élevé pour diminuer le réchauffement climatique. Parmi lesquelles (Krayenhoff & Voogt, 2010) qui ont synthétisé les travaux scientifiques portant sur l'albédo, ils ont trouvé que les réductions de la température diurne maximale sont de 1.1°, 1.5° et 3.6°C pour des augmentations uniformes d'albédo de toit de 0,19, 0,26 et 0,59, les réductions sont à environ de 40% . Le tableau suivant présente la bonde d'Albédo sur une échelle de 0 à 1.

Tableau I.3: Bonde d'Albédo de 0 à 1. *Wikipédia. Octobre, 2020*

Surface	Albédo	Surface	Albédo
Corps noir parfait	0	Sable léger et sec	0,25 à 0,45
Surface de lac	0,02 à 0,04	Calcaire	Environ 0,40
Forêt de conifères	0,05 à 0,15	Nuage	0,5 à 0,8
Forêt de feuillus	0,15 à 0,20	Glace	Environ 0,60
Surface de la mer	0,05 à 0,15	Neige tassée	0,40 à 0,70
Sol sombre	0,05 à 0,15	Neige fraîche	0,75 à 0,90
Cultures	0,15 à 0,25	Miroir parfait	1

I.3.2.5 Couverture végétale

La végétation améliore esthétiquement l'environnement bâti, contribue à contrôler la température ambiante et elle sert l'oxygénation du milieu urbain. Cependant, la plantation d'arbres est considérée comme un puissant régulateur du climat urbain à travers de nombreux effets ou fonctions.

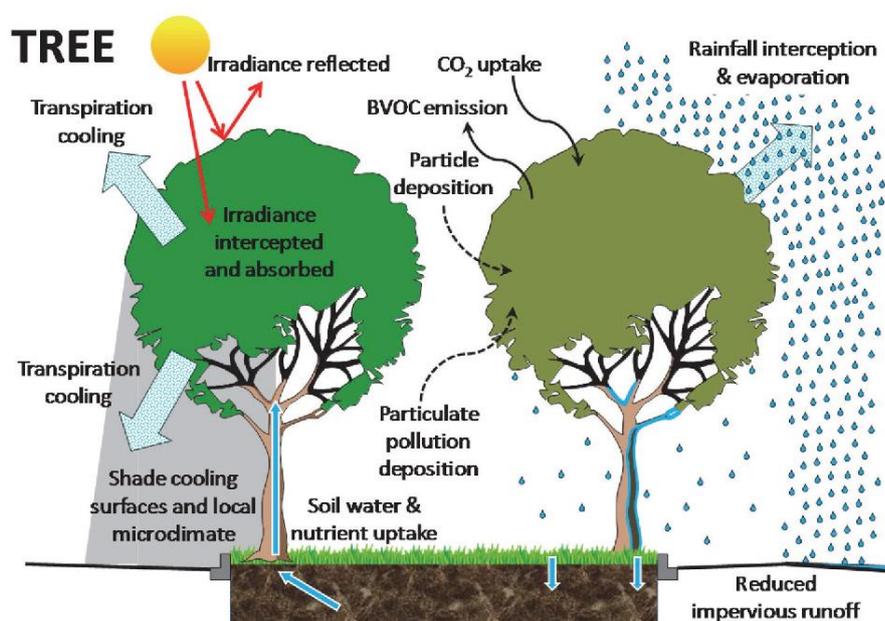


Figure I.6: Diverses fonctions et effets des arbres urbains. (*The Urban Forest and Ecosystem* / Semantic Scholar, n.d.)

✓ *Effet de rafraîchissement des espaces enherbés*

La configuration surfacique de la végétation dans le milieu urbain est représentée par les petites surfaces enherbées qui contribuent au rafraîchissement de l'air. Il est bien entendu que les petits espaces verts en milieu urbain pourraient avoir une action globale plus efficace par rapport aux grands parcs (Aram et al., 2019; Shashua-Bar et al., 2011).

✓ *Effet d'ombrage des arbres*

L'ombre des arbres réduit la température des surfaces, l'éblouissement et bloque le rayonnement diffus par le ciel et celui réfléchi par les surfaces environnantes, alertant ainsi l'échange thermique dedans l'environnement bâti. La qualité et la quantité d'ombre sont déterminées par l'espèce d'arbre, l'état foliaire, la conopée d'arbre, la forme des feuilles, la période de foliation, l'emplacement et l'orientation des arbres par rapport à un bâtiment (Abdel-Aziz et al., 2015; Ridha et al., 2018).

✓ Effet d'évapotranspiration

L'évapotranspiration des arbres urbains est considérée comme une composante importante du bilan hydrique et énergétique urbain. Elle se réalise lorsque les rayons du soleil tombent sur la canopée des arbres, provoquant l'évaporation de l'eau des tissus des feuilles d'arbres. Cela les refroidit, réduisant ainsi la quantité d'énergie restante pour réchauffer l'air.

✓ Effet de brise-vent des arbres

Planter les bons arbres aux bons endroits économise de l'énergie en fournissant de l'ombre d'été, de la chaleur hivernale et agit comme brise-vent d'hiver. La meilleure protection contre le vent se produit lorsque le brise-vent n'est pas à plus d'une ou deux hauteurs d'arbres de la construction.

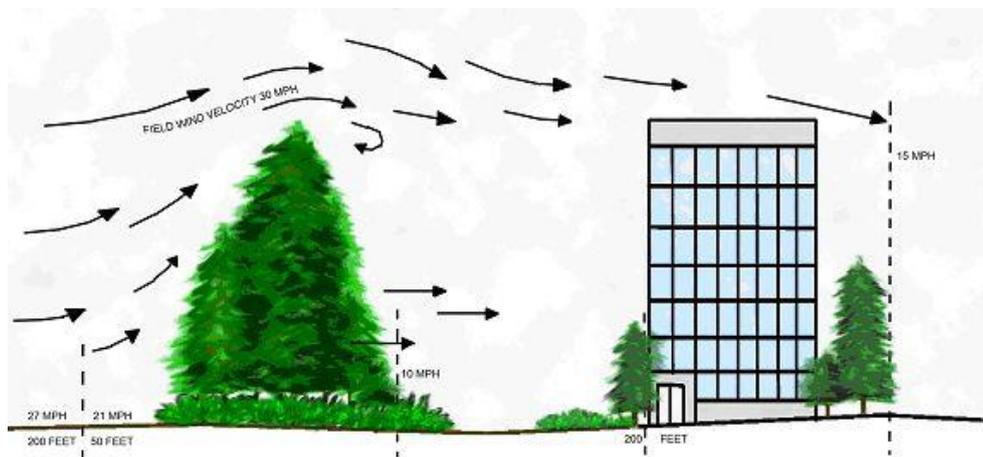


Figure I.7: L'effet brise-vent des arbres urbains. (*The Urban Forest and Ecosystem* / Semantic Scholar, n.d.)

I.3.2.6 Surfaces d'eau

La température de l'air à proximité des plans d'eau est différente de celle au-dessus des espaces minéraux en raison des échanges thermiques. Les plans d'eau sont connus comme les meilleurs absorbeurs de rayonnement, de par leur capacité thermique, ils peuvent entraîner des réductions significatives de la température de l'air (Lai et al., 2019). Ce genre d'étude a été mené par de nombreux chercheurs utilisant de diverses méthodes, d'où l'effet de refroidissement des différents sols en zones urbaines a été mesuré, en analysant les températures surfaciques par télédétection (Chen et al., 2006; Hou et al., 2009; Schwarz et al., 2012), dont les réductions des températures ont dépassé les 5°C dans l'étude de (Hou et al., 2009).

I.3.3 Microclimat urbain

Le microclimat urbain peut être défini comme le climat local observé dans les zones urbaines, il peut être sensiblement différent du climat des zones rurales environnantes (Microclimate - Glossary of Meteorology).

Parlant en chiffre, le microclimat urbain est la structure climatique fine de l'espace urbain qui s'étend généralement de la surface de la terre à une hauteur 0.01km et à une largeur de 0.1km (Voir Tableau I.1). Les études qui portent sur le microclimat urbain traitent en particulier, du premier niveau, les effets des éléments qui le composent sur la sensation thermique en milieu urbain (Wang et al., 2015; Yang et al., 2018; Zhao et al., 2017). De ce fait, l'interaction entre l'espace construit et les paramètres microclimatiques est toujours le point de départ dans ce genre des recherches, pour atteindre des niveau optimaux du confort thermique dans les espaces extérieurs (Ali-Toudert & Mayer, 2007; Jin et al., 2017).

Il est a noté qu'il existe un jeu de mots qui estampe ce champ de recherche, nous constatons que les recherches utilisent parfois « Thermal outdoor comfort », synonyme du confort thermique dans les espaces extérieurs, d'autres fois « urbain microclimate » qui signifie l'étude des paramètres thermique à l'échelle fine dite micro. En raison de son implication dans le climat urbain il est dit dans le contexte Français « le confort climatique ».

De par sa recherche intitulée « *Theoretical dimension of outdoor thermal comfort research* » (Shooshtarian, 2019) a pu clarifier l'occurrence de ce flou, mais aussi a pu positionner la recherche sur le confort thermique en extérieur par rapport aux différentes théories utilisées.

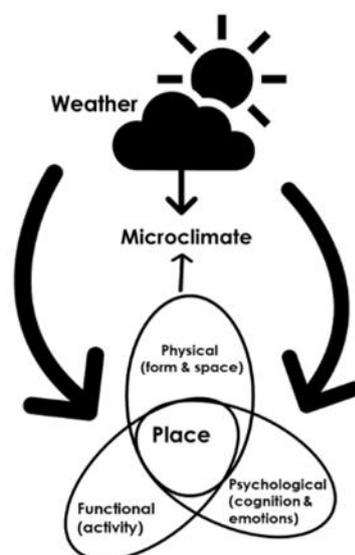


Figure I.8: L'interrelation entre le microclimat et les trois composantes du lieu.(Shooshtarian, 2019; p: 10)

La théorie de la place positionne le microclimat par rapport l'interaction des trois composantes d'un espace. Projetant l'influence qu'exerce chaque composante sur le microclimat, on obtient une synoptique de paramètres interdépendants.

A ce titre, une étude interrelationnelle des paramètres qui composent le microclimat urbain doivent donc l'être et nous devons l'aborder dans une vision de modifié et modifiant. C'est-à-dire qu'il faudrait étudier l'effet qu'exerce chaque paramètre sur le reste des paramètres dans une chaîne continuelle.

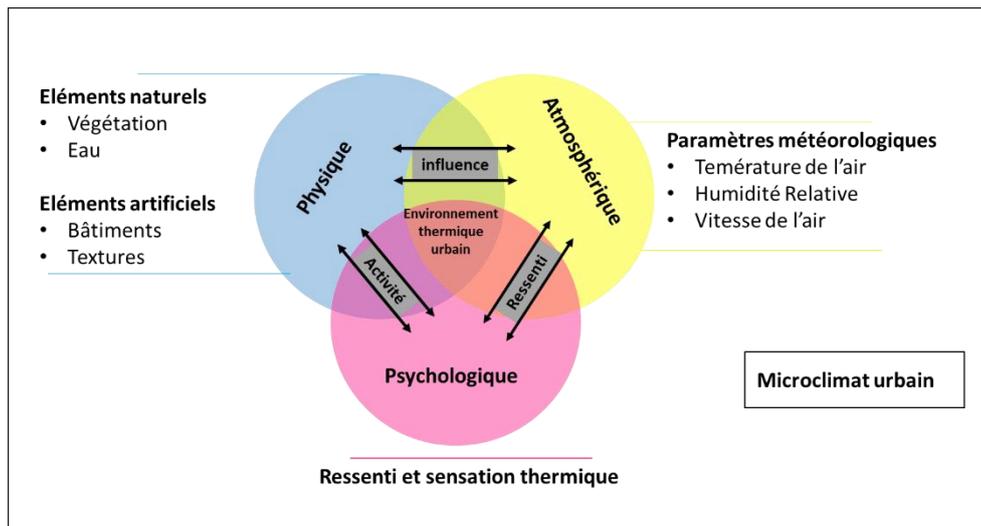


Figure I.9: Interrelation entre les paramètres du microclimat urbain. (Lai et al., 2019)

D'autant que le microclimat est en sous-jacente du climat urbain local, l'affection de ce dernier englobe aussi bien l'environnement thermique à une échelle plus fine, par le biais des mêmes paramètres ; morphologie et géométrie, activité anthropique, albédo, végétation et plans d'eau.

I.3.3.1 Paramètres modifiants

C'est l'ensemble des paramètres affectant le microclimat urbain positivement ou négativement, dont les travaux de recherche sont souvent conduit dans une optique d'évaluation et d'amélioration du confort thermique ou de renforcement de l'environnement thermique urbain (Hammadi., 2017; Shooshtarian et al., 2018). Autres ont approché l'effet ou l'impact d'un ou de plusieurs paramètres sur le microclimat et sur le niveau du confort dans les espaces extérieurs (Lau et al., 2015; Morille & Musy, 2017; Wong & Peck, 2005).

Des études antérieures ont montré que les paramètres physiques ; végétation, plans d'eau, textures, et bâtiments, de par leur propriétés physiques et thermiques font partie des

paramètres modifiants du microclimat urbain (Önder & Akay, 2014; Sobstyl et al., 2018). Ces études étaient intitulées, le plus souvent par des formules indiquant un effet positif, tels que, le rôle, la contribution... etc.

Il a été démontré que la végétation constitue une stratégie significative en été en matière de régulation microclimatique et plus spécialement dans la réduction de la température de l'air (Lai et al., 2019), tandis que la géométrie est la stratégie la plus significative pour d'atteindre un certain degré du confort thermique.

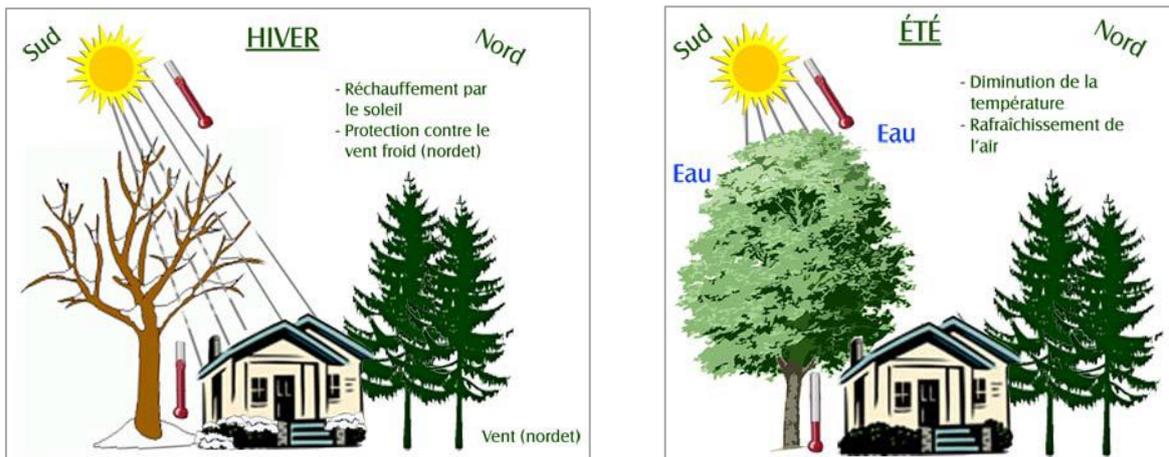


Figure I.10: Contribution saisonnière d'un arbre à la création des microclimats confortables. (CRÉDITS Projet Initié Par Le Conseil de l'industrie Forestière Du Québec (CIFQ) Conception)

Selon (CRÉDITS Projet Initié Par Le Conseil de l'industrie Forestière Du Québec (CIFQ) Conception), l'arbre urbain peut Diminuer la chaleur en été sans nuire à la chaleur en hiver.

« Des arbres plantés du côté des façades ouest et sud créent de l'ombrage l'été. Ces arbres plantés, en plus de réduire la chaleur l'été grâce à l'ombre qu'ils projettent sur les habitations, apportent un effet rafraîchissant supplémentaire par la circulation de l'air frais qu'ils engendrent et la production de vapeur d'eau lors du phénomène de respiration. Il est important par contre que les arbres plantés sur les façades ouest et sud ne gênent pas l'ensoleillement pendant l'hiver ; il faut donc privilégier des essences feuillues ».

Mais aussi diminuer les refroidissements en hiver causée par le vent.

« Lorsque des conifères sont plantés du côté de la façade nord, de manière à faire écran. Par contre, des règles strictes doivent être suivies lors de la plantation d'arbres à proximité d'infrastructures, si l'on ne veut pas que ces derniers altèrent les édifices ou les pavages ».

I.3.3.2 Paramètres modifiés

C'est l'ensemble des paramètres modifiés par les paramètres modifiants, soit par effet positive sur le microclimat urbain ou négative. Les travaux effectués à l'échelle microclimatique en milieu urbain focalisent sur les conditions microclimatiques et la sensation thermique, dont on trouve de nombreuses expressions ; conditions atmosphériques, conditions thermiques, paramètres météorologiques et conditions climatiques, tout se jette dans le sens étroit du microclimat urbain. En effet, il s'agit, majoritairement, de mettre en correspondance les variations microclimatiques au sein des espaces extérieurs, à l'aide des mesures in-situ (Elmira Othman et al., 2019; Wimalarathne & Perera, 2019).

L'interaction entre les paramètres microclimatiques et l'espace extérieur prend en compte des informations sur les paramètres physiques et leurs propriétés. Chaque paramètre microclimatique est rapporté donc à des propriétés physiques de l'environnement construit. A titre d'exemple, les variations de la température de l'air dedans l'espace extérieur sont conditionnées par l'effet d'ombrage induit par la géométrie urbaine (Baghaeipoor & Nasrollahi, 2019). C'est parce qu'il y a autant d'indicateurs physiques que de paramètres microclimatiques, l'effet de de modification sera discuté au large sens dans ce qui suit (Voir chapitre II).

I.4 Changement climatique en milieu urbain

I.4.1 Contexte général : Dynamique des villes et évolution du climat

Aujourd'hui plus de 55% de la population mondiale vit dans les zones urbaines, un pourcentage qui devrait passer à 68% d'ici à 2050, des villes débordées vont voir le jour (*United Nations Department of Economic and Social Affairs*).

De plus la problématique de la surpopulation et l'urbanisation effrénée, les villes actuelles sont confrontées à la problématique du changement climatique et ses effets. Certains chercheurs l'ont décrit comme un défi pour les villes (Angeles et al., 2011; Tesselaar et al., 2020), tandis que (Eames et al., 2013) voient que le vrai défi est d'anticiper des solutions durables pour un avenir viable et meilleur. Les deux points de vue s'accordent à dire que l'environnement urbain se détériore constamment et que les zones urbaines doivent s'adapter aux effets du changement climatique (Barrau et al., 2014).

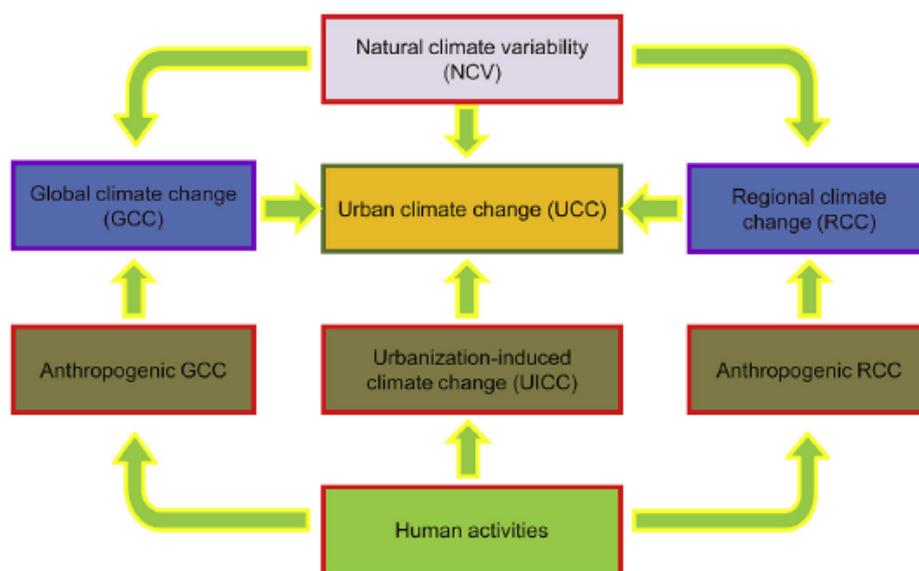


Figure I.11: Types et causes du changement climatique. (Barrau et al., 2014)

Selon (Ren, 2015), le changement des paramètres de surface induit par l'urbanisation est la raison fondamentale de la formation et de l'évolution des climats urbains. Le changement climatique induit par l'urbanisation devient une composante majeure du changement climatique urbain (UCC) qui est en outre affecté par le changement climatique global (GCC) et le changement climatique régional (RCC), résultant du forçages anthropiques et naturels à grande échelle et par la variabilité naturelle du climat (NCV), résultant des oscillations internes des modes du système climatique.

I.4.2 Causes principales du changement climatique (McEvoy, 2007)

Le changement climatique résulte de la transformation chimique de l'atmosphère par les gaz à effet de serre (GES). Ce qui engendre des perturbations de l'équilibre atmosphérique, exprimées essentiellement par l'augmentation des températures moyennes de la terre, modifiant ses caractéristiques physiques, chimiques et biologiques.

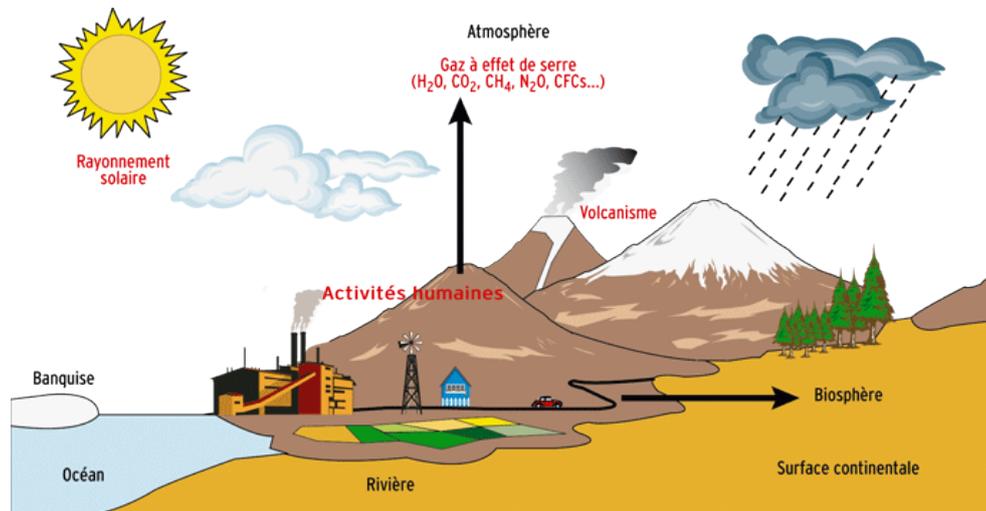


Figure I.12: Les principales causes du changement climatique. (Équiterre, 2011)

I.4.2.1 Causes naturelles

C'est l'ensemble des facteurs exogènes au système climatique qui agissent principalement sur la quantité d'énergie reçue sur terre. L'activité volcanique et l'émission d'énergie solaire de l'orbite de la terre autour du Soleil sont les deux facteurs déterminants à des échelles temporelles du changement climatique contemporain.

- Les éruptions épisodiques des volcans exercent des effets temporaires de courte durée sur le climat.
- L'augmentation de l'irradiation solaire ont contribuent au changement climatique global, dont le monde a connu des augmentations sans précédent des irradiances solaires après la révolution industrielle.

I.4.2.2 Causes dues à l'activité anthropique

Le dioxyde de carbone c'est un gaz qui possède une longue durée de vie, il résulte de la combustion de combustibles fossiles par les humains. Son accumulation et le fait qu'il y demeure dans l'atmosphère pendant des siècles est la cause principale du réchauffement climatique, provoqué par les différentes activités des êtres humains, parmi entre autres :

- L'utilisation des combustibles fossiles et la conversion des terres pour la foresterie et l'agriculture.
- Les procédés industriels qui contribuent à la multiplication des émissions du dioxyde de carbone et intensifiée par les émissions d'autres gaz à effet de serre.

I.4.3 Principaux effets du changement climatique (*Quelles Sont Les Conséquences Du Changement Climatique?* / Myclimate, n.d.)

Le changement climatique a de nombreux effets sur l'homme et l'environnement, qui sont perceptibles à l'échelle planétaire. Dans le cadre du réchauffement mondial, le bilan énergétique et la température terrestre sont modifiés en raison de la hausse des concentrations des gaz à effet de serre.

I.4.3.1 La météorologie

Des événements climatiques extrêmes (sécheresses, pluies diluviennes, tempêtes, etc.) plus violents et plus fréquents.

- Hausse des températures maximales et des températures minimales.
- Hausse du niveau de la mer.
- Hausse de la température des océans.
- Intensification des précipitations.

I.4.3.2 Biodiversité et écosystèmes

- La pollution atmosphérique.
- Perte de la biodiversité en raison de la capacité et de la vitesse d'adaptation limitées de la faune et de la flore.
- Acidification des océans due aux concentrations de HCO₃ élevées dans l'eau en raison de la hausse des concentrations de CO₂.
- L'extinction d'espèces animales sauvages et indigènes.

I.4.3.3 La santé publique

- Augmentation des crises alimentaires et de l'eau, notamment dans les pays en voie de développement.
- Risques sanitaires en raison de la hausse des températures et des vagues de canicule.
- Conséquences économiques pour l'élimination des conséquences climatiques.
- Prolifération des nuisibles et des maladies.

Récemment, le média de référence en environnement et sciences de la Terre **Notre-Planète-Info**¹ a publié comme actualité « *Le coronavirus Covid-19 fait diminuer la pollution de l'air en Europe* ». Les conditions de la pandémie Covid-19 ont causées l'arrêt d'une partie de l'activité industrielles chinoise qui avait entraîné une diminution de la pollution atmosphérique, de même pour l'Europe, et plus spécialement l'Espagne, l'Italie et la France ou les niveaux de pollution décroissent significativement. Ainsi, une réduction considérable de la pollution atmosphérique qui concerne les émissions de dioxyde d'azote (NO₂) a été détecté par le satellite *Copernicus Sentinel-5P*².

I.4.4 Phénomènes dues au changement climatique en milieu urbain

Il est évident que le changement climatique en milieu urbain représente des complications climatiques à la surface terrestre, causés par tous les forçages externes et la variabilité interne à diverses échelles spatiales, mais l'urbanisation est évidemment l'un des principaux moteurs.

I.4.4.1 Rugosité et vent

Le vent est un facteur important dans la vie quotidienne, alors que les prévisions météorologiques fournissent des informations sur la direction et la force du vent au grand public. Le vent détermine aussi la température ambiante (refroidissement éolien) car il augmente la ventilation. De plus, le vent transporte la chaleur et les polluants d'un endroit à un autre. Ainsi, la direction du vent est fortement corrélée au type du climat et au niveau de pollution de l'air.

Dans les zones bâties, par opposition à la campagne ouverte, on peut s'attendre à une diminution moyenne de 20 à 30% des vitesses de l'air près du sol. Une augmentation simultanée du niveau de pollution bioclimatique et hygiénique de l'air empêche

¹ Média en environnement, écologie et sciences de la Terre

² Le premier satellite *Copernicus* à se focaliser sur l'atmosphère par l'agence spatiale européenne.

fréquemment l'introduction des masses d'air non polluées d'une part ainsi que la turbulence, l'amincissement et l'évacuation de cet air d'autre part (04.03 Near Ground Wind Speeds).

Dans le voisinage immédiat des structures individuelles des bâtiments et dans la zone de la rue, il peut cependant en résulter de très fortes augmentations de la vitesse du vent causées par les grains et la canalisation du vent avec ses effets désagréables sur les personnes (charge de vent, grains de poussière, irritation des yeux, etc.).

Le vent est défini en termes de vecteur de sa direction et de sa vitesse. Les mesures de vent en continu sont effectuées, conformément à un accord international, à des stations fixes, les moins perturbées, à une hauteur de 10 m au-dessus du sol (WMO, 1983).

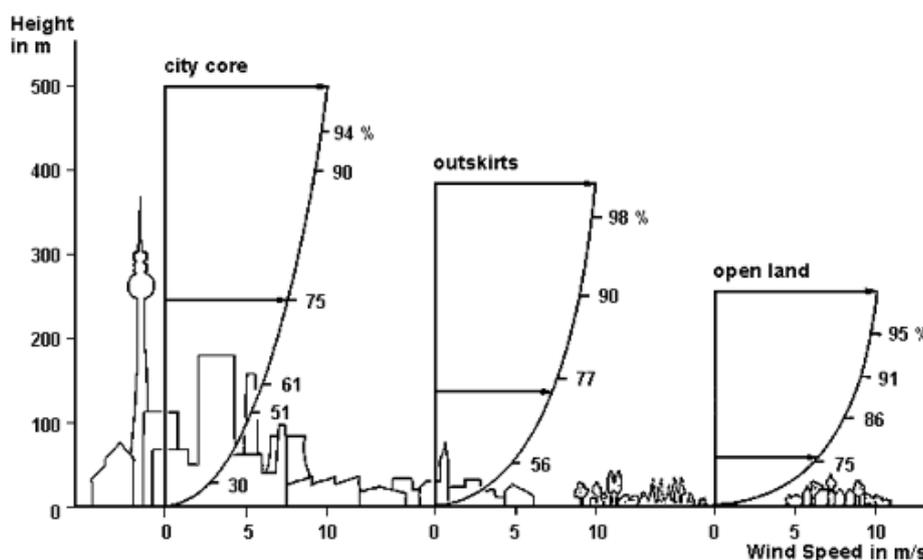


Figure I.13: Diminution de la vitesse du vent selon la rugosité du terrain. (04.03 Near Ground Wind Speeds)

Une influence supplémentaire peut être exercée soit par une conduite d'air froid conditionné par le relief, en particulier pendant les périodes de rayonnement nocturne à faible échange avec un léger degré de nébulosité, soit dans les zones urbaines par des systèmes de vent particuliers créés par des effets du vent ordinaire.

Les masses d'air qui montent en raison du fort réchauffement des villes provoquent des retombées d'air plus frais provenant de la campagne environnante. Les effets de vent ordinaire ne peuvent fonctionner dans les centres-villes que si des canaux d'air sortant sont disponibles ou du moins des structures de bâtiment perméables menant à la périphérie urbaine (04.03 Near Ground Wind Speeds, n.d.).

I.4.4.2 Pollution de l'atmosphère

À mesure que l'urbanisation effrénée est de plus en plus rapide, le besoin des prévisions météorologiques précises à l'échelle urbaine devient critique. Dans un temps où les villes deviennent plus grandes, plus chaudes et plus polluées, les études du microclimat urbain à plus long terme deviennent plus importantes pour la santé publique et le bien-être humain.

Selon (Dandotiya, 2019; Udara, 2016), la plupart des zones urbaines souffrent de graves problèmes de qualité d'air en raison de l'augmentation des niveaux de population, combinés à des changements dans l'utilisation des terres et à une augmentation de la circulation automobile. D'où (Liébard & Herde, 2006) estiment que la pollution urbaine est capable de réduire la transmission de l'atmosphère urbaine, mais aussi le taux d'ensoleillement en milieu urbain en comparaison avec le milieu rural.

Selon (Asimakopoulos, 2013), les principales causes de la pollution atmosphérique en milieu urbain sont ; les combustibles utilisés dans le transport, la production d'électricité et les activités anthropiques. L'ensemble de ces éléments peut produire un mélange complexe de polluants comprenant littéralement des milliers de constituants chimiques, alors que l'exposition à de tels mélanges est un risque omniprésent de la vie urbaine.

Ce qui a été confirmé par (Liébard & Herde, 2006) en utilisant les statistiques suivantes « 87% de la consommation énergétique mondiale viennent des combustibles fossiles (pétrole 37%, charbon 27%, gaz 23%). Leur combustion émet chaque année plus de 22 milliards de tonnes de CO₂ dans l'atmosphère »

Sources extérieures de pollution de l'air				
Rejets par secteur (en %)	SO ₂	CO ₂	CO	CH ₄
Transformation de l'énergie	52 %	14 %	-	5 %
Résidentiel/Tertiaire	12 %	24 %	30 %	6 %
Transport routier	5 %	25 %	35 %	-
Industrie manufacturière	26 %	20 %	25 %	18 %
Agriculture/Sylviculture	2 %	14 %	7 %	70 %
Autres transports	3 %	2 %	2 %	-
Autres	-	1 %	1 %	-
Total en 2003 (kt/an)	492 kt	346 000 kt	5 897 kt	2 775 kt

Figure I.14: Les différentes sources de pollution de l'air en France. (Liébard & Herde, 2006; p: 28)

I.4.4.3 Phénomène d'îlot de chaleur urbain

Il a été déjà mentionné que l'urbanisation a un impact négatif sur l'environnement principalement par la production des polluants, la modification des propriétés physiques et chimiques de l'atmosphère et la couverture de la surface du sol. L'ICU est considérée comme un effet cumulatif de tous ces impacts affectant le microclimat urbain, définie comme la surhausse des températures dans les zones urbanisées, résultant en une « île chaude » par rapport à la campagne environnante. Bien que des îlots de chaleur puissent se former sur n'importe quelle zone rurale ou urbaine, et à n'importe quelle échelle spatiale. Les villes sont favorisées, car leurs surfaces sont susceptibles à dégager de grandes quantités de chaleur. Néanmoins, l'ICU a un impact négatif non seulement sur les habitants des environs urbains, mais aussi sur les humains et leurs écosystèmes situés loin des villes. En fait, les ICU ont été indirectement liés au changement climatique en raison de leur contribution à l'effet de serre, et donc, au réchauffement climatique (*Four Approaches to Reducing the Urban Heat Island Effect - Urban Land Magazine*).

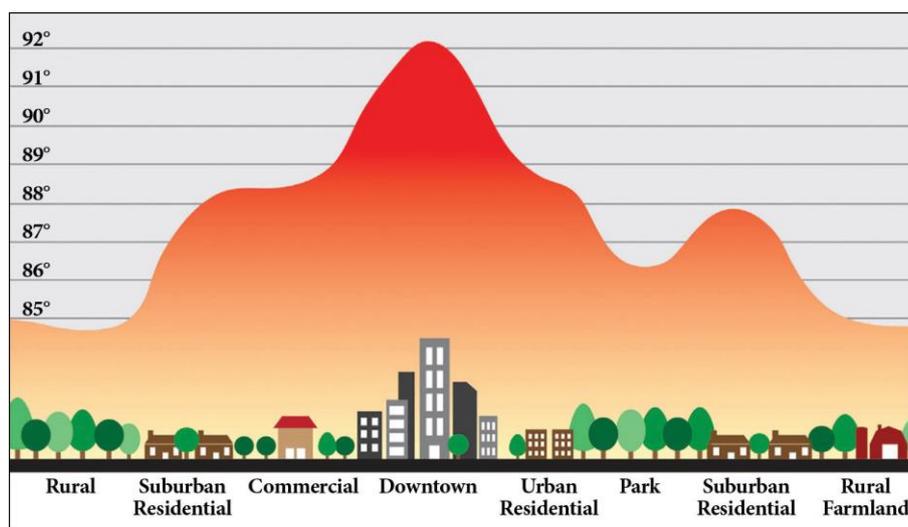


Figure I.15: Profil schématique du phénomène d'îlot de Chaleur Urbain. (*Summer in the City: Seeking Relief from Urban Heat Islands - Bay Area Monitor*)

Causes de l'îlot de chaleur urbain

Ces derniers temps, le phénomène d'ICU est devenu l'un des problèmes environnementaux les plus croissants dans les zones urbaines en raison de l'urbanisation, de la densité et de la population.

Selon (Nuruzzaman, 2015), l'ICU est principalement formé par la faible évapotranspiration en raison de la diminution de la végétation, l'absorption du rayonnement solaire en raison

des faibles albédos, la circulation contrainte de l'air en raison de la rugosité élevée et la grande quantité de dégagement de chaleur anthropique.

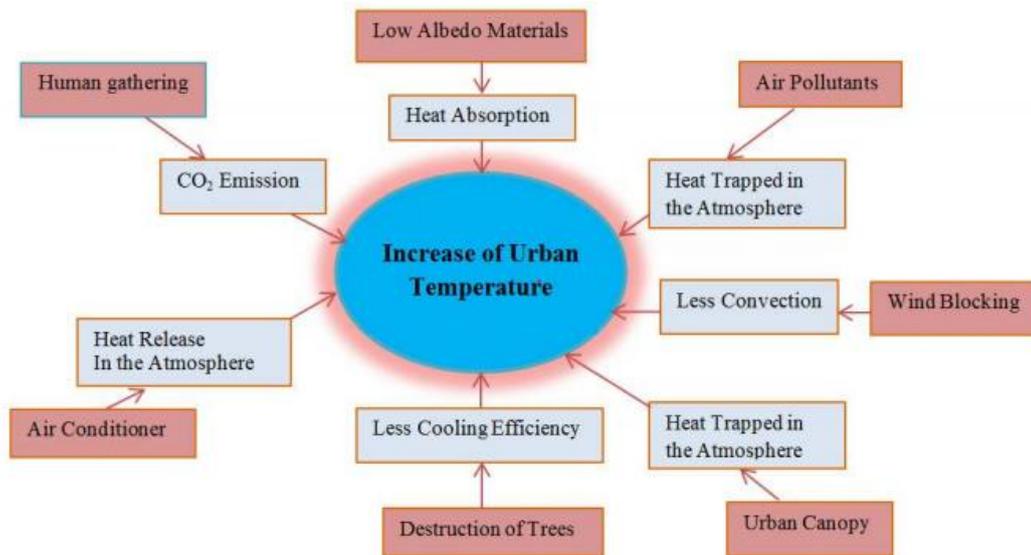


Figure I.16: Processus de formation du phénomène d'ICU. (Nuruzzaman, 2015)

§ L'utilisation des matériaux à faible albédo

L'albédo est le rapport entre l'énergie solaire réfléchiée et l'énergie solaire incidente, il a un impact direct sur la formation du microclimat urbain. En effet, l'albédo à cette échelle varie en fonction de divers facteurs comme l'orientation, l'exposition au soleil, l'hétérogénéité des textures des bâtiments et des matériaux du pavé (Nuruzzaman, 2015).

En général, la valeur de la réflectivité est déterminée par la couleur du matériau et sa rugosité, les couleurs claires présentent une plus faible absorption du spectre visible du rayonnement solaire, tandis que l'absorption spécifique de la partie infrarouge du rayonnement est tout à fait indépendante de la couleur perçue. Ainsi, de nombreuses études ont été réalisées pour corréler l'impact de la couleur des matériaux des chaussées sur la température des surfaces et la chaleur sensible dégagée (Santamouris, 2013).

§ La chaleur anthropique

L'effet ultime de la chaleur anthropique contribue dans une large mesure à la formation d'îlots de chaleur urbain. Le rassemblement des usagers de la ville étant prédominant dans les centres-villes en raison de la disponibilité de diverses installations, les émissions de CO₂ sont également énormes, ce qui contribue au stockage de la chaleur à température atmosphérique.

☞ La diminution de la végétation

Il a été déjà démontré que la végétation constitue la stratégie la plus significative en été en termes de régulation microclimatique. D'où, les arbres de par leur propriétés photosynthèses sont considérés comme des systèmes de refroidissement naturels en milieu Urban, tout en interceptant la chaleur solaire et absorbant le CO₂ (Buyadi et al., 2015).

La destruction de ces systèmes-là (les arbres urbains) diminue considérablement le refroidissement du milieu urbain en saison chaude.

☞ L'utilisation accrue des systèmes de climatisation

L'utilisation des systèmes de climatisation maintienne les bâtiments au frais à l'intérieur mais elle augmente la chaleur absorbée au-dessous de l'atmosphère. Par conséquence l'environnement extérieur est réchauffé, ce qui entraîne une augmentation des températures atmosphériques et contribue à la formation d'Ilot de chaleur urbain (DE MUNCK, 2014).

☞ La canopée urbaine

À la verticale, le milieu urbain est façonné par les hauteurs des bâtiments, la chaleur réfléchi par un bâtiment est influencée par les bâtiments les plus hauts, connus sous le nom de canopée urbaine (Mills, 1997). La formation du phénomène d'îlot de chaleur urbain est affectée par la canopée urbaine (Skoufali & Battisti, 2019).

☞ La rugosité et le blocage des vents

Le milieu urbain génère des vitesses d'air plus ou moins moindres en comparaison avec l'environnement rural, ceci est due principalement à l'effet du blocage des particules d'air induit par les éléments physiques, tels que les bâtiments, les arbres et autres.

La rugosité des surfaces intervient en milieu urbain comme facteurs diminuant la vitesse d'air (Priyadarsini & Wong, 2005).

☞ La pollution de l'air

La pollution atmosphérique est éminente dans les zones urbanisées et plus particulièrement dans les centres-villes (Dandotiya, 2019). À l'échelle microclimatique, les gaz d'échappement des véhicules et des polluants industriels rejetés dans l'atmosphère, piègent le rayonnement solaire. Ainsi, le milieu urbain génère des hausses température, par la suite les effets sur le microclimat urbain deviennent plus forts (Asimakopoulos, 2013).

Effets de l'îlot de chaleur urbain

Les effets d'ICU peuvent être observés en termes de température des surfaces terrestres, ou de l'air à différentes hauteurs, généralement au-dessus de l'atmosphère. En termes de confort thermique piétonnier, son observation est faite sous la couche de canopée urbaine (UCL) ou le volume d'air s'étendant du niveau de la rue jusqu'à la hauteur moyenne des bâtiments et des arbres environnants. (Lee et al., 2017).

Prenant en considération des causes mentionnés ci-dessus et les étude de (Nuruzzaman, 2015), les effets d'ICU peuvent être réduits en deux principaux aspects :

⌘ Consommation énergétique

Durant la saison chaude, le recours aux systèmes de climatisation est la solution adoptée par les usagers pour faire face aux températures élevées, ce qui augmente la demande en énergie et par la suite l'augmentation des dépenses énergétiques.

⌘ Confort thermique

Le phénomène d'ICU affecte le milieu urbain en engendrant des conditions microclimatiques extrêmes pendant la saison chaude ainsi que la saison froide, ce qui cause des situations de stress thermique ou d'inconfort humain.

L'exposition fréquente à l'environnement chauffé contribuera à une diminution du confort thermique et augmentera ainsi la prévalence des maladies liées à la chaleur. Le confort et la sensation thermique dans les environnements à conditions microclimatiques extrêmes sont traduites en fonction des réponses physiologiques et psychologiques du corps humain.

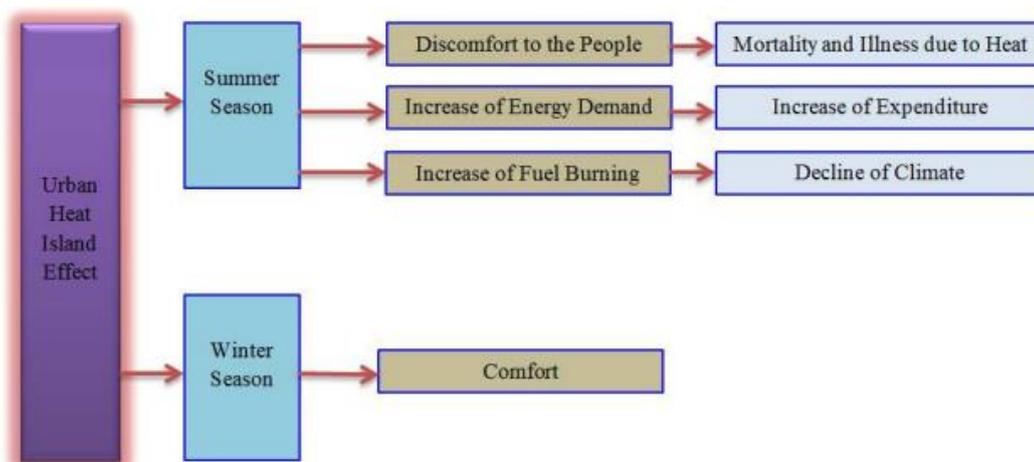


Figure I.17: Principaux effets du phénomène d'ICU. (Nuruzzaman, 2015)

I.4.5 Adaptation aux effets du changement climatique en milieu urbain

Comme c'est expliqué ci-dessus, les villes sont directement touchées par le changement climatique. Elles représentent une partie du problème, en contribuant à plus de 70% des émissions totales de gaz à effet de serre (GES) et sont victimes directes de leurs conséquences qui peuvent se manifester de diverses manières telles que les canicules, les pluies abondantes et autres. Il semble donc primordial pour les villes de s'engager dans la lutte contre les changements climatiques en travaillant à la diminution des émissions de GES d'une part, mettant en place des stratégies d'atténuation et d'adaptation d'une autre part.

Nous présentons en ce qui suit la différence entre l'atténuation et l'adaptation au effets du changement climatique, ainsi qu'une synthèses des différentes actions qui se trouvent sous chaque stratégie (*Mitigation and Adaptation / Solutions – Climate Change: Vital Signs of the Planet*, n.d.).

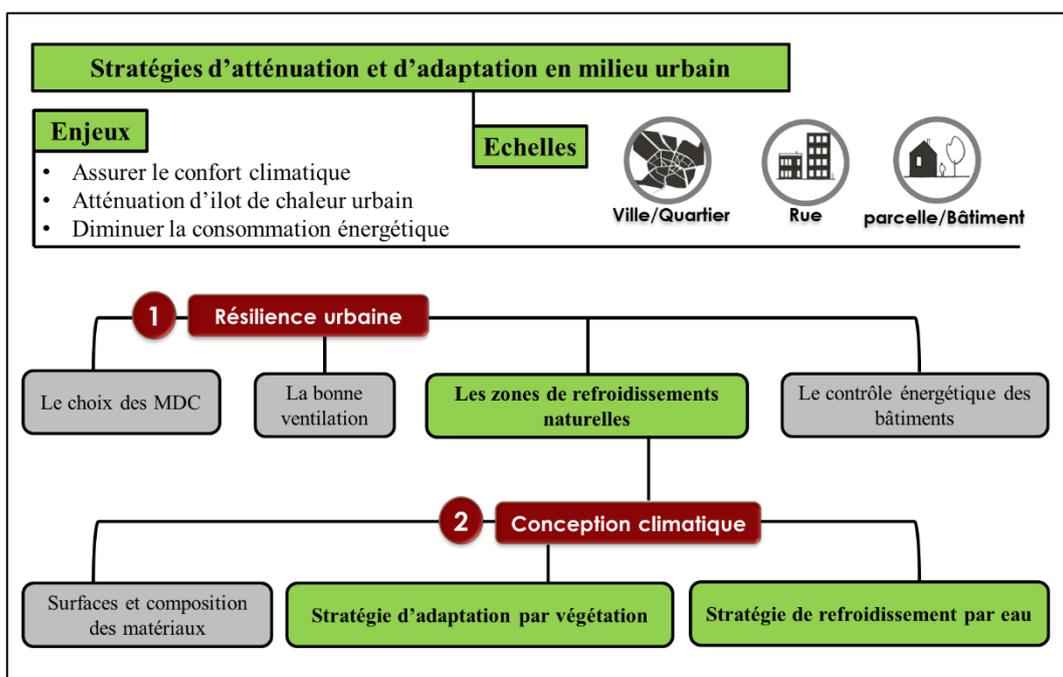


Figure I.18: Stratégies d'adaptation aux effets du changement climatique en ville. (Auteur, 2018)

I.4.5.1 Stratégies d'atténuation

Tout d'abord, l'atténuation consiste à réduire le flux de gaz à effet de serre piégeant la chaleur dans l'atmosphère, soit en réduisant les sources de ces gaz, par exemple, la combustion de combustibles fossiles pour l'électricité, le chauffage ou le transport ou en améliorant les puits qui accumulent et stockent ces gaz, comme les océans, les forêts et le sol.

L'objectif de l'atténuation est d'éviter toutes interférences humaines significatives avec le système climatique et de stabiliser les niveaux de gaz à effet de serre pour permettre aux écosystèmes de s'adapter au changement climatique, garantir que la production alimentaire ne soit pas menacée et permettre à l'économie de se développer d'une manière durable.

🌀 La forme urbaine

Une forme urbaine durable contribue à l'atténuation du changement climatique en créant des quartiers compacts, mixtes, accessibles à pied et denses, en plus du co-bénéfice d'améliorer la santé et l'habitabilité urbaine. Cependant, la forme urbaine compacte et mixte réduit également les coûts de chauffage et de climatisation, ce qui en résulte des petites maisons, des murs partagés dans les maisons à logements multiples et la proximité des résidences et des entreprises (Coutts et al., 2016; Fahmy & Sharples, 2008).

🌀 Les zones de rafraîchissement naturelles

Les infrastructures vertes sont généralement considérées comme un outil de rafraîchissement de l'air en milieu urbain. Cette stratégie consiste à prévoir de grandes infrastructures vertes synonyme de plantation d'arbres, d'arbustes et d'herbes pour leurs services écosystémiques dans les zones urbaines, y compris les rues, les toits et les parcs (Ridha et al., 2018).

🌀 Le choix des matériaux de construction

L'extraction des ressources naturelles en tant que matériaux de construction elle-même consomme de l'énergie, provoque une dégradation de l'environnement et contribue au réchauffement climatique. Des changements urgents sont donc nécessaires concernant les économies d'énergie, le contrôle des émissions des gaz, la production et l'application des matériaux. Une suggestion immédiate relative à l'utilisation des ressources renouvelables et à la réutilisation des matériaux de construction est nécessaire (Santamouris, 2013).

🌀 Le contrôle énergétique des bâtiments

C'est parce que les bâtiments sont les plus gros consommateurs d'énergie et émetteurs de gaz à effet de serre, tant dans les pays développés que dans les pays en développement. Le contrôle énergétique des bâtiments est devenu une nécessité pour lutter contre les effets du changement climatique en milieu urbain. D'où, les architectes et les concepteurs des bâtiments doivent intervenir pour réduire la quantité d'empreinte du carbone émise par les matériaux de construction, tout en étudiant comment un bâtiment typique contribue au réchauffement climatique en libérant les émissions de dioxyde de carbone (Nash et al., 2019).

I.4.5.2 Stratégies d'adaptation

L'adaptation implique de s'ajuster au climat futur, réel ou attendu, tout en adoptant des pratiques et des actions pour se protéger des effets dû au changement climatiques. L'objectif est de réduire la vulnérabilité humaine aux effets néfastes du changement climatique, à l'instar des événements météorologiques extrêmes plus intenses qui touchent au bien-être humain. Les stratégies d'adaptation au effets dû au changement climatique en milieu urbain sont bien connus et leur efficacité a été démontrée dans de nombreux travaux de recherche (Barrau et al., 2014; Eames et al., 2013).

∞ Surfaces et composition des matériaux

La capacité thermique des matériaux de construction contribue à lutte contre les effets du changement climatique. Ainsi, la capacité thermique élevée d'un matériau peut réduire l'amplitude des variations des températures et par la suite des réductions considérables de l'énergie consommé. Toutefois, obtenir une diffusivité thermique importante dépend du premier niveau de l'épaisseur des matériaux de construction. La diffusivité thermique élevée induit, à la fois un retard dans l'échauffement du matériau et un refroidissement de l'air environnant (Al-hafiz et al., 2017).

∞ Stratégie de refroidissement par eau

Les plans d'eau en milieu urbain, comme les fontaines ou les canaux, sont souvent supposés à refroidir leur environnement pendant les périodes chaudes et améliorer la sensation thermique dehors. C'est pourquoi les urbanistes les intègrent souvent dans la conception des espaces publics urbains (Jacobs et al., 2020).

∞ Stratégie d'adaptation par végétation

La végétation à savoir sa configuration en milieu urbain ; arbres, surfaces enherbées, toitures ou murs végétalisés, est très efficaces en matière de lutte contre les effets du changement climatique, notamment le phénomène d'îlot de chaleur urbain. Les arbres urbains sont censés à offrir de nombreux avantages, notamment la modification de la température et la conservation de l'énergie, la réduction de la pollution de l'air et de l'eau et l'amélioration de la valeur des propriétés. Ils fournissent également de l'ombre et utilisent la photosynthèse pour convertir l'énergie solaire en sucres, ce qui peut abaisser les températures ambiantes autour de l'arbre (Abdel-Aziz et al., 2015).

I.5 Conclusion

La prise en compte du climat dans la construction a été initiée y a plus d'une vingtaine d'années. En effet, toutes opérations de construction ou d'interventions architecturales ou urbaines ont inclus des descriptions du climat local. Aujourd'hui, la description du climat urbain est jugée d'insuffisante pour faire face aux adversités et aux risques que l'être humain peut subir dans le contexte de l'urbanisation effrénée et des effets du changement climatique.

- Les modes de planification et de fonctionnement de nos villes - ainsi que les modes de vie des personnes qui y vivent - contribuent largement aux émissions de gaz à effet de serre qui provoquent le changement climatique. La dépendance aux combustibles fossiles pour le transport et à l'électricité pour le chauffage, la climatisation, l'éclairage et d'autres activités quotidiennes augmente parallèlement à la croissance des villes tentaculaires.
- La croissance urbaine sera de plus en plus tirée par la migration rurale-urbaine induite par le changement climatique.
- L'urbanisation rapide se manifeste par une population croissante de bidonvilles, une augmentation du caractère informel de l'occupation et de la demande de logements et de services de base, et crée une pression sur les terres et les écosystèmes. Souvent, l'expansion urbaine a lieu sur des sites les plus vulnérables aux risques liés au changement climatique.

Il est devenu à notre époque, plus qu'indispensable d'adapter les villes aux nouveaux modes de construction qui prennent en compte l'urbanisation rapide et le changement climatique, pour leur assurer résilience et adaptabilité. Cependant, aucune ville ne peut s'engager sur la voie d'un développement durable à long terme sans d'abord s'attaquer au changement climatique.

Chapitre II :

Sensation thermique et confort climatique extérieur

II. Sensation thermique et confort climatique extérieur

« *Le dehors est toujours un dedans* » Le Corbusier

II.1 Introduction

Une approche analogique par (CLAIRE & MICHEL, 1982) considère que l'espace physique est habité à deux niveaux ; le dedans ou l'espace domestique et le dehors ou l'espace extérieur. Ainsi, l'ensemble des fonctions à l'extérieur n'est qu'une reproduction des fonctions à l'intérieur des habitations. Selon cette approche les espaces publics urbains jouent le rôle des séjours dans le milieu urbain, d'où le bon fonctionnement des espaces publics représente un indice de confort de la vie urbaine.

L'environnement bâti est fortement influencé par l'environnement thermique, par voie de différents phénomènes, tels que la chaleur anthropique, l'évaporation et l'évapotranspiration des plantes, l'ombrage des arbres, les objets construits par l'homme et la couverture du sol, tels que le gazon naturel et le pavage artificiel, etc. Un espace extérieur confortable offre une expérience de confort climatique agréable pour les personnes et améliore efficacement la qualité de la vie urbaine. Cependant, les gens ressentent des différentes sensations thermiques lors du déroulement des différentes activités en plein air ; dans les rues, les places, les terrains de jeux et les parcs urbains.

Ce second chapitre porte sur l'étude de la sensation thermique et l'évaluation du niveau de confort climatique en extérieur. La première partie tente de définir les paramètres qui régissent les échanges de l'être humain avec l'environnement thermique urbain qui sont l'origine de toutes sensations thermiques. En effet, la compréhension de ces paramètres contribue à étudier les conditions thermiques qui affectent l'homme au sein des espaces extérieurs, souligner les situations du confort et d'inconfort climatique devient alors possible. La deuxième partie met en lumière les différentes méthodologies et outils pour étudier l'environnement thermique urbain et pour évaluer le niveau du confort climatique en extérieur à savoir ; analyse bioclimatique, indices thermiques, outils numériques d'aide à la décision et modèles climatiques. La dernière partie présente une synthèse bibliographique des quatre fameuses stratégies d'adaptation à l'environnement thermique urbain, ainsi que les effets de chaque stratégie sur les paramètres microclimatiques et sur le niveau du confort climatique extérieur.

II.2 Environnement thermique urbain

II.2.1 Définition

L'environnement thermique urbain est devenu l'un des sujets de recherche les plus importants, pour commencer l'environnement thermique est défini comme l'ensemble des conditions physiques qui affectent l'échange de chaleur entre l'homme et son environnement (Jendritzky & Dear, 2009).

Dans les espaces extérieurs urbains, l'environnement thermique est défini par l'interaction de trois composantes. Humaine (sensation thermique humaine), physique (environnement bâti comprenant des éléments naturels) et atmosphérique (paramètres microclimatiques). Selon (Jendritzky & Tinz, 2009), la relation étroite de l'homme avec l'environnement atmosphérique fait partie de l'expérience quotidienne de chacun.

À la lumière de tout ce qui précède, l'environnement thermique urbain pourrait être défini comme l'ensemble des conditions atmosphériques que subit l'homme à un moment donné dans le milieu urbain.

II.2.2 Paramètres de l'environnement thermique urbain (*Confort Thermique : Généralité - Energie Plus Le Site*, n.d.)

Le corps humain échange de la chaleur avec son environnement par rayonnement, convection, conduction et évaporation (Richard R Gonzalez et al., 2019; Ichinose, 2008). À cet égard, deux catégories de paramètres influant l'environnement thermique sont à déterminer, personnels (habillement et métabolisme) et physiques (paramètres microclimatiques). Des études antérieures ont montré que la température de l'air, la température radiante moyenne, l'humidité relative et la vitesse du vent doivent être pris en compte pour décrire pleinement l'environnement thermique urbain (Ichinose, 2008; Shooshtarian et al., 2018).

II.2.2.1 Le métabolisme

C'est la manière de production de chaleur interne au corps humain, elle permet de maintenir celui-ci autour de 36,7°C. Le métabolisme de travail correspondant à une activité particulière s'ajoute au métabolisme de base du corps au repos.

II.2.2.2 L'habillement

C'est un paramètre très important en termes de résistance et de protection des conditions dures de l'environnement thermique. Il représente la résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau humaine et l'environnement.

II.2.2.3 La température de l'air

C'est le paramètre qui influe directement les échanges convectifs, cutanés et respiratoires des êtres humains. Pour assurer le bien-être humain, un équilibre doit-il être trouvé entre la température ambiante de l'air et la température du corps humain, alors que celle-ci est maintenue, généralement à 36.7°C.

II.2.2.4 L'humidité relative de l'air

C'est le paramètre qui exprime le rapport entre la quantité d'eau contenue dans l'air à la température et la quantité maximale d'eau contenue à la même température, elle influence la capacité du corps humain à éliminer la chaleur excédentaire.

Il est à noter que l'humidité relative renforce la chaleur ressentie, c'est d'ailleurs le taux d'humidité de l'air peut influencer, significativement la différence entre la température annoncée et la chaleur ressentie par les individus en milieu urbain.

II.2.2.5 La vitesse de l'air

C'est un paramètre de prime importance car elle influe les échanges de chaleur par convection et elle augmente l'évaporation à la surface de la peau humaine.

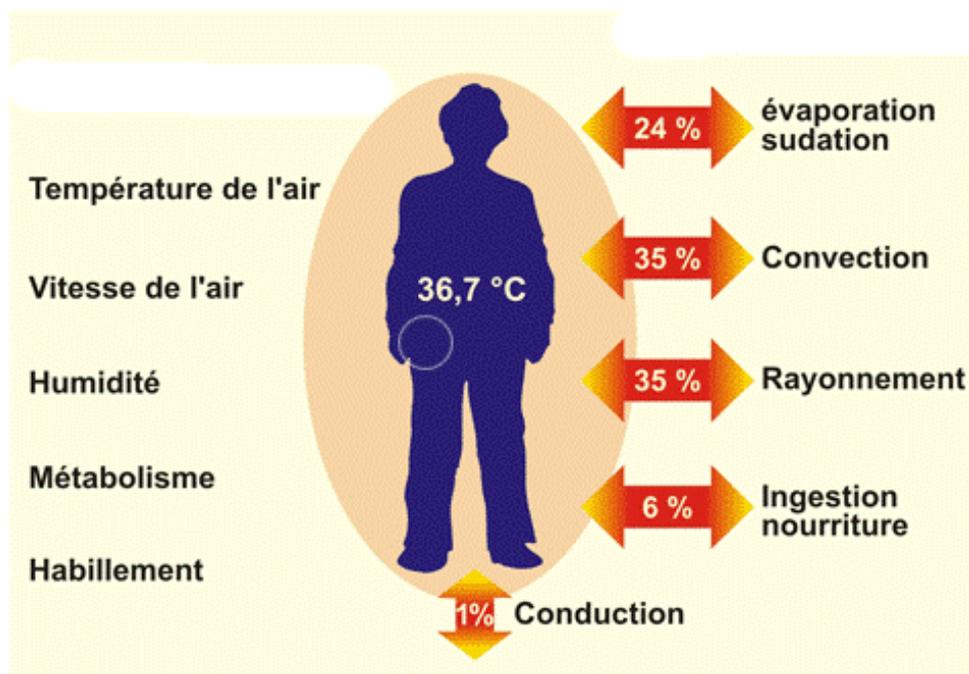


Figure II.1: Paramètres de l'environnement thermique urbain. (*Energie Plus*,2007)

II.2.3 Confort climatique en extérieur

Le confort thermique est défini comme « *un état de satisfaction du corps vis-à-vis de l'environnement thermique* » (Liébard & Herde, 2006; p: 27).

Selon ASHREA 55¹, le confort thermique est « *cette condition d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique* ». Sur cette base, le confort climatique est synonyme de disponibilité des conditions thermiques agréables dans les espaces extérieurs. Cependant, le confort thermique extérieur est pleinement considéré comme un garant de l'utilisation des espaces extérieurs (Elnabawi & Hamza, 2019; Hammadi., 2017).

L'inconfort est provoqué par une différence verticale des températures de l'air entre les pieds et la tête, par un champ rayonnant asymétrique, résultant d'un échange par convection locale ou par contact avec un sol chaud ou froid (*What Is ASHRAE 55? Basics of Thermal Comfort*).

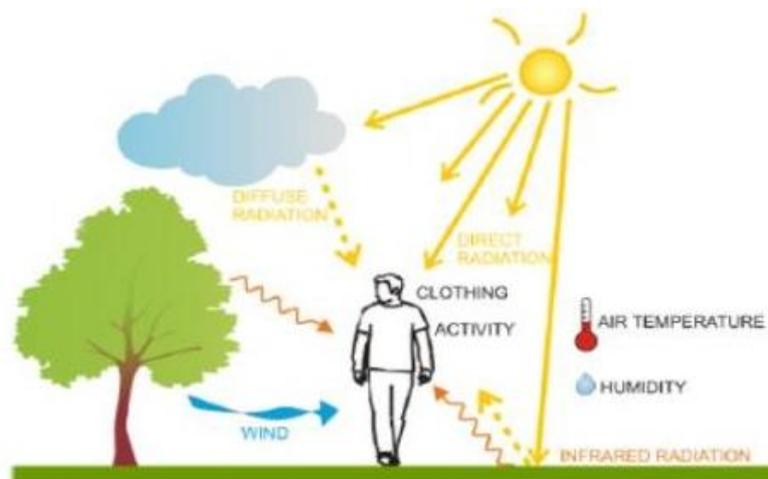


Figure II.2: Les conditions affectant le confort climatique dans les espaces extérieur.(Ridha et al., 2018)

La température radiante moyenne (T_{mrt}) indique le niveau de température radiante reçu par le corps humain. Le rayonnement comprend tous les flux radiatifs ; rayonnement solaire direct, diffus, réfléchi et émissions à ondes longues des surfaces (Jamei & Rajagopalan, 2015). La température radiante moyenne est considérée comme le facteur le plus important, affectant le confort thermique humain en milieu urbain.

¹La norme 55 une norme qui spécifie les conditions d'environnements thermiques acceptables et est destinée à être utilisée dans la conception, l'exploitation et la mise en service des bâtiments et autres espaces occupés.

II.3 Méthodologies et outils pour étudier l'environnement thermique urbain et pour évaluer le confort climatique en extérieur

L'évaluation du confort climatique (Thermal Outdoor Comfort) doit être menée en considérant des divers aspects ; physiques, physiologiques et psychologiques, en tenant compte des interrelations entre les conditions thermiques, les réponses psychologiques et les phénomènes physiologiques (Andris Auliciems and Steven Szokolay, 1995).

II.3.1 Méthodes d'acquisition des données

De la définition de l'environnement thermique urbain, il ressort deux catégories de données pour mener à bien son étude, mais aussi pour bien évaluer les niveaux du stress thermique dans les espaces extérieurs.

II.3.1.1 Données subjectives

Cette catégorie englobe les données relatives aux phénomènes physiologiques effectués par les usagers, il est nécessaire d'acquérir ce genre de données pour explorer la sensation thermique de la population locale (Cheung & Jim, 2019; Elmira Othman et al., 2019). Elles sont recueillies par moyen de questionnaires ou d'entretiens décrivant la satisfaction de ces derniers vis-à-vis les conditions thermiques extérieures (Neto, 2016).

II.3.1.2 Données objectives

Cette catégorie comporte les données relatives aux phénomènes physiques, climatiques et microclimatiques qui se déroulent dans les espaces extérieurs et qui agissent comme facteurs modifiants de l'environnement physio-thermique.

✂ Stations météorologiques

Les stations météorologiques constituent la première source d'information essentielle pour suivre le climat.

« Une station météorologique, parfois désignée par synecdoque abri météorologique, est un ensemble de capteurs qui enregistrent et fournissent des mesures physiques et des paramètres météorologiques liés aux variations du climat » (Station Météorologique — Wikipédia, n.d.)



Figure II.3: Station météorologique.(Station Météorologique — Wikipédia, n.d.)

Les paramètres météorologiques à mesurer pour décrire un climat à un moment donné, en un lieu précis sont au nombre de sept, regroupés en trois catégories (Stations Météorologiques : Paramètres Mesurés et Emplacement | Dossier, n.d.).

Tableau II.1: Catégories et description des paramètres météorologiques.

Descriptions	Paramètres
Descriptions thermodynamiques de l'air	Température de l'air C'est la grandeur physique qui caractérise de façon objective la sensation subjective de chaleur ou de froid laissée par le contact de l'air
	Humidité de l'air C'est le rapport de la pression effective de la vapeur d'eau à la pression maximale
	Pression atmosphérique La pression exercée par la colonne d'air se situant au-dessus d'une surface.
Descriptions dynamiques de l'air	Direction du vent C'est la direction d'où vient l'air en mouvement.
	Vitesse du vent La vitesse à laquelle se déplace l'air en mouvement.
Descriptions de la couverture nuageuse	Précipitations Ce sont les diverses chutes d'eau (pluie, neige, grêle)
	Ensoleillement il résulte d'une part de l'intensité du rayonnement solaire et d'autre part de l'absorption de ce rayonnement par l'atmosphère.

∞ Mesures in-situ

Ce sont des mesures effectuées sur terrain, elles offrent des enregistrements réels de l'environnement thermique urbain et elles permettent d'étudier et de surveiller le phénomène thermique et ses métriques sur terrain. Par exemple, pour étudier l'influence de la végétation sur l'environnement thermique en été (Huang et al., 2020) ont effectué des mesures à différents endroits dans un district situé à Wuhan², Chine. Aussi, une campagne de mesure mobile a été effectuée sur l'agglomération de Nancy, France en vue de caractériser le phénomène d'îlot de chaleur urbain (Leconte, 2014).

² Wuhan, la capitale tentaculaire de la province du Hubei en Chine centrale.

§ Simulation

Mener des recherches dans des contextes urbains réels peut être difficile car il est difficile d'étudier l'effet d'une variable, tout en maintenant les autres variables constantes. En conséquence, certains chercheurs font recours à la simulation numérique, ceci permis à la fois l'acquisition des paramètres extérieurs et intérieurs. A titre d'exemple, (Abaas, 2020) qui a conduit une recherche pour l'amélioration du microclimat à Bagdad par des simulations réalisées à l'aide des données météorologiques irakiennes obtenues à la station de Bagdad. Les modèles numériques simulent des phénomènes du monde réel en résolvant des ensembles d'équations qui relient les propriétés du climat urbain (Oke et al., 2017). Parmi ces modèles, les modèles du bilan énergétique (EBM) et la dynamique des fluides computationnelle (CFD) ont montré les résultats les plus fiables et les plus satisfaisants (Toparlar et al., 2017).

II.3.2 Méthodes et études bioclimatiques

L'optimisation des conditions thermiques extérieures est importante pour concevoir des espaces extérieurs au même temps attrayants et confortables, c'est pourquoi les spécialistes et les chercheurs se sont concentrés sur la conception bioclimatique (Lai et al., 2014; Nouri et al., 2018; Tsitoura et al., 2017). Trois ouvrages reconnus à travers l'histoire ont bien rapproché les études bioclimatiques, soit :

1. Design with climate: bioclimatic approach to architectural regionalism, par les deux frères Olgyay (1963).
2. Man, climate and architecture, par Givoni (1978).
3. Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques, par Liébard (2006).

II.3.2.1 Les études d'Olgyay

La conception extérieure bioclimatique a été initiée en 1963 par (Olgyay, 1963), dont Les essais expérimentaux ont été élaborée dans des zones climatiques aux Etats-Unis. Dans sa charte bioclimatique, décrite dans son livre *Design with climate*, Olgyay (1963), a décrit d'une part, les outils de la conception bioclimatique pour atteindre un confort climatique extérieur optimal. D'autre part, il a expliqué l'analyse spécifique des sites qui permet le calcul des indices microclimatiques et thermiques. Ainsi, pour calculer la zone de confort les paramètres suivants sont à impliquer ; la température ambiante, l'humidité, la vitesse de l'air, la température rayonnante moyenne, le rayonnement solaire et le refroidissement par évaporation. Les résultats sont reportés sur le fameux graphe appelé charte bioclimatique (Figure II.4), l'axe des abscisses comporte les valeurs d'humidité relative et l'axe des

ordonnées comporte les valeurs de la température. Trois zones sont déterminées ; la zone de confort au centre, la zone de confort d’hiver et la zone du confort d’été indiquées séparément prenant en considération les adaptations saisonnières. Afin de rétablir le niveau du confort, le diagramme mis en relation l’humidité relative avec la vitesse de l’air.

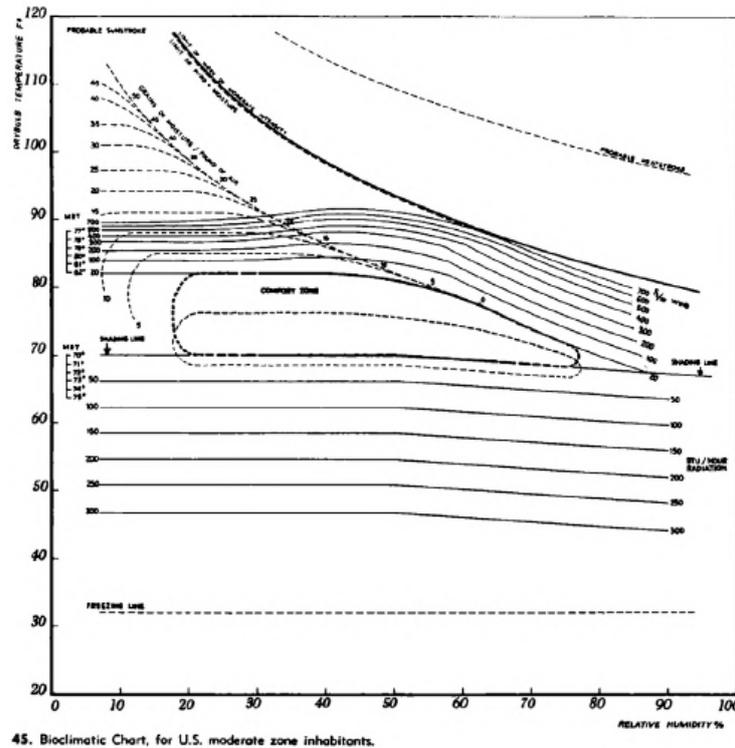


Figure II.4: Charte Bioclimatique d'Olgay.(Olgay, 1963)

II.3.2.2 Les études de Givoni et de Szocolay

Dans son livre *Man, climate and architecture* (1978), Givoni a remis en cause la charte d’Olgay, du fait que cette dernière est applicable qu’aux environnements à climat chaud et humide. La méthode de Givoni s’est développée dans la continuité de Mahoney évitant une succession de tables, utilisant un diagramme bioclimatique à deux dimensions. Dont il reporte la température sur l’axe horizontal et l’humidité sur l’axe vertical et il comporte plusieurs zones bioclimatiques avec des recommandations pour chaque zone (Figure II.5).

- La zone C est la zone de confort en air calme.
- La zone V est une zone de confort qui nécessite la mise en place de la ventilation.
- La zone INV, si l’on met en place une ventilation nocturne pour décharger la chaleur accumulée la journée on obtient le confort requis.
- La zone IG correspond au confort obtenu mettant en place des apports solaires.

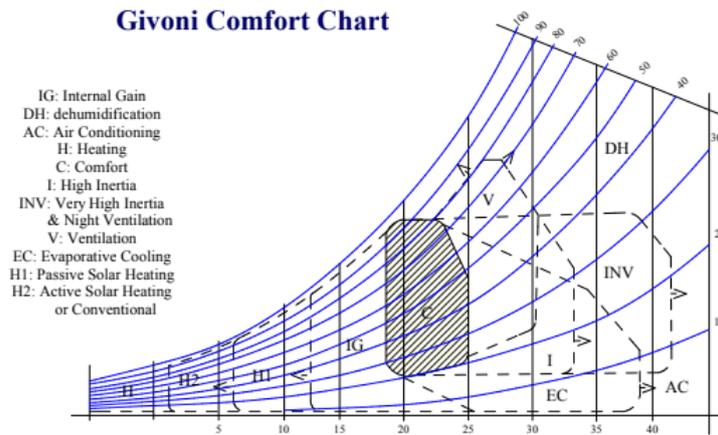


Figure II.5: Diagramme climatique de Givoni. (Fezzai Soufiane et Atef Ahriz)

Pour Szocolay et même avant les études de Givoni, il existe deux approches de conception bioclimatique en architecture, la première prend en compte l’aspect qualitatif des facteurs thermiques, d’où la performance et le contrôle thermique de la conception du bâtiment ne garantissent pas les conditions du confort. La deuxième approche prend en considération les températures dans la conception et la capacité mécanique requises dans les conditions du froid ou du chaud, ce qui manifeste dans la conception technique d’ingénierie et les équipements du contrôle thermique (Auliciems and Szokolay, 1995).

Tout comme les méthodes précédente le diagramme psychométrique de Szocolay indique des différentes zones de confort avec des recommandation, en se basant sur le couple température et humidité.

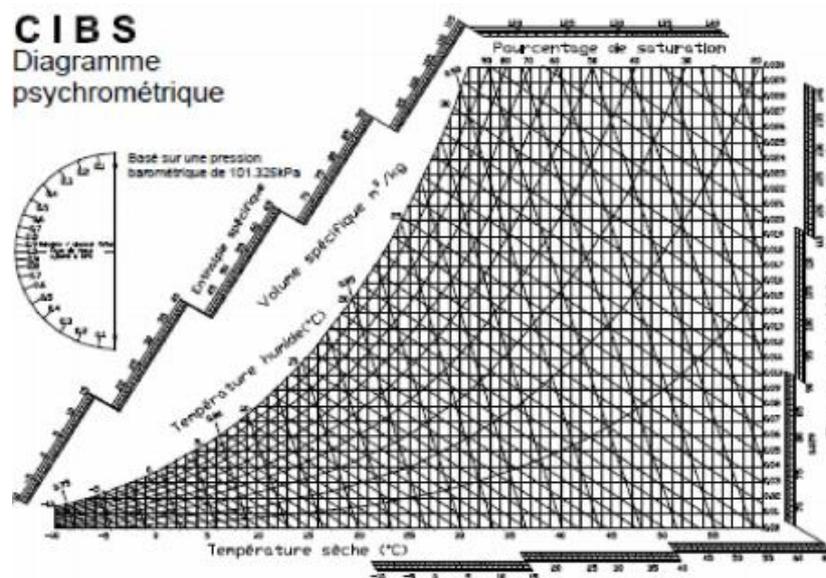


Figure II.6: Diagramme psychométrique de Szocolay. (Auliciems and Szokolay, 1995).

II.3.2.3 Les études bioclimatiques à l'air du développement durable

Liébard a pu positionner la conception dite bioclimatique par rapport au développement urbain durable par son ouvrage *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques* (2006). L'ouvrage est considéré comme une référence pour les exigences et les recommandations du confort et des nouvelles technologies de construction. Il propose une architecture bioclimatique cohérente en introduisant la nouvelle réglementation thermique, tout en privilégiant les dispositifs passifs en vue d'améliorer le confort thermique et de garantir la durabilité des constructions (Skelhorn, 2013).

II.3.3 Indices thermiques et climatiques

Les différentes méthodes d'évaluation du confort climatique et thermique sont basées sur le bilan énergétique humain, qui constitue la base de tous les indices thermiques connus. Plusieurs indices ont été développés pour évaluer le confort climatique extérieur et pour évaluer les niveaux du stress thermique dans les espaces extérieurs. De plus, ces indices ont été corrélés les uns aux autres pour sélectionner les plus appropriés pour les appliquer aux études du confort thermique et climatique (Staiger et al., 2019; Zare et al., 2018).

II.3.3.1 PMV et PPD

PMV (Predicted Mean Vote) a été créé en 1970 par Fanger, est l'un des indices les plus importants dans la mesure des températures physiologiques, utilisées pour prédire la perception de la population d'un groupe exposé aux mêmes conditions microclimatiques (A Matzarakis & Mayer, 2000; Wimalarathne & Perera, 2019). Cet indice comprend une catégorisation en sept points de -3 à +3, avec 0 comme sensation thermique neutre et quatre valeurs positives indiquant le stress physiologique pendant les saisons chaudes. L'indice est utilisé pour évaluer le stress thermique dans les deux environnements thermiques, intérieur et extérieur (A Matzarakis & Mayer, 2000; Zare et al., 2018). PMV est compatible avec des modèles de simulation de conception urbaine et pris en charge par des logiciels numériques, tels que Ray-man et Envi-Met.

Tableau II.2: Catégorisation de l'indice thermique PMV.(Zare et al., 2018)

PMV	Thermal perception	Grade of physiological Stress
-3	Very cold	Extreme cold stress
-2.5	Cold	Strong cold stress
-1.5	Cool	Moderate cold stress
-0.5	Slightly cool	Slight cold stress
0	Comfortable	No thermal stress
0.5	Slightly warm	Slight heat stress
1.5	Warm	Moderate heat stress
2.5	Hot	Strong heat stress
3	Very hot	Extreme heat stress

Une fois le PMV est calculé, le PPD (**Predicted Percentage of Dissatisfied**) établit une prédiction quantitative du pourcentage des occupants thermiquement insatisfaits (c'est-à-dire trop chaud ou trop froid). Le PPD donne essentiellement le pourcentage de personnes susceptibles à ressentir l'inconfort local.

II.3.3.2 UTCI – Universal Thermal Climate Index

L'UTCI est le fruit d'un projet lancé par la Société Internationale de Biométéorologie (ISB) en 1999. Dix ans après, La coopération européenne de développement scientifique et technique a développée l'indice à travers l'action COST 730 (Blazejczyk et al., 2012). L'UTCI est définie comme synonyme de la température équivalente pour une combinaison donnée de vent, de rayonnement, d'humidité et de température de l'air, ayant pour but de quantifier le stress thermique humain (Zare et al., 2018). C'est l'un des indices les plus populaires pour évaluer le stress climatique dans les espaces urbains extérieurs (Andreas Matzarakis et al., 2014; Pantavou et al., 2018). L'indice UTCI est incorporé aux modèles climatiques numériques, ainsi deux catégories de données d'entrée sont nécessaires pour calculer le niveau du stress thermique, des paramètres personnels comme l'habillement, le taux métabolique et la résistance thermique et des paramètres météorologiques comme la température sèche, l'humidité relative, la température radiante moyenne et la vitesse du vent à 10 m d'altitude (Blazejczyk et al., 2012; Andreas Matzarakis et al., 2014). Les niveaux du stress thermique de l'UTCI sont classés en dix catégories, allant du stress dû au froid extrême au stress extrême dû au chaud.

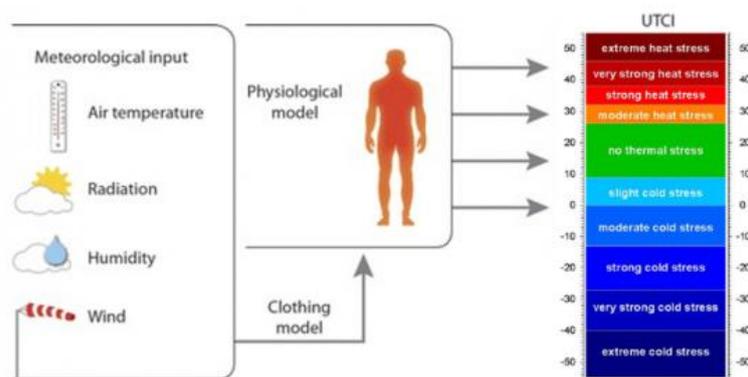


Figure II.7: Catégorisation et calcul de l'indice UTCI. (Di Napoli et al., 2018)

II.3.3.3 SET– Standard Effective Temperature

La tolérance des humains aux températures de l'air élevées ou basses peut varier en fonction de l'humidité et d'autres facteurs (R. R. Gonzalez et al., 1974). Elle constitue un indice

rationnel qui se calcule en tenant compte de la température cutanée et de l'humidité cutanée (Zhang & Lin, 2020), c'est d'ailleurs pour cette fin que SET a été utilisée dans la norme ASHRAE 55 pour le confort thermique. SET est essentiellement la température de l'air sec d'un environnement hypothétique à 50% d'humidité relative pour les occupants portant des vêtements standard pour une activité donnée dans l'environnement réel (Standard Effective Temperature (SET) and Thermal Comfort | 2016-01-18).

Tableau II.3: Catégorisation de l'indice thermique SET.(Zare et al., 2018)

Category	Thermal sensation	Physiological Stress
<17	Cool	Moderate Hazard
17-30	Comfortable	No Danger
30-34	Warm	Caution
34-37	Hot	Extreme caution
>37	Very Hot	Danger

II.3.3.4 WBGT– Wet Bulb Globe Temperature

Selon (Zare et al., 2018) WBGT a été suggérée par Yaglou et Minard en 1957 (ISO, 1989). Cet indice se calcule pour les espaces extérieurs sur la base des données météorologiques standard, dont quatre paramètres sont impliqués, à savoir la température sèche, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement. Le WBGT présente une valeur plus précise par rapport à d'autres indices de chaleur simples comme l'indice de chaleur et l'humidex (Hyatt et al., 2010).

II.3.3.5 PET– Physiological Equivalent Temperature

Le PET ou la température physiologique équivalente est tirée du model énergétique (MEMI : Munich Energy-balance Model), c'est un modèle à deux nœuds qui modélise les conditions thermiques du corps humain d'une manière physiologiquement pertinente (Hoppe, 1999). Le PET est applicable, à la fois pour l'étude de l'environnement intérieur et extérieur, son calcul implique la température sèche, l'humidité relative, la vitesse de l'air et la température radiante moyenne (Deb & Alur, 2010; Sharmin et al., 2019).

Tableau II.4: Catégorisation de l'indice thermique PET.(Zare et al., 2018)

PET	Thermal perception	Grade of physiological Stress
<4	Very cold	Extreme cold stress
4-8	Cold	Strong cold stress
8-13	Cool	Moderate cold stress
13-18	Slightly cool	Slight cold stress
18-23	Comfortable	No thermal stress
23-29	Slightly warm	Slight heat stress
29-35	Warm	Moderate heat stress
35-41	Hot	Strong heat stress
>41	Very hot	Extreme heat stress

II.3.4 Outils numériques et modèles climatiques

L'environnement bâti modifie les microclimats locaux en influençant une série de phénomènes thermodynamiques. Cependant, en raison de la nature dynamique de l'environnement urbain, il est difficile de choisir un outil numérique capable à fournir des données exploitables dans les études du microclimat urbains et du confort thermique, le choix d'un progiciel qui simule ou modélise, adéquatement tous les types de contextes physiques découle aussi bien des données exploitées (donnée d'entrée) que ceux à fournir (données de sortie).

Au cours des dernières années, les chercheurs et les concepteurs ont de plus en plus abordé la simulation et la modélisation du microclimat urbain, d'où, la prise en conscience des capacités de modélisation et des limites de l'applicabilité de ses outils est devenue critique. A notre connaissance, il existe deux progiciels utilisés dans ce genre d'étude, alors qu'en vrai, il existe plusieurs programmes ; Rayman, ENVI-met, ANSYS, Autodesk CFD, CitySim Pro, TAS, Meteodyn, Honeybee, et Ladybug, tout destinés à étudier le microclimat urbain, le confort thermique, les paramètres météorologiques et les stratégies de conception des espaces extérieurs (Albdour & Baranyai, 2019). Ainsi, pour l'ensemble des travaux scientifique analysés dans ce travail de recherche, le choix s'est limité au deux modèles microclimatiques ; celui d'Envi-Met (Park et al., 2014; W. Yang et al., 2018) et celui de RayMan (Andreas Matzarakis, 2012), utilisés séparément ou en combinaison (Abaas, 2020).

II.3.4.1 L'Outil de confort thermique CBE

CBE (Center for the Built Environment) est un outil en ligne gratuit pour les calculs et les visualisations du confort thermique, conforme aux normes ASHRAE 55–2017, ISO 7730 : 2005 et EN 16798–1 : 2019. L'outil du confort thermique CBE est librement accessible via l'URL publique suivante : <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>.

Cet outil intègre les principaux indices du confort thermique, y compris le PMV, la température effective standard SET, il fournit également des visualisations dynamiques et interactives des zones de confort thermique. Due à ses multiples applications pratiques, il est utilisé par les ingénieurs, les architectes, les chercheurs, les gestionnaires d'installations et les décideurs. (Tartarini et al., 2020a).

Développement de l'outil CBE

La première version de cet outil a été initié et mis en usage en 2013 (Schiavon et al., 2014), plusieurs fonctionnalités ont été ajoutées à la version initiale ; amélioration de la conception

de l'interface d'utilisateur en ajoutant la page "Télécharger", calcul et visualisation de la conformité de confort pour les normes ISO 7730 : 2005 et EN 16798-1: 2019, les graphiques «perte de chaleur par rapport à la température de l'air» et «vitesse de l'air par rapport à la température de service» ont été ajoutés, la mise en conformité des codes d'utilisation à la norme ASHRAE 55-2017, le calcul des indices PMV et PPD a été ajouté. Après ces modifications et ces ajouts la dernière version a vu le jour en 2019 (Liu et al., 2020; Schiavon et al., 2014).

Description et mise en fonction de CBE

L'outil de confort thermique CBE est un outil Web gratuit et open source pour calculer et visualiser les indices du confort thermique. Il est destiné à utiliser par des utilisateurs de différents domaines, notamment des ingénieurs, des architectes, des chercheurs, des éducateurs, des gestionnaires d'installations et des décideurs. Il peut même être utilisé par des utilisateurs non techniques, sans compétences analytiques.

Selon (Tartarini et al., 2020b), il est le seul outil disponible gratuitement permettant aux utilisateurs d'effectuer des calculs de confort thermique, conformément aux principales normes du confort thermique, dont les résultats sont visualisés dans une interface conviviale.

L'outil du confort thermique CBE est une application Web (CBE Thermal Comfort Tool for ASHRAE-55), l'outil intègre les principales fonctionnalités suivantes (voir figure II.8) :



Figure II.8: Page d'accueil de l'outil de confort thermique CBE.

🌀 *Visualisation des indices du confort thermique*

À mesure que les utilisateurs modifient les paramètres d'entrée, l'outil met à jour le graphique et les indices du confort thermique calculés (par exemple PMV, pourcentage prévu d'insatisfaits (PPD), SET, effet de refroidissement (CE)). Le calcul de PMV et le PPD se fait conformément aux normes ASHRAE 55–2017 ou EN 16798–1 : 2019.

🌀 *Visualisation adaptative du confort thermique*

L'outil permet de visualiser les zones du confort thermique sur un diagramme avec la température intérieure en ordonnée et différents indices de température extérieure en abscisse, conformément aux modèles adaptatifs fournis dans les normes ASHRAE 55–2017 ou EN 16798–1 : 2019. Cette visualisation peut être sélectionnée à l'aide du menu déroulant situé en haut de la section d'entrée.

🌀 *Comparaison du confort thermique*

CBE peut calculer jusqu'à trois conditions de confort thermique et les tracer sur un même diagramme psychrométrique en même temps. Par la suite, la comparaison des différentes combinaisons des conditions d'entrée est mise en étude. Autrement dit, comment les combinaisons des conditions climatiques affectent les conditions du confort thermique.

🌀 *Catégorisation du confort thermique*

L'outil de confort thermique CBE permet aux utilisateurs de définir une plage d'intervalles discrets sur lesquels la vitesse moyenne de l'air (V_a), le taux métabolique ou l'isolation des vêtements peuvent varier. Cette fonction permet aux utilisateurs d'évaluer comment les zones de confort thermique changent en fonction des paramètres d'entrée sélectionnés.

🌀 *Calcul des indices du confort thermique*

CBE permet aux utilisateurs de télécharger des données chronologiques ou de grands ensembles des paramètres d'entrée et de calculer automatiquement : PMV, PPD, SET et CE. Cette fonction peut être utilisée pour effectuer des prévisions de dépassement (annuel ou saisonnier) pour des environnements simulés ou réels.

🌀 *Évaluation d'inconfort local*

Cette fonctionnalité est accessible en cliquant sur le bouton « inconfort local ». Il comprend plusieurs modèles d'inconfort local, y compris l'asymétrie de la température radiante, le tirage de la cheville et la différence de température verticale de l'air, comme défini dans les normes ASHRAE et EN (Liu et al., 2020; Schiavon et al., 2014).

II.3.4.2 L'outil CitySim Pro

CitySim Pro est un outil de simulation numérique développé au laboratoire d'énergie solaire et du physique des bâtiments de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Cet outil est d'accès gratuit. Son téléchargement se fait en remplissant un formulaire disponible sur le site web : <http://www.kaemco.ch/download.php>.

CitySim Pro utilise une interface graphique Java pour simuler et optimiser les flux de ressources liés aux bâtiments, selon (Robinson et al., 2009) ceci se déroule suivant quatre étapes clés:

1. Définition de l'emplacement du site et des données climatiques associées.
2. Choix et ajustement des jeux de données par défaut pour les types et les catégories d'âge des bâtiments à étudier.
3. Définition de la forme 3D des bâtiments, définition des systèmes d'approvisionnement et de stockage d'énergie à modéliser, raffinement des attributs du bâtiment.
4. Analyse des données au format XML de l'interface graphique vers le solveur C ++ pour la simulation des flux des ressources horaires.

II.3.4.3 Modèle climatique par RayMan

Evaluer le microclimat urbain d'un point de vue physiologique, nécessite l'utilisation des méthodes de la biométéorologie humaine, qui traite des effets temporels du climat et de la qualité de l'air sur l'être humain. RayMan estime les flux de rayonnement et les effets des nuages et des obstacles solides sur les flux du rayonnement à ondes courtes. Le modèle climatique par RayMan prend en compte des structures complexes, convient à des fins d'utilisation et de planification au niveau local et régional. Le résultat final de ce modèle est la température radiante moyenne calculée, qui est requise dans le modèle du bilan énergétique pour les humains. Il est également, nécessaire pour l'évaluation du bioclimat urbain et des indices thermiques, comme le PMV, la température physiologiquement équivalente (PET) et la température effective standard (SET).

II.3.4.4 Modèle atmosphérique par ENVI-met

ENVI-Met est un modèle de simulation de conception urbaine en trois dimensions, développé en 1993 par Michael Bruse, pour reconstituer la triptyque surface-plante-air à l'échelle microclimatique dans l'environnement urbain. Il est souvent reconnu comme le

modèle holistique le plus complet en termes de calcul du confort humain (ENVI-Met - Decode Urban Nature with ENVI-Met Software, n.d.).

Le programme Envi-Met fait partie des principaux dispositifs de modélisation utilisés pour anticiper les conditions microclimatiques, lors de la conception et du développement urbain (Albdour & Baranyai, 2019; Sukma & Angel, 2020). Envi-Met calcule des conditions (outputs), telles que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse et le débit du vent, la température radiante moyenne et la température de surface, tout en considérant différents albédos de surfaces et propriétés des éléments physiques composants le microclimat urbain (inputs). Les indices thermiques et climatiques se calculent à l'aide du module BioMet, les données de sortie sont représentées par le module de visualisation LEONARDO.

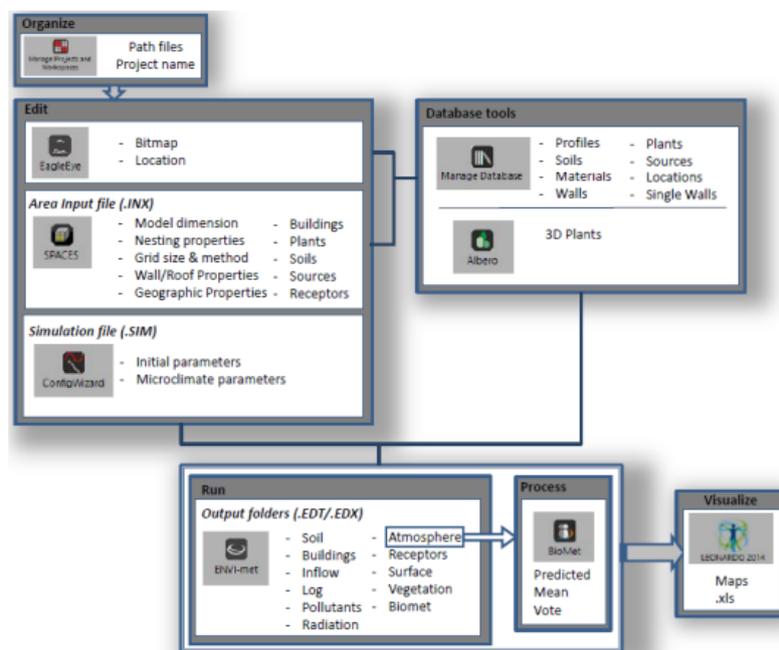


Figure II.9: Processus de simulation par Envi-Met. (Chatzinikolaou et al., 2018)

II.3.4.5 Logiciel de simulation ANSYS

C'est un Logiciel de simulation d'ingénierie et de conception 3D, il fournit des solutions hautement intégrées, avec une technologie de pointe dans tous les domaines clés, y compris la structure, la CFD, la thermique et la dynamique. Cela permet aux chercheurs aux et aux spécialistes de prédire les niveaux du confort thermique en milieu urbain. ANSYS a été utilisé dans les études du climat urbain à de nombreuses fins et pour différents phénomènes, par exemple la ventilation urbaine, le transport des polluants, la végétation urbaine et la dispersion de la chaleur anthropique (Sukma & Angel, 2020).

Récemment, l'éditeur du logiciel a lancé une méthode quantitative du vent, basée sur la simulation CFD (Quantitative CFD Wind Studies), dont la vision d'ANSYS est de simuler l'effet du vent sur le microclimat urbain pour produire un environnement sûr et agréable (Wind Microclimate Study: Use ANSYS CFD for Pedestrian Comfort Study).

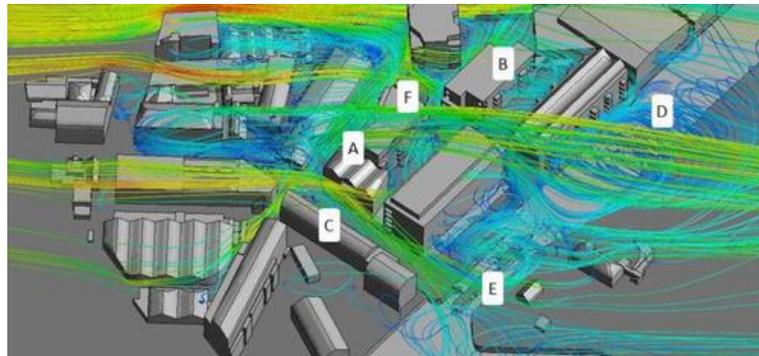


Figure II. 10: Exemple d'une modélisation par ANSYS, Projet antérieur à Bream Street, Fish Island. (*Wind Microclimate Study: Use ANSYS CFD for Pedestrian Comfort Study*)

II.3.4.6 Meteodyn WT

Un progiciel d'ingénierie numérique et de climatologie dédiée aux secteurs des énergies renouvelables, de la construction et des études éoliennes, il quantifie les ressources éoliennes dans un terrain donné, afin d'évaluer la faisabilité d'un cadre éolien souhaité. Ceci est réalisé, en tenant compte des données du vent mesurées dans une tour de mesure et des conditions du terrain (METEODYN | Numerical Wind Engineering – Software and Consultancy, n.d.).

II.3.4.7 Autodesk CFD

Le logiciel Autodesk CFD fournit des outils flexibles des flux des fluides et de simulation thermique pour aider à prendre des décisions, plus tôt dans le processus de développement du produit. Explorez et comparez facilement les alternatives de conception et comprenez mieux les implications des choix de conception à l'aide d'un environnement d'étude de conception innovant et d'outils d'automatisation (Mahmoud M. Abdelrahman et al., 2016). Le logiciel Autodesk CFD prend en charge l'échange direct des données avec la plupart des logiciels de CAO et le logiciel ; Autodesk Inventor, le logiciel Autodesk Revit, Creo, Pro / ENGINEER et SolidWorks (Albdour & Baranyai, 2019).

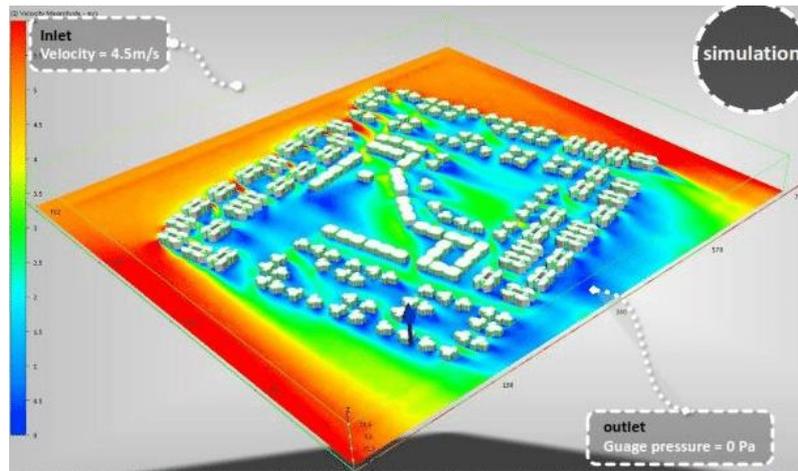


Figure II.11: Exemple du Processus de simulation - Autodesk Simulation CFD. (Mahmoud M. Abdelrahman et al., 2016)

II.3.4.8 Les plug-in Honeybee et Ladybug

Honeybee et Ladybug sont une collection d'applications informatiques gratuites qui sert de support pour les opérations de conception environnementale, réalisées par les systèmes experts et les progiciels de simulation et de modélisation microclimatique actuels. Le plug-in Ladybug est parmi les extensions les plus complètes qui connecte les interfaces de conception assistée par ordinateur (CAO) 3D à une multitude de moteurs de simulation validés. Honeybee est capable de connecter les fameux progiciels, Grasshopper 3D et Rhino à des moteurs de simulation validés comme EnergyPlus, Envi-Met, Radiance, Daysim et Open Studio pour l'énergie du bâtiment, le confort, l'éclairage naturel et la simulation d'éclairage (Ladybug & Honeybee | Parametric Monkey, n.d.).

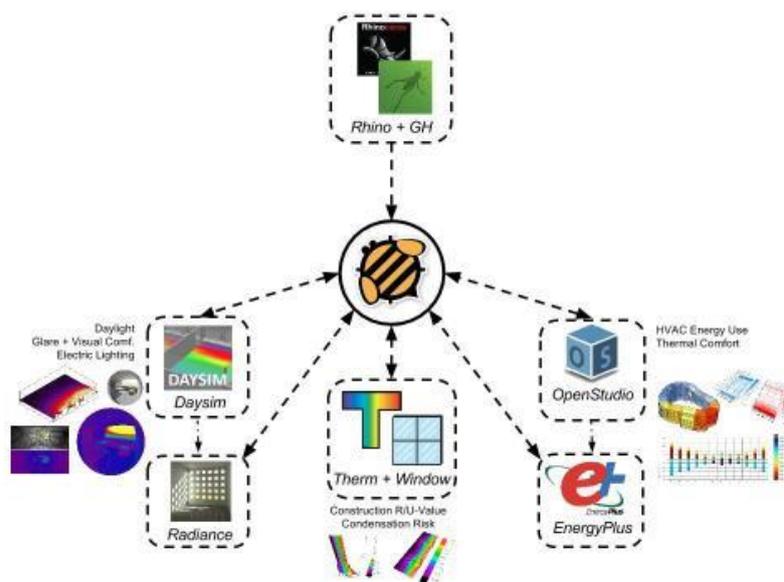


Figure II.12: Connexion des progiciels Grasshopper 3D et Rhino à des moteurs de simulation par le plug-in Honeybee. (Ladybug & Honeybee | Parametric Monkey)

II.4 Stratégies d'adaptation à l'environnement thermique

Depuis toujours, les populations et les sociétés se sont adaptées au climat local et ont fait face aux conditions climatiques difficiles, en hiver comme en été (Nash et al., 2019). Dans ce contexte, les stratégies d'adaptation sont synonymes de toutes mesures faites pour améliorer l'environnement thermique urbain, mais aussi la manière, dont les usagers de l'espace public urbain gèrent leur environnement à la recherche d'une meilleure sensation thermique (Jendritzky & Dear, 2009; Mitigation and Adaptation | Solutions – Climate Change: Vital Signs of the Planet, n.d.). En été, le rafraîchissement urbain est devenu la solution-clé pour atténuer les effets du phénomène d'îlot de chaleur urbain (Morille & Musy, 2017). De nombreux chercheurs (Mahdavinejad et al., 2013; Ojaghloou & Khakzand, 2017; Taleghani, 2018a) se sont concentrés sur les stratégies de refroidissement pour améliorer le confort climatique extérieur, tandis que (Lai et al., 2019) ont adressé une revue des stratégies d'adaptation pour améliorer le confort thermique dans les espaces extérieurs urbains. Suivant la même méthodologie, les quatre fameuses stratégies de refroidissement à savoir ; la végétation urbaine, la géométrie urbaine, les surfaces réfléchissantes et les plans d'eau, seront discutées, en se basant sur l'analyse de plusieurs études et recherches qui traitent de la thématique du confort climatique en milieu urbain, mettant en évidence l'effet de chaque stratégie sur les conditions microclimatiques et sur le confort climatique extérieur. Le schéma suivant résume l'effet des quatre stratégies d'adaptation sur les paramètres microclimatiques (figure II.13).

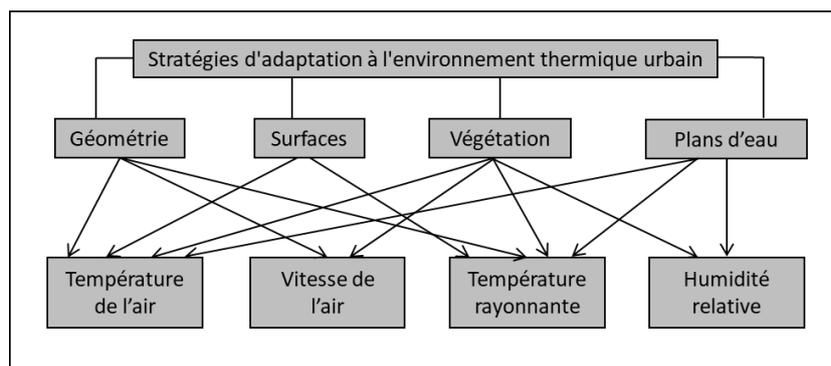


Figure II.13: Effet des stratégies d'adaptation à l'environnement thermique sur les paramètres microclimatiques. Auteur, 2020

II.4.1 Végétation urbaine

L'effet de la végétation urbaine sur le confort thermique extérieur et sur les conditions climatiques a été largement abordé, en particulier l'effet d'atténuation d'ICU et la diminution des températures de l'air (Önder & Akay, 2014). Par exemple, une étude menée dans la ville

de Querétaro, au Mexique (Colunga et al., 2015), a révélé qu'une augmentation de 50% de la couverture végétale en milieu urbain pourrait réduire l'intensité d'ICU jusqu'à 2,05 °C pendant la surchauffe estivale. La végétation se présente en milieu urbain sous forme de quatre configurations principales ; des arbres, des surfaces enherbées, des toitures et des façades végétalisées, ont tous montré une régulation microclimatique considérable en été et une atténuation significative des effets de l'ICU. (Shashua-Bar et al., 2011) ont effectué une comparaison de l'influence des arbres et des zones enherbées sur le confort thermique extérieur, en étudiant l'effet d'évapotranspiration. Ils ont trouvé que les arbres sont les plus influents, tandis que la combinaison reste la meilleure solution microclimatique. Une simulation réalisée par (Peng & Jim, 2013), a démontré que la toiture végétalisée contribue à la création d'un environnement thermique plus frais et peut offrir un certain niveau du confort thermique extérieur. En raison de leur croissance naturelle et de leurs divers avantages, les arbres sont considérés comme l'élément le plus efficace pour réduire les conditions de chaleur extrême et pour améliorer le confort thermique extérieur (Abdel-Aziz et al., 2015).

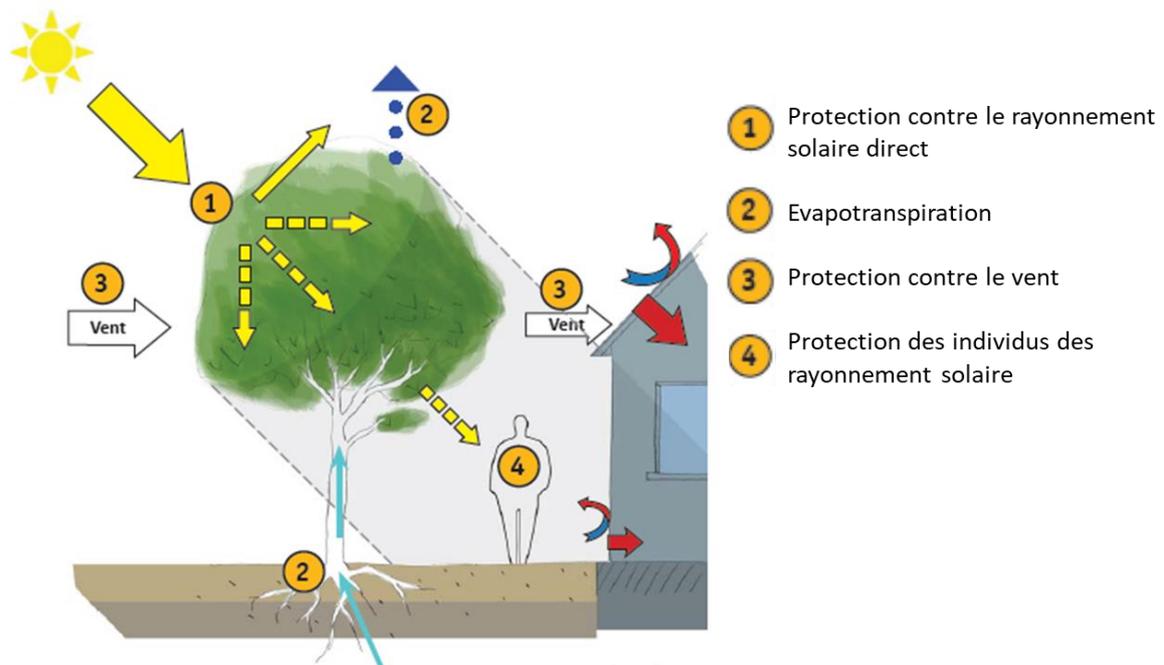


Figure II.14: Effet de l'arbre sur le bâtiment et sur l'individu. (*The Urban Forest and Ecosystem Services / Semantic Scholar, n.d.*)

II.4.1.1 Effet de la végétation sur la température de l'air

Les arbres réduisent efficacement la température de l'air grâce à deux effets ; l'ombrage par la canopée d'arbres, ce qui signifie que les radiations à ondes courtes sont bloquées et effet

d'évapotranspiration, ce qui contribue à une atmosphère plus fraîche, en ajoutant plus de vapeur d'eau. La réduction des températures de l'air par les arbres a été étudiée par de nombreux chercheurs, une étude menée à Singapour (Tan et al., 2018) a détaillé le processus de réduction de la température de l'air grâce aux deux effets déjà mentionnés. Aussi, des mesures de cinq mois à Assen, aux Pays-Bas, par (Wang et al., 2015) ont trouvé une réduction moyenne des températures de l'air de 0,6 à 0,9 K sous ombrage d'arbres par rapport à une zone non ombragée.

II.4.1.2 Effet de la végétation sur la température rayonnante

La végétation réduit efficacement le rayonnement thermique dans les espaces extérieurs urbains, les arbres peuvent éliminer une grande quantité de rayonnement solaire à ondes courtes par réflexion et par absorption (Buyadi et al., 2013; Lai et al., 2019).

Certains chercheurs ont étudié différemment l'effet des arbres sur les conditions microclimatiques, notamment sur la température radiante moyenne. Par exemple, (Aminipouri et al., 2019) ont constaté que la présence des arbres a réduit de 3,3 à 7,1 ° C de la T_{mrt} pendant les heures chaudes. De plus, une corrélation positive entre T_{mrt} et la densité de la couverture végétale a été démontrée par une modélisation météorologique. Des résultats similaires ont été trouvés récemment à Wuhan, en Chine (Huang et al., 2020).

II.4.1.3 Effet de la végétation sur l'humidité relative

La relation entre la température de l'air et l'humidité relative en été est d'ordre inverse, lorsque la végétation convertit l'eau liquide en vapeur d'eau par transpiration, la température des feuilles et de l'air environnant diminue, cette diminution s'accompagne toujours d'une augmentation de l'humidité relative (Önder & Akay, 2014; Tahir & Yousif, 2013).

II.4.1.4 Effet de la végétation sur la vitesse de l'air

Le mouvement d'air dans les espaces verts dépend de l'espacement des arbres, de la propagation de la cime et de la distribution verticale de la surface foliaire en hauteur. Cependant, une couverture arborée étendue dans les zones urbaines peut emprisonner l'air sous leurs cimes (Tahir & Yousif, 2013).

En été, les arbres agissent comme obstacles contre les vents dedans les espaces extérieurs (Abaas, 2020). Un arbre individuel par sa morphologie peut agir comme un obstacle pour le flux d'air, tandis qu'un rassemblement linéaire d'arbres peut agir comme un écran face aux poussières ; ici l'idée est que l'effet de blocage des arbres dépend de la plantation et de l'orientation de ces derniers.

II.4.1.5 Effet de la végétation sur le confort climatique

Bien que la végétation diminue la vitesse du vent (effet d'obstruction), elle améliore encore, considérablement l'environnement thermique urbain, tout en réduisant le rayonnement et en rafraîchissant l'air. Ainsi, une réduction considérable des températures de l'air et du T_{mrt} avec une augmentation de l'humidité relative en été pourrait conduire à une régulation microclimatique positive. Par conséquent, une zone végétalisée pourrait être une stratégie d'adaptation efficace et confortable dans des conditions de chaleur extrême. Ce qui est étayé par des enquêtes approfondies portant sur les indices du confort thermique (de Abreu-Harbich et al., 2015 ; Yang et al., 2018).

II.4.2 Géométrie urbaine

Les villes sont caractérisées par des diverses structures géométriques avec des différents modèles morphologiques. La géométrie urbaine affecte, principalement l'environnement thermique urbain en modifiant les échanges radiatifs au sein des espaces extérieurs (Erell, 2012; Lin et al., 2017). Le modèle compact a été largement utilisé par les anciennes villes des régions chaudes, alors qu'il est recommandé dans la conception de nouvelles villes. Cependant, (Fazia Ali-Toudert et al., 2005) ont démontré que la morphologie compacte et dense de Beni-Isguen-Algérie a affectait considérablement le confort thermique extérieur. Des études antérieures portant sur l'environnement thermique extérieur ont principalement utilisé les trois paramètres suivants pour quantifier l'impact de la géométrie urbaine, le facteur de vue du ciel (SVF), le rapport hauteur / largeur (H / W) et l'orientation des rues du canyon (Lau et al., 2015; Matallah et al., 2020).

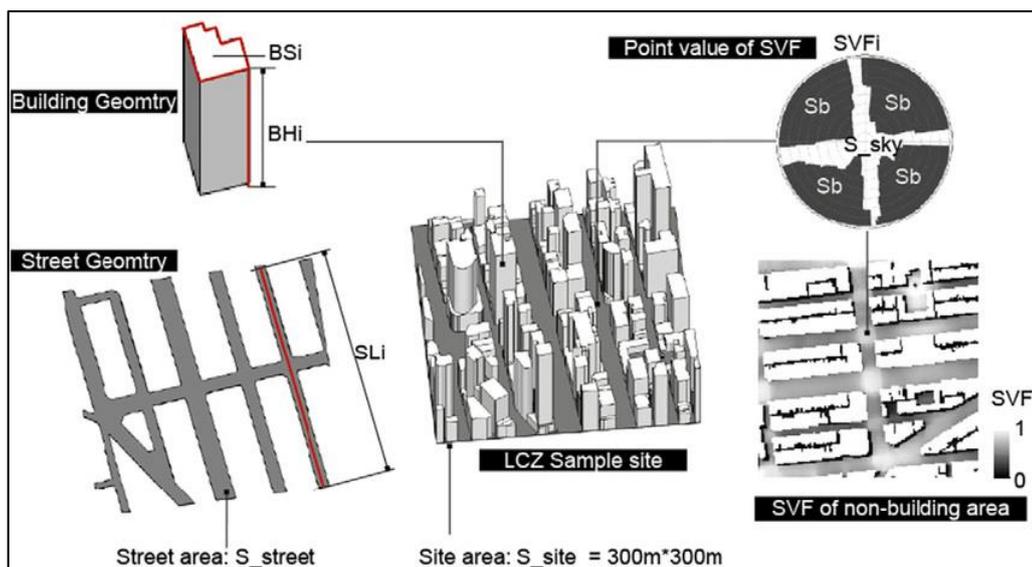


Figure II.15: Paramètres influant la morphologie urbaine. (Zheng et al., 2018)

II.4.2.1 Effet de la géométrie sur la vitesse de l'air

Dans les études de la géométrie urbaine, la vitesse du vent est généralement liée à l'ouverture au ciel (Facteur SVF). La vitesse de l'air a un effet moindre dans les modèles compacts car les bâtiments ralentissent énormément l'écoulement et le déplacement des particules d'air (Lai et al., 2019). Malgré cela, une forte corrélation a été mise en évidence entre la température de l'air et le flux du vent dans les canyons urbains. Une simulation numérique menée par (Priyadarsini & Wong, 2005) à Singapour, indique que les immeubles de grande hauteur peuvent améliorer les vitesses de l'air et en même temps, réduire les températures de l'air dans les canyons. Une autre modélisation numérique au Bangladesh par (Kakon et al., 2009), a constaté que les vitesses du vent s'accompagne d'une diminution des températures de l'air et des températures surfaciques dans les canyons.

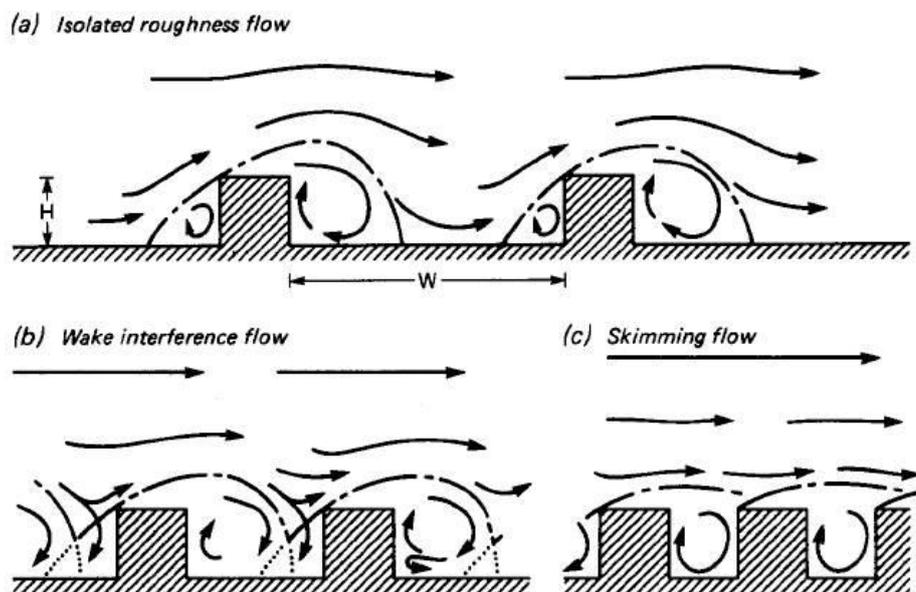


Figure II.16: Régimes d'écoulement d'air dans des différentes géométries urbaines. (04.03 Near Ground Wind Speeds, n.d.)

II.4.2.2 Effet de la géométrie sur la température rayonnante

De nombreuses études ont démontré l'impact positif des paramètres mentionnés ci-dessus sur les conditions microclimatiques. Parmi lesquelles une recherche (Lau et al., 2015) qui a examiné l'effet de la géométrie urbaine en utilisant la T_{mrt} comme indicateur du stress thermique dans trois villes européennes, ils ont constaté que la géométrie urbaine dense, des canyons urbains et des rues étroites ont généré une faible T_{mrt} en été. Ainsi, les valeurs élevées de T_{mrt} pendant la journée reflètent la quantité élevée du rayonnement à ondes courtes dans les espaces extérieurs urbains et vice versa.

II.4.2.3 Effet de la géométrie sur la température de l'air

Généralement, bloquer le rayonnement solaire direct dans une zone compacte est suffisant pour la rendre plus fraîche qu'une zone ouverte. Ceci signifie que l'ouverture au ciel (SVF élevé) génère moins de rayonnements à ondes longues pendant la journée, elle engendre des températures de l'air élevées en été chaud. De tels résultats ont été soutenu par (Baghaeipour & Nasrollahi, 2019), dont l'étude menée a confirmé la relation directe entre l'ouverture (SVF) et la température de l'air. Selon des mesures continues à Melbourne, Australie (Coutts et al., 2016), une réduction d'environ 0,2 à 0,6 ° C a été observée et le rafraîchissement diurne maximal a atteint 1,5 ° C dans le canyon peu profond (Coutts et al., 2016).

II.4.2.4 Effet de la géométrie sur le confort climatique

Après avoir étudié l'effet de la géométrie urbaine sur les conditions atmosphériques, nous pouvons conclure que la géométrie peut améliorer l'environnement thermique urbain en été, à travers ; la maîtrise du rayonnement solaire, de la température d'air et de la vitesse du vent. Quel que soit l'effet du vent, la réduction du rayonnement et des températures de l'air est utile pour offrir un meilleur confort climatique extérieur, durant les journées chaudes d'été. Ceci concorde avec plusieurs investigations, utilisant les indices thermiques pour mesurer le confort climatique dans les espaces extérieurs. Une simulation numérique a comparé l'indice PMV dans trois différents modèles géométriques au Caire, Égypte (Fahmy & Sharples, 2008), où les auteurs ont constaté que la géométrie compacte et dense est la plus confortable pendant la journée. Un degré très élevé du confort thermique extérieur a été trouvé dans les canyons urbains à Fribourg³ et à Nanjing⁴, par comparaison des valeurs de PET en été (F. Ali-Toudert & Mayer, 2007; Ji-Yu Deng, 2019).

II.4.3 Surfaces réfléchissantes

L'environnement urbain est composé essentiellement de trois types de surfaces ; l'enveloppe des bâtiments (toitures et façades), les routes (rues et trottoirs) et les espaces verts. La réflectivité en milieu urbain a été toujours liée au rehaussement des températures urbaines, d'où l'absorption excessive de chaleur solaire par les structures urbaines contribue, fortement au développement des îlots de chaleur urbains. Par ailleurs, en réfléchissant une quantité considérable du rayonnement solaire, ces surfaces peuvent contribuer de manière

³ Fribourg-en-Brisgau, ville universitaire allemande dynamique, située dans le sud-ouest de l'Allemagne.

⁴ Nanjing, ville appartient à la province Jiangsu et au comté Nanjing City de la Chine.

significative à lutter contre ce phénomène (Sen et al., 2019). En effet, la capacité de réflectivité de chaque surface est mesurée par le pourcentage de rayonnement solaire réfléchi (Albédo), il est donc conseillé d'utiliser des matériaux à albédo élevé en milieu urbain pour éviter la surchauffe d'été (Santamouris, 2013).

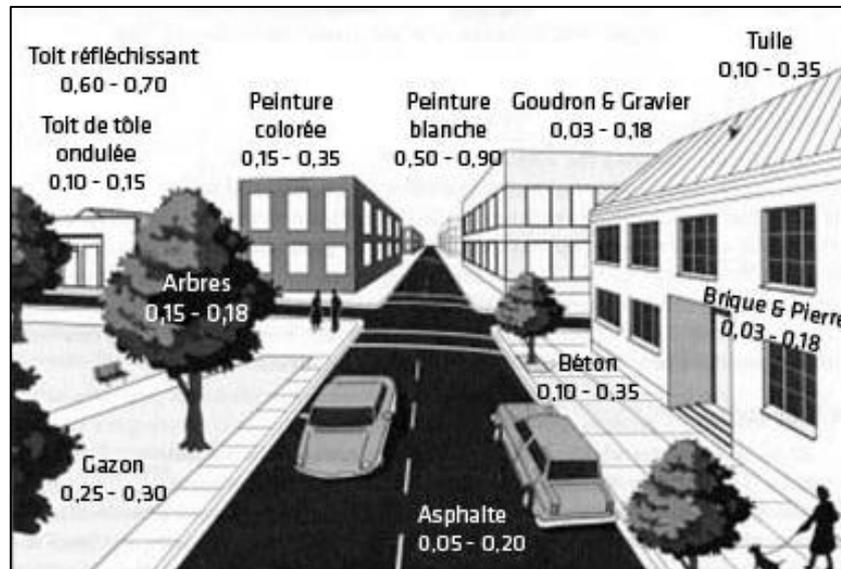


Figure II.17: Divers Albédos de l'environnement urbain. (Sobstyl et al., 2018)

II.4.3.1 Effet des surfaces réfléchissantes sur la température rayonnante

La surface réfléchissante influe, principalement l'environnement thermique urbain en modifiant le rayonnement. En réfléchissant une grande quantité du rayonnement solaire, la surface réfléchissante absorbe moins de rayonnement solaire et donc fournit des températures surfaciques inférieures. Beaucoup de recherches ont abordé le sujet de diminution de la température des surfaces à albédo élevé, parmi entre autres, la simulation conduite par (X. Yang et al., 2013) en Chine, les résultats ont montré une augmentation de 8 à 14 K en T_{mrt} lorsque l'albédo au sol a été augmenté de 0,4.

II.4.3.2 Effet des surfaces réfléchissantes sur la température de l'air

Les matériaux avec albédo élevé réduisent la température de la surface, diminuent le transfert de chaleur par convection de la surface à l'air, produisant ainsi des températures d'air plus fraîches que la surface à faible albédo. Une étude a été menée en Irak (Al-hafiz et al., 2017), où les auteurs ont constaté que l'utilisation des matériaux à haute réflectivité a conduit à un changement important des températures des surfaces, ce qui contribue à une forte réduction (11 ° C) des températures de l'air en milieu urbain.

II.4.3.3 Effet des surfaces réfléchissantes sur le confort climatique

La diminution des températures de l'air peut être estimée en connaissant la quantité d'irradiation solaire absorbée et le rayonnement infrarouge réémis par les surfaces bâties. La forte réflectance solaire des surfaces bâties peut également diminuer les températures extérieures rayonnantes et celles de l'air. Par la suite, offrir un certain niveau du confort thermique (Taleghani, 2018b). A titre d'exemple, une étude menée à Singapour (D E V S et al., 2019) a montré que l'application des surfaces à albédo élevé réduit la température rayonnante moyenne jusqu'à 1,2 ° C pendant la journée, ce qui améliore le niveau de confort thermique extérieur de 34%.

II.4.4 Plans d'eau

Les plans d'eau peuvent naturellement modifier l'environnement thermique urbain par effet d'évaporation. D'où, la capacité thermique de l'eau aide à fournir des températures locales fraîches par rapport à son environnement dans les zones urbanisées. En outre, les plans d'eau, en tant que surfaces humides peuvent conduire à un environnement urbain thermiquement modéré, en émettant moins de rayonnement. Alors que les plans d'eau sont considérés comme une stratégie d'atténuation significative (Lai et al., 2019). Ce qui est confirmé par de nombreux chercheurs sous différents climats. Par exemple, une étude menée à Alexandrie, en Égypte (Ayad et al., 2020), où les auteurs ont constaté que les plans d'eau constituent une stratégie importante de rafraîchissement urbain et d'économie d'énergie.

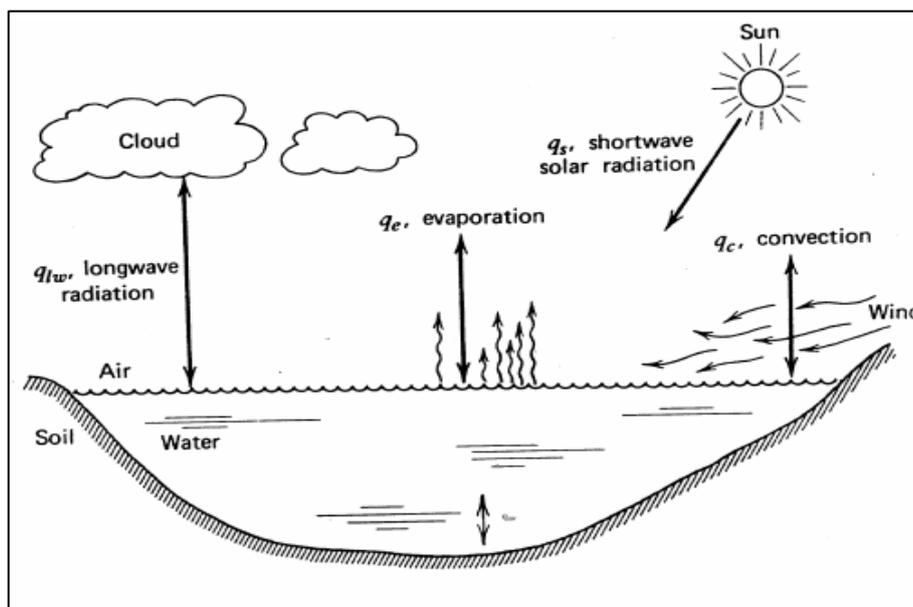


Figure II.18: Processus d'évaporation de l'eau. (Auteur, 2018)

II.4.4.1 Effet des plans d'eau sur la température rayonnante

La capacité thermique de l'eau est estimée à environ quatre fois de celle des matériaux de construction courants, tels que le béton, le granite, l'asphalte et le marbre (Chatzidimitriou & Yannas, 2015). Par conséquent, l'absorption d'une même quantité de rayonnement solaire par l'eau, présente une augmentation de température beaucoup plus faible que ces matériaux.

II.4.4.2 Effet des plans d'eau sur la température de l'air

Il est évident que les plans d'eau contribuent à la diminution des températures de l'air dans les espaces urbains par effet d'évaporation. En outre, l'air ambiant est rafraîchi, en raison du transfert de chaleur par convection entre l'air ambiant et la surface de l'eau. L'effet de rafraîchissement d'un plan d'eau dépend de nombreux facteurs, tels que la taille, la géométrie et l'emplacement du plan d'eau (Lai et al., 2019).

II.4.4.3 Effet des plans d'eau sur l'humidité relative

L'évaporation de l'eau augmente l'humidité de l'air, dans des conditions chaudes. Ainsi, une humidité élevée peut empêcher la perte de chaleur. Tout comme la température l'humidité fourni par les plans d'eau induit un effet de rafraîchissement en milieu urbain, dont il dépend des facteurs physiques comme le démontre (Zeng et al., 2017).

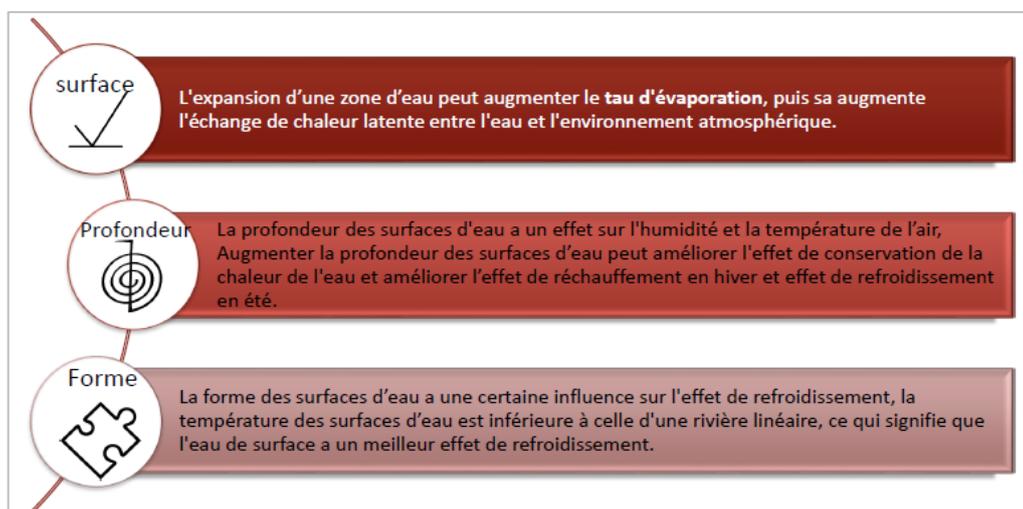


Figure II.19: Caractéristiques physiques des étendus d'eau. (Auteur, 2018)

II.4.4.4 Effet des plans d'eau sur le confort climatique

Plusieurs recherches ont démontré que la présence des plans d'eau en milieu urbain conduit à de meilleures conditions thermiques en été et offre un certain degré du confort thermique

extérieur aux occupants. Le projet « REALCOOL⁵ » a testé l'effet de rafraîchissement des plans d'eau sur la température de l'air et sur le confort thermique extérieur aux Pays-Bas. En conséquence, une forte réduction de la température quotidienne de l'air et de l'indice PET a été observée de 0,6 ° C et 1,9 ° C (Jacobs et al., 2020).

II.5 Conclusion

Le confort climatique a été toujours considéré comme un garant pour l'usage et la fréquentation des espaces extérieurs.

Mesurer le niveau du confort climatique en extérieur est une tâche complexe qui nécessite une compréhension approfondie de l'interaction entre l'utilisateur et les propriétés thermiques de l'environnement urbain, qui lui en associées à une échelle spatiale fine, celle du piéton. En effet, la sensation thermique et l'appréciation des paramètres microclimatiques fournies par les usagers dans un endroit à un moment donné est le fruit d'une telle interaction.

Ainsi pour qualifier un endroit de climatiquement confortable, l'ensembles des paramètres microclimatiques doivent être étudiés, en se référant à la composition de l'environnement thermique urbain, de sorte que la sensation thermique soit traduite en situation de confort, ce que justement a traité ce chapitre.

L'exposition des quatre fameuses stratégies d'adaptation à l'environnement thermique urbain ; végétation, géométrie, surfaces réfléchissantes et plans d'eau est venue à la fin du chapitre pour y illustrer le processus de traduction de la sensation humaine des conditions thermiques sous différents environnements à une sensation du confort climatique dans les espaces extérieurs.

⁵ REALLY COOL- Really cooling water bodies in cities, Climatelier 2016-2018.

Chapitre III :

Présentation de l'Environnement d'Etude

III. Présentation de l'environnement d'étude

« The chief function of the city is to convert power into form, energy into culture, dead matter into the living symbols of art, biological reproduction into social creativity » Lewis Mumford

III.1 Introduction

Les villes des environnements arides sont confrontées à des défis complexes qui touchent d'une façon ou d'autre à la santé publique et au confort humain. Il est évident que ces régions doivent planifier, concevoir et construire des villes plus durables et résilientes. L'adoption des stratégies qui combinent l'innovation technologique avec des solutions adaptées localement et climatiquement appropriées semble la solution clé aux problèmes environnementaux à long terme.

Ce chapitre s'attache principalement à démontrer l'appartenance de la ville de Guelma au climat semi-aride. Il cherche ainsi à comprendre les logiques constitutives et les mécanismes de production du cadre physique de la ville. Notamment, la configuration de l'espaces extérieur et la prise en compte des éléments naturels dans sa conception, sa construction et son usage. La première partie présente le cadre général de l'aridité et expose les caractéristiques des régions à climat semi-aride. Avant de commencer la démonstration, nous dressons un portrait du contexte général de la ville, en une partie séparée. Dans la troisième partie, nous conduisons une analyse climatique de la décennie 2008-2017 en utilisant plusieurs méthodes et outils bioclimatiques. La dernière partie expose un large aperçu sur la configuration, la conception et l'aménagement de ses espaces extérieurs.

III.2 L'environnement semi-aride

Cette première partie s'attache à situer l'environnement semi-aride par rapport au cadre général de l'aridité et à présenter les caractéristiques des régions à climat semi-aride.

III.2.1 Origine et répartition

III.2.1.1 Signification de l'aridité

L'aridité est un phénomène climatique impliquant une pluviométrie faible. Dans les régions dites arides ou sèches, les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle

(*Indices d'aridité — Wikipédia*). Ces régions présentent une diversité du milieu naturel qui capable à définir l'environnement aride, tels que la forme des terrains, les sols, la faune, la flore, l'équilibres hydriques et l'activité humaine. Ainsi, l'aridité est exprimée par un indice AI^1 représentant la proportion directe entre la précipitation et l'évapotranspiration potentielle :

$$AI = \frac{P}{PET}$$

Avec PET est l'évapotranspiration potentielle et P est la moyenne annuelle des précipitations.

Il peut être déterminé aussi en utilisant la formule de De Martonne² :

$$I = \frac{P}{T + 10}$$

Avec P est la précipitation totale annuelle et T est la température moyenne annuelle, le degré d'aridité est mesuré alors suivant la catégorisation dans le tableau suivant.

Tableau III.1: Catégorisation et de degré d'aridité.

Catégorie	$I < 5$	$5 < I < 10$	$10 < I < 20$	$I > 20$
Degré d'aridité	Hyperaride	Arde	Semi-aride	Subhumide

III.2.1.2 Causes de l'aridité

Les causes d'aridité se résument dans les trois points suivants (*Chapitre I - Les Environnements Arides*):

- La situation des déserts continentaux subtropicaux sous les anticyclones dynamiques permanents en altitude.
- Le traitement des déserts continentaux extratropicaux comme des déserts d'abri, la subsidence y étant liée au phénomène de foehn.
- L'origine des déserts côtiers qui remonte aux subsidences thermiques affectants l'atmosphère au-dessus des courant froids et l'effet stabilisateur qui résulte du refroidissement des masses d'air par en bas.

¹ Programme des Nations Unies pour l'environnement, *World Atlas of Desertification*, 1992.

² Emmanuel de Martonne, géographe et climatologue français, indice d'aridité d'une région.

III.2.1.3 Degré d'aridité

La répartition de l'aridité est faite en fonction de l'indice d'aridité AI, ce dernier a permis de définir quatre milieux arides, par lesquels chaque un couvre une superficie des terres mondiales comme il est montré dans (Tableau III.2).

1. Milieu hyperaride : sur le plan physique ce milieu est dépourvu de végétation. Les pluies sont peu fréquentes et irrégulières avec de faibles précipitations annuelles qui ne dépassent pas les 100 millimètres.

2. Milieu aride : se caractérise par des précipitations extrêmement variables, avec des quantités annuelles allant de 100 à 300 millimètres, la couverture végétale est composée initialement de plantes herbacées.

3. Milieu semi-aride : se caractérise par une couverture végétale variée avec diverses espèces d'arbrisseaux et d'arbres. La précipitation annuelle varie de 300-600 à 700-800 millimètres, avec des pluies d'été, et de 200-250 à 450-500 millimètres avec des pluies d'hiver.

4. Milieu subhumide sec : ce milieu partage les mêmes caractéristiques du milieu semi-aride présentant une augmentation dans les valeurs annuelles d'humidité due au phénomène d'évapotranspiration.

Tableau III.2: Limites des divers degrés de l'aridité. (*Indices d'aridité — Wikipédia, n.d.-b*)

Classification	Indice d'aridité	La superficie terrestre mondiale
Hyperaride	$AI < 0,05$	7,5 %
Aride	$0,05 < IA < 0,20$	12,1 %
Semi-arides	$0,20 < IA < 0,50$	De 17,7 %
Subhumides sèches	$0,50 < IA < 0,65$	De 9,9 %

III.2.1.4 Climats arides

En général, les environnements à climat aride sont caractérisés par des chaleurs excessives et des précipitations insuffisantes, la distinction des différents climats est faite selon les différences de température, de saison des pluies et de degré d'aridité.

Climat méditerranéen : la saison des pluies se trouve en automne et en hiver avec des étés chauds et secs ; les températures hivernales sont douces, avec une saison humide allant d'octobre à avril ou mai, suivie de cinq mois de saison sèche.

Climat tropical : dans ce climat plus on est loin de l'équateur, plus la saison des pluies est courte, ce qui fait que les précipitations se produisent majoritairement en été.

Climat continental : ce climat se caractérise par des précipitations régulièrement réparties sur toute l'année, avec plus de pluie en été.

III.2.2 Identification du climat semi-aride

Il est appelé aussi climat semi-désertique. Cependant, le climat semi-aride présente moins d'aridité par rapport au climat désertique. Caractérisé par une faible pluviométrie dont l'évaporation excède souvent les précipitations, avec une saison sèche s'étendant sur la plus grande partie de l'année et une saison humide, avec des faibles précipitations entre 200 et 400 mm/an (Gand, n.d.).

Vue le manque de documentation sur le climat semi-aride, nous avons proposé une méthodologie de recueil des données, ayant pour but d'identifier les caractéristiques propres à ce climat. Comme première étape nous avons sélectionné un ensemble de ville à climat semi-aride en s'appuyant sur la carte de distribution du climat semi-aride dans le monde (Figure III.1). La deuxième étape consiste à calculer les moyennes annuelles des quotients des différents paramètres météorologiques.

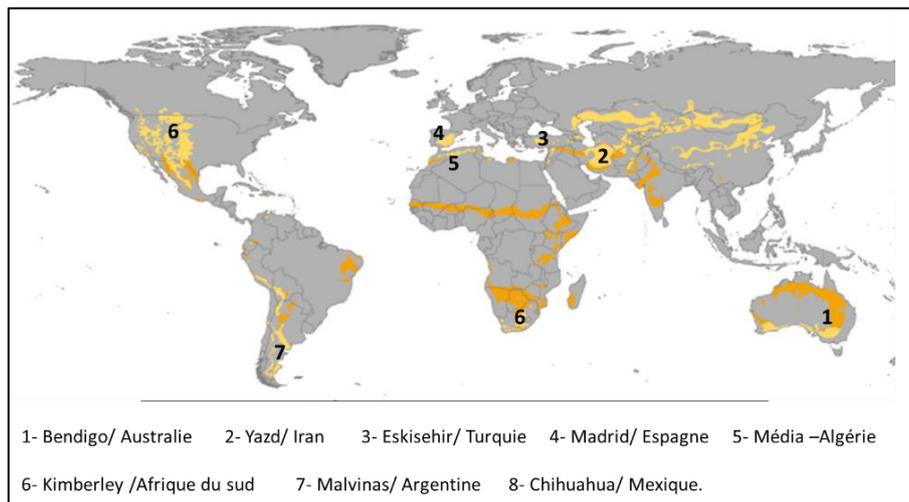


Figure III.1: Répartition du climat semi-aride dans le monde. (*Climat Semi-Aride* — Wikipédia, n.d.)

III.2.2.1 Météorologie dans les zones semi-aride (*La Météo Typique Partout Dans Le Monde - Weather Spark, n.d.*)

Température

Les zones semi-arides se caractérisent, généralement par des étés courts de 03 à 05 mois, avec un climat chaud à très chaud. Les hivers sont partiellement longs froids et secs à très froids. Le climat est en grand part dégagé, d'où les températures varient entre -3°C et 36°C. Il est à noter aussi que les régions à climat semi-aride peuvent subir de forts mouvements caniculaires situés souvent en mois de juillet et d'aout.

Soleil et rayonnement solaire

Le rayonnement solaire incident moyen connaît une variation saisonnière considérable au cours de l'année. La période la plus lumineuse de l'année dure 3,5 mois, avec un rayonnement solaire incident à ondes courtes par mètre carré supérieur à 6 kWh, La période la plus sombre de l'année dure 3,5 mois, avec un rayonnement solaire incident à ondes courtes par mètre carré inférieur à 3.5 kWh.

Pluie et précipitation

Dans les régions semi-aride les précipitations sont souvent fortes en saisons froides, donc elles durent de 05 à 08 mois avec une probabilité de précipitation quotidienne à 15%. La saison chaude peut y avoir des précipitations plus basses. Pour les jours de précipitation, nous distinguons les jours avec pluie seulement, neige seulement ou un mélange des deux. En fonction de ce classement, la forme de précipitation la plus courante au cours de l'année est la pluie seulement.

Humidité

Le niveau d'humidité perçu aux régions à climat semi-aride, tel que mesuré par le pourcentage de temps durant lequel le niveau d'humidité est lourd, oppressant ou étouffant, ne varie pas beaucoup au cours de l'année. Les mois froids représentent une augmentation légère du taux d'humidité estimé de 6% à 11%.

Vent

Le vent observé à un emplacement donné dépend fortement de la topographie locale et d'autres facteurs. La vitesse et la direction du vent instantané varient plus que les moyennes horaires. La végétation contribue grandement à la direction et la vitesse du vent, les milieux semi-arides sont classés comme des zones venteuses à vents chauds.

III.2.2.2 Plantation et végétation

La végétation a été toujours armée pour supporter l'aridité et pour faire face aux adversités que les milieux arides génèrent, notamment la sécheresse estivale. Les zones à climat semi-aride peuvent accueillir une agriculture pluviale avec la présence de l'élevage, en effet la plupart des villes semi-arides sont d'une vocation agropastorale ayant la chance d'être entouré souvent de zones boisées. La végétation est alors présentée par diverse espèces.

Plantes graminées et graminiformes

Les graminées ou Poaceae, sont une famille de plantes monocotylédones de l'ordre des Poales, qui comprend environ 12 000 espèces groupées en 780 genres, on y trouve la plupart des espèces appelées communément les herbes et les céréales.



Figure III.2: Plantes graminées et graminiformes. (*Famille Poaceae: Description et Genres, n.d.*)

Arbrisseaux et arbres

D'après les études botaniques, les régions à climat semi-aride supportent une végétation indigène très diversifiée, composée de plusieurs espèces, dont les essences d'arbres sont souvent à production plus ou moins régulières.



Figure III.3: Arbres à production régulière dans les zones semi-aride. (*Chapitre II - Fonction et Place Des Arbres et Arbustes Dans Les Zones Arides, n.d.*)

III.3 La ville de Guelma un cas témoin à étudier

Cette seconde partie, présente la ville de Guelma comme organisme vivant produit à travers le temps, ainsi que les mécanismes de production de son cadre physique et les potentialités qu'elle dispose.

III.3.1 Situation géographique

La ville de Guelma, qui est la capitale d'une wilaya portant le même nom, se situe dans le nord-est de l'Algérie, à 65 km seulement de la mer Méditerranée. Nichée aux pieds des montagnes ; Maouna, Dbegh et Houara, à 290 mètres au-dessus du niveau de la mer. De plus Guelma, se trouve sur un carrefour de plusieurs routes de transit reliant la côte avec l'intérieur du pays, ce qui en fait un point stratégique important.

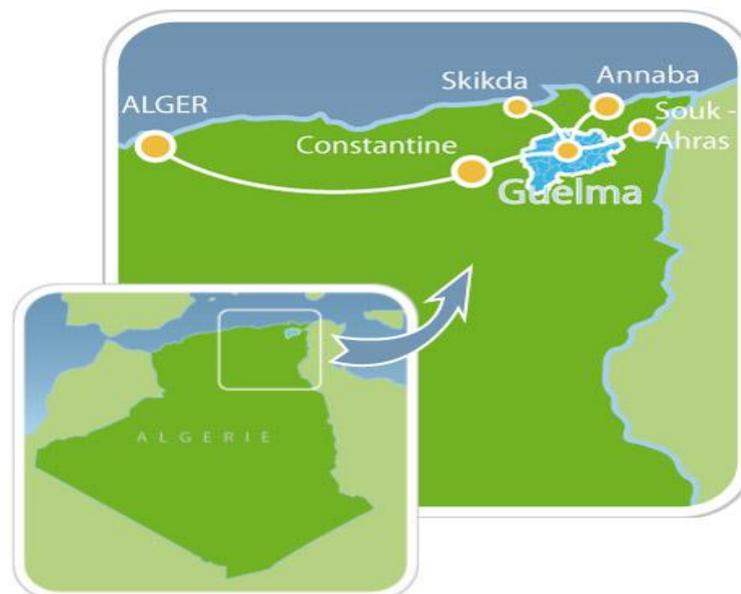


Figure III.4: Situation géographique de la ville de Guelma. (Blog of Guelmacity - Skyrock.Com, n.d.)

La ville de Guelma est limitée par les communes suivantes :

Nord : Héliopolis.

Sud : Bendjerah.

Est : Belkheir.

Ouest : Hammam Debagh.

Nord-Ouest : Medjez Amar

III.3.2 Contexte historique (*Histoire - Guelma*, n.d.)

Guelma est l'une des plus anciennes villes du nord-africain. Son histoire commence avec la création de la ville numide "Malacca" sous le règne de Massinissa. Des mentions latines attestent que Guelma s'appelait "Calama", les récits des batailles que Jugurtha y livra en 109 avant J.C aux troupes romaines rapportent des faits historiques confirment que l'antique Calama fut un centre urbain relativement important au cours du IIe et IIIe siècles après J.C.

Possidius, le biographe de saint augustin rapporta qu'après la reconquête de l'Afrique du Nord par les Byzantins, Calama tomba au pouvoir de Genséric.

Au cours du IXe siècle des tribus arabes s'étaient déjà installées dans la région de Calama, en particulier les Banou Hillal. Calama fut une région attractive pour les anciennes civilisations, entre autres la civilisation arabo-musulmane qui marquera à jamais, l'histoire de Calama comme l'indiquai Ibn Khaldoun.

La région de Calama a connu la présence des ottomanes, conquise en 1834 par les Français, elle accueillit plusieurs générations de colons et des pieds-noirs. La résistance de la population contre le colonialisme a fini par les massacres du 8 mai 1945.

L'office de tourisme de Guelma résume son histoire comme se suit : « *Une ville qui a vécu les guerres puniques, connu la colonisation romaine, et côtoyé Byzance avant de rentrer dans la spiritualité de l'Islam, pour retomber dans l'emprise des ottomans et replonger dans la colonisation française et retrouver enfin l'indépendance. Guelma est Wilaya depuis 1974 et Ville universitaire depuis 1986* ». (*Histoire - Guelma*, n.d.)

III.3.3 Contexte géophysique (*Monographie de La Willaya de Guelma.*, 2015)

Sur le plan géophysique, le terroir de Guelma est subdivisé en quatre grands ensembles, la Zone de Guelma, la Zone de Bouchegouf, la Zone de Oued Zénati et la zone de Tamlouka. La ville de Guelma fait partie du premier ensemble qui est organisé en auréole, tout autour de la plaine centrale constituée de terrasses alluviales qui s'étalent le long de la vallée du Seybouse.

III.3.3.1 Relief et topographie

Guelma se situe au cœur d'une grande région agricole à 290 m d'altitude, elle se caractérise par un relief diversifié, du fait d'être entourée de montagnes à haute altitude (Maouna 1.411 m, Dbegh 1.060 m, Houara 1.292 m) ce qui lui donne le nom de ville assiette.

La région de Guelma, se bénéficie d'une importante couverture forestière et le passage du Seybouse qui constitue le principal cours d'eau.

III.3.3.2 Hydrologie

Les nappes captives de la région de Guelma constituent les plus importantes nappes du territoire. Elles s'étendent sur près de 40 Km le long du sous bassin versant de Seybouse et sont alimentées par les infiltrations et les ruissellements qui déversent dans l'Oued Seybouse avec un débit exploitable de 385 l/s.

III.3.4 Potentialités naturelles de la région de Guelma (Monographie de La Wilaya de Guelma., 2015)

III.3.4.1 Potentialités agricoles

Le territoire de Guelma est essentiellement d'une vocation agricole, avec une surface agricole totale (S.A.T) de 264.618 Ha, soit 71,77 % de la superficie totale, le potentiel agricole de la région de Guelma est partagé comme montre le tableau suivant :

Tableau III.3: Cultures et superficies agricoles pour la région de Guelma. (DSA,2012)

Culture des céréales	Surface (ha)	Fourrage	Culture maraichère	Surface (ha)	Surface T irriguée
Blé dur	30	Fourrage naturelle	Pomme de terre	02	650 ha
			Tomate maraichère	01	
Blé tendre	3		Salade	0.5	
			Oignon sec	01	
			Piment et poivron	02	
Orge	2		Tomate industrielle	10	

III.3.4.2 Potentialités forestières

Superficie couverture forestière totale : 105.395 ha, soit un taux de 28,59 % de la superficie totale de la Wilaya.

Paysage forestier : discontinu et hétérogène confiné dis continuellement dans des massifs et répartis d'Ouest en Est.

Grands espaces de terrains : à vocation forestière dans la partie Sud-est.

Important potentiel de bois : composé de chêne zen et liège, forêts de Béni Salah à Bouchegouf, de Houara à Ain Ben Beida et Djeballah, Mahouna à Ben Djerrah et Béni

Medjeled à Bouhamdane, totalisant près de 19.771 ha de forêts et moyennant une production de l'ordre de 3.000 Stères de Chêne Zen et chêne liège et de 2.000 m³ de bois.



Figure III.5: Vue sud de la couverture forestière de Guelma. (*Les Forêts de Guelma, Une Échappatoire Pour Les Familles Face à La Chaleur, n.d.*)

III.3.4.3 Potentialités hydrauliques

Selon la monographie de la willaya, le territoire Guelmi dispose de 151,81 Million m³ d'eaux mobilisable, dont la répartition est de l'ordre suivant :

Eaux souterraines

- 04 sous bassins versants (hydriques).
- 1620 points d'eau opérationnels totalisant un potentiel total mobilisable de 94,1 Millions m³/an.

Eaux superficielles

- Barrage de Bouhamdane avec 185 millions m³
- Barrage de Medjez-Beggar (Ain Makhoulouf) avec 2,86 millions m³
- Retenue de Guefta (Nechmeya) avec 0.44 millions m³
- Un important nombre de retenues collinaires (16) avec 0.51 millions m³.



Figure III.6: Barrage Bouhamdane à Guelma en état rempli. (*Le Barrage de Bouhamdane (Guelma) Rempli à 100 % - Algerie360, n.d.*)

III.4 La ville de Guelma appartient-elle au climat semi-aride !

Cette partie vise à dresser un constat climatique actualisé de l'agglomération de Guelma en se basant sur les données climatiques obtenus à l'aide de l'application Climate Toolbox³.

En premier lieu, nous avons défini le climat à Guelma à travers l'évolution des principaux paramètres climatiques le long de la décennie 2008 – 2017. Puis, nous avons conduit une analyse bioclimatique qui a pour but de définir l'étage bioclimatique, auquel appartient la ville de Guelma, ainsi que les différentes zones climatiques.

III.4.1 Climat et météo à Guelma

III.4.1.1 Température de l'air

Le graphe ci-dessous montre l'évolution des moyennes mensuelles des températures pendant la décennie allant du 2008 au 2017. Les températures moyennes maximales varient entre 14.2°C -une valeur minimale relevée le mois de janvier- et 35.1°C -une valeur maximale au mois de juillet-. Par ailleurs, les moyennes minimales varient entre 4.8°C enregistré le mois de février et 19.6°C enregistré le mois d'août.

L'écart moyen entre les températures maximales et celles minimales pour la décennie étudiée (2008-2017) est de 12°C, l'écart maximal a atteint 16°C en mois de juin.

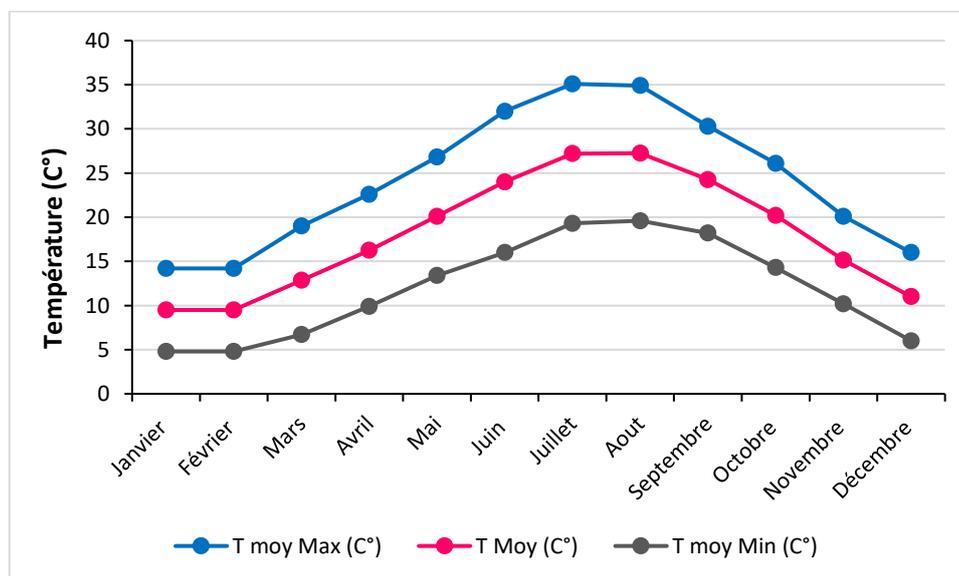


Figure III.7: Moyennes mensuelles des températures de l'air pour la décennie 2008-2017. (*Climate Toolbox, données traitées par l'auteur, 2020*)

³ Outil de téléchargement d'historique des données climatiques pour n'importe quel endroit sur la surface terrestre. <https://climatetoolbox.org/tool/data-download>

III.4.1.2 Précipitations

L'histogramme ci-dessous montre les moyennes mensuelles des précipitations sur l'agglomération de Guelma, durant la décennie 2008-2017. Il ressort qu'il existe trois périodes pluviométriques tout détaillé dans (Tableau III.4). La première englobe les mois froids ; d'octobre à mars, dont la moyenne dépasse les 50 mm. La deuxième période implique une pluviométrie moyenne entre 20 et 40 mm. La troisième période englobe les mois chauds d'été ; juin, juillet et aout avec une valeur minimale de 3 mm, enregistrée le mois de juillet.

En somme, les précipitations à Guelma pour la décennie 2008-2017 indiquent la dureté de sa saison estivale, mais aussi renseigne sur son degré d'aridité, ceci sera évoqué et détaillé dans les étapes ultérieures (Indice d'aridité).

Tableau III.4: Précipitations moyennes à Guelma pendant la décennie 2008-2017

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Jui	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
PP (mm)	85.2	74.8	64.5	39.9	39.9	10.3	3.2	10.7	28	50.7	61	65

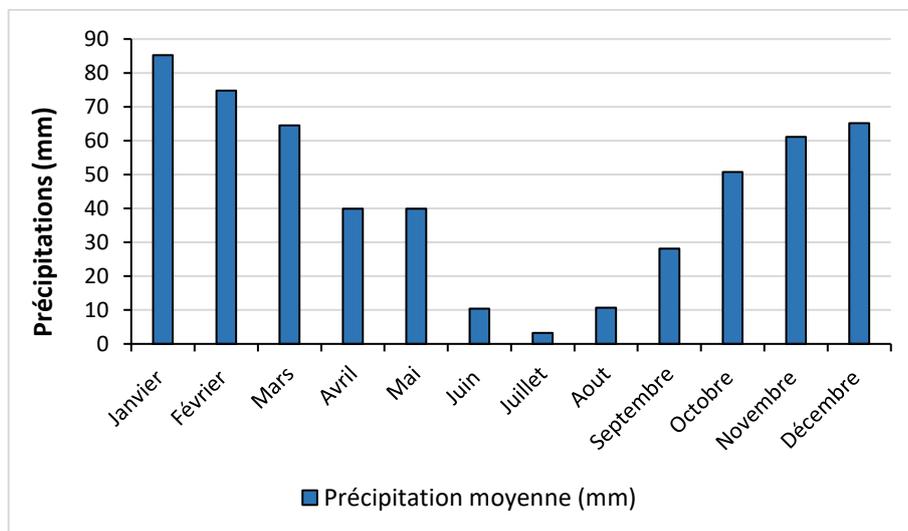


Figure III.8: Moyennes des précipitations mensuelles pour la décennie 2008-2017. (Climate Toolbox, données traitées par l'auteur, 2020)

III.4.1.3 Insolation

L'histogramme dans la page suivante (Figure III.9) montre la quantité moyenne mensuelle du rayonnement solaire global reçu pendant la décennie 2008-2017, exprimée en W/m².

Les valeurs maximales ont été relevées aux mois longs d'été, avec une valeur maximale de 277 W/m² le mois de juillet, ceci due principalement aux heures d'exposition au soleil en été. En revanche, des valeurs minimales ont été relevés aux mois froids avec une valeur minimale de 82 W/m² le mois de décembre.

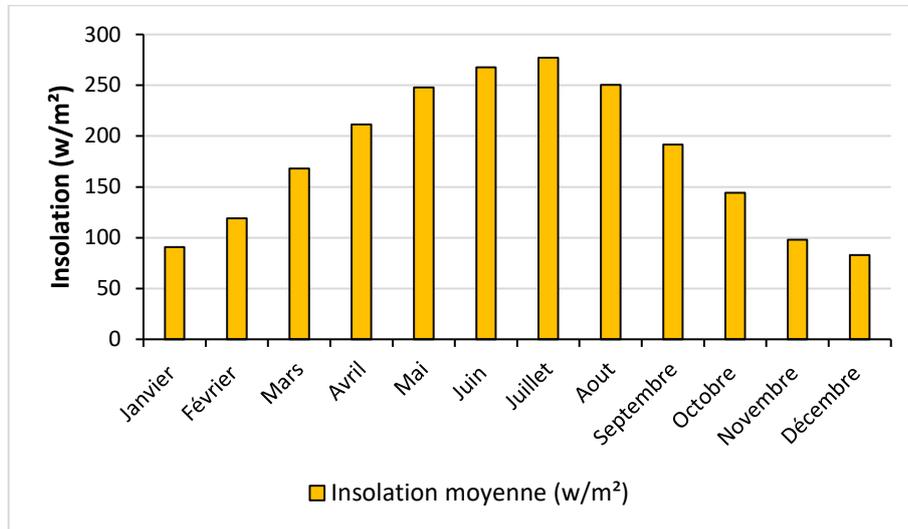


Figure III.9: Insolation moyenne pour la décennie 2008-2017. (Climate Toolbox, données traitées par l'auteur, 2020)

III.4.1.4 Vents

Le graphique ci-dessous indique que les moyennes mensuelles des vitesses de l'air varient entre 2.5 et 3.5 m/s, avec un rythme mensuel perturbé tout au long de la décennie 2008-2017.

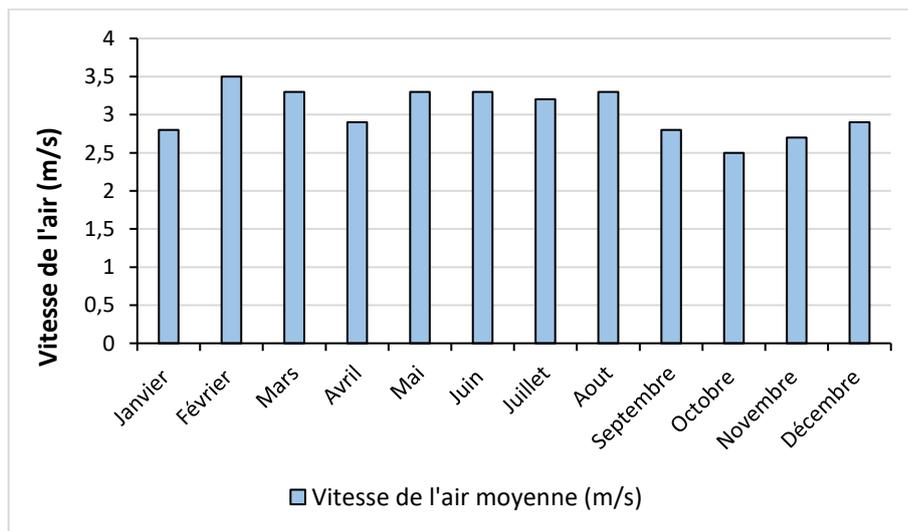


Figure III.10: Moyennes mensuelles des vitesses de l'air pour la décennie 2008-2017. (Climate Toolbox, données traitées par l'auteur, 2020)

III.4.2 Etude Bioclimatique de La ville de Guelma

Dans le but de fournir une analyse précise des conditions climatiques à Guelma, nous avons fait recours à plusieurs méthodes et outils bioclimatiques, en utilisant les données climatiques de la décennie 2008 à 2017. Chaque outil consiste à présenter et à suivre le croisement d'un ou de plusieurs paramètres climatiques par rapport au temps.

III.4.2.1 Indice d'aridité

Il a été déjà mentionné que le degré d'aridité se calcule en fonction des précipitations et des températures annuelles. Nous avons calculé le degré d'aridité à Guelma à l'aide de deux méthodes, la première est celle de De Martonne, dont les résultats figurent dans l'histogramme (Figure III.11). La deuxième est celle d'EMBERGER⁴ (Figure III.11).

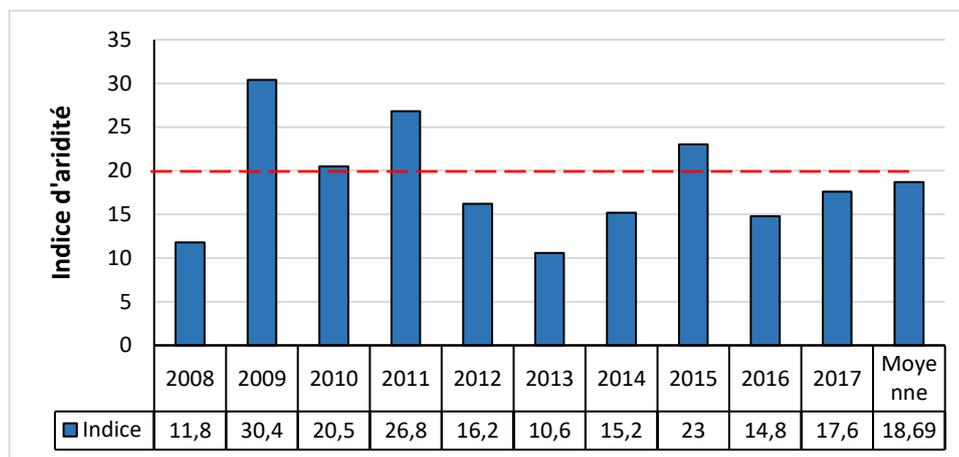


Figure III.11: Indice d'aridité de la ville de Guelma pour la décennie 2008-2017. (Climate Toolbox, données traitées par l'auteur, 2020)

Pour l'ensemble des années étudiées, l'an 2008 et 2013 présentent une aridité supérieure, par ailleurs les années 2009,2011, et 2015 présentent une aridité minimale causée par les précipitations élevées (plus de 600 mm), ce qui fait que le climat est qualifié de subhumide pour ces années. La somme pour les dix années calculées est de 18.8, compris entre $10 < I < 20$ correspond à un climat semi-aride dans ses états supérieurs (Tableau III.2).

III.4.2.2 Climagramme d'EMBERGER

La méthode d'EMBERGER est développée pour les régions méditerranéennes, utilisant des données météorologiques précises de plusieurs années, le calcul d'aridité implique la

⁴ Louis Emberger, botaniste phytogéographe français connu pour sa classification des bioclimats méditerranéens,1955.

pluviométrie et la température, dont les résultats sont reportés sur un graphe à deux axes. Saharien, aride, semi-aride, subhumide et humide se sont les étages climatiques présentés par EMBERGER.

$$Q = 3.43 \left(\frac{P}{M - m} \right)$$

Q : le quotient pluviométrique, il est reporté sur l'axe des ordonnées.

P : les précipitations annuelles.

M : Moyenne maximale du mois le plus chaud en °C.

m : Moyenne minimale du mois le plus froid en °C, reporté sur l'axe des abscisses et donne une idée sur le type d'hiver.

Les résultats d'application de cette méthode sur la ville de Guelma sont présentés dans le diagramme (Figure III.12). Le quotient pluviométrique pour les dix années de 2008 à 2017 est de 61.5 avec une température annuelle froide de 2.4°C. Donc le climat à Guelma est inclus dans l'étage climatique semi-aride avec un hiver froid.

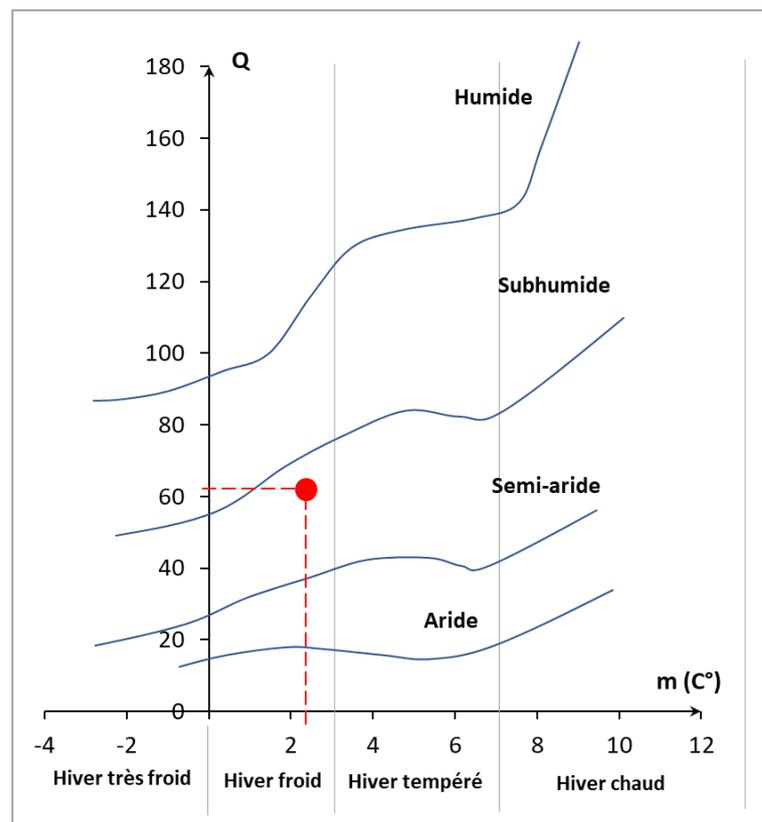


Figure III.12: Etage climatique de la ville de Guelma pour la décennie 2008-2017. (Climate Toolbox, données traitées par l'auteur, 2020)

Plusieurs chercheurs ont travaillé dans le même sens qu'Emberger sur des villes méditerranéennes du grand Maghreb entre autres la Tunisie. D'où Le HOUREOU (1995) a arrivé aux correspondances suivantes :

Saharien : $Q < 10$ et $P < 100$ mm

Aride : $10 < Q < 40$ et P de 100 à 400 mm

Semi-aride : $40 < Q < 70$ et P de 400 à 600 mm

Subhumide : $70 < Q < 110$ et P de 600 à 800 mm

Humide : $Q > 100$ et $P > 100$ mm

III.4.2.3 Détermination du diagramme Ombrothermique

Ce diagramme est utilisé pour laisser apparaître la période sèche et la période humide de l'année, le calcul se fait en impliquant la moyenne mensuelle des précipitations et des températures de 10 ans. L'application sur la ville de Guelma est faite pour la décennie (2008-2017), les résultats montrent une alternance de deux périodes. La première est humide s'étale sur cinq mois de l'année englobant ; janvier, février, mars, novembre et décembre. La deuxième période est sèche, touche aux sept mois restants, allant d'avril à octobre. Par projection nous avons obtenu un nombre précis des jours, climatiquement secs, estimé à 202 jours.

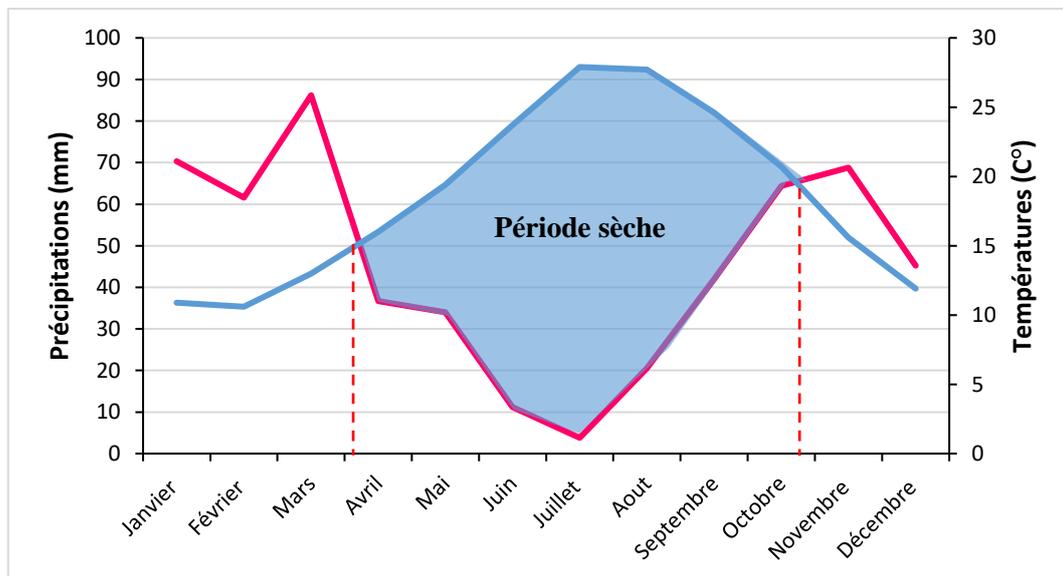


Figure III.13: Diagramme Ombrothermique de la ville de Guelma pour la décennie 2008-2017. (*Climate Toolbox, données traitées par l'auteur, 2020*)

III.4.2.4 Détermination du diagramme psychrométrique

L'extrapolation du diagramme psychrométrique de S. SZOCOLAY appliqué à la ville de Guelma renseigne sur l'existence de six périodes climatiques :

Période très froide : touche en petite partie au mois ; janvier, février, mars et décembre dont le recours à un système de chauffage solaire actif est nécessaire dans cette période.

Période froide : englobe les mois d'hiver ; janvier, février, mars, avril décembre et novembre, cette sollicite un système de chauffage solaire passif.

Période neutre : touche en grand part les mois d'automne et du printemps, elle sollicite aucun changement.

Période confortable : elle englobe six mois de l'année allant du mois de mars au mois d'octobre, mais la plage du confort offerte diffère d'un mois à l'autre. Comprenant des températures allant de 20° à 24°C et bornée par des niveaux d'humidité relative (20%-80%).

Période chaude : sollicite un refroidissement naturel et une ventilation mécanique pour les mois ; mai, juin, juillet, aout et septembre.

Période très chaude : englobe les mois chauds d'été, juin, juillet, aout et une partie du mois de septembre, dans cette période un contrôle majeur sur les radiations est requis, une grande masse thermique et la ventilation nocturne sont sollicitées.

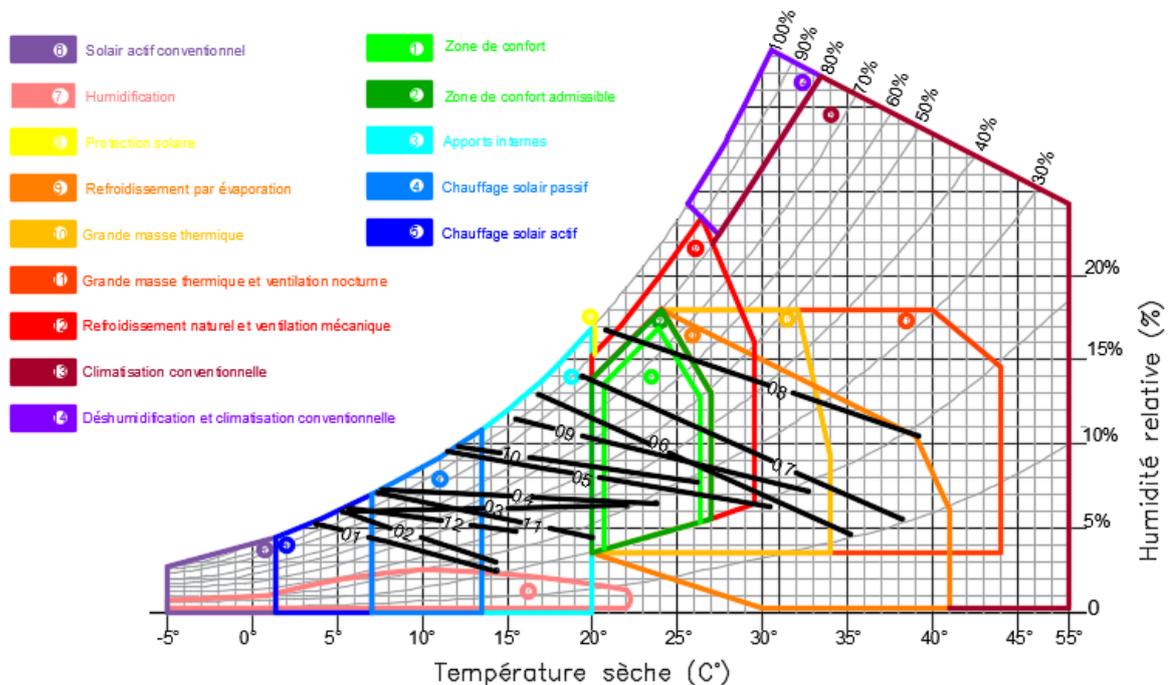


Figure III.14: Diagramme psychrométrique de la ville de Guelma. (Climate Toolbox, données traitées par l'auteur, 2020)

III.4.2.5 Détermination d'isotherme de Guelma

La lecture d'isotherme de Guelma, indique qu'il existe cinq principales zones climatiques, d'où chaque zone est délimitée par deux courbes de température :

Zone de sous chauffe très froide : s'étale sur trois mois froids ; janvier, février, mars, novembre et décembre, dont la température est comprise entre 5°C et 10°C, la période la plus froide se trouve le février avec une température de 5.1°C.

Zone de sous chauffe froide : située entre les courbes 10°C à 15°C, englobe les mois d'hiver ; mars, avril, mai, novembre et octobre. La sensation du froid est localisée dans la période diurne de 22 :00 à 06 :00.

Zone de confort : comprise entre 15°C et 20°C, correspond à la saison du printemps et la fin d'été (mai, juin, septembre et octobre), dont la sensation du confort se défaire d'un mois à l'autre.

Zone de chauffe : représente une augmentation des températures journalières (de 08 :00 à 18 :00), située entre 20°C et 25°C et s'étale sur le mois de mai, juin et septembre.

Zone de surchauffe : se caractérise par des températures élevées qui dépassent 30°C, elle couvre la période comprise entre 10 :00 et 17 :00 des jours chauds et ensoleillés d'été (mois de juin, juillet et aout).

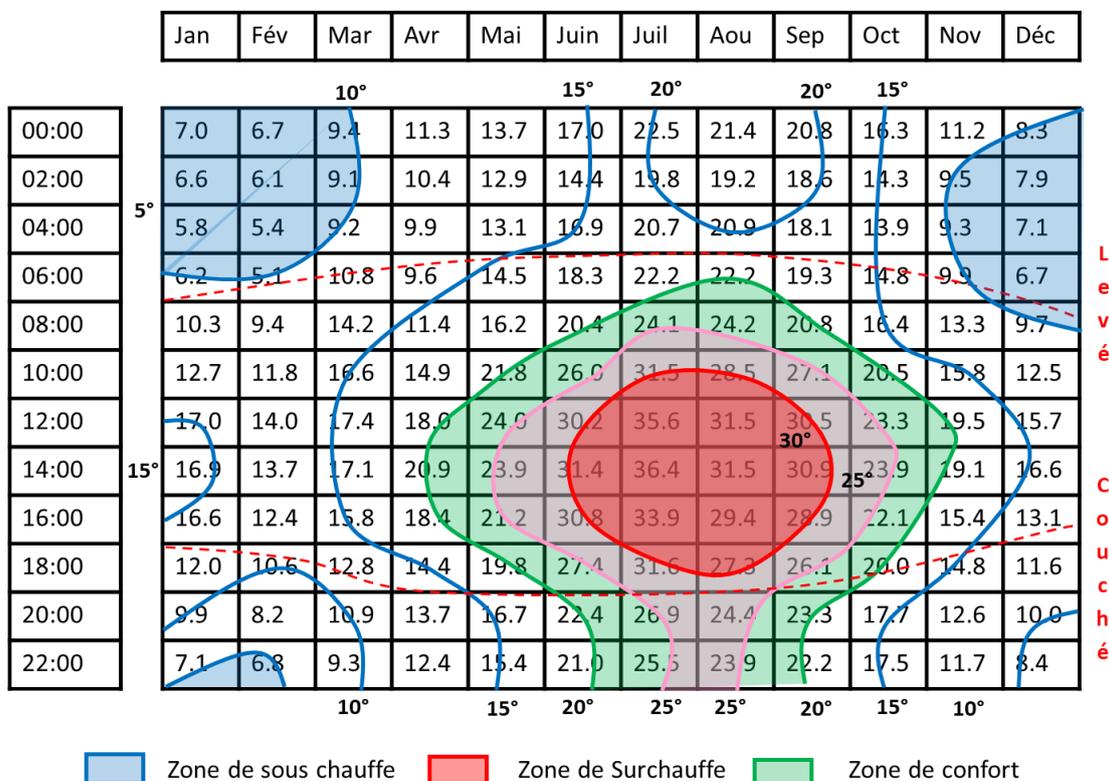


Figure III.15: Isotherme de la ville de Guelma. (Climate Toolbox, données traitées par l'auteur, 2020)

III.5 De l'espace extérieur de Guelma à sa configuration

III.5.1 Genèse des espaces extérieurs

Les espaces extérieurs se génèrent généralement par fait d'urbanisation. Ainsi, la hiérarchisation des rues et l'édification des espaces libres affectés à l'usage public font en un premier lieu une structure urbaine pour la ville, cette dernière est construite progressivement et selon des logiques de fabrique. En effet, la genèse des espaces extérieurs se fait avec, entre autres au travers une lecture chronologique de ces logiques et de la croissance de cette structure.

III.5.1.1 Logique militaire – avant 1850

Les vestiges romains de la ville racontent quelques détails sur la présence d'un établissement humain intra-muros, datant de l'époque romaine, le site servait de bonne assiette pour l'établissement qui en lui succède naissant d'une logique militaire (BENZERARI, 2013). Une cité militaire s'est développée alors en reprenant les traits de celle romaines, favorisant la convivialité sociale et la centralité des espaces urbains, dont au croisement des deux fameux axes romains se trouve l'ex forum romain. En plus du théâtre romain qui servait d'espace public d'haute polyvalence, accueillait ainsi une multitude de fonctions telles que la théâtralisation, l'exposition et autres.

III.5.1.2 Logique coloniale – entre 1852 et 1962

Cette logique concerna la réorganisation de la ville de Guelma intra et extra-muros sur le plans juridique et physique, ainsi les plans du parcellaire appliquèrent la répartition par lots. Une attention particulière s'est accordée aux espaces publics ; les lots urbains, les lots jardins et les lots ruraux. Aujourd'hui, le centre colonial de Guelma témoin d'une diversification typologique des espaces public urbains, place saint augustin, le square et la place du théâtre.

III.5.1.3 Logique populaire – entre 1962 et 1966

Comme aux autres villes Algériennes, Cette logique a été dictée par la population locale de Guelma et celle issue d'exode rural. Malgré que la ville ait gardé son caractère colonial, le secteur de construction et d'urbanisation a connu un accroissement illégal.

III.5.1.4 Logique de l'Algérie indépendante – entre 1966 et 1989

Une logique volontariste institutionnelle pour reconstruire la ville Algérienne indépendante, les traits de cette logique se manifestait dans la prise en charge des différentes classes

sociales en lançant le programme des ZHUN et des lotissements. D'un urbanisme fonctionnel, la ville a planifié des espaces de récréation de proximité annexées à ces programmes, a réservé aussi une place aux espaces publics urbains souvent sans les édifier.

III.5.1.5 Logiques de 1990 jusqu'à nos jours

La surpopulation qu'a connu l'Algérie les deux dernières décennies a impliqué une urbanisation effrénée sous plusieurs logiques ; institutionnel, informel, rural et la logique des nouvelles villes, avec beaucoup d'efforts pour améliorer la qualité et la fréquentation des espaces publics urbains.

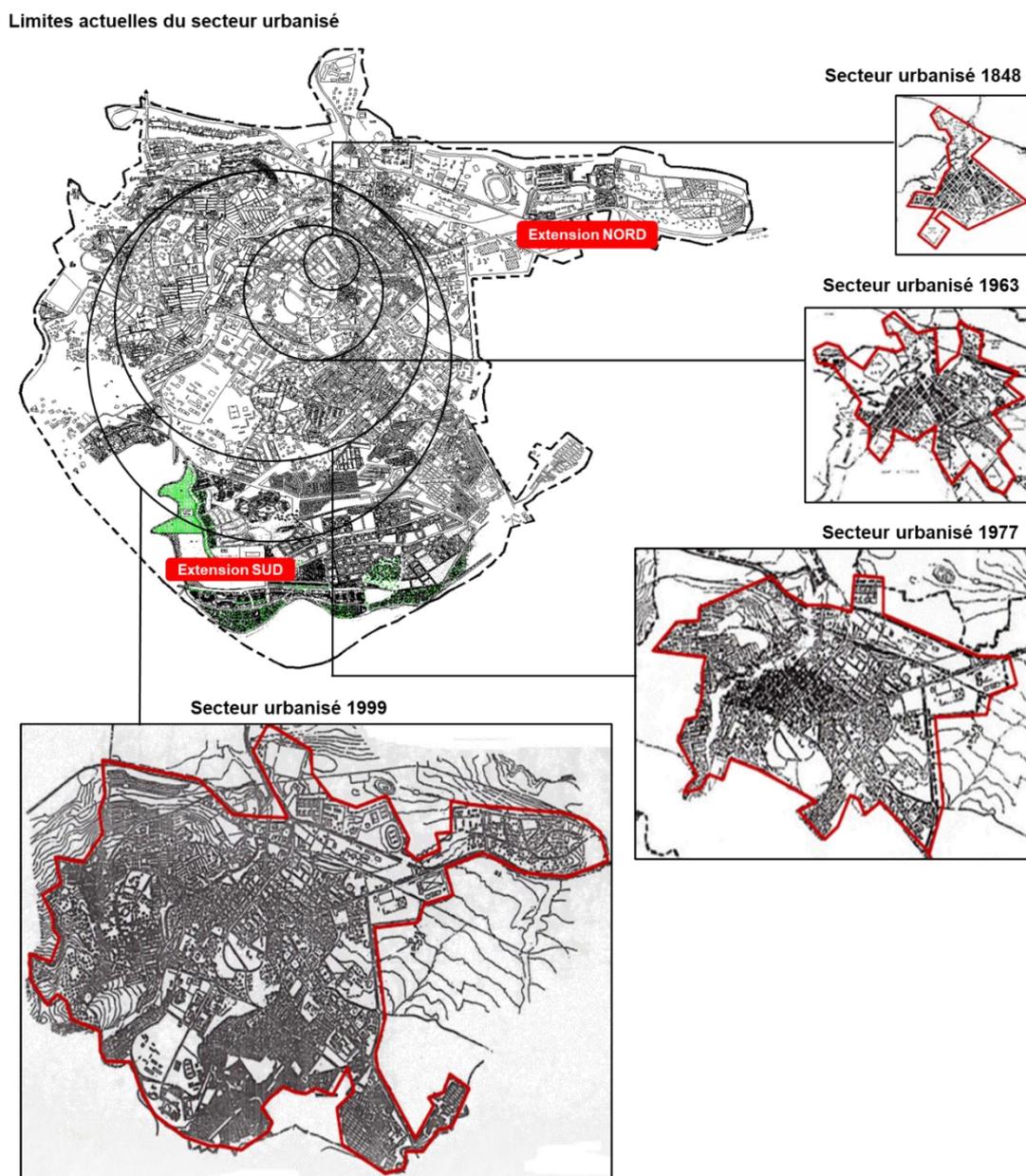


Figure III.16: Evolution de la structure urbaine de la ville de Guelma entre 1848 et 2016. (Archive de l'APC)

III.5.2 Aménagement des espaces extérieurs

D'une manière générale, les espaces extérieurs à Guelma sont traités d'une façon unifiée, d'où l'ensemble des places et des placettes est quasi totalement structuré par bâtissent, comportent des aires minérales et végétales et l'ensemble des rues est fortement occupé en mouvement et en stationnement.

III.5.2.1 Bâtiments environnants

Les espaces publics urbains de la ville sont souvent construits et aménagés avec la construction du cadre bâti, donc ce dernier fait toujours de bon cadre structurel aux espaces publics, à savoir leurs configurations et leurs typologies.

Les espaces publics urbains situés au centre-ville sont souvent structurés par des bâtisses qui datent de l'époque coloniale, rappelons ici la place saint-augustin située en plein centre français, axée avec l'ancienne église de la ville (L'actuelle mosquée Ibn Badis) et bordée d'arcades avec des avenues droites, large est ombragées.

Certain d'autres font l'extension d'équipements publics, à l'instar du théâtre municipal de la ville qui s'impose en plein centre de la parcelle, laissant tout autour un espace d'agrément à caractère végétale.



Figure III.17: Espaces publics urbains structurés par des bâtisses qui datent de l'époque coloniale. (Guelma  Calama / Facebook, n.d.)

III.5.2.2 Les édifices et les monuments

L'espace public urbain à Guelma est très riche en termes d'édifices et de monuments qui racontent la succession des civilisations, mais aussi les événements sociaux survenus au gré du temps. Les portes monumentales de l'enceinte de l'ancienne caserne, qui servent aujourd'hui d'accès à l'hôpital *Ibn Zohr*. Les monuments élevés souvent à la mémoire des personnages historiques qui ont contribué à la sculpture de l'histoire de la ville ou du pays

notamment les martyres et les moudjahidines, tels que le statut de l'ex président *Houari Boumediene* et celui du martyr *Souidani Boudjema*.

Certains de ces édicules ont disparu, mais sont toujours présents comme repères dans la ville, à l'instar des quatre fameuses portes de la ville, la porte de Bone, Constantine, Souk ahras, et de Mahouna.



Figure III.18: Quelques édicule de la ville de Guelma. (Guelma & Calama / Facebook, n.d.)

III.5.2.3 Mobilier urbain

L'espace public extérieur est doté d'un ensemble d'objets et de dispositifs fixés au sol et installés près des bâtisses, servant le bon déroulement de la fonction public, parfois insuffisants, mal entretenus et inadéquats.

La signalisation : l'espace extérieur à Guelma est équipé d'un ensemble de dispositifs visuels ayant pour but de bien guider la circulation automobile, mais aussi de panneaux portants des informations facilitant le déplacement dans la ville.



Figure III.19: Plaques de signalisation au centre-ville de Guelma. (Photos prises par l'auteur le 10.07.2018)

L'éclairage : les espaces extérieurs à Guelma sont munis de candélabres en acier souvent à plusieurs branches pour veiller à un meilleur éclairage nocturne. En distinguant trois principaux types, le premier est à branche unique, placé sur les voies principales constitué d'une colonne métallique creuse portant une seule lampe. Le deuxième type est à deux branches ou plus, ornementé et portant deux lampes, placé dans les places et les placettes.



Figure III.20: Candélabres au centre-ville de Guelma. (Photos prises par l'auteur le 10.07.2018)

Les bancs publics : les espaces publics urbains à Guelma sont dotés de sièges fixés au sol et installés le long des trottoirs ou dans les places et les placettes, généralement de trois à quatre places, simple en bois et en acier avec ornementation. Ces derniers montrent un abandon total pendant les heures chaudes d'été à cause de leur emplacement hors ombrage et à cause de la chaleur emmagasinée par l'acier.



Figure III.21: Bancs publics au centre-ville de Guelma. (Photos prises par l'auteur le 10.07.2018)

Les corbeilles à déchets : le recueil des déchets légers dans les espaces extérieurs à Guelma, se fait à l'aide des grands bacs à ordures et des corbeilles fixées au sol, en acier couvert de panneaux en bois, ou en plastique fixé sur un support métallique. Sont présents qu'aux espaces de détente, d'un nombre insuffisant qui dépasse rarement trois corbeilles par espace, soit un espace extérieur de 250m².

III.5.2.4 Végétation

L'arbre de *ficus* de par les avantages qu'il offre constitue un véritable héritage naturel pour la ville de Guelma comme toute les villes Algériennes. Le *ficus* est un genre de la famille des Moraceae, représenté par des arbres et des arbustes ou des lianes avec plus de 750 espèces. En se basant sur la liste des arbres urbains et des arbres d'alignement en Algérie⁵, de plus l'arbre de *ficus* nous avons identifié les principaux types implantés dans les espaces extérieurs à Guelma (Voir Annexe 06 et 09).

Tableau III.5: Végétation implantée dans les espaces extérieurs à Guelma. (Wikipédia, traitées par l'auteur, 2019)

Type	Caractéristiques
<p>Frêne</p> 	<p>Le frêne « <i>Fraxinus exelsior</i> » arbre du genre Fraxinus, appartient à la famille des Oléacées ; une soixantaine d'espèces de frênes sont connues, elles vivent essentiellement dans les forêts tempérées.</p> 
<p>Févier d'Amérique</p> 	<p>Le févier d'Amérique « <i>Gleditsia triacanthos</i> » est une espèce de plantes dicotylédones de la famille des Fabaceae (légumineuses), Ce sont des arbres de grande taille, épineux, à feuilles caduques.</p> 
<p>Platane d'occident</p> 	<p>Le Platane d'occident « <i>Platanus occidentalis</i> » est une espèce d'arbre de la famille des Platanacées, utilisée comme arbre d'ornement. Les feuilles caduques, alternes et larges que longues</p> 
<p>Cyprès toujours vert</p> 	<p>Le cyprès toujours vert « <i>Cupressus sempervirens</i> » ou cyprès méditerranéen est un arbre de la famille des Cupressaceae. Il est originaire d'Asie mineure, mais il a été acclimaté autour du bassin méditerranéen.</p> 

⁵ Journal officiel de la république Algérienne N°10, 11 février 2009

<p>Saule blanc</p> 	<p>Le Saule blanc « <i>Salix alba</i> » est un arbre de la famille des Salicacées. Cet arbre commun dans les régions tempérées est souvent cultivé en forme de « têtard » pour la production d'osier.</p> 
<p>Micocoulier</p> 	<p>Les micocouliers « <i>Celtis australis</i> » aussi appelé arbre aux feuilles d'ortie, sont un genre d'environ 60 à 70 espèces d'arbres à feuilles caduques</p> 
<p>Palmier washingtonia</p> 	<p>« <i>Washingtonia filifera</i> » C'est un palmier à gros développement vigoureux avec une croissance rapide pouvant atteindre une hauteur de 10 mètres et une résistance à des températures jusqu'à -12°C. Idéal sous un climat océanique comme sur nos côtes atlantiques où il tolère également bien les embruns.</p>
<p>Sophore du japon</p> 	<p>Le sophore du japon « <i>Styphnolobium japonicum</i> » est une espèce d'arbres de la famille des Fabaceae. Fait partie des arbres traditionnels installés à proximité des pagodes.</p> 
<p>Laurier rose</p> 	<p>Le Laurier-rose « <i>Nerium oleander</i> » est une espèce d'arbustes ou de petits arbres de la famille des Apocynacées. Cette espèce est présente sur les deux rives de la Méditerranée mais de façon plus éparse sur la rive nord.</p>
<p>Troène du japon</p> 	<p>Le troène du Japon « <i>Ligustrum japonicum</i> » est une espèce de troène originaire du sud du Japon. Il s'agit d'un arbuste ou d'un petit arbre pouvant mesurer jusqu'à 6 mètres de hauteur à l'écorce gris-beige.</p>

III.5.2.5 Plans d'eau

L'eau a été toujours considérée comme élément essentiel dans la configuration des espaces extérieurs à Guelma, auparavant les fontaines de la ville été à plusieurs utilités, à savoir boire, irriguer et embellir.

A l'aire actuelle, la majorité des espaces publics urbain de la ville sont dotées de plans d'eau, dont la fontaine classique est la configuration dominante.

Nous avons établi une série d'observation sur terrain (juillet 2019) dont l'objectif été de faire le point sur l'état et le fonctionnement des plans d'eau dans la ville.



Figure III.22: Usage et fonctionnement des plans d'eau à Guelma auparavant. (Guelma & Calama / Facebook, n.d.)



Figure III.23: Usage et fonctionnement actuel des plans d'eau à Guelma. (Photos prises par l'auteur le 10.07.2018)

L'observation indique que l'ensemble des plans observés sont dégradés, mal entretenus et souvent dépourvus d'eau. La fontaine dans (Figure III.23) parmi neuf plans d'eau visités, située à l'entrée de la ville été le seul plan alimenté en eau et en état de fonctionnement, mais à circuit ouvert et exploité comme étendue de loisir, notamment en temps de canicule.

III.5.3 Typologies des espaces extérieurs

Placette, "Djneyna" ou jardin, boulevard, "Triq" ou rue sont les typologies existantes dans le langage citoyen. Par ailleurs, square, rue, place et placettes sont les typologies présentes dans l'histoire de la ville. En se basant sur les critères théoriques d'identification des types d'espace public urbains (BADACHE, 2014), une multitude de typologies spatiales d'espaces extérieurs à Guelma aux usages et aux échelles multiples peuvent être dégagées.

III.5.3.1 La place historique

Desservi par quatre voies, au revêtement minéral avec un édifice au centre, changé au travers le temps (fontaine, kiosque, étendue et puis une stèle), ces caractéristiques font de la place des martyres appelée "Place saint augustin" l'unique place dans la ville, sa situation en pleine centre colonial lui qualifie de place historique.

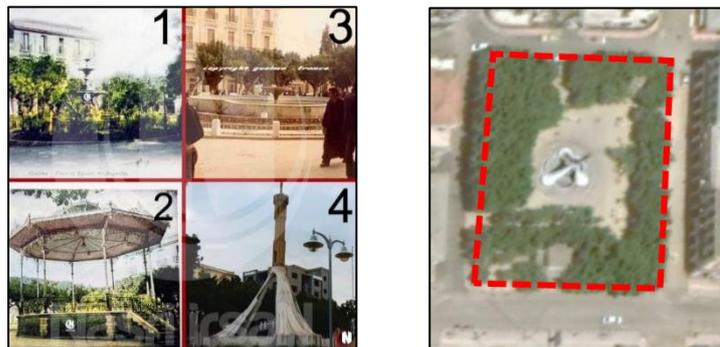


Figure III.24: Situation et principales transformations de la place Saint augustin. (Guelma & Calama / Facebook, n.d.)

III.5.3.2 La placette

Cette typologie est obtenue généralement par le recul de l'alignement ou par suppression d'une parcelle bâtie, dotée de Kiosques, statues, plan d'eau et d'arbres. Ceci s'applique à la placette 8 Mai 1945, dont la parcelle a été occupée par une école pendant la colonisation.



Figure III.25: La place 8 Mai 1945 auparavant et aujourd'hui. (Guelma & Calama / Facebook, n.d.)

III.5.3.3 Le boulevard

D'une certaine monumentalité architecturale et à plusieurs fonction, théâtralisation, manifestation et agrément sont les boulevards au centre-ville de Guelma. "Souidani Boudjemaa" est le boulevard principal de la ville, composé de deux allées avec un alignement d'arbres au milieu et un statut central du martyr *Souidani Boudjemma*.



Figure III.26: Vue générale et monument du boulevard Souidani Boudjemaa à Guelma. (Photos prises par l'auteur le 10.07.2018)

III.5.3.4 La rue

La rue à Guelma est fortement employée dans le langage citoyen, elle signifie un espace linéaire avec extension du commerce, la rue d'Announa est la figure phare de cette typologie. "Triq" est aussi utilisée pour décrire une rue ayant une certaine représentativité.

III.5.3.5 L'espace d'agrément linéaire

A l'exemple des rues, les espaces linéaires se trouvent dans le langage courant comme "Triq" avec toujours une appellation spécifique y affère au lieu décrit. "Triq El Nakhlette" est l'exemple le plus expressif de cette typologie à Guelma. Il s'agit d'un espace d'agrément linéaire qui accueille des activités et des services modestes, il est principalement composé d'immeubles de faible hauteur, il couvre une surface totale d'environ 2060 m².

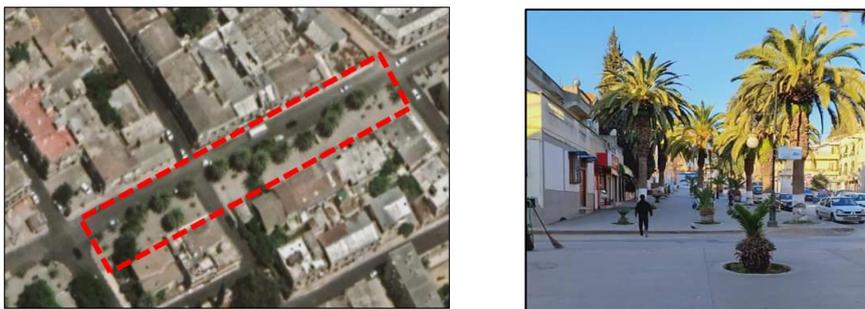


Figure III.27: Situation et vue de la rue El-Nakhlette à Guelma. (Photos prises par l'auteur le 07.02.2019)

III.5.3.6 Le jardin public

Le jardin c'est la typologie dominante à Guelma, on y trouve souvent des espaces publics verts à dominante végétation, à libre et à plusieurs accès, à l'instar des jardins ; "Seridi Mustafa, les frères Bou El Moukh".

Le jardin parc, une typologie qui existe à Guelma, il s'agit d'un jardin à grandes dimensions, situé au centre-ville, d'environ 12000 m², à caractère végétale implanté de conifères, portant l'appellation "jardin public 1965".



Figure III.28: Jardin Mustafa Séridi et jardin 19 juin 1965. (Guelma & Calama / Facebook, n.d.)

III.5.3.7 Les plaines

Ce sont des espaces correspondant à des critères particuliers selon le type des usagers et leur tranche d'âge. Pour la petite enfance ce sont les aires de jeux, pour les adultes sont les aires de sport, située généralement au pieds de l'habitat collectif et dans les nouveaux quartiers.

La plaine "Gehdour Tahar" située à environ 600 m du centre-ville, compte parmi les espaces extérieurs les plus importants, de par sa polyvalence d'usage et les fonctions qu'elle peut accueillir. Elle sert de plaine de jeux pour les jeunes, d'espace de repos pour les adultes, d'un endroit de théâtralisation pour les événements publics et d'endroit de détente, de commerce et de loisir durant la saison estivale.

III.5.3.8 Les espaces collectifs

Dans le centre-ville de Guelma, l'habitat collectif est marqué par l'entrelacement des aires privées avec ceux communautaires, dont les espaces situés au pieds de l'habitat collectif et les espaces entre bâtiments sont fortement exploités et appropriés par les visiteurs de la ville. Ce sont aménagés et équipés de tous les dispositifs nécessaires pour assurer le bon fonctionnement et la complémentarité aux espaces publics urbains.

III.6 Conclusion

Nous avons analysé, indépendamment et progressivement tout au long de ce chapitre deux aspects physiques qui concernent la ville de Guelma, le climat et la dynamique des espaces extérieurs. Ces deux aspects nous ont semblé importants dans la caractérisation de l'environnement climatique extérieur qui servira de socle aux investigations sur les niveaux du confort climatique dans les espaces extérieurs de la ville.

Avant de déterminer la zone de confort et la zone d'inconfort, il nous a paru très évident de dresser un constat actualisé sur le climat de la ville, spécialement dans le contexte du changement climatique actuel. Comme première étape, nous avons démontré l'appartenance de Guelma au climat semi-aride, en se basant sur les données climatiques de la décennie 2008-2017. Les résultats indiquent que Guelma est d'un état moyen d'aridité, qui lui inclus dans l'étage climatique semi-aride, avec un hiver froid et une période sèche d'environ 202 jours /an.

Il ressort de l'analyse bioclimatique qu'il existe trois principales zones climatiques ; une zone de sous-chauffe sollicite un chauffage passif, une zone de confort dont aucun changement n'est sollicité et une zone de surchauffe, dont les exigences requises en extérieur sont le contrôle sur les radiations solaires et le refroidissement naturel.

En analysant la composition et la dynamique des espaces extérieurs à Guelma nous avons conclu sur les points suivants :

- Il existe plusieurs typologies d'espaces extérieurs, place, placette, jardin, boulevard, rue, square... etc.
- Les espaces structurants de la ville sont ceux qui datent de l'époque coloniale.
- L'ensemble des espaces extérieurs comporte des aires minérales et végétales traitées d'une façon similaire, doté de mobilier urbain, parfois insuffisant, mal entretenu et inadéquat.
- Le ficus est l'espèce végétale dominante dans la ville, représentée par des arbres et des arbustes.
- La majorité des espaces publics urbains de la ville sont dotés de plans d'eau, dont la fontaine classique est la configuration dominante.

Chapitre IV :

Processus Méthodologique

IV. Processus méthodologique

IV.1 Introduction

Le présent chapitre vise à établir une méthodologie scientifique capable à répondre aux objectifs soulignés par ce travail de thèse, la construction de notre modèle d'analyse comprend un ensemble de méthodes scientifiques qui combinent plusieurs outils de récolte de données. Le processus méthodologique implique initialement une enquête pilote réalisée auprès d'un échantillon aléatoire et restreint de la population de Guelma. Elle est de double objectif, d'une part prendre contact avec la population et de tester son accessibilité à répondre aux questionnaires, d'autre part définir une aire pour l'investigation à mener dans des étapes ultérieures.

La méthode suivante consiste à effectuer des campagnes de mesures microclimatiques à l'aide des instruments de mesures calibrés, cette démarche nécessite que l'instrumentation soit positionnée directement dans le terrain d'investigation et mobiliser suivant des points bien définis, un enregistrement immédiat des paramètres mesurées est également nécessaire soit manuel ou assisté. Conduire parallèlement un questionnaire ciblé avec le relevé de mesures est la méthode adoptée pour acquérir, à la fois des données quantitatives et qualitatives.

L'observation intervient le long du processus d'investigation sur terrain, tant comme outil de vérification guidé à priori par un ou plusieurs indicateurs pour confirmer ou infirmer une ou plusieurs données résultantes, par exemple le cas de vérification des résultats de l'enquête pilote. Tant comme outil de recueil des données guidé par plusieurs indicateurs.

Des séries de simulation viennent pour supporter le processus méthodologique à l'aide du progiciel Envi-Met, tout en utilisant les conditions microclimatiques mesurés comme données d'entrée. Les données de sorties sont alors utilisées pour vérifier les résultats des méthodes déjà utilisées et pour rechercher de nouveaux résultats.

Dans le but de vérifier les hypothèses de ce travail de thèse, les résultats des quatre méthodes utilisées dans cette investigation sont mis en corrélation et en combinaison, tout dépend à l'objectif de la recherche à atteindre. Le schéma dans la page suivante (Figure IV.1) montre les différentes étapes du processus méthodologique, ainsi que la mise en combinaison des différentes méthodes utilisées dans l'investigation.

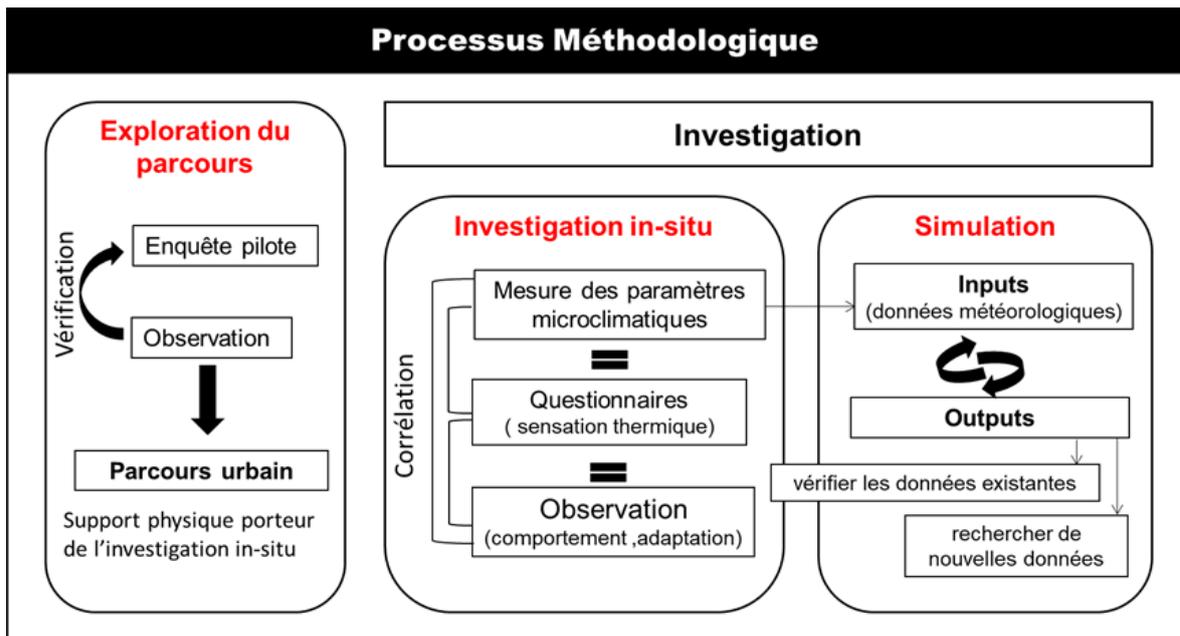


Figure IV.1: Schéma du processus méthodologique comprend les différentes méthodes utilisées dans l'investigation. (Auteur 2020)

IV.2 Exploration in-situ

Cette étape consiste à identifier un cadre physique porteur d'une investigation in-situ, il s'agit d'un parcours urbain situé au centre-ville de Guelma, exploré par les citoyens à l'aide d'une enquête pilote et justifié objectivement par une observation guidée à priori.

IV.2.1 Enquête pilote

IV.2.1.1 Protocole d'enquête

L'enquête a été menée durant la période comprise entre 09/2018 et 11/2018, à partir de six différents points qui balaient des sites capitaux de la ville de Guelma.

Le questionnaire d'enquête été adressé à un échantillon aléatoire des usagers de la ville commençant par ceux volontaires. Le schéma dans la page suivante (Figure IV.2) illustre l'aire que couvre l'enquête, ainsi que le nombre de répondants dans chaque site.



Figure IV.2: Les sites couverts par l'enquête avec le nombre de répondants dans chaque site. (Auteur 2019)

IV.2.1.2 Présentation du questionnaire d'enquête

La délimitation de l'aire de plus haute influence et la classification des espaces extérieurs dans la ville de Guelma sont les deux thématiques que traite le questionnaire, il a été demandé aux répondants de reporter leurs réponses sur une carte annexe de la ville (Voir Annexe 01). 129 est le nombre total des répondants aux questions suivantes :

Sur la carte support !

- Délimitez l'aire de plus haute influence (centre-ville).
- Tracez depuis ce point (position actuelle) votre chemin de navigation.
- Classifiez les espaces extérieurs dedans l'aire délimitée, selon leurs importances.
 - a. De 01 à 08 pour les places et les placettes
 - b. De 09 à 15 pour les rues/routes/boulevards

Vous vous rendez fréquemment dans l'un ou plusieurs espaces parmi ces espaces ?

Si la réponse est oui !

- Dessinez sur la carte votre chemin pour le rejoindre.
- Dessinez votre chemin pour se rendre au centre-ville et puis pour se rendre à votre espace de détente (repos).

IV.2.1.3 Résultats de l'enquête pilote.

L'étude pilote a été adressée à un échantillon représentatif de la population de Guelma, dont la synthèse des chiffres-clés figure dans le tableau.

Tableau IV.1: Effectifs et caractéristiques personnelles des répondants. *Auteur 2020*

	Genre		Tranche d'âge					Lieu de résidence				
	Masculin	Féminin	16-19	20-24	25-34	35-49	50 et plus	Cette rue	Ce quartier	Cette ville	Cette willaya	Autre willaya
Effectif	62	67	16	22	38	36	17	9	21	36	35	28
Pourcentage	48 %	52 %	12%	17%	30%	28%	13%	7%	16 %	28 %	27%	22%

L'équilibre est observé pour le genre des répondants, 58% des répondants appartient aux deux catégories d'âge 25-34 et 35-49 qui correspondent, généralement aux professionnels. Ces derniers ont montré une grande accessibilité de réponse aux questions, notamment pour la lecture de la carte annexe.

Les résultats des premiers questionnaires (13% de l'échantillon) établis en mois de septembre ont montré un fort lien entre la sensation thermique et la qualité des espaces extérieurs en période chaude. Ceci a induit un réajustement au niveau du questionnaire, "que diriez-vous des espaces extérieurs à Guelma, sont-ils confortables ?" cette question-là nous a permis d'avoir une idée générale sur la satisfaction vis-à-vis l'environnement thermique.

Il est également à mentionner que la notion d'espace extérieur se limite, majoritairement chez les répondants aux espaces de détente, dont il a été contraint de classer une place avec un boulevard ou une rue, pour se remédier à ceci la question a été posée en deux catégories ; espaces repos et espaces marcher.

Le schéma dans la page suivante (Figure IV.4) montre les résultats de la superposition des délimitations fournis par les usagers interrogés y compris un ensemble des espaces extérieurs dont la classification figure dans les histogrammes (Figure IV.3).

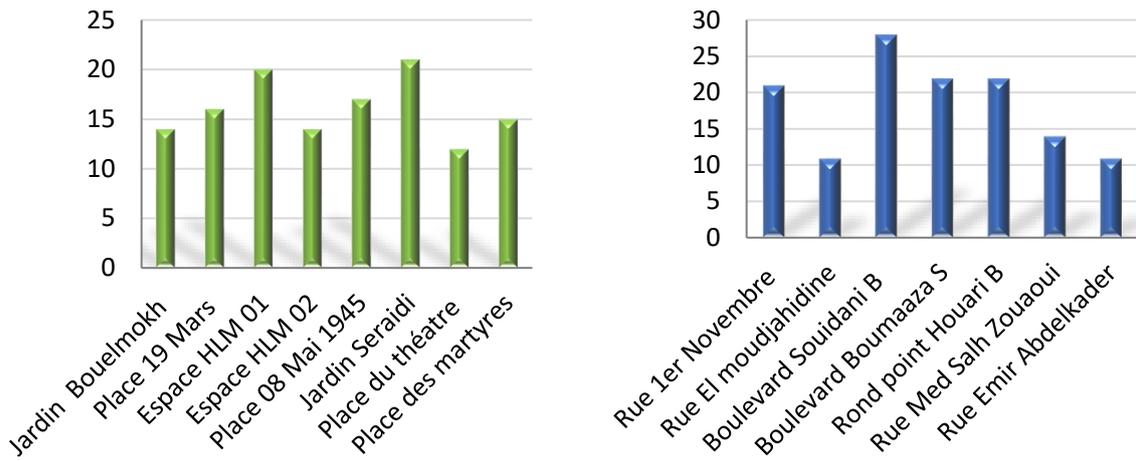


Figure IV.3: Classification des espaces extérieurs selon les usagers. (Auteur, 2019)

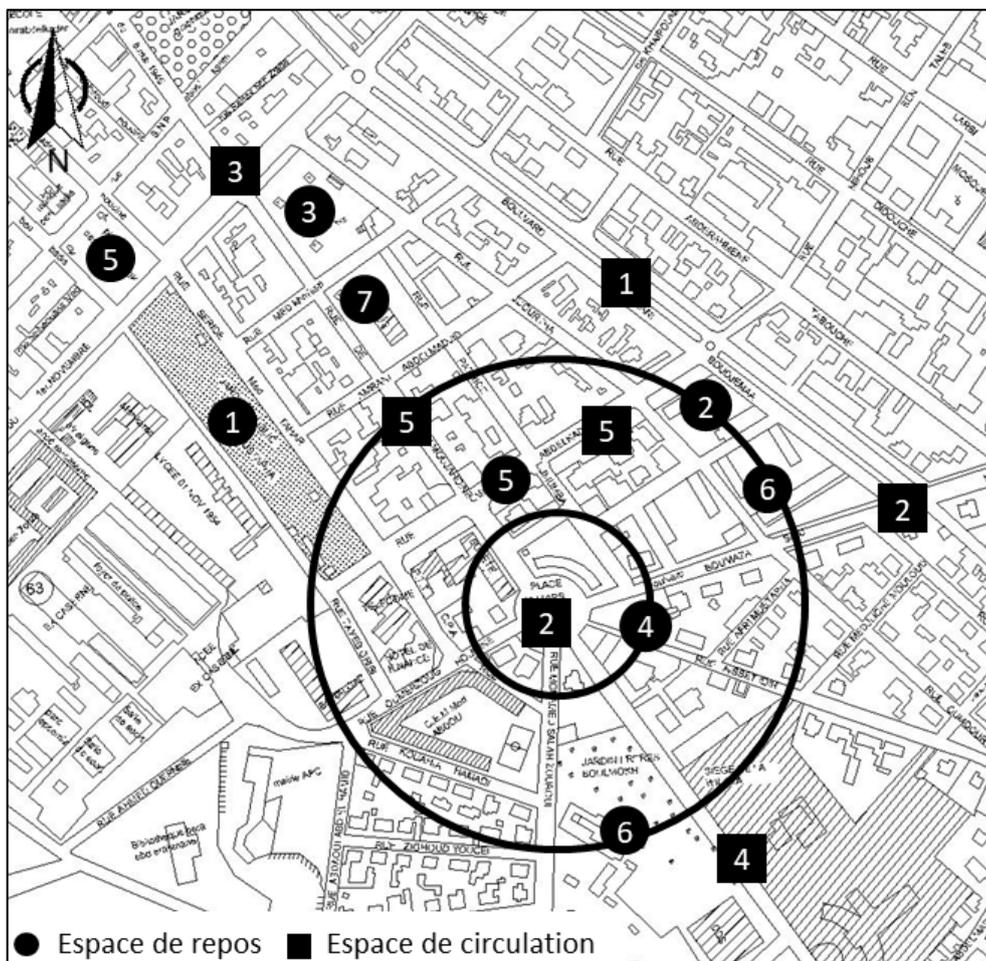


Figure IV.4: Résultats de la superposition des délimitations fournis par les usagers. (Auteur, 2019)

IV.2.2 Observation

IV.2.2.1 A propos de l'observation

Dans cette phase l'observation intervient comme outil objectif de vérification des résultats de la phase précédente, elle a eu lieu du 09/2018 au 11/2018. Le premier niveau d'observation a pris la photographie et les séquences vidéo comme instruments, dont l'indicateur principal est la convergence vers l'aire d'influence délimitée par les usagers. Le deuxième niveau vient pour vérifier la classification des espaces extérieurs de détente dont, l'intensité d'usage est son indicateur guide. Des fiches d'observation journalière de 07 :00 à 21 :00 ont été mis en place pour quantifier le nombre des usagers dans chaque espace, prenant en considération le flux transitoire et le nombre des visiteurs (Voir Annexe 03).

IV.2.2.2 Résultats de l'observation

L'analyse des supports photographiques issues de l'observation in-situ indique que le rondpoint Houari Boumediene est le point de convergence le plus important en matière de flux transitoire, qui sert la distribution aux boulevards Souidani Boudjemaa et Boumaaza Said. Ces deux derniers constituent à leur tour des espaces très fréquentés ayant une bonne classification chez les usagers (Voir Figure IV.3). Les deux espaces voisins HLM 01 et HLM 02 sont des espaces dédiés à l'usage semi-privatif de l'habitat collectif, fortement appropriés par l'ensemble des usagers de la ville. Les résultats de l'observation estiment que l'espace HLM 01, donnant sur le boulevard principal est le plus fréquenté, accueillant ainsi un nombre important de visiteurs, au contraire de l'espace HLM 02 qui accueille un nombre moyen de visiteurs, notamment aux heures du matin. Jardin les frères Boulemoukh, place des martyres, place 19 mars et place 8 mai 1945 se sont des espaces extérieurs à forte présence masculines, accueillant un nombre moyen des usagers par jour, mis à part la place 8 Mai 1945 qui accueille un nombre important de visiteurs, principalement dû aux services qu'elle offre aux usagers. La place du théâtre est marquée par un grand flux transitoire et un flux de visiteurs important en mi-journée. Pour ceux qui viennent du rondpoint Houari Boumediene, l'espace linéaire appelé "El Nakhlette" constitue un évitement pour se rendre au boulevard principal, cet espace est marqué par un considérable flux de visiteurs, notamment en période chaude.

Pour l'ensemble des espaces de détente situés au centre-ville de Guelma, les résultats de l'observation chiffrée sont regroupés en sept sessions du 07 :00 à 21 :00. Le nombre des usagers cumulé et la classification sont illustrés dans le graphe (Figure IV.5).

L'extrapolation du graphe indique initialement que les espaces de détente sont peu fréquentés de 09 :00 à 15 :00, par ailleurs, la fréquentation est forte de 17 :00 à 21 :00.

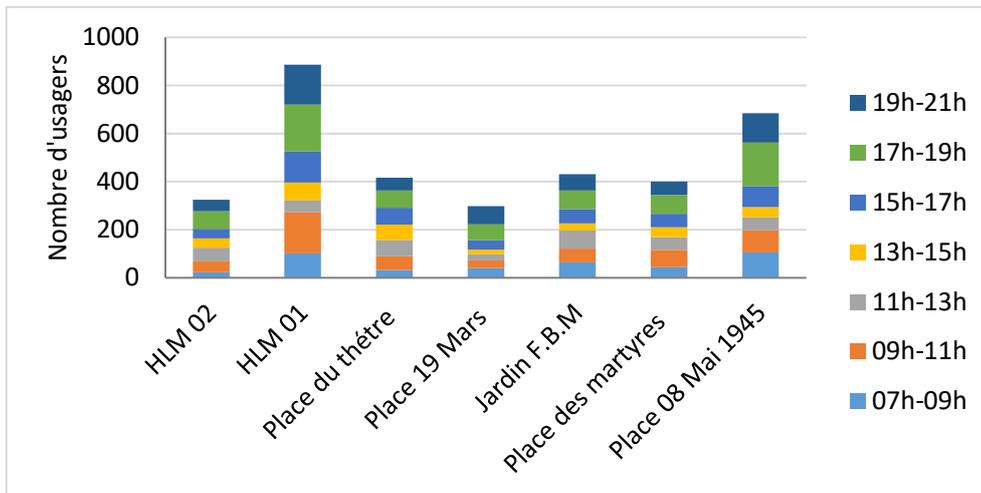


Figure IV.5: Résultats de l'observation chiffrée des espaces de détente. (Auteur, 2019)

IV.2.3 Synthèse de la phase d'exploration

La phase d'exploration sur terrain a été couronnée par la définition d'un parcours urbain situé au centre-ville de Guelma, dont la plupart des usagers de la ville le font au moins une fois par semaine avec une durée moyenne de 85 min pour le parcourir. Sur le plan physique le parcours exploré est composé d'un ensemble important des espaces extérieurs de la ville, supporté par 41 (quarante-et-un) différent point comme montre le dessin 3D dans la page suivante.

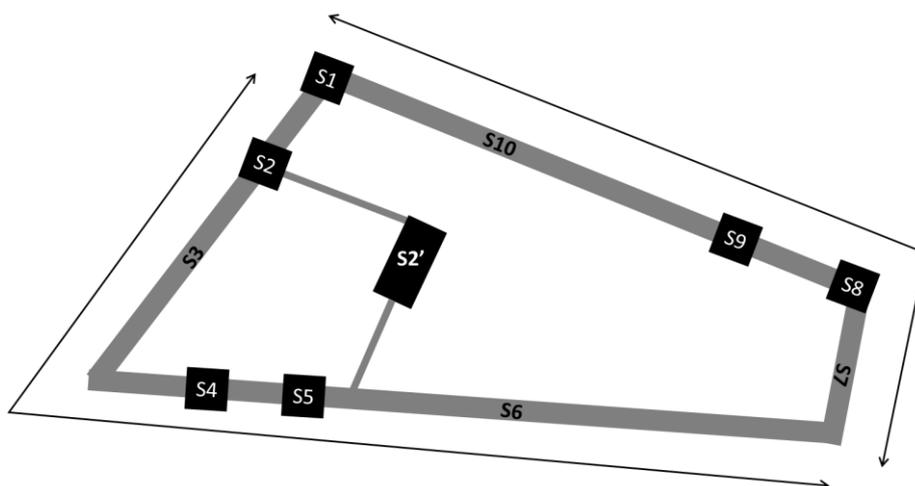
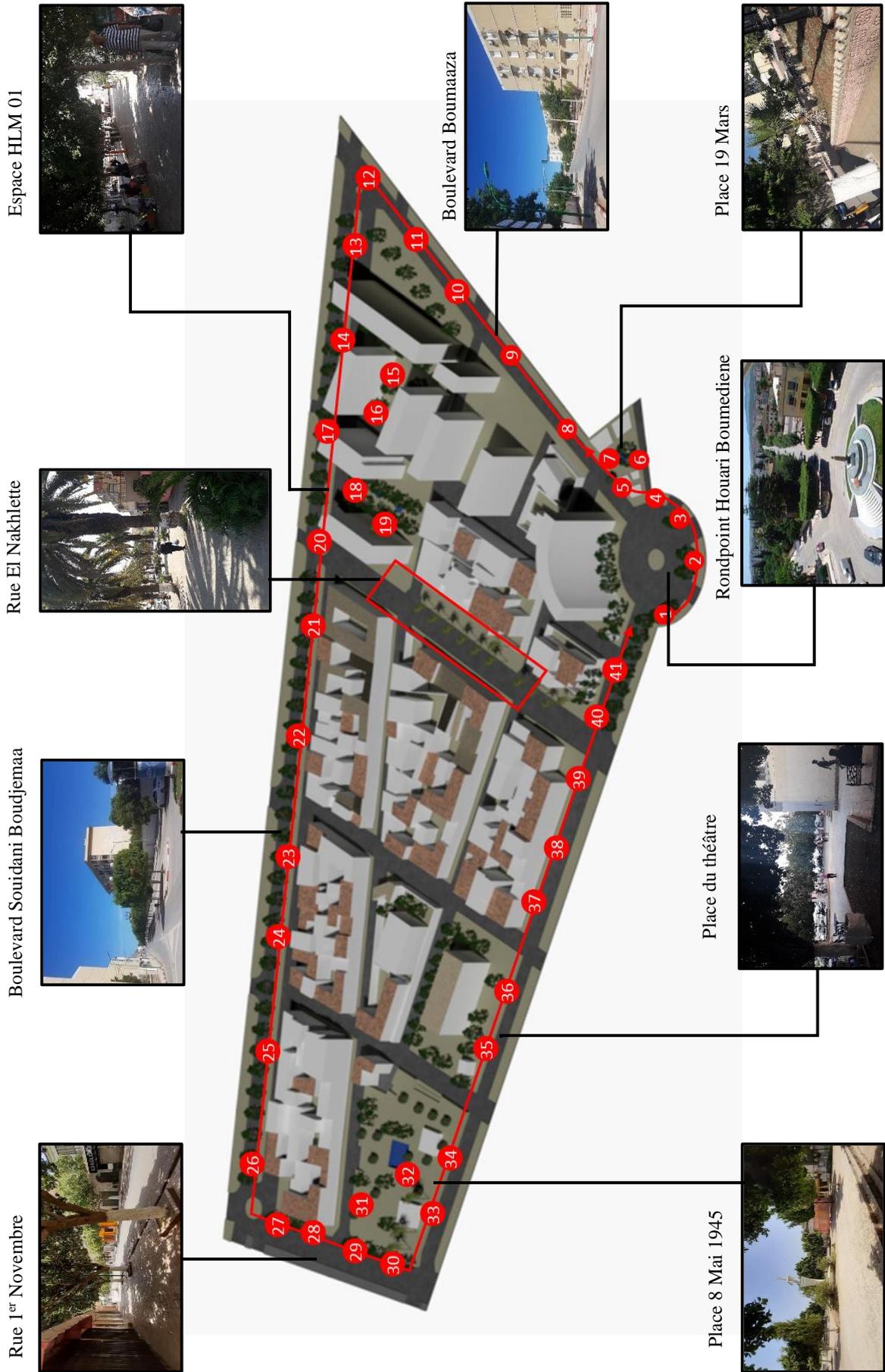


Figure IV.6: Le parcours d'investigation avec l'ensemble des espaces extérieurs en question. (Auteur, 2019)



IV.3 Investigation in-situ

Dans une volonté de collecter un maximum de données relatives au site d’investigation, les trois modalités suivantes ; mesures in-situ, questionnaires et observations ont été mis en réunion, mais aussi pour mieux comprendre la réalité que dicte l’espace urbain à Guelma, notamment pour l’interdépendance entre la fréquentation de ce dernier et le bien-être qu’il offre aux usagers. La variabilité stress-confort, l’intégration des éléments naturels, les variations microclimatiques, l’adaptation aux conditions dures, et la sensation thermique sont là les indicateurs à souligner par cette étape.

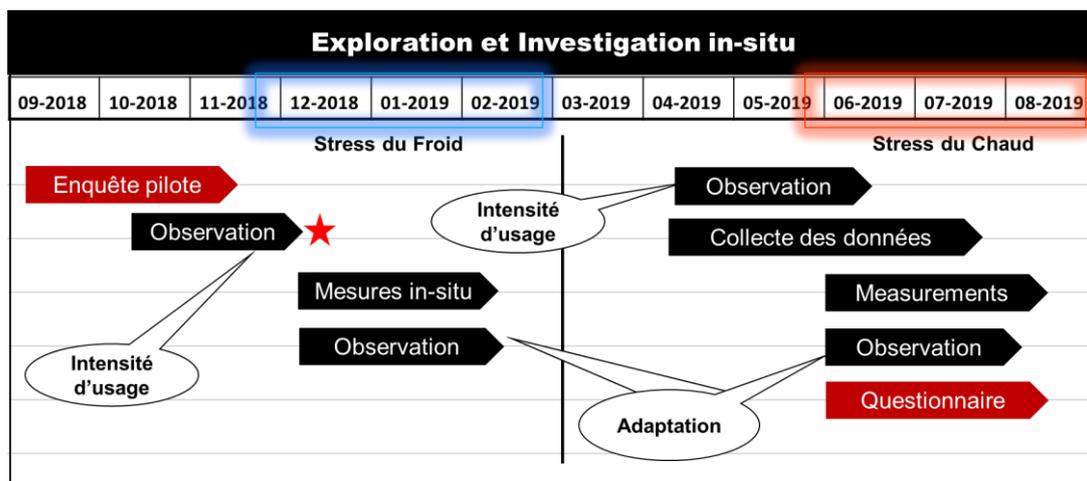


Figure IV.7: Le déroulement de l’investigation in-situ. (Auteur, 2019)

IV.3.1 Mesures in-situ

IV.3.1.1 Protocole de mesure

Avant d’entamer la campagne de mesure, la période la plus froide (Sous chauffe) et la période plus chaude (Surchauffe) de l’année ont été calculées sur la base des données climatiques de la décennie 2008 et 2017. Pour une caractérisation saisonnière des conditions atmosphériques, le relevé des paramètres microclimatiques a été effectué le long de deux périodes dans des différents point supporter par le parcours urbain explorer précédemment.

✂ La campagne de mesure d’hiver

Une série de mesure hivernale a été effectuée le long d’une journée froide typique 12/02/2019, nous avons obtenu un enregistrement bihoraire des trois paramètres mesurés dans 41 différents points de 07 :00 à 19 :00.

☞ La campagne de mesure d'été

La campagne de mesure estivale a été effectuée suivant le parcours urbain exploré par les usagers de la ville, le long de trois journées successives, allant de 20/07/2019 jusqu'au 22/07/2019. Comme résultat nous avons obtenu un relevé journalier composé de six sessions du 09 :00 à 21 :00 des trois paramètres, température de l'air, humidité relative et vitesse de l'air. Un deuxième relevé de mesures horaire a été mené le 24/07/2019 dans l'espace linéaire "El Nakhlette" appelé communément "Rue Emir Abdelkader" situé au centre-ville de Guelma.

IV.3.1.2 Paramètres mesurés

Dans son sens étroit, l'environnement thermique est défini par les paramètres microclimatiques responsables de toutes sensations thermiques, dans notre cas les paramètres mesurés sont les suivants :

La température de l'air : la température de l'air constitue un élément principal de l'atmosphère, elle se réfère à la sensation du chaud et du froid en extérieur. Dans notre recherche elle est utilisée comme indicateur indépendant subjective pour mesurer la sensation thermique durant la surchauffe estivale, mais aussi un indicateur objectif du confort climatique utilisé pour quantifier le stress du chaud.

L'humidité relative : l'humidité relative représente la quantité d'eau présente dans l'atmosphère, elle fait de bon indicateur pour démontrer les effets d'humidification de l'air (BELLARA, 2013). Sa mesure nous a permis alors d'étudier les effets des éléments naturels ; eau et végétation dans les espaces extérieurs, elle constitue aussi un élément important pour quantifier le degré du confort climatique extérieur.

La vitesse de l'air : la vitesse de l'air représente l'écoulement ou le mouvement des particules d'air, elle est conditionnée par la configuration urbaine et elle constitue un paramètre important pour évaluer le confort climatique en extérieur.

IV.3.1.3 Instrumentation

Les deux campagnes de mesures ont été réalisées à l'aide de deux instruments portatifs. Le premier "Testo 480 – AG 501 1ST, 0563 4800" est un instrument multifonction équipé avec des sondes numériques intelligentes, calibrées indépendamment. L'instrument a été utilisé comme thermo-hygromètre et comme anémomètre à l'ordre suivant :

- Mesure des températures de l'air et d'humidité relative effectuée à l'aide d'une sonde \varnothing 12 mm, avec une haute résolution de 0.01 et une précision de ± 0.03 %RH et ± 0.2 °C (+15 to +30 °C).
- Mesure des vitesses de l'air effectuée à l'aide d'une sonde de mesure à ventilo \varnothing 16 mm (échelle max. 960 mm) avec une précision de ± 0.2 m/s.

Le deuxième instrument "HENNA HI +9564" est un thermo-hygromètre, avec une résolution de 0.1°C et 0.1% HR et une précision optimale de $\pm 0,5$ °C et ± 3 % HR, son rôle est de supporter les mesures de température et d'humidité relevées par Testo 480.



Figure IV.8: Instruments utilisés dans la campagne de mesures. (Auteur, 2019)

IV.3.1.4 Résultats de la campagne de mesure

Les résultats des deux campagnes de mesures indiquent, initialement que l'été se caractérise par des surhaussements de température. A l'inverse, l'hiver se caractérise par des températures modérées. Ceci signifie que l'environnement thermique urbain au centre-ville de Guelma est climatiquement affecté en été et il génère des situations d'inconfort durant la surchauffe estivale. À évaluer et améliorer par notre investigation.

✂ Météo générale de la période d'étude

Selon les prévisions météorologiques de la ville de Guelma (Ventusky - Cartes de Prévision Météo, n.d.), la valeur la plus élevée de température était 41°C, l'humidité relative minimum, durant les trois jours était de $\pm 20\%$, avec une vitesse d'air moyenne de 3,5 m / s. Les mesures in-situ au centre-ville de Guelma ont montré plus de détails météorologiques, donnant une description précise de la météo pendant la période d'étude. Pour le troisième jour, la température la plus élevée a atteint 42,9°C à 15 h 00 au point 41 avec une faible humidité relative 17,4% et une faible vitesse du vent 0.3 m / s. La température la plus basse

30,5°C a été enregistrée à 09 :00 au point P1, avec une valeur maximum d’humidité relative 56% et une faible vitesse du vent 0,5 m /s. On peut conclure que les journées d'étude ont connu une vague de chaleur majeure. Les paramètres microclimatiques mesurés sont représentés dans (Tableau IV.2).

Tableau IV.2: Météo générale de la période d'investigation. (Auteur, 2019)

Journées d'étude	Température de l'air (C°)			Humidité relative (%)			Vitesse de l'air (m/s)		
	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moye	Max	Min
20/07/2019	35.9	42.6	30	28.7	49.4	18.4	0.6	1.2	0
21/07/2019	36.4	41.4	32	31.9	50.0	21.9	0.5	1.2	0
22/07/2019	36.9	42.9	30.5	30.5	56.0	16.5	0.6	1.5	0.3

☞ Paramètres microclimatiques mesurées

Les graphes suivants illustrent les résultats de la campagne estivale du troisième jour (22/07/2019) c'était une journée d'été ensoleillée et chaude avec un stress thermique maximal et une forte exposition au soleil.

Les températures d'air les plus élevées ont été enregistrées dans la troisième session de 13 :00 à 15 :00, les valeurs les plus basses ont été enregistrées au niveau des premiers dix endroits, allant de P1 à P10 pendant la première session de 09 :00 à 11 :00. La session du soir a connu des températures relativement basses avec une tendance journalière stable.

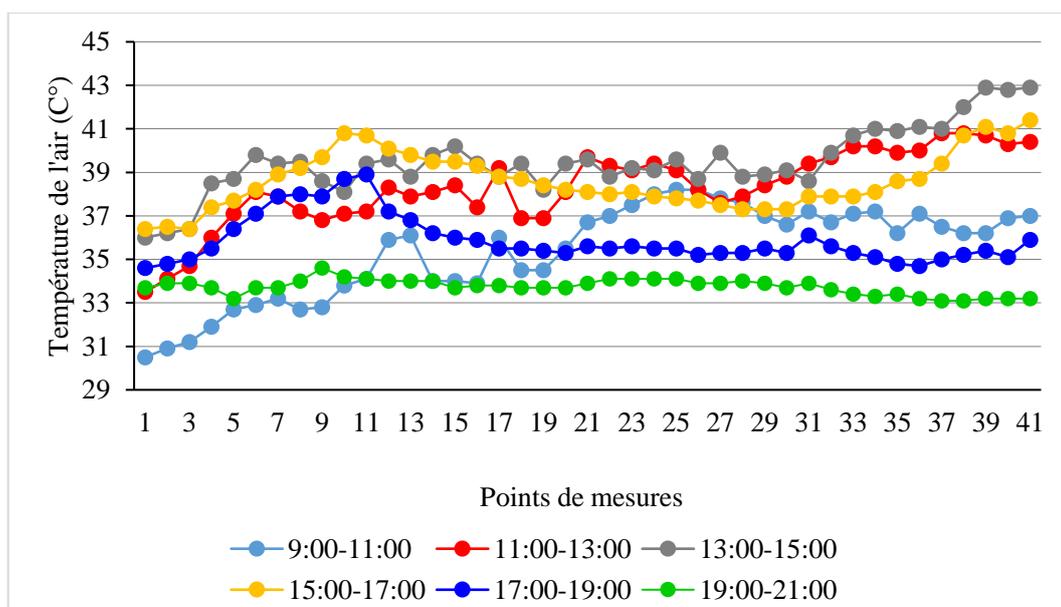


Figure IV.9: Résultats de mesure des températures de l'air le long du parcours d'investigation. (Auteur, 2019)

A l'ordre inverse, les valeurs les plus élevées d'humidité relative ont été enregistrées au niveau des endroits P1 à P16 pendant la première session du 09 :00 à 11 :00. Il a été relevé des valeurs moyennes élevées pour la session du 19 :00 à 21 :00, tandis que les valeurs les plus basses ont été relevées dans la session du 13 :00 à 15 :00.

La vitesse de l'air était d'une tendance perturbée pour toute la journée, avec des valeurs un peu élevées pendant la session du 17 :00 à 19 :00.

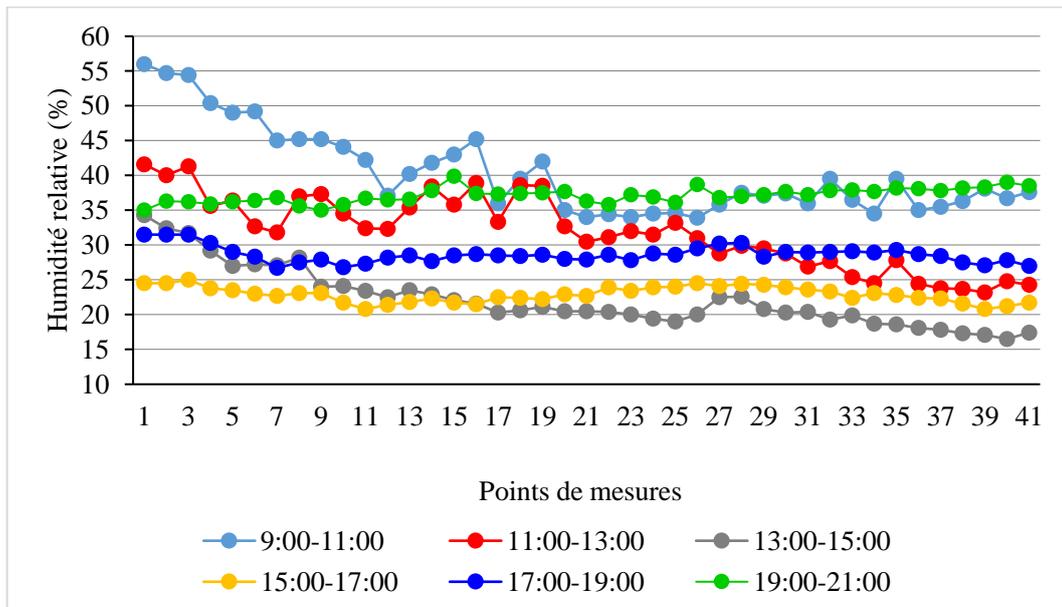


Figure IV.10: Résultats de mesure d'humidité relative le long du parcours d'investigation. (Auteur, 2019)

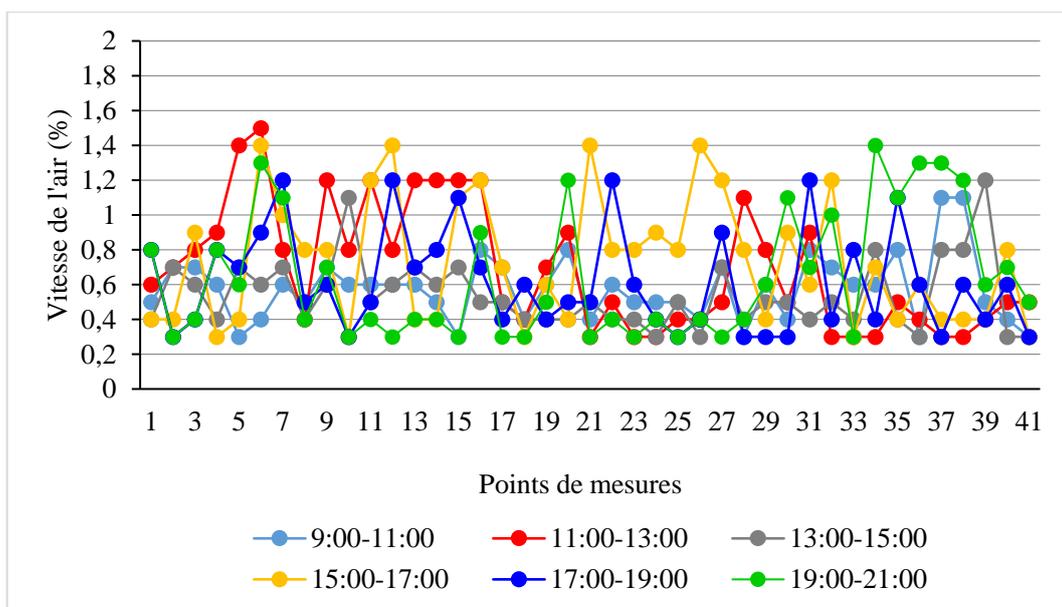


Figure IV.11: Résultats de mesure des vitesses de l'air le long du parcours d'investigation. (Auteur, 2019)

IV.3.2 Questionnaire et observation

Le questionnaire d'enquête intitulé "le confort climatique dans les espaces extérieurs a Guelma" a été conduit simultanément avec le relevé de mesure et suivant les mêmes points de mesure pendant trois jours successifs du 20/07/2019 au 22/07/2019. Bien qu'elle n'ait pas de résultats concrètes, l'observation a grandement supporté l'investigation, dont elle s'est opérée parallèlement avec le questionnaire et la campagne de mesures d'été.

IV.3.2.1 Déroulement du questionnaire

Prenant en considération que le parcours urbain objet de notre investigation est composé de 41 différents points et qui nécessite deux heures à le parcourir (120 minutes), le recueil des données propres à ce parcours implique un processus compliqué qui consiste à mesurer trois paramètres microclimatiques d'un endroit donné et en même temps de questionner ses usagers, dans un laps de temps qui ne dépasse pas trois minutes au maximum.

Pour bien mener la phase d'investigation in-situ, nous nous sommes organisés en équipe de sept membres¹, dont le facteur commun est l'appartenance à la faculté des sciences et de la technologie de l'université de Guelma. La figure ci-dessous explique le processus de récolte des données pour une session d'investigation.

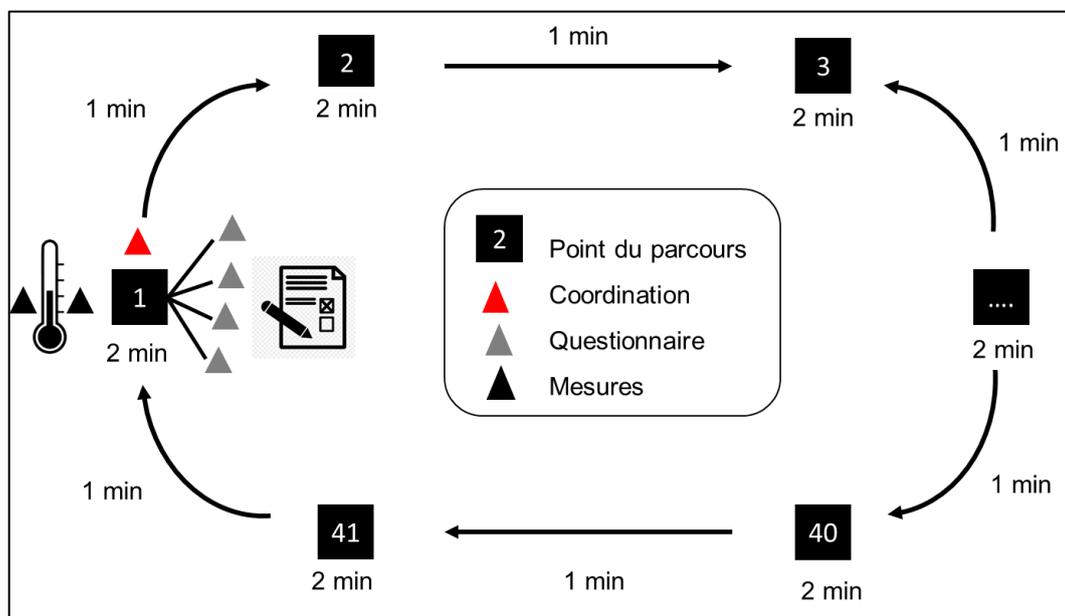


Figure IV.12: Déroulement du processus de récolte de données (mesures in-situ et questionnaire) pour une session d'investigation. (Auteur, 2019)

¹ Équipe d'assistants au travail d'investigation in-situ : Oudjani Selma, Guenine Mohamed Amine, Allel Housseem, Erhaili Abd Allah, Sahraoui Randa et Mokhtar Saada.

IV.3.2.2 Structure du questionnaire

Le questionnaire est organisé en quatre rubriques et établi en tableaux pour encourager les répondants à fournir des informations exactes, impartiales et complètes.

La première rubrique "l'identification de l'interviewé" est cruciale car elle constitue la première exposition du répondant à l'entretien et donne le ton à la nature de la tâche à effectuer. Elle consiste alors à renseigner sur le profil du répondant et le mettre en sujet en demandant pourquoi il était là à ce moment.

La deuxième rubrique porte sur l'usage et la fréquentations des espaces extérieurs, les questions utilisés sont à choix multiples et poser de sorte que l'une mène, facilement et naturellement à la suivante. Le choix "degré du confort" fait de bon articulateur pour passer à la rubrique suivante ; "Évaluation de la sensation thermique", l'évaluation s'articule autour de trois critères synthétiques, degré du confort thermique, acceptabilité thermique et préférences thermiques. Chaque un de ces derniers aborde des critères détaillés par une question fermée avec un niveau d'évaluation (choix de réponse) et une question ouverte vise le développement de l'avis citoyen en matière de préférence thermique.

La dernière rubrique "Évaluation des paramètres microclimatiques influant la sensation thermique" pose des questions directes sur les paramètres microclimatiques responsables de toutes sensations thermiques y compris la sensation du stress.

Pour les trois paramètres mesurés, température, humidité et vitesse de l'air, la question suivante a été posée avec une échelle de cinq réponses.

Q : comment vous évaluez un tel paramètre dans cet endroit ?

Après une longue série des questions dans lesquelles les répondants ont été contraints de limiter leurs réponses à des catégories précédées, deux questions ouvertes, optionnelles ont été posés pour apporter d'une part un soulagement aux répondants, d'une autre part pour mieux appréhender la sensation thermique :

Q3 : essayez de décrire ce que vous sentez vis-à-vis un tel paramètre dans cet endroit !

Q2 : citez des causes !

La question clôture était ouverte "proposez des solutions lors des mouvements de canicule".

IV.3.2.3 Traitement et analyse des données

La gestion et l'accessibilité aux données récoltées lors de l'investigation sur terrain ont été grandement facilitées à l'aide du logiciel *IBM SPSS Statistics 23* "Statistical package for the social sciences". Le processus de traitement s'est commencé par un codage et une saisie manuelle bihoraire des questionnaires, ensuite une étape d'apurement des données s'est effectuée, dont 581 est le nombre total des questionnaires valides, puis la préparation de la tabulation à savoir fréquence, croisée ou descriptive et enfin l'exportation des données exploitables en tableaux ou en graphes.

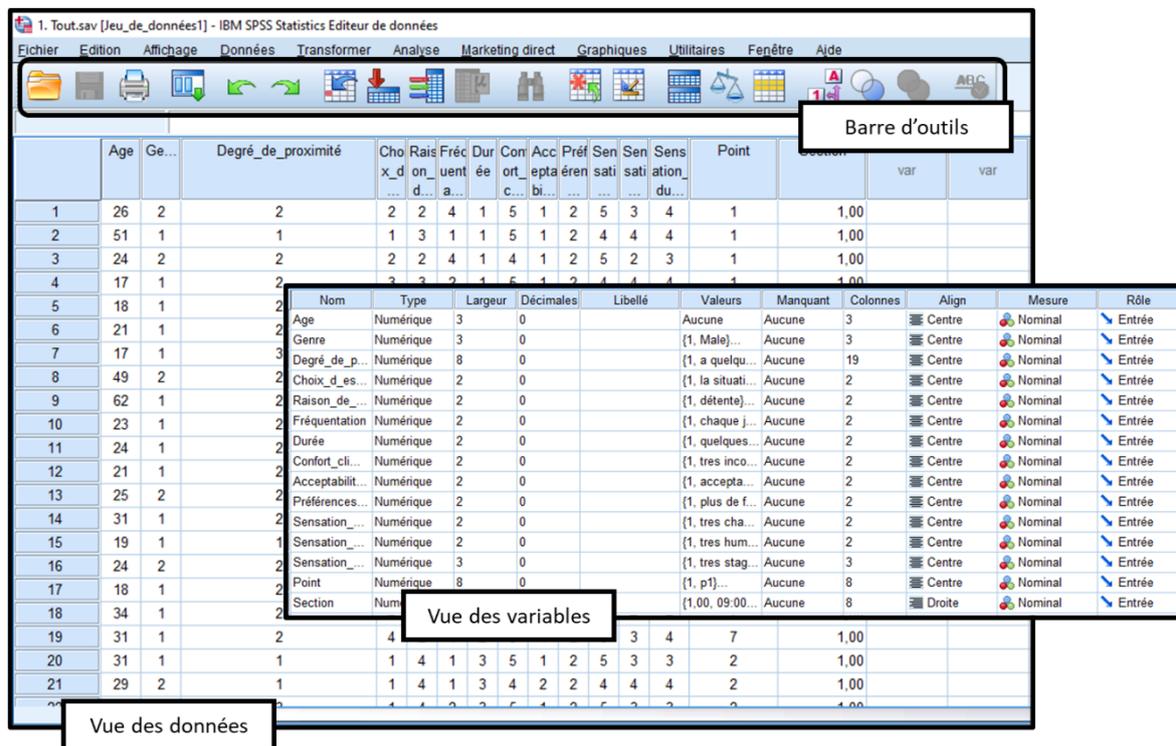


Figure IV.13: Interface du logiciel SPSS, vue des données et vue des variable lors de la saisie des données. (IBM SPSS Statistics 23)

IV.3.2.4 Résultats du questionnaire

∞ Profils et caractéristiques personnelles des répondants

Généralement, l'identification de la personne interrogée vise à connaître le profil de l'individu pour comprendre quels facteurs influencent ses réponses. Pour l'ensemble des usagers de l'espace extérieur au centre-ville de Guelma, le profil dominant c'est celui qui appartient à la catégorie des professionnels, âgés de 25 à 49 ans, dont 63% d'eux vivent loin du centre-ville, le profil de l'universitaire est aussi présent en force. Le lancement et la

conduite du questionnement pour ces deux profils s'est fait directement en lisant le titre du questionnaire "le confort climatique dans les espaces extérieurs à Guelma", contrairement pour la catégorie du 16 à 19 ans, la notion du confort climatique semblait abstraite.

Il est à noter qu'il été difficile de limiter les réponses aux questions ouvertes pour la catégorie des usagers âgés de 50 ans et plus, en raison du temps limité nous étions obligés de mettre fin au questionnement pour la plupart de ceux-ci.

Tableau IV.3: Effectifs et caractéristiques personnelles des répondants par session. *Auteur, 2020*

Session	Effectif	Genre		Tranche d'âge					Degré de proximité		
		Masculin	Féminin	16-19	20-24	25-34	35-49	50 et plus	A quelque mètre	Loin	Très loin
09 :00 – 11 :00	143	91	52	23	31	43	28	18	31	72	40
11 :00 – 13 :00	109	62	47	17	19	36	21	16	19	57	33
13 :00 – 15 :00	66	37	29	9	16	25	12	4	16	31	19
15 :00 – 17 :00	74	38	36	6	17	28	21	2	10	44	20
17 :00 – 19 :00	87	36	51	4	24	29	19	11	12	56	19
19 :00 – 21 :00	102	47	55	3	23	41	23	12	32	53	17
Total	581	311	270	62	130	202	124	63	120	313	148
Pourcentage	100 %	54 %	46 %	11 %	22 %	35 %	21 %	11 %	21 %	54 %	25 %

🌀 Usage et fréquentation de l'espace extérieur

Avant d'aborder le sujet du confort climatique dans les espaces extérieurs, une partie du questionnaire a été dédié au recensement sur l'usage et la fréquentation de ces derniers.

Les résultats indiquent que la plupart des usagers ont choisis l'espace mis en questionnement pour sa situation, un nombre important des usagers ont les choisis pour le degré du confort. A la réponse "pourquoi faire ? ", les réponses ont été en grande part "je passe par ici", les deux raisons de visite "rencontre et détente" ont eu des pourcentages élevés. 20% des usagers ont des réponses non encadrées par le questionnaire, par d'exemple, je travaille ou j'habite ici.

Tableau IV.4: Résultats du questionnaire "usage et fréquentation de l'espace extérieur". Auteur, 2020

Choix de l'espace	Raison de la visite
<p>■ la situation ■ le degré de confort ■ l'animation ■ autre</p>	<p>■ détente ■ rencontre ■ je passe par ici ■ autre</p>
Fréquentation de l'espace	Durée de la visite
<p>■ chaque jour ■ plusieurs fois par semaine ■ le weekend ■ rare</p>	<p>■ quelques minutes ■ environ une heure ■ plus d'une heure ■ autre</p>

36% des usagers fréquentent les espaces extérieurs plusieurs fois par semaine, alors que 35% d’eux les visitent chaque jour. La durée de visite est partagée d’une manière presque égale, dont 64% des usagers passent une durée d’une heure et plus. Tandis que 36% passent quelques minutes, sont souvent ceux qui ont déjà répondu par "je passe par ici".

∞ Sensation du confort et satisfaction vis-à-vis l’environnement thermique

Cinq options sensorielles ont été utilisées pour déterminer la sensation du confort climatique en été, dont l’option "Neutre" est utilisée pour exprimer un état de sensation moyen qui signifie que l’environnement n’est pas confortable ni inconfortable.

Les résultats indiquent que l’environnement thermique urbain est majoritairement voté comme "un peu confortable" et "neutre" pour la session du matin, de 09 :00 à 11 :00, ainsi que celle du soir, de 19 :00 à 21 :00. Par ailleurs, les cinq options ont été utilisées dans la session du midi de 11 :00 à 13 :00. La sensation d’inconfort se manifeste en force pendant

les heures de l'après-midi, avec la sensation du « neutre » vers 19 :00, qui annonce souvent le début de la relève journalière après de longues heures du stress climatique.

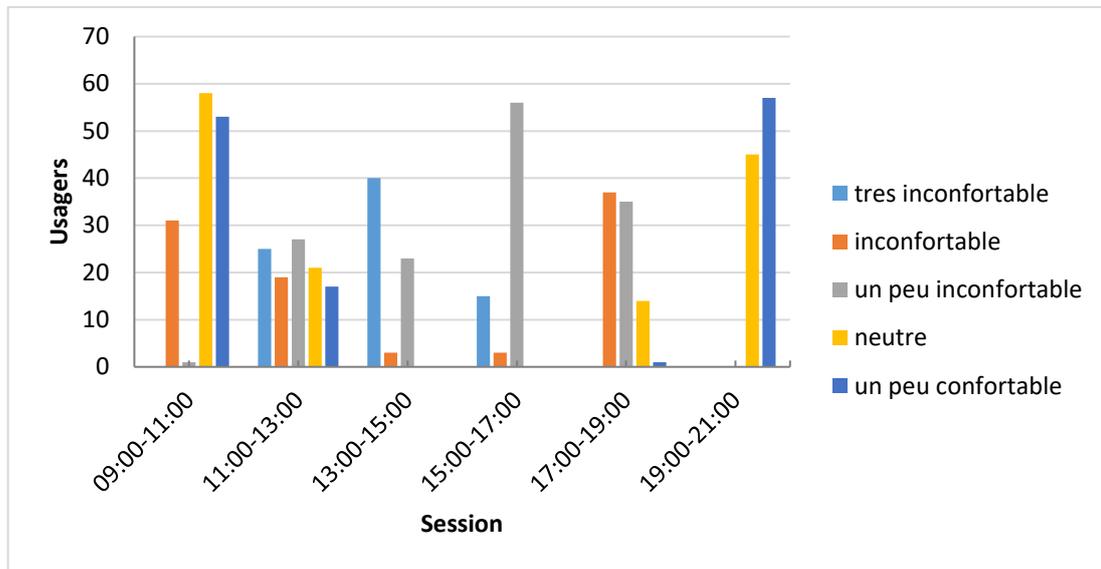


Figure IV.14: Sensation du confort climatique par session. (Auteur, 2020)

L'appréciation de l'environnement thermique urbain s'est effectuée par le biais de trois options, ayant pour but d'explorer l'acceptabilité thermique tout au long des journées chaudes d'été suivant six sessions de 09 :00 à 21 :00 (Figure IV.16).

Pour la première session, l'environnement thermique urbain est grandement voté comme "acceptable et neutre" avec une minorité qui le voit "inacceptable". A l'encontre de la session suivante, ou l'environnement thermique urbain est voté majoritairement comme "inacceptable". Les deux sessions de 13 :00 à 17 :00 sont jugé quasi-totalement comme "inacceptables". Les sessions après ont expérimenté le changement vers l'appréciation, d'où l'option acceptable est la dominante durant la dernière session de 19 :00 à 21 :00.

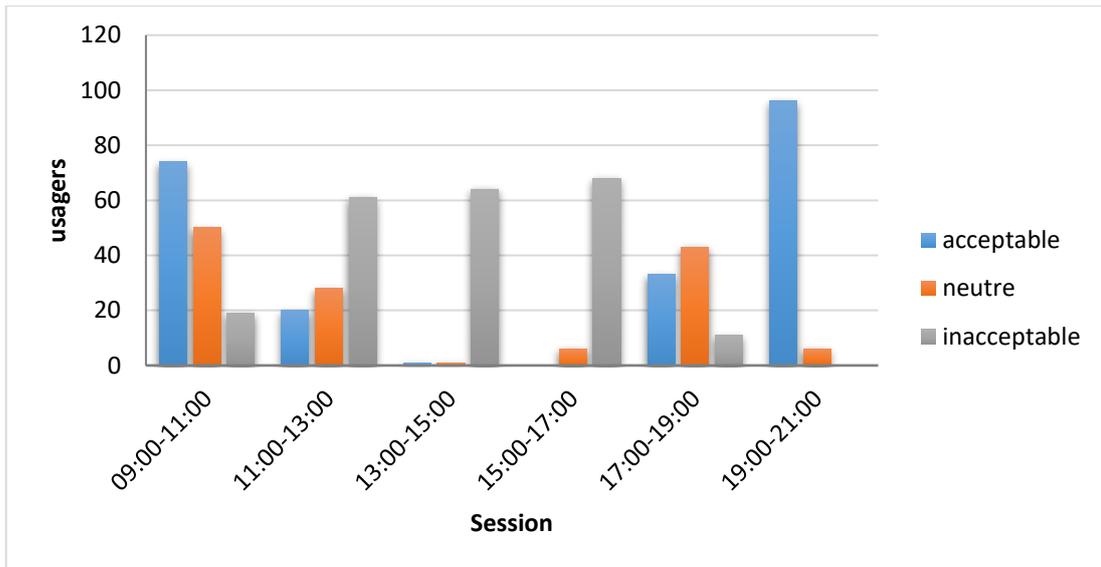


Figure IV.15: Appréciation de l’environnement thermique urbain (Acceptabilité) par session. (Auteur, 2020)

Les préférences thermiques des usagers ont été explorées en posant la question "Pour de conditions meilleures, vous suggérez !" avec trois options de réponse ; plus de fraîcheur, aucun changement ou plus de chaleur.

Seulement deux options ont été utilisées comme montre l’histogramme (Figure IV.17). La réponse "aucun changement" a été largement utilisée par les usagers pendant la session du matin, de 09 :00 a11 :00, ainsi que celle du soir de 19 :00 à 21 :00. Tandis que, la majorité préfère plus de fraîcheur pendant les sessions, de 11 :00 à 17 :00. Pour la session, de 17 :00 à 19 :00, les préférences thermiques sont presque également partagées entre les deux options.

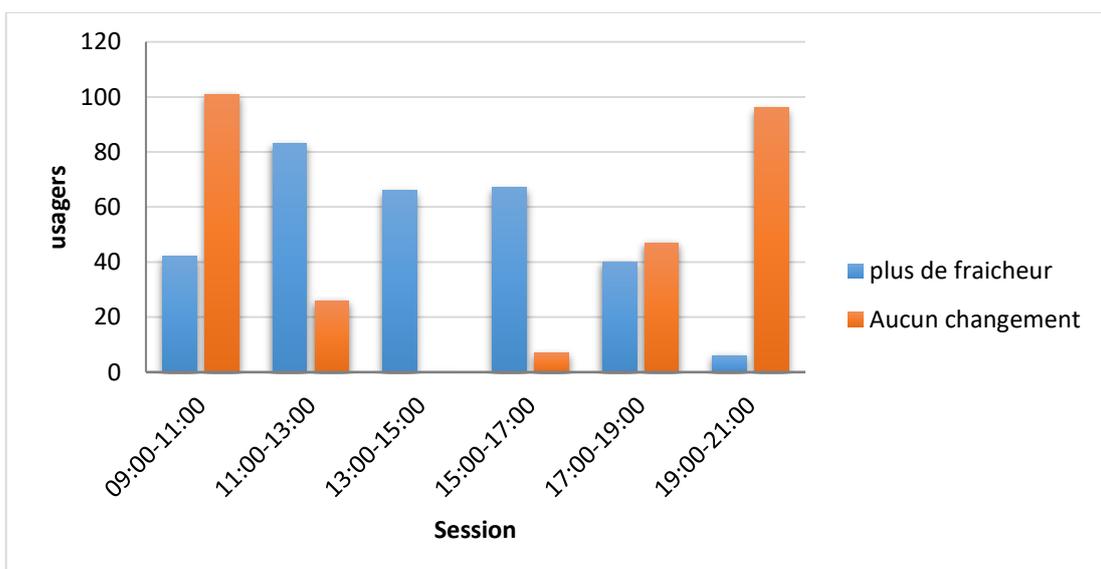


Figure IV.16: Préférences thermiques des usagers par session. (Auteur, 2020)

🌀 Sensation thermique des conditions microclimatique

La sensation des conditions microclimatiques implique l'utilisation de cinq options sensorielles pour juger ou apprécier les paramètres suivants : température de l'air, humidité relative et vitesse d l'air. Comme le cas avec la sensation du confort climatique, l'option "Neutre" est utilisée pour exprimer un état de sensation moyen de chaque paramètre le long des six sessions de 09 :00 à 21 :00.

L'histogramme ci-dessous présente les résultats de la sensation des températures de l'air par session (Figure IV.18). Pour la première session, trois options sensorielles ont été utilisées ; "neutre", "un peu frais" et "un peu chaud" avec une dominance de la première. La deuxième session de 11 :00 à 13 :00 implique les cinq options sensorielles, dont les deux options ; "un peu chaud" et "chaud" dominant équitablement. L'environnement thermique urbain est voté par la majorité des usagers comme "très chaud" et "chaud" pendant la période de 13 :00 à 17 :00. La session suivante de 17 :00 à 19 :00 est voté comme "un peu chaud" pour la grande part des usagers. Pour la dernière session, l'appréciation de l'environnement thermique urbain est faite en fonction des deux options sensorielles ; "neutre" et "un peu frais", exprimant un état de sensation qui se tend souvent vers la satisfaction thermique.

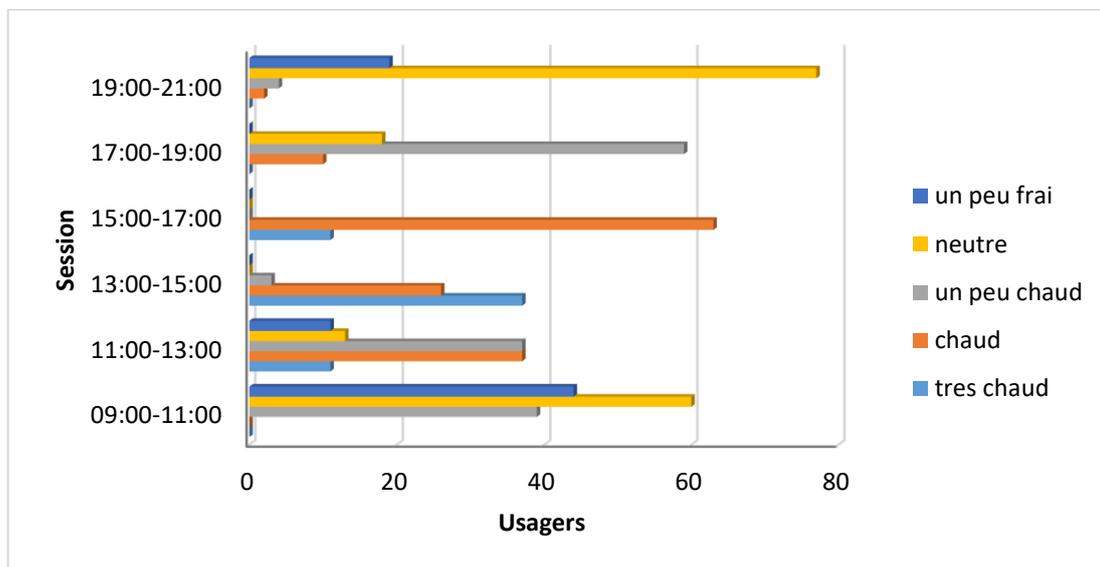


Figure IV.17: Sensation des températures de l'air par session. (Auteur, 2020)

A l'exemple des températures de l'air, la sensation de l'humidité relative a été explorée selon une échelle de réponse composée de cinq options sensorielles. Les résultats sont affichés dans l'histogramme dans la page suivante (Figure IV.19).

La première session se caractérise par deux sensations qui dominent ; "neutre" et "un peu humide". Globalement, l'environnement thermique urbain a expérimenté une sensation sèche pendant les trois sessions de 11 :00 à 17 :00. D'où l'option "un peu sec" a été largement utilisée pendant les trois sessions mentionnées, tandis que l'option "sec" a été grandement relevée dans la session du 13 :00 à 15 :00. La sensation humide est la dominante pendant les deux dernières sessions, notamment celle du 19 :00 à 21 :00, d'où plus de 90% des votes ont été pour la sensation "un peu humide".

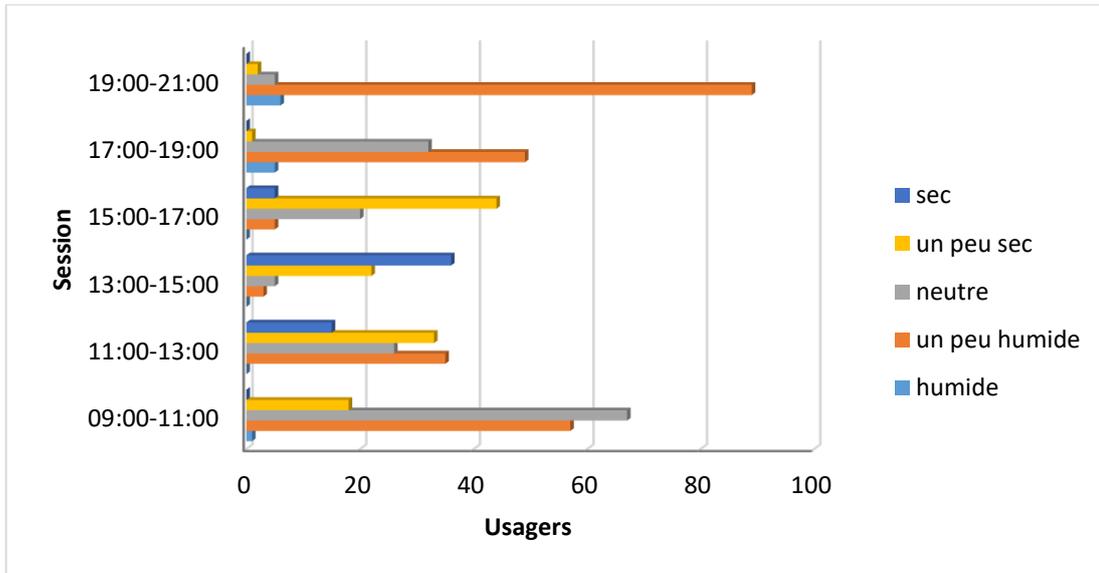


Figure IV.18: Sensation d'humidité relative par session. (Auteur, 2020)

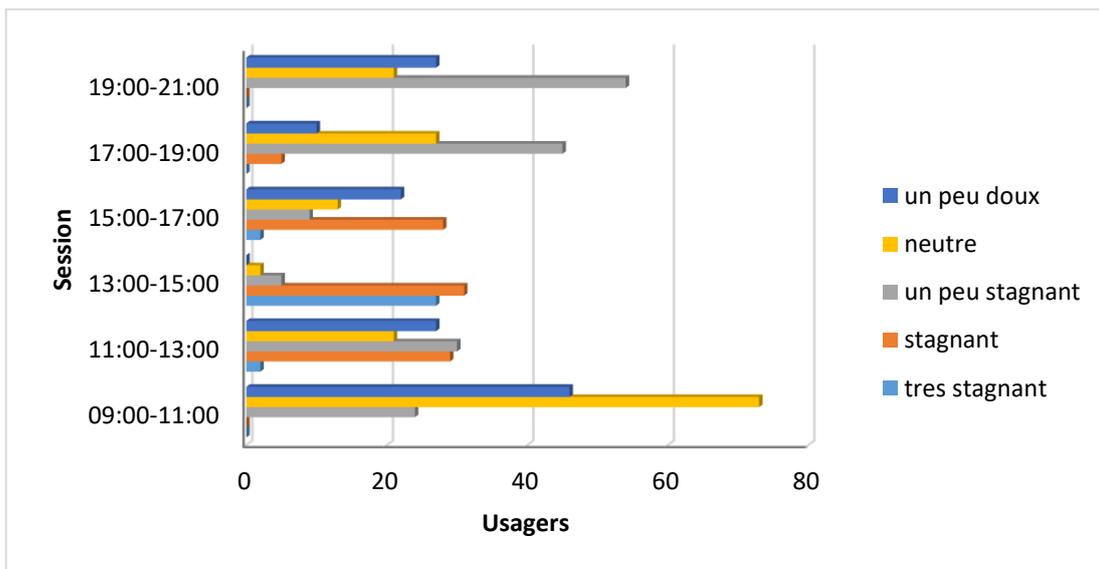


Figure IV.19: Sensation des vitesses de l'air par session. (Auteur, 2020)

IV.4 Simulation numérique

La méthode de simulation numérique vise à étudier la réalité de l'environnement thermique et à évaluer le confort climatique dans les espaces extérieurs au centre-ville de Guelma, durant la surchauffe estivale. Autrement dit, fournir une meilleure compréhension de l'environnement thermique à l'échelle piétonne, en observant le comportement des éléments naturels (eau et végétation) et leur rôle de modifications des conditions microclimatiques.

IV.4.1 Modèle de simulation

Le rapport entre éléments naturels des espaces extérieurs (végétation et eau) et les paramètres microclimatiques trouve une modélisation très précise dans les modèles de simulation atmosphérique. Dans notre recherche, nous avons opté pour un modèle atmosphérique supporté par le progiciel Envi-Met. Ce dernier implique des données d'entrée liées à la composition des espaces extérieurs étudiés, tels que le ratio, la disposition végétale et les surfaces d'eau.

L'avantage de ce modèle réside dans sa capacité de simuler des échelles spatiales réduites, outre il reconstruit les mécanismes de propagation des paramètres microclimatiques et leurs effets sur l'usager à l'échelle du piéton en fournissant des indices thermiques et climatiques tels que l'indice UTCI et PMV.

IV.4.2 Le progiciel Envi-Met

Envi-met est un programme de conception urbaine en trois dimensions qui simule le microclimat urbain, développé par Michael Bruse en 1993. C'est l'un des principaux outils numériques utilisés dans la conception bioclimatique en milieu urbain. De par sa capacité d'anticiper les conditions microclimatiques, tels que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et d'autres paramètres, Envi-met aide les concepteurs à opter pour des choix judicieux lors de la conception des espaces extérieurs (Ozkeresteci et al., 2003; Tsitoura et al., 2017). De plus, le modèle ENVI-met a été largement utilisé pour améliorer l'environnement thermique urbain (Elwy et al., 2018). Les données atmosphériques de sortie issues de ce modèle sont utilisées dans le calcul des indices thermiques, via l'outil de post-traitement BioMet. L'ensemble des données de sortie générées par Envi-met sont visualisées via le module LEONARDO (Chatzinikolaou et al., 2018). Une explication complète du programme ENVI-met est disponible sur le site Web (ENVI-Met - Decode Urban Nature with ENVI-Met Software, n.d.).

IV.4.2.1 Mise en fonction du programme Envi-Met

La mise en fonction du progiciel Envi-Met lors de simulation atmosphérique se résume principalement en quatre étapes.

Premièrement, créer une nouvelle zone et projeter les caractéristiques de l'environnement physique (sol, bâtiments et végétation), deuxièmement, éditer les paramètres de simulation, introduire les données microclimatiques et exécuter la simulation, puis calculer les indices thermiques et climatiques tels que UTCI, PET et PMV via BioMet. Enfin, c'est la visualisation des résultats à l'aide du module LEONARDO.

La figure suivante illustre un exemple de la méthodologie de simulation atmosphérique supportée par Envi-met.

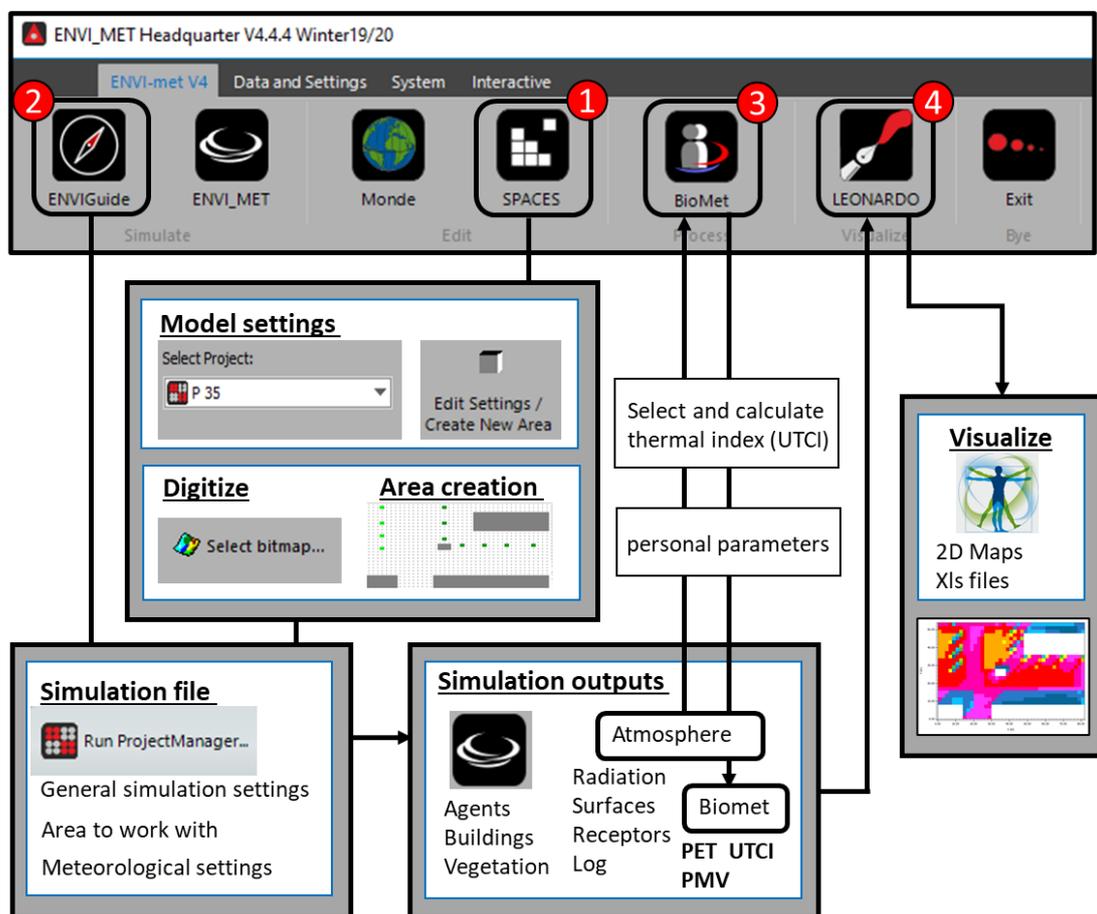


Figure IV.20: Mise en fonction du programme Envi-Met. (Envi-Met V4)

IV.4.2.2 Scénarios de simulation

Dans notre travail de recherche nous avons conduit des séries de simulation atmosphérique avec différents scénarios :

- **Etude de l'état actuel** : ceci vise essentiellement à étudier la réalité de l'environnement thermique et à quantifier le stress climatique du chaud dans les espaces extérieurs à Guelma. En vue d'exploiter des données microclimatiques que nous n'avons pas pu les mesurer sur terrain, telle que la température radiante, nous avons mis en corrélation les paramètres microclimatiques mesurés avec ceux simulés. Cette étape est appelée la validation du modèle de simulation.
- **Etude d'impact des éléments naturels** : ceci vise à contrôler la réalité de l'environnement physio-thermique en éliminant ou en ajoutant un élément naturel (eau et végétation). Le simple fait d'éliminer le végétal ou le plan d'eau d'un espace et le simuler sous les mêmes conditions microclimatiques est suffisant pour apprécier les bienfaits de la végétation et de l'eau en tant que régulateurs des conditions microclimatiques en été.
- **La recherche des solutions thermiques et climatiques adéquates** : ce genre de simulation implique des scénarios végétaux basés sur le type et la disposition de la végétation et des scénarios d'eau avec des différentes configurations des plans d'eau. Dépend des résultats de ces derniers, une proposition optimale, impliquant les deux éléments naturels ; eau et végétation sera étudié et évalué par rapport à l'état actuel.

IV.4.2.3 Données d'entrée

Les séries de simulation mentionnées ci-dessus impliquent en entrée deux catégories de données, la première catégorie englobe les éléments physiques, tels que les bâtiments, les rues, la végétation et les plans d'eau. La deuxième catégorie englobe les conditions climatiques, telles que la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse de l'air. La simulation atmosphérique des différents espaces a été réalisée en utilisant les paramètres microclimatiques mesurés pendant le troisième jour (22 juillet 2019).

IV.4.3 Conditions de simulation

L'ensemble des espaces sélectionnés au centre-ville de Guelma ont été étudiés au moyen de simulations atmosphériques à l'aide du modèle ENVI-met, dont l'évaluation du confort climatique est faite par le biais des indices thermiques UTCI et PMV.

Les paramètres microclimatiques issues des différentes simulations ; la température de l'air (Ta), l'humidité relative (HR), la température radiante moyenne (Tmrt) et la vitesse du vent (Va), ont été utilisés pour étudier les variations microclimatiques. Alors que les indices thermiques et climatiques ont été utilisés pour mesurer le niveau du confort climatique dans chaque scénario.

Tableau IV.5: Cadre détaillé et paramètres initiaux du modèle Envi-met. *Envi-met V4.4.4*

Conditions et paramètres initiaux du modèle Envi-met	
Ville	Guelma (36° 27' 43 N; 7° 25' 33 E; 840 ft)
Climat	Semi-aride
Date de simulation	22.07.2019 / 24.07.2019
Temps de simulation	De 09:00 à 21:00
Calcul de l'indice UTCI et PMV	Biomet process
Visualisation des résultats	Leonardo

IV.4.4 Déroulement de la simulation

Le déroulement d'une opération de simulation se fait généralement suivant les quatre étapes illustrées dans la mise en fonction du progiciel Envi-Met (Figure IV.21). Nous présentons alors en suivant les étapes de simulation d'une des stations retenues (Station S2).

Etape 01

La création d'une nouvelle zone et la reconstruction de l'environnement physique de la station mis en étude, en introduisant des caractéristiques physiques, tels que le sol, les bâtiments et la végétation.

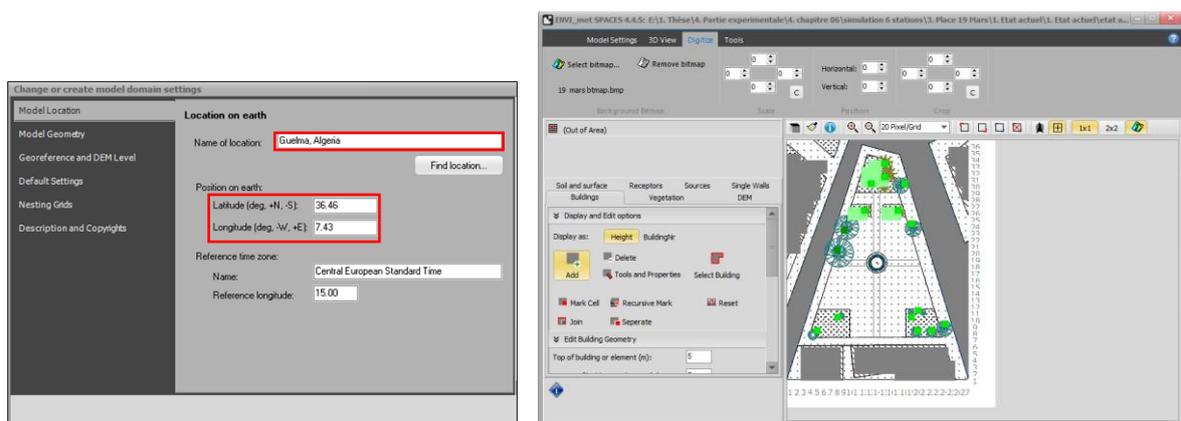


Figure IV.21: La reconstruction de l'environnement physique de la station S2 par Envi-Met. (*Envi-met V4.4.4*)

Etape 02

Édition des paramètres de simulation, introduction des données microclimatiques et exécution de la simulation.

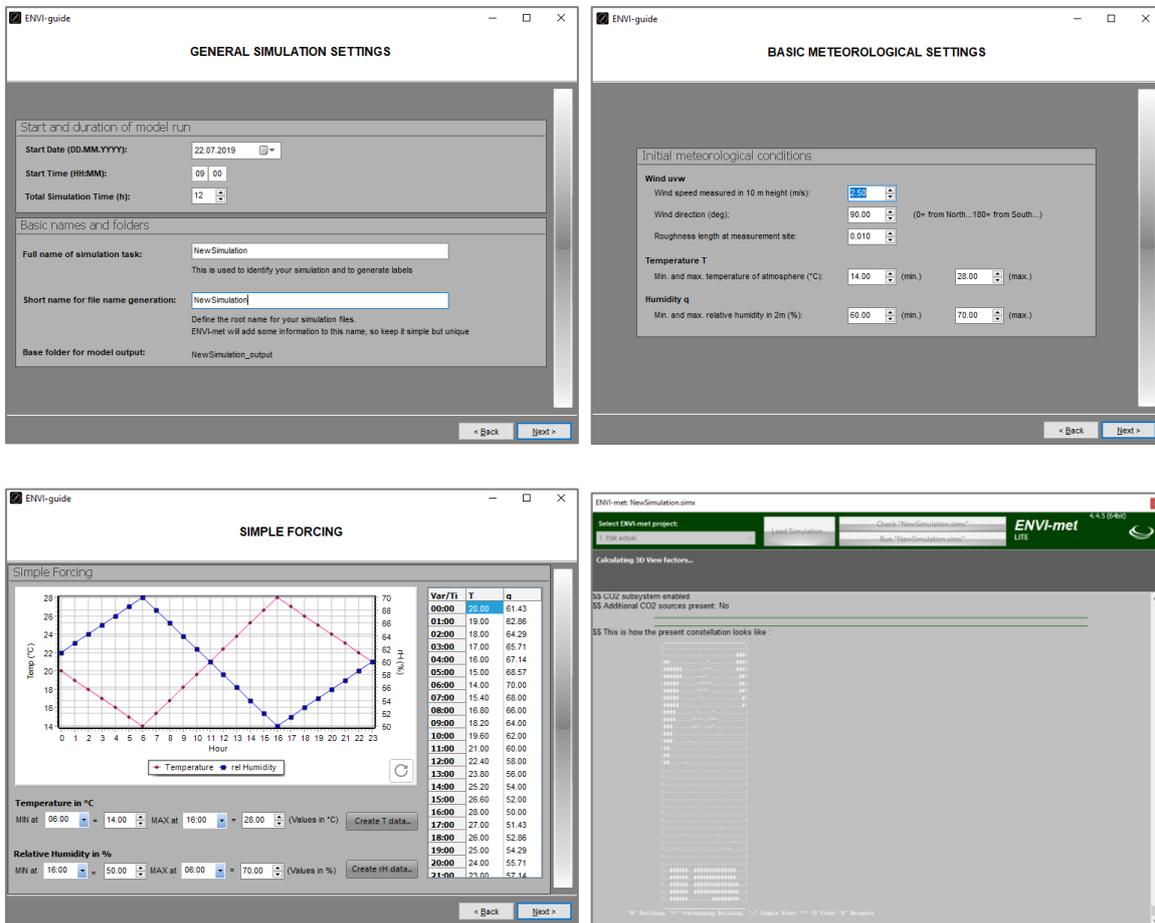


Figure IV.22: Les paramètres de simulation de la station S2 par Envi-Met. (Envi-met V4.4.4)

Etape 03

Choix et calcul des indices thermiques et climatiques, tels que UTCI, PET et PMV via l'outil BioMet.

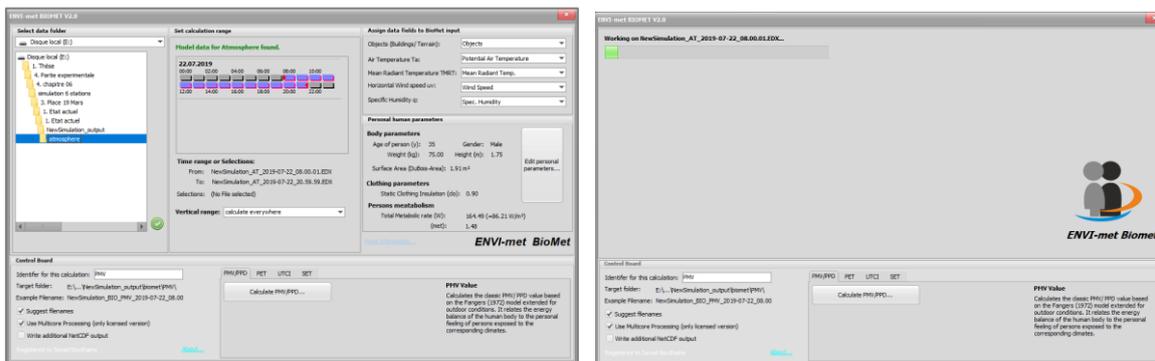


Figure IV.23: Calcul de l'indice PMV pour la station S2 par Envi-Met. (Envi-met V4.4.4)

Etape 04

Visualisation des résultats à l'aide du module LEONARDO.

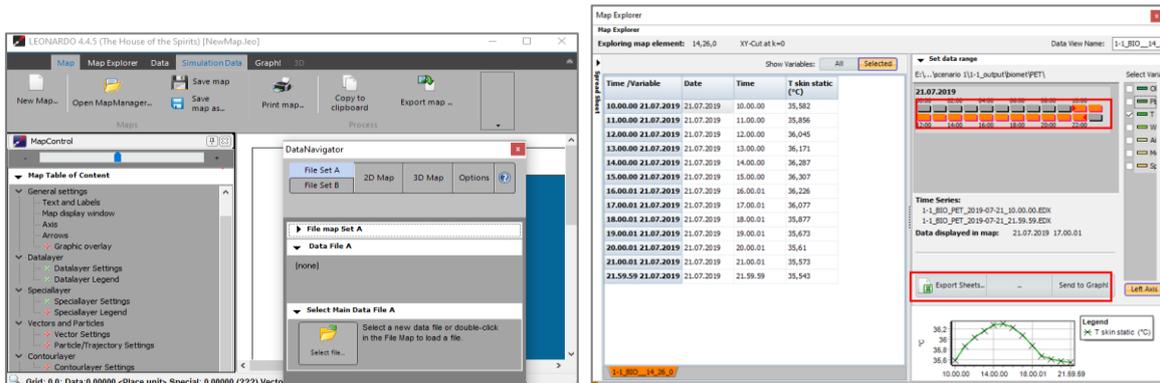


Figure IV.24: Visualisation des résultats de simulation de la station S2 par Envi-Met. (Envi-met V4.4.4)

IV.4.5 Validation du modèle de la simulation

Afin de valider le modèle Envi-Met, les valeurs simulées de la température de l'air, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air ont été corrélées aux valeurs enregistrées au centre-ville de Guelma le 22 juillet 2019. D'où le R^2 est le coefficient de réconciliation, indiquant le degré de corrélation. Les résultats sont présentés dans les graphes (Figure IV.26).

Vue le nombre énorme d'espaces extérieurs mis en simulation, nous avons vérifié la corrélation des trois paramètres dans les deux endroits de mesures P1 et P20 de 09 :00 à 21 :00. Les coefficients de réconciliation des températures de l'air, de l'humidité relative et des vitesses de l'air sont, respectivement de $R^2 = 0,85$, $R^2 = 0,76$ et $R^2 = 0,77$. Les trois indiquent que les valeurs simulées sont fortement en accord avec les valeurs enregistrées au centre-ville de Guelma le long de la journée d'investigation avec une forte corrélation des températures de l'air.

En général, le modèle est capable à reproduire correctement les données climatiques du contexte d'étude, ce qui permettra par la suite dévaluer des scénarios d'amélioration des conditions thermiques, en jouant sur la composition formelle et végétale d'un ensemble d'espaces extérieurs de la ville de Guelma. Ainsi, le modèle de simulation atmosphérique par Envi-Met est valide pour répondre aux objectifs de la présente étude.

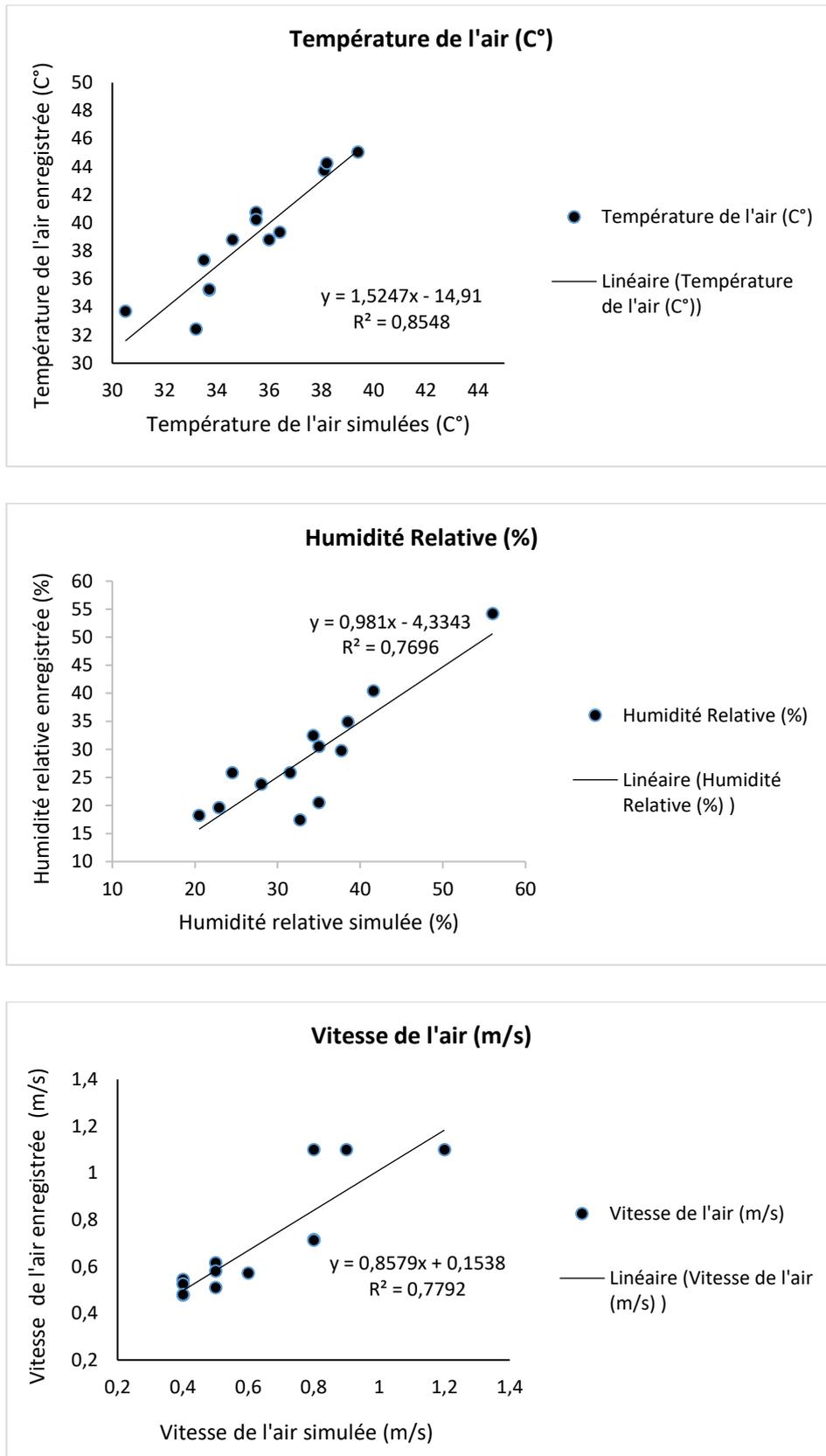


Figure IV.25: Validation du modèle de simulation Envi-Met, corrélation des valeurs simulées et enregistrées de la température de l'air, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air. (Auteur, 2020)

IV.5 Conclusion

Les investigations qui traitent la thématique du confort climatique en extérieur analysent l'environnement thermique urbain en étudiant l'interaction entre deux dimensions, le cadre physique et le microclimat urbain dans les espaces extérieurs.

Pour notre part, l'analyse de l'environnement thermique urbain a été effectuée en été le long d'un parcours urbain situé au centre-ville de Guelma, exploré par ses usagers. L'interaction entre l'environnement physique et les paramètres du microclimat urbain a été alors étudié au niveau de quarante-et-un différent endroit, supporté par ce parcours urbain en ajoutant une troisième dimension qui est la sensation thermique des usagers dans chaque endroit.

La collecte des données a fait recours à plusieurs méthodes et outils. Ainsi, l'acquisition des données objectives a été menée sur terrain, les campagnes de mesure microclimatiques à l'aide des appareils portatifs (mesures in-situ), les relevés architecturaux des espaces extérieurs, les caractéristiques physiques et géométriques des éléments naturels ...Etc. De même pour les données subjectives qui ont été collectées par voie de questionnaire et d'enquêtes.

Nous avons exposé dans ce chapitre les méthodes utilisées dans notre investigation et leur déroulement, ainsi que les résultats de chaque méthode. Bien que ces derniers aient été exposés d'une manière linéaire, l'analyse de l'environnement thermique urbain a été possible.

Toutefois, les variations microclimatiques qui existent entre des endroits successifs permettent de mettre en relation la composition de l'environnement thermique urbain et le niveau du confort attendu à endroit. La sensation thermique par session des paramètres microclimatiques renseigne sur le niveau bihoraire du confort climatique à fournir. L'utilisation des options sensorielles de réponse permet de conclure sur l'effet entraîné par l'environnement thermique urbain dans l'espace et dans le temps.

L'aboutissement de cette recherche implique à mettre en combinaison ces méthodes, mais aussi à conduire des séries de simulation. Cependant, pour fournir une meilleure compréhension de l'environnement thermique urbain à l'échelle piétonne pendant la surchauffe estivale, un croisement est nécessaire entre les résultats des deux méthodes exposées. Tout sera discuté dans les chapitres suivants et selon les objectifs de recherche à atteindre.

Chapitre VI :

Environnement thermique urbain durant la surchauffe estivale

V. Environnement thermique urbain durant la surchauffe estivale

V.1 Introduction

Les investigations portant sur le confort climatique et le comportement thermique des espaces extérieurs continue à se développer rapidement, le besoin de développer des méthodes innovantes deviens alors une nécessité pour améliorer la sensation thermique et le confort climatique en extérieur. Cependant, c'est une tâche difficile d'évaluer l'environnement thermique et de mesurer les niveaux du confort en extérieur. Le premier enjeu trouve son origine dans la définition du confort thermique par ASHRAE 55 "*le confort thermique est cette condition d'esprit qui exprime la satisfaction de l'environnement thermique*" (*What Is ASHRAE 55? Basics of Thermal Comfort / SimScale Blog*). Étant donné que la clé de voute de la satisfaction thermique est l'acceptabilité thermique, nous nous trouvons dans l'incapacité de la quantifier, donc cette définition rend le statut du confort climatique des usagers flou. La satisfaction à un environnement thermique donné dépend alors de plusieurs facteurs qui sont, généralement basés sur la compréhension de l'environnement thermique à une échelle fine.

Le présent chapitre cherche à fournir une meilleure compréhension de l'environnement thermique urbain à l'échelle piétonne pendant la surchauffe estivale, mais aussi à mesurer les niveaux du confort climatique extérieur au centre-ville de Guelma.

La première partie vise à observer et à quantifier l'intensité d'ICU au centre-ville à l'aide des mesures climatiques effectuées dans la canopée urbaine sur l'agglomération de Guelma.

La deuxième partie vise à évaluer quantitativement et qualitativement la sensation thermique (ST) des conditions atmosphériques au centre-ville de Guelma, pendant les jours ensoleillés et chauds d'été. Ceci a été réalisé par le biais d'une analyse croisée ; mesures in situ / vs. / sensation thermique.

La troisième partie cherche à étudier les stratégies d'adaptation au centre-ville de Guelma pendant l'été, alors nous avons opté pour une simulation atmosphérique réalisée à l'aide du modèle ENVI-met. L'efficacité de chaque stratégie d'adaptation a été examinée en analysant les résultats obtenus (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent et température radiante moyenne), en se référant aux mécanismes potentiels qui sous-tendent la relation entre la composition de l'environnement thermique et la régulation microclimatique.

L'UTCI a été utilisé pour évaluer le niveau du confort climatique fourni dans chaque stratégie, mais aussi pour déterminer la stratégie la plus efficace pendant les heures chaudes. La dernière étape cherche à démontrer la faisabilité de la corrélation des paramètres objectifs (Indice UTCI) avec des paramètres subjectifs (l'acceptabilité thermique) pour prédire et anticiper le confort climatique extérieur au centre-ville de Guelma.

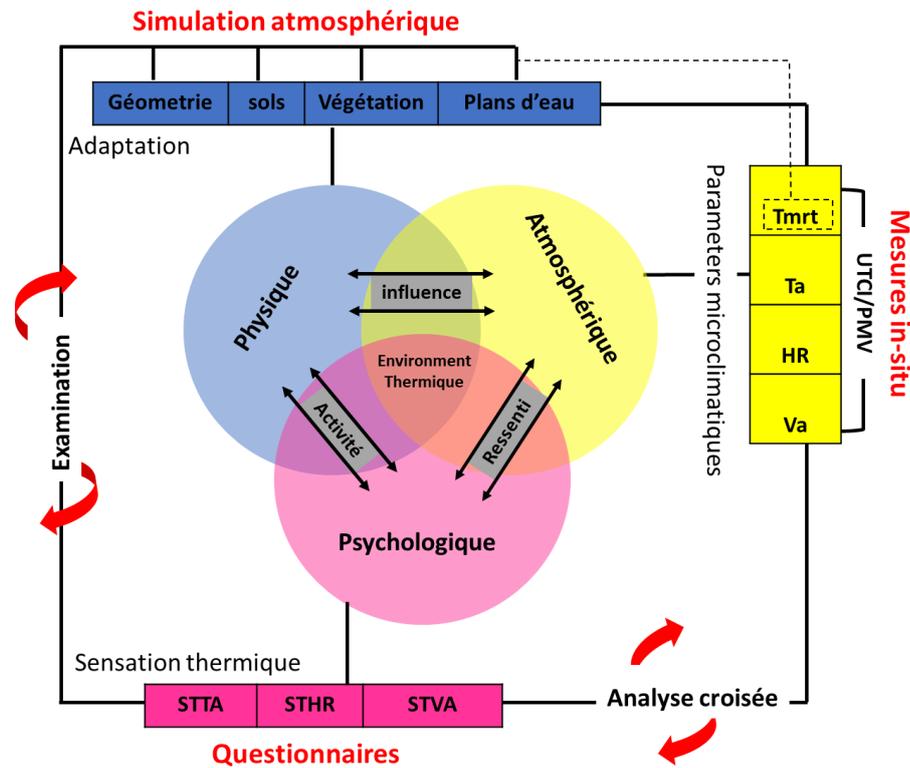


Figure V.1: Schéma des étapes d'évaluation de l'environnement thermique urbain. (Auteur 2019)

V.2 Observation du phénomène d'ICU sur l'agglomération de Guelma

V.2.1 Méthodologie de quantification de l'ICU

Dans cette partie, nous nous intéressons à observer le phénomène d'îlot de chaleur urbain atmosphérique de basse couche en période diurne. La caractérisation d'ICU atmosphérique est basé généralement sur le calcul des différences positives entre les températures d'air mesurées en milieu urbain et celles des campagnes environnantes.

Deux approches ont été utilisées pour calculer l'écart des températures en milieu urbain, puis les résultats issus des deux approches ont été corrélé afin de définir une échelle pour mesurer l'intensité du phénomène d'ICU à Guelma.

V.2.1.1 Approche in-situ

Cette première approche s’appuie sur une comparaison des mesures climatiques effectuées dans la canopée urbaine sur l’agglomération de Guelma, durant la surchauffe estivale.

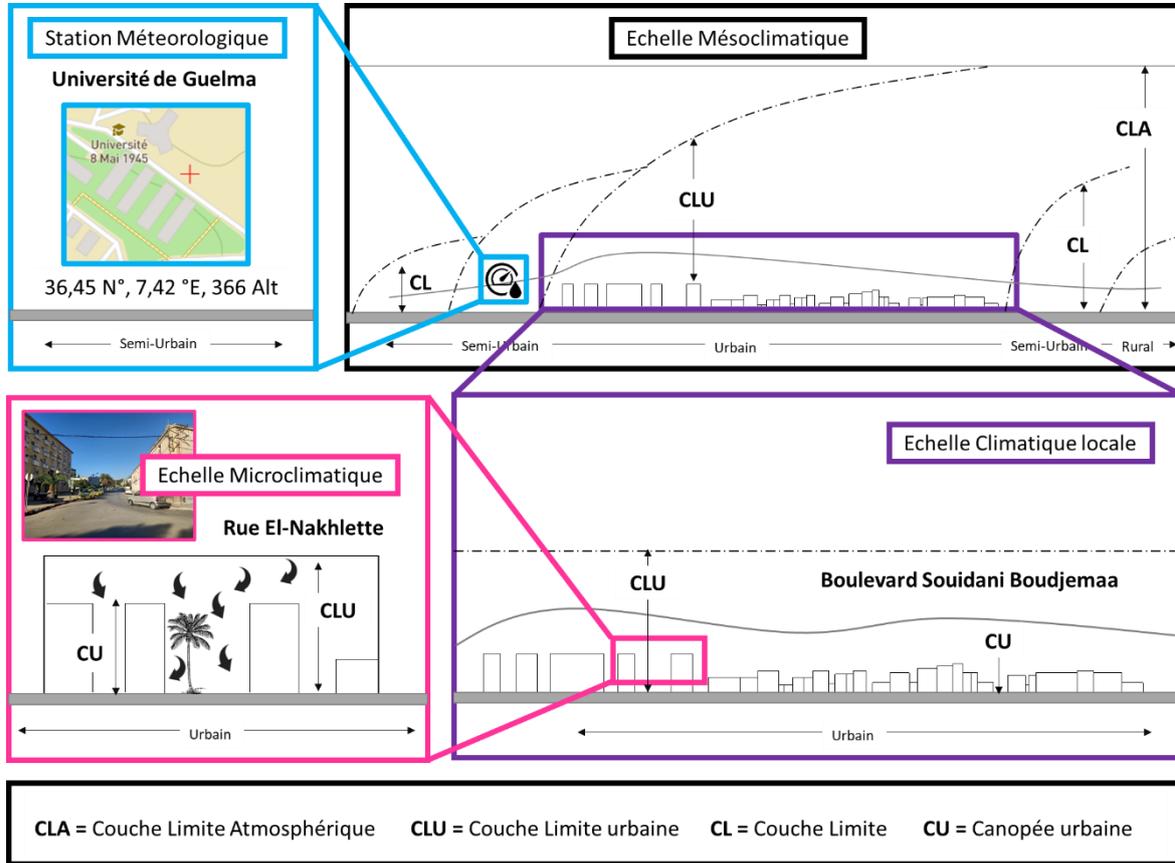


Figure V.2: Cadre détaillé de l’approche de comparaison effectuées dans la canopée urbaine sur l’agglomération de Guelma. (Auteur 2020)

✂ Mesures au centre-ville de Guelma

Une série de mesures microclimatiques mobiles a été conduite de 09 :00 à 20 :00 au centre-ville de Guelma, pendant trois jours successifs du 20 à 22 juillet 2019. Les mesures ont été effectuées à l’aide des instruments portatifs mentionnés dans le chapitre précédent (Voir Figure IV.8).

✂ Mesures fixes de la station météorologique

Les mesures référentes utilisées dans cette comparaison ont été enregistrées au niveau de la station météorologique de l’université 8 Mai 1945. Il s’agit d’une station nouvellement installée, située sur un terrain présentant les conditions exigées par l’OMM¹ ; « Les stations

¹ Organisation Météorologique Mondiale

climatologiques ordinaires et principales devraient se trouver sur un terrain plat, couvert d'herbe rase, bien éloigné d'arbres, d'immeubles, de murs ou de pentes raides et qui ne se situe pas au fond d'une cuvette ».



Figure V.3: Les deux modalités utilisées dans le recueil des données climatiques ; station météorologique de l'université et mesure in-situ. (Auteur 2019)

V.2.1.2 Approche statique

Cette approche a été proposée par Oke TR² à Genève en 1982, elle propose une expression pour calculer l'écart des températures urbaines en fonction de la population habitante de la ville et de la vitesse de l'air de référence.

$$\Delta \text{Tur Max} = \frac{P^{0.25}}{(4U)^{0.5}}$$

P : nombre d'habitant

U : vitesse de l'air (m/s)

V.2.2 Quantification du phénomène d'ICU au centre-ville

V.2.2.1 Écart des températures urbaines

La comparaison est faite entre les températures de l'air enregistrées au niveau de la station météorologique de l'université et celles prises dans le centre-ville de Guelma, durant trois journées d'été chaudes et ensoleillées, de 09 :00 à 20 :00.

² Timothy Richard OKE. «Overview of interactions between settlements and their environments». Genève 1982.

Le premier constat est que l'écart journalier dépasse 4°C durant la période d'étude, l'écart journalier maximal a atteint 4.8°C, le troisième jour avec une différence positive de 6.4°C à midi. Pour les trois jours, les différences positives les plus élevées ont été observées de 10 :00 à 14 :00, ce qui signifie que le phénomène d'ICU est d'une forte intensité à cette période au centre-ville de Guelma. Le graphe ci-dessous présente les différences positives des trois journées.

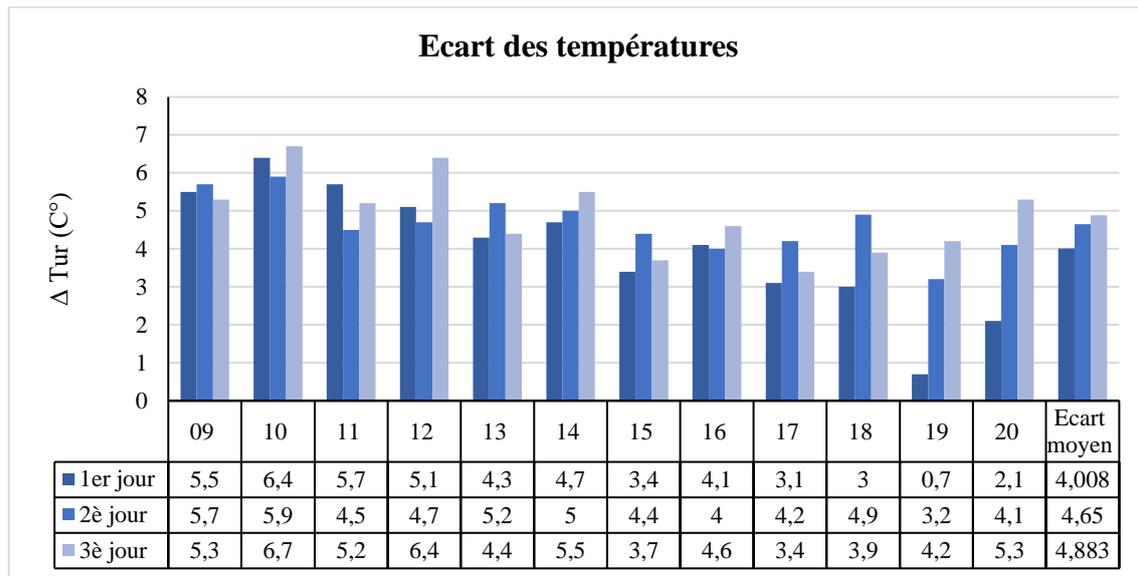


Figure V.4: Écart des températures urbaine pendant la période de 20 au 22 juillet 2019. (Auteur 2019)

La méthode statique est basée sur l'application de l'équation de Oke TR. Pour se faire nous avons utilisé les vitesses d'air enregistrées le 22.07.2019 par la station météorologique de l'université, de 09 :00 à 20 :00. Et le population habitante de la ville de Guelma qui est estimée par la DPAT³ de la willaya à 132.947 hab. Le tableau suivant présente les températures urbaines maximales obtenus.

Tableau V.1: Écart des températures urbaine relevé le 22 juillet 2019.

Heure	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Δ Tur (C°)	5.2	6.1	5.7	5.9	5.1	4.7	4.4	4.1	4.9	5	5.3	5

Les différences les plus élevées ont été observées dans la période de 10 :00 à 13 :00 ce qui confirme grandement le constat qui dit de l'intensité d'ICU au centre-ville de Guelma.

³Direction de la programmation et du suivi budgétaires de la wilaya de Guelma,2015.

V.2.2.2 Echelle d'intensité d'ICU a Guelma

Afin de mettre en place une échelle pour mesurer l'intensité du phénomène d'ICU sur l'agglomération de Guelma, nous avons proposé une corrélation entre les deux approches mentionnées ci-dessus.

Les différences des températures positives issues des deux approches sont fortement corrélées ($R^2 = 0.42$), comme le montre le graphe à droite.

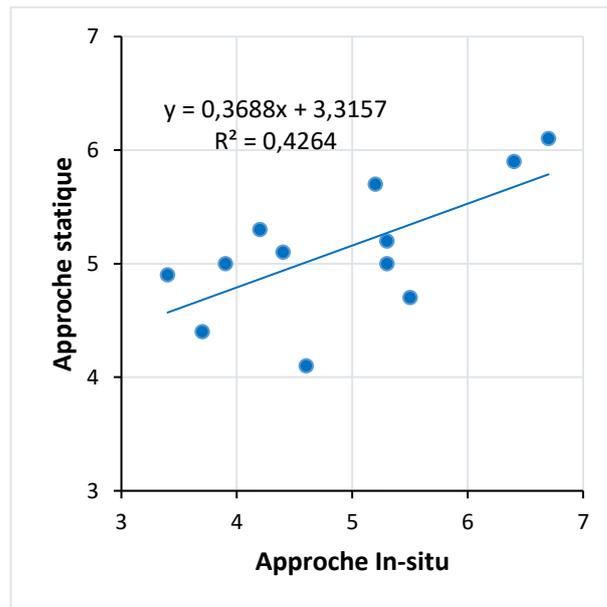


Figure V.5: Corrélation des écarts de températures urbaines issues des deux approches ; in-situ et statique. (Auteur 2020)

Plus concrètement, la fonction $y = 0,3688x + 3,3157$ définit l'accord entre les différences des température relevées dans les deux approches. Par ceci nous pouvons définir une échelle pour quantifier l'intensité du phénomène d'ICU en été, en fonction d'écart des température urbaines en centre-ville, une échelle appropriée au climat semi-aride qui caractérise la ville de Guelma.

Tableau V.2: Echelle d'intensité du phénomène d'ICU a Guelma. Auteur 2020

$\Delta Tur (C^\circ)$	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4
Intensité d'ICU	3.3	3.5	3.6	3.8	4	4.2	4.5	4.7	4.9

V.3 Evaluation de l'environnement thermique urbain durant la surchauffe estivale

V.3.1 Méthodologie de l'évaluation

Opter pour une analyse croisée découle de la volonté d'évaluer point par point la sensation thermique (ST) dans l'espace et dans le temps. Pour ce faire, nous avons mis en croisement les trois paramètres microclimatiques mesurés ; température de l'air, humidité relative et vitesse de l'air avec les sensations thermiques y affèrent pour l'ensemble des points soutenus par le parcours piéton objet d'étude. Un nombre total de 581 questionnaires valides ont été menés simultanément avec les mesures sur terrain, le long de la période du 20 juillet au 22 juillet 2019, ce qui fait que le recensement sur la sensation thermique a pratiquement couvert le nombre des usagers présents dans chaque point pendant le relevé de mesure sur trois jours.

Pour ce qui concerne les questions sont organisé à l'échelle Likert⁴, avec cinq niveaux de réponse. Cependant, nous avons demandé aux répondants de choisir une option sensorielle pour chaque paramètre mesuré. Le tableau suivant présente les trois paramètres mesurés avec les cinq options de réponse.

Tableau V.3: Echelles et niveaux de réponses utilisé dans le questionnaire. *Auteur 2020*

Paramètres	Évaluation basée sur une échelle en cinq options sensorielles				
Température de l'air	Très chaud	Chaud	Un peu Chaud	Neutre	Un peu frais
Humidité relative	Sec	Un peu sec	Neutre	Un peu humide	Humide
Vitesse de l'air	Stagnant	Un peu stagnant	Neutre	Un peu doux	Doux

V.3.2 Comportement thermique de l'espace extérieur

Afin de fournir une évaluation précise de l'environnement thermique urbain durant la surchauffe estivale, la température de l'air (T_a), l'humidité relative (HR) et la vitesse de l'air (V_a) mesurées le 22.07.2019 ont été mis en croisement, respectivement avec la sensation thermique de la température (STTA), la sensation thermique de l'humidité relative (STRH) et la sensation thermique du vent (STVA) pour six sessions du 09 :00 à 21 :00.

⁴ Une échelle de Likert est un outil psychométrique permettant de mesurer une attitude chez des individus.

V.3.2.1 Première session de 09 :00 à 11 :00

La tendance générale de la température de l'air est d'ordre ascendant de 30.5° à 38.2°C, à l'inverse, la tendance de l'humidité relative est d'ordre descendant, avec une HR max = 56% et une HR min = 33,9%. Trois options sensorielles ont été utilisées par les usagers pour décrire la sensation de la température ; "un peu chaud", "neutre" et "un peu frais" et quatre options pour exprimer la sensation de l'humidité ; "humide", "un peu humide", "neutre" et "un peu sec", la sensation du vent a été majoritairement voté comme "un peu doux". Ceci est principalement dû aux variations des conditions microclimatiques dans l'espace (composition formelle et végétale) et dans le temps (position du soleil).

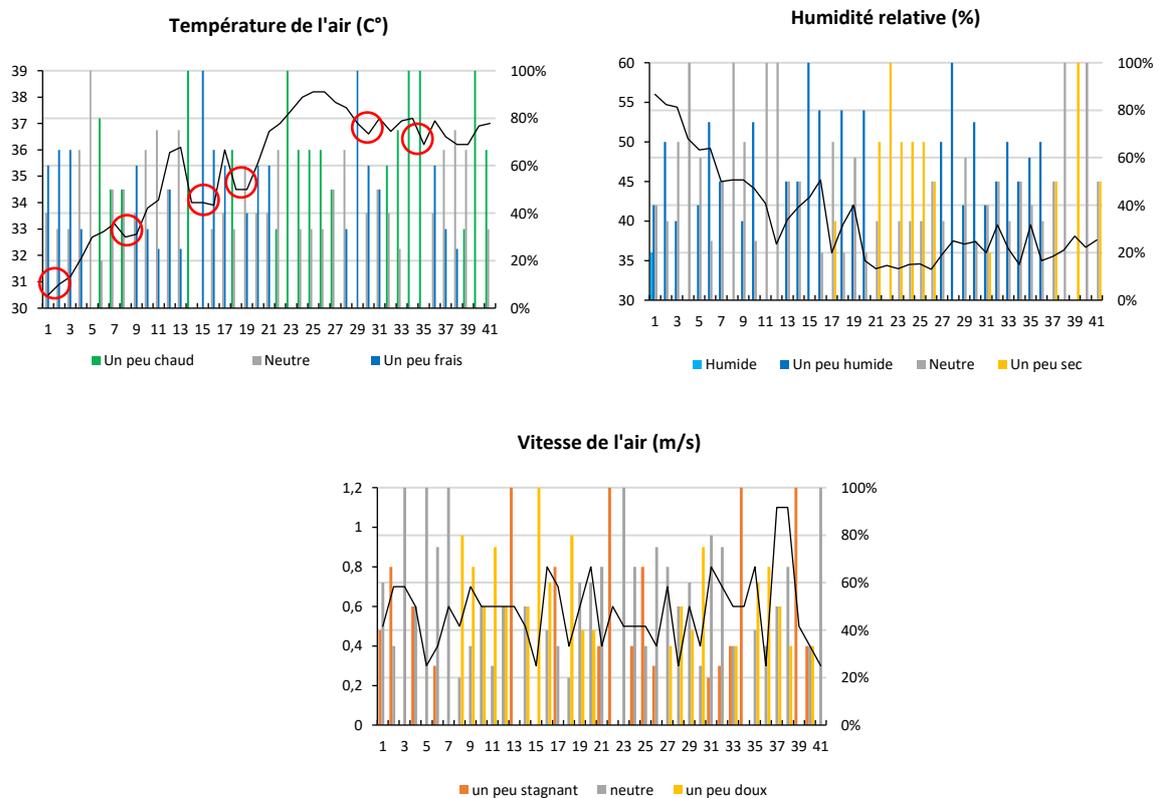


Figure V.6: Croisement mesures in situ / vs. / sensation thermique pour la première session. (Auteur 2020)

Les conditions microclimatiques les plus dures ont été enregistrées dans les endroits du P21 à P26 pendant la période de 09 :55 à 10 :15, correspondant à une période non ombragée, dont la sensation de la température, de l'humidité et du vent a été votée, globalement comme "chaude", "un peu sèche" et "un peu stagnante". Ceci est à cause de la situation des endroits mentionnés au boulevard Soudani Boujemaa, qui est dépourvu de la végétation et directement exposé au soleil durant les heures du matin.

V.3.2.2 Deuxième session de 11 :00 à 13 :00

La tendance générale de la température de l'air et de l'humidité relative pour cette session sont similaires aux tendances de la session précédente, avec une augmentation respective de 3°C et 2,6°C des températures de l'air minimales et maximales, d'une tendance perturbée des vitesses de l'air. Les deux options sensorielles "chaud" et "très chaud" ont été largement utilisées par les usagers pour exprimer la sensation thermique de la température. Alors que l'humidité relative a été comprise entre 41,6% et 30,5%, correspondant à quatre options sensorielles comme montre le graphe ci-dessous. En général, la sensation thermique dans des endroits dépourvus de végétation a été quasi-totalement votée comme "sèche", à l'exemple des endroits de P21 à P26. Les endroits de P36 à P39 sont considérés comme les plus critique en ayant des votes "très chaud et sec", causés par l'exposition directe au soleil et du manque de la végétation. À noter dans cette session que la sensation thermique au boulevard Souidani Boujemaa (endroits de P21 à P26) est votée comme "un peu chaud", cela peut être expliqué par les ombres portées des immeubles le long du boulevard.

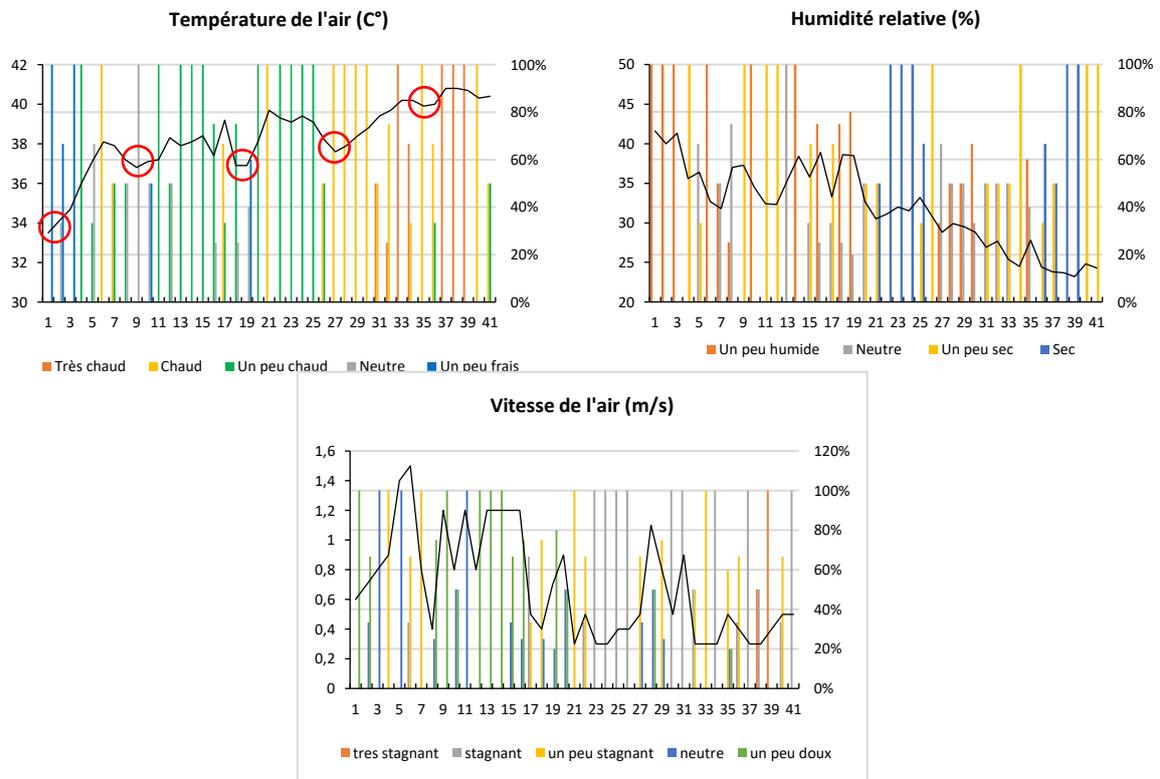


Figure V.7 : Croisement mesures in situ / vs. / sensation thermique pour la deuxième session. (Auteur 2020)

V.3.2.3 Troisième session de 13 :00 à 15 :00

En termes de variations microclimatiques, cette session est considérée comme la période la plus difficile de toute la journée, d'où le pic journalier des températures a atteint 42,9°C à 14 :48 au niveau de l'endroits P39, avec une faible humidité relative de 17,1%, et des vitesses de l'air qui ne dépassent pas 1.2 m/s. La sensation des températures de l'air a été décrite par les usagers comme "chaude" et "très chaude, la sensation d'humidité relative est majoritairement votée comme "un peu sèche" et "sèche". Parallèlement le vent était, globalement d'un a été stagnant, dont la sensation a été exprimée par les usagers comme "un peu stagnant", "stagnant" et "très stagnant". Hormis, les trois premiers points situés dans des zones ombragées et végétalisées, l'environnement thermique urbain a été, majoritairement décrit comme insupportable.

Les endroits les plus critiques sont ceux situés entre P29 et P41. D'où, l'environnement thermique urbain a expérimenté des températures de l'air très élevé dépassent les 40°C avec une sensation thermique très chaude, des valeurs basses d'humidité relative au-dessous de 20%, décrites comme "très sèche" avec des valeurs perturbées des vitesses de l'air votées comme "stagnantes" et "très stagnantes".

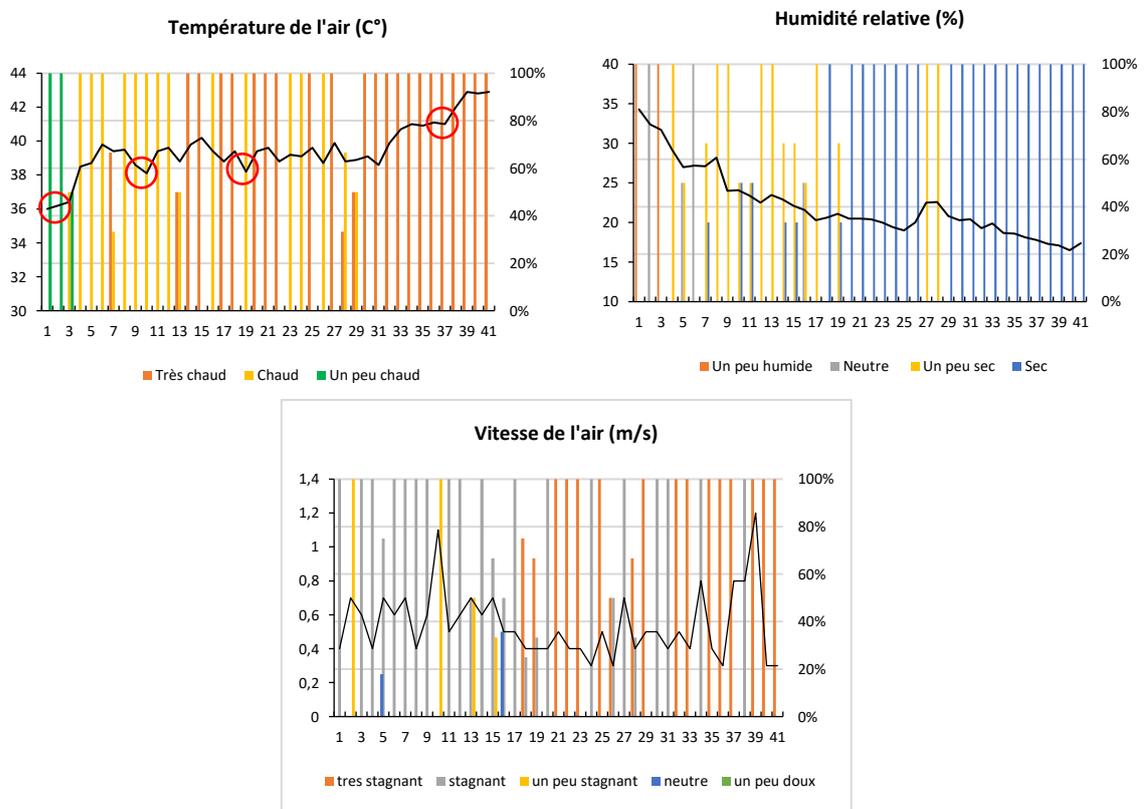


Figure V.8: Croisement mesures in situ / vs. / sensation thermique pour la troisième session. (Auteur 2020)

V.3.2.4 Quatrième session de 15 :00 à 17 :00

Prenant en considération les conditions microclimatiques dures qu'a connu cette session (Ta max = 41,4 ° C et HR min = 20,8%) et la sensation thermique des usagers, cette session peut être estimé comme la plus dure.

Pour exprimer leur mécontentement face à l'environnement thermique, les usagers ont voté la sensation thermique comme "chaude" dans les endroits où les températures de l'air varient entre 36°C et 41°C et "très chaude" dans les endroits où les températures dépassent les 41°C (endroits de P9 a P13 et de P37 a P41). En parallèle, la sensation d'humidité relative a été votée comme "un peu sèche" pour la plupart des endroits et comme "sèche" dans les endroits de pic (P11 et P39). Les vitesses d'air varient d'un endroit à l'autre, elles sont moins de 0.4 m/s dans les endroits de pic et votées comme "stagnantes".

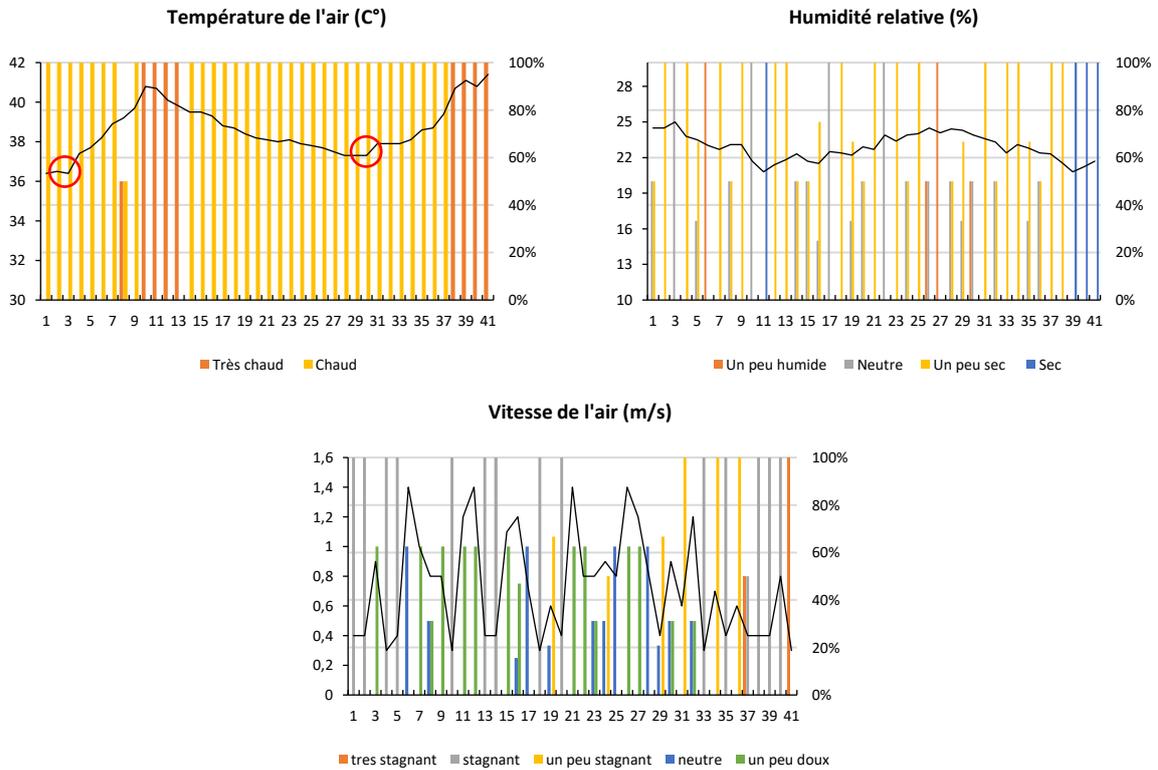


Figure V.9: Croisement mesures in situ / vs. / sensation thermique pour la quatrième session. (Auteur 2020)

V.3.2.5 Cinquième session de 17 :00 à 19 :00

Après trois dures sessions successives, cette session lance le soulagement thermique pour une fréquentation maximale des espaces extérieurs.

La température moyenne de l'air a été réduite à 2,8°C et la sensation thermique des températures a été votée, en grande part comme "un peu chaude" et "neutre", l'humidité relative a été votée comme "un peu humide" et "neutre", pour ce qui concerne la vitesse de l'air a été perturbée à l'exemple de la première session.

Les endroits P10 et P11 ont connu les températures de l'air les plus élevées (39°C) avec une sensation "chaude". Les valeurs d'humidité relative y affèrent été à la moyenne de 26% et votées comme "neutre". Ces deux endroits ont connu les vitesses d'air les plus basses (au-dessous de 0.3m/s), votées par les usagers comme "neutre"

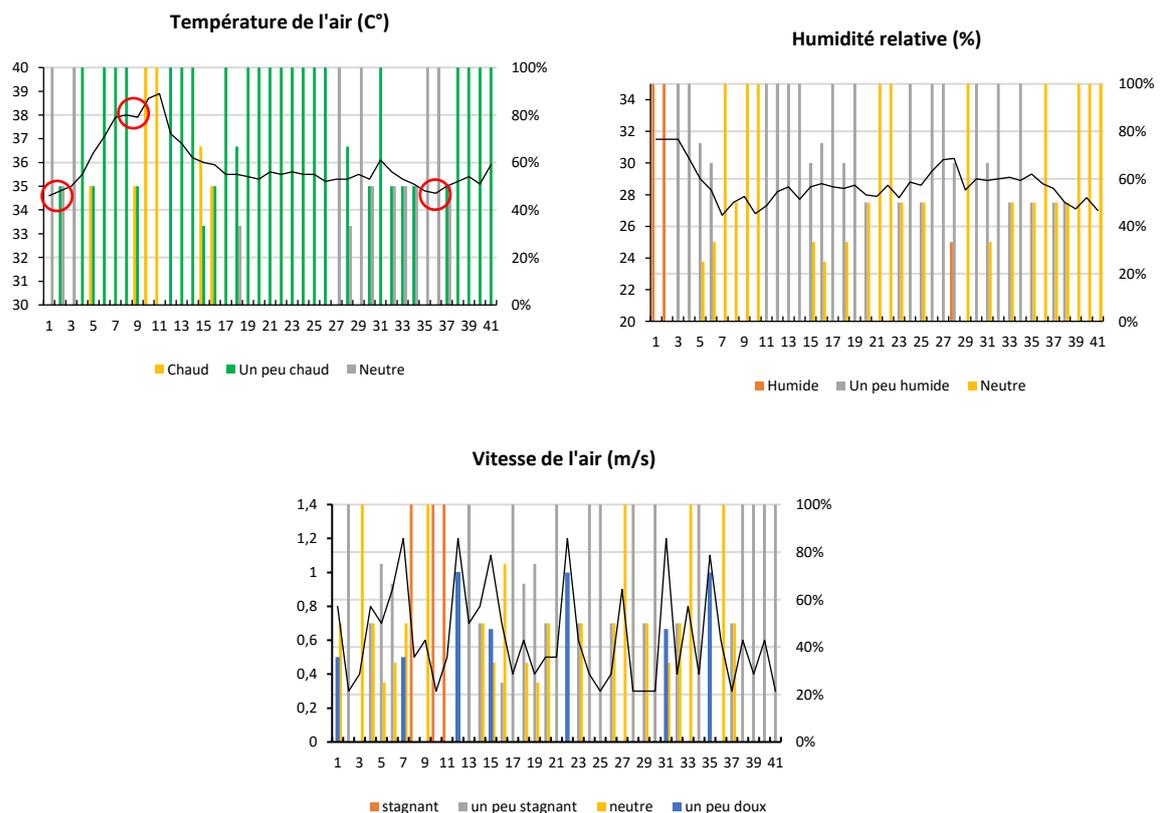


Figure V.10: Croisement mesures in situ / vs. / sensation thermique pour la cinquième session. (Auteur 2020)

V.3.2.6 Dernière session de 19 :00 à 21 :00

Pour la période du soir, la tendance générale de la température d'air été d'ordre descendant avec une valeur moyenne de 33,7°C, elle a été souvent considérée comme "neutre" dans la majorité des endroits. Tandis que, l'humidité relative a été d'ordre ascendant et votée majoritairement comme "un peu humide", trois options sensuelles ; "un peu stagnant", "neutre" et " un peu doux" ont été utilisées par les usagers pour décrire la sensation du vent.

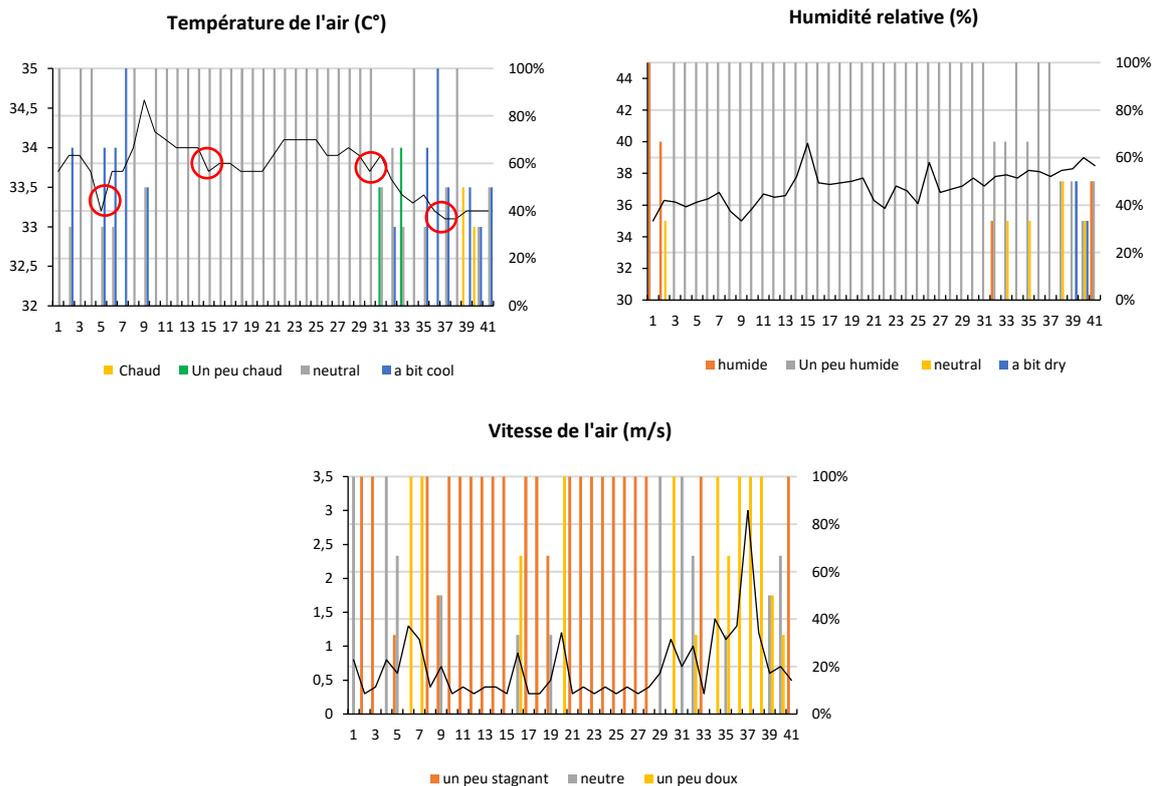


Figure V.11: Croisement mesures in situ / vs. / sensation thermique pour la dernière session. (Auteur 2020)

De manière générale, la variation des conditions microclimatiques au centre-ville de Guelma pourrait conduire à une évaluation partielle de l'environnement thermique urbain, lors des journées ensoleillées d'été. Le matin et le soir, respectivement de 09 :00 à 11 :00 et de 19 :00 à 21 :00, l'environnement thermique urbain peut être qualifié de modéré. Pour les périodes chaudes de 11 :00 à 17 :00, les conditions thermiques extérieures ont été devenu difficiles à supporter. Ainsi, l'environnement urbain thermique peut être qualifié d'insupportable. La période de 17 :00 à 19 :00 peut être considérée comme une période de transit de la sensation chaude à la sensation modérée. Cependant, l'environnement urbain thermique a été d'une tendance à fournir le soulagement thermique.

V.4 Adaptation à l'environnement thermique urbain en situation de stress du chaud

L'évaluation de l'environnement thermique urbaine révèle que certains points ont subi des températures relativement basses pour chaque session évaluée (Voir Figure V.11). En termes de temps et d'espace, chaque point présente un endroit à un moment donné avec une température d'air basse, par rapport à l'endroit précédent et l'endroit suivant. Selon les usagers ces points constituent des abris pour s'adapter aux conditions climatiques dures au centre-ville de Guelma, lors des journées chaudes. Ainsi, l'environnement thermique local dans ces endroits-abris répond aux besoins psychologiques des usagers en période de chaleur. Les étapes à mener ont pour objectif de souligner les mécanismes potentiels qui sous-tendent la relation entre la composition de l'environnement thermique et la régulation microclimatique de ses composantes lors des journées ensoleillées d'été, mais aussi de mesurer les niveaux du confort climatique dans ces endroits qualifiés de stratégiques.

V.4.1 Points stratégiques d'adaptation

Afin de sélectionner les points-abris les plus importants au centre-ville de Guelma, nous avons développé une méthode de sélection, basée sur la sensation thermique des conditions atmosphériques (ST), l'acceptabilité thermique (AT) et le critère de fréquence (CF), qui représente la répétition bihoraire d'un endroit pendant la journée. Les pourcentages de la sensation thermique ont été obtenus en calculant les moyennes quotidiennes de la sensation des températures de l'air (STTA) et la sensation d'humidité relative (STHR). Les pourcentages de l'acceptabilité thermique ont été obtenus par multiplication dans un coefficient pour chaque option de réponse (acceptable x 1,5, neutre x 1 et inacceptable x 0,5) et nous avons obtenu le critère de fréquence par multiplication à un coefficient de modulation.

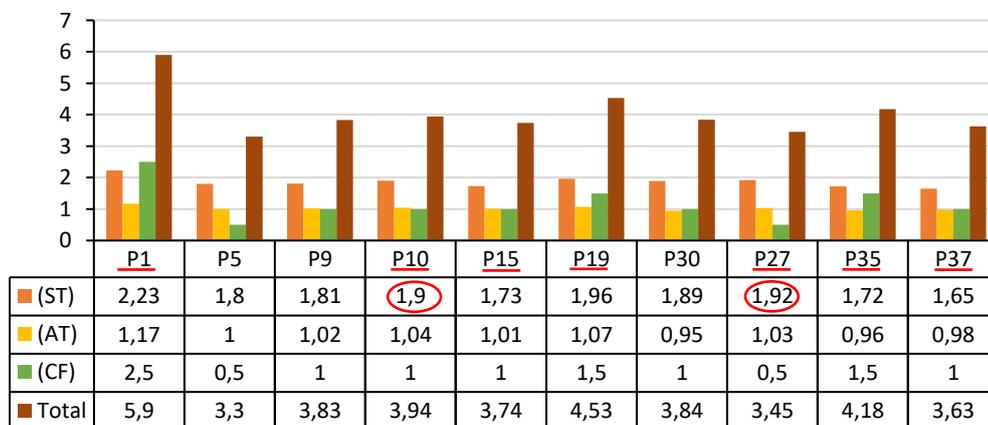


Figure V.12: Résultats de l'application des critères de sélection sur les dix endroits. (Auteur 2020)

L'acceptabilité thermique la plus élevée ($AT = 1,17$ et $AT = 1,07$) a été observée, respectivement aux points P1 et P19. L'endroit P19 a été classé troisième en termes de ratio total (Total= 4,18). Les trois points qui suivent en classement P15, P127 et P35 constituent les endroits-abris les plus importants pour s'adapter à l'environnement thermique extérieur. L'environnement thermique physique aux emplacements P9 et P10 est presque similaire, dans ce cas-là la sensation thermique intervient comme critère déterminant pour la sélection de P10 ($ST = 1,9$). Malgré l'acquisition d'un ratio total élevé (Total = 3,84), P30 n'a pas été sélectionné en raison de ses faibles ST et AT, tandis que l'emplacement P27 (Total = 3,54) a été sélectionné avec des valeurs légèrement élevées ($ST = 1,92$) et ($AT = 1,03$). Les points P15 et P37 ont été choisis en fonction de leur composition physio-thermique différente, le point P37 est une rue de forme canyon dépourvue de végétation, mais l'environnement thermique local a été voté à 30,8% comme acceptable et c'est la raison de l'inclure parmi les stratégies importantes. En somme, nous avons sélectionné sept points stratégiques (7/10) en utilisant les trois critères de sélection susmentionnés et la composition physio-thermique locale comme critère déterminant de sélection.

V.4.2 Adaptation significative

Chacun des sept endroit-abri sélectionnés suppose une analyse primaire et s'attend à un certain degré d'efficacité thermique en heures chaudes, soit examiné par une simulation atmosphérique à l'aide du programme Envi-met. La température de l'air (T_a), l'humidité relative (HR), la température radiante moyenne (T_{mrt}) et la vitesse du vent (V_a), résultants de simulation ont été utilisés pour examiner l'efficacité de chaque point-abri en tant que stratégie d'adaptation à l'environnement thermique au centre-ville de Guelma. L'indice climatique UTCI a été utilisé pour quantifier le stress climatique du chaud et pour évaluer le niveau du confort climatique fourni dans chaque stratégie. Le cadre méthodologique de la vérification des différentes stratégies est présenté dans (Tableau V.5 et V.6)

Commençant par le point P1, il s'agit d'une zone de transit ombragée située au rond-point Houari Boumediene. Dont, la couverture végétale est composée d'arbres très denses et d'une végétation grimpante au niveau de la clôture du bâtiment. Pour toutes les sessions de mesures, les températures minimales ont été relevées à cet endroit. D'où, l'environnement thermique local a été voté, majoritairement comme acceptable. L'analyse possible c'est que cet endroit représente une stratégie végétale par effet d'ombrage et il devrait être l'une des stratégies d'adaptation les plus efficaces en heures de chaleur extrême.

L'endroit suivant P10 est un point minéral (pavé clair et route goudronnée), qui donne sur le boulevard Boumaaza Saïd. L'environnement thermique immédiat est principalement composé d'une couverture végétale dispersée et des bâtiments de moyenne hauteur. Cet endroit suppose une stratégie d'adaptation mixte, qui combine géométrie urbaine et réflectivité du pavé (Voir Tableau V.4). Compte tenu de son fréquentation limitée de 15 :00 à 19 :00, l'endroit P10 peut s'attendre à un classement inférieur.

Les simulations suivantes impliquent deux stratégies mixtes qui combinent la végétation et la réflectivité du sol. L'endroit P15 est une zone enherbée et ombragée (arbres denses et herbe) située dans l'espace entre bâtiments HLM 2, avec une acceptabilité thermique moyenne ($TA = 50\%$). L'endroit P19 est une zone humide et ombragée (arbres denses et plan d'eau circulaire) située dans l'espace entre bâtiments HLM 1. On s'attend à ce que P15 et P19 soit parmi les stratégies d'adaptation les plus efficaces pendant les heures chaudes.

L'endroit P27 est une zone de transit ombragée à basse topographie, située dans la rue le 1er novembre dont la couverture végétale est composée d'arbre de ficus dense, le sol est en pavé clair. Pendant les heures de matin, cet endroit constitue le début d'un cheminement frais pour les usagers venant du boulevard Souidani Boudjemaa. Compte tenu de ces faits, ce point peut constituer une stratégie urbaine mixte basée sur l'effet d'ombrage et la réflectivité du sol et elle devrait être l'une des stratégies les plus efficaces en moments chauds.

Le point P35 est un endroit ombragé situé dans un espace ouvert à proximité du théâtre municipal de la ville. L'environnement thermique local peut constituer une bonne stratégie d'adaptation pendant les journées chaudes grâce aux grands arbres de *ficus* très denses et il devrait être la stratégie d'adaptation la plus efficace à l'environnement thermique extérieur.

Le dernier endroit P37 constitue l'entrée de la dernière partie de la rue El Moudjahidin, qui est une rue d'une forme canyon, toute dépourvue de végétation. En termes d'acceptabilité thermique cet endroit a été votée comme "inacceptable" de 11 :00 à 19 :00, il peut être donc considéré comme une stratégie de géométrie urbaine pendant les heures de matin et il devrait être classé dernier aux heures chaudes de la journée.

Tableau V.4: Types et albédo de la végétation et des matériaux du sol.

	Végétation	Hauteur	Albédo		Matériaux du sol	Albédo
[SM]	Arbre très dense	15 m	0.2	[XX]	Herbe dense	0.25
[BS]	Arbre très dense	10 m	0.2	[PL]	Pavé clair	0.4
[T1]	Arbre dense	10 m	0.2	[ST]	Asphalte	0.1
[PW]	Palmier	15 m	0.2	[PG]	Pave gris	0.2
[H2]	Arbuste dense	2 m	0.2	[WW]	Surface d'eau	0.15

Tableau V.5: Cadre détaillé et description du processus de simulation des endroits P1, P10, P15 et P19.

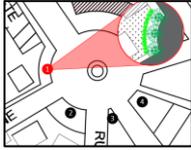
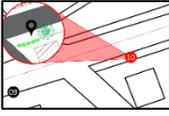
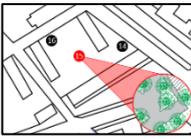
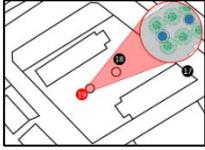
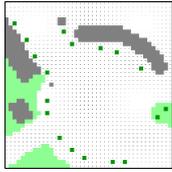
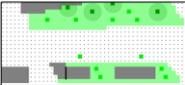
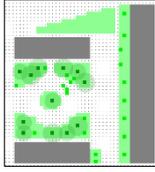
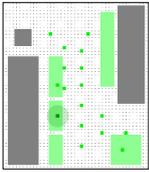
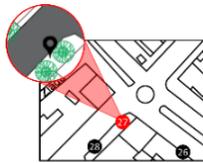
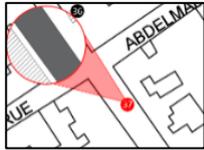
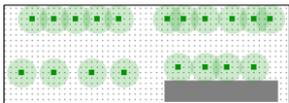
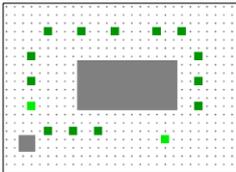
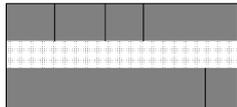
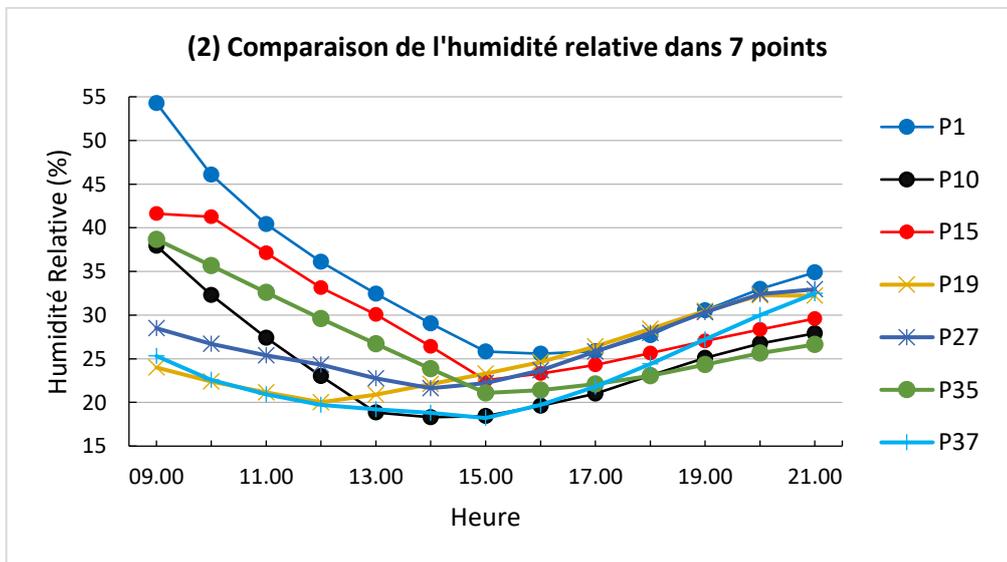
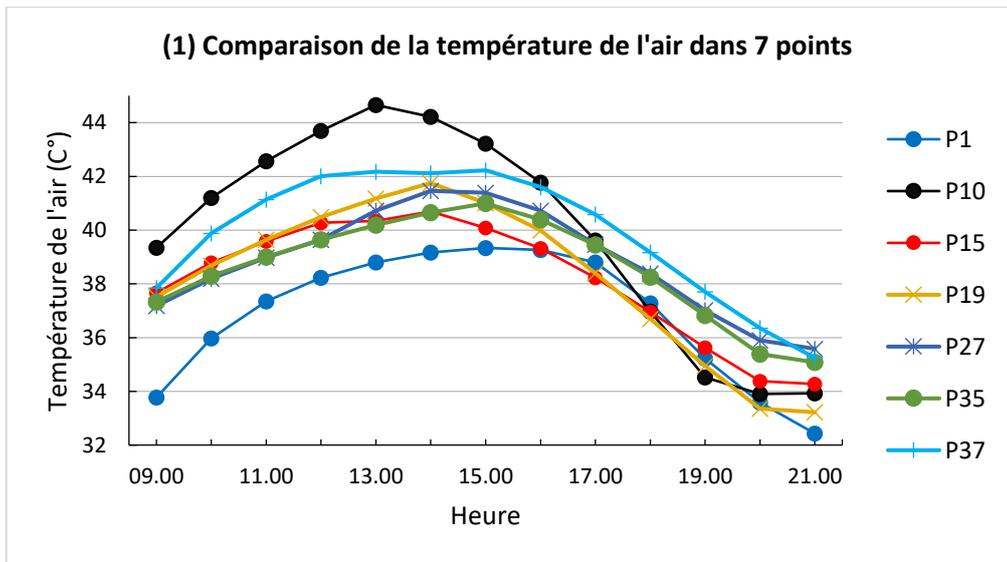
Propriétés	P1 (7°25'58''E)	P10 (7°26'06''E)	P15 (7°26'05''E)	P19 (36°27'50''E)
Vue en plan Dessiné à l'aide d'AutoCAD				
Description	Un point de transit ombragé située au rondpoint H B.	Un point minéral qui donne sur le boulevard. Boumaza Said.	Un point enherbé et ombragé situé dans l'espace HLM 2.	Un point humide et ombragé situé dans l'espace HLM 1.
Illustration Photographies prises par l'auteur, juillet 2019				
Acceptabilité Thermique	64.8 %	41.6 %	55.5 %	53.8 %
Assomption primaire	Stratégie végétale basée sur l'effet d'ombrage des arbres de <i>ficus retusa</i> .	Stratégie mixte, géométrie et réflectivité du pavé.	Stratégie végétale basée sur l'effet d'ombrage et la réflectivité de l'herbe.	Stratégie mixte basée sur l'effet d'ombrage et la réflectivité des surfaces d'eau.
Efficacité à 14:00	02	04	02	03
Détails de la simulation				
-Dimensions du modèle (x, y, z)	- (41, 41, 30)	- (94, 20, 30)	- (30, 34, 30)	- (28, 28, 30)
-Nord	- 00.00	- (-15.00)	- 45.00	- 45.00
-Modèle graphique				
-Végétation et Albedo (tableau 2)				
-Bâtiments	- W: 8 H: 8	- W: 6.8 H: 4-12	- W: 8 H: 14	- W: 8 H: 14
Données de sortie				
-Paramètres climatiques	Ta (C°) : 36.8 HR (%) : 33.9 Va (m/s) : 0.5 Tmrt (C°) : 65.7	Ta (C°) : 39.9 HR (%) : 24.5 Va (m/s) : 1 Tmrt (C°) : 67.8	Ta (C°) : 38.1 HR (%) : 30 Va (m/s) : 0.5 Tmrt (C°) : 55.7	Ta (C°) : 38.2 HR (%) : 25.2 Va (m/s) : 0.8 Tmrt (C°) : 58.3
-Indice thermique a 14.00 (C°)	UCTI : 48.9	UCTI : 54.2	UCTI : 47.8.9	UCTI : 48.7

Tableau V.6: Cadre détaillé et description du processus de simulation des endroits P27, P35 et P37.

Propriétés	P27 (36°25'58''E)	P35 (7°27'53''E)	P37 (7°25'55''E)
Vue en plan Dessiné à l'aide d'AutoCAD			
Description	Un premier point de la rue du 1er novembre, aire de transit basse et ombragée.	Un point ombragé à proximité du théâtre municipal.	Un point de la rue d'El moudjahidine, rue canyon dépourvu de végétation.
Illustration Photographies prises par l'auteur, juillet 2019			
Acceptabilité Thermique	44.4 %	60.55 %	25 %
Assomption primaire	Stratégie de végétation basée sur l'ombre des arbres de <i>ficus nitida</i> et la réflectivité du pavé.	Stratégie végétale grâce à la grande zone ombragée des grands arbres de <i>ficus nitida</i> ou <i>retusa</i> .	Stratégie géométrique dans les premiers heures de la journée due à l'ombre portée des constructions.
Efficacité à 14:00	03	01	05
Détails de la simulation			
-Dimensions du modèle	- (57, 18, 30)	- (, 28, 30)	- (68, 21, 30)
-Nord	- (-45.00)	- 45.00	- 45.00
-Modèle graphique			
-Végétation et Albedo (tableau 2)			
-Bâtiments	- W: 8 H: 8	- P: 8 H:10	- W: 8 L:75 H: 8
Données de sortie			
-Paramètres climatiques	Ta (C°) : 38.8 HR (%) : 26.5 Va (m/s) : 0.8 Tmrt (C°) : 57.9	Ta (C°) : 38.5 HR (%) : 27 Va (m/s) : 0.6 Tmrt (C°) : 61.4	Ta (C°) : 39.8 HR (%) : 23.1 Va (m/s) : 1.1 Tmrt (C°) : 51.2
-Indice thermique a 14.00 (C°)	UCTI : 47.2	UCTI : 50.5	UCTI : 52.1

V.4.3 Stratégies d'adaptation et niveaux du confort climatique

Comme mentionné ci-dessus, la simulation a été effectuée à l'aide du modèle atmosphérique par le progiciel Envi-Met. Les graphes ci-dessous présentent la comparaison des résultats de simulation ; la température de l'air, l'humidité relative, la température radiante moyenne, la vitesse de l'air et l'indice UTCI dans sept point-abri situés au centre-ville de Guelma.



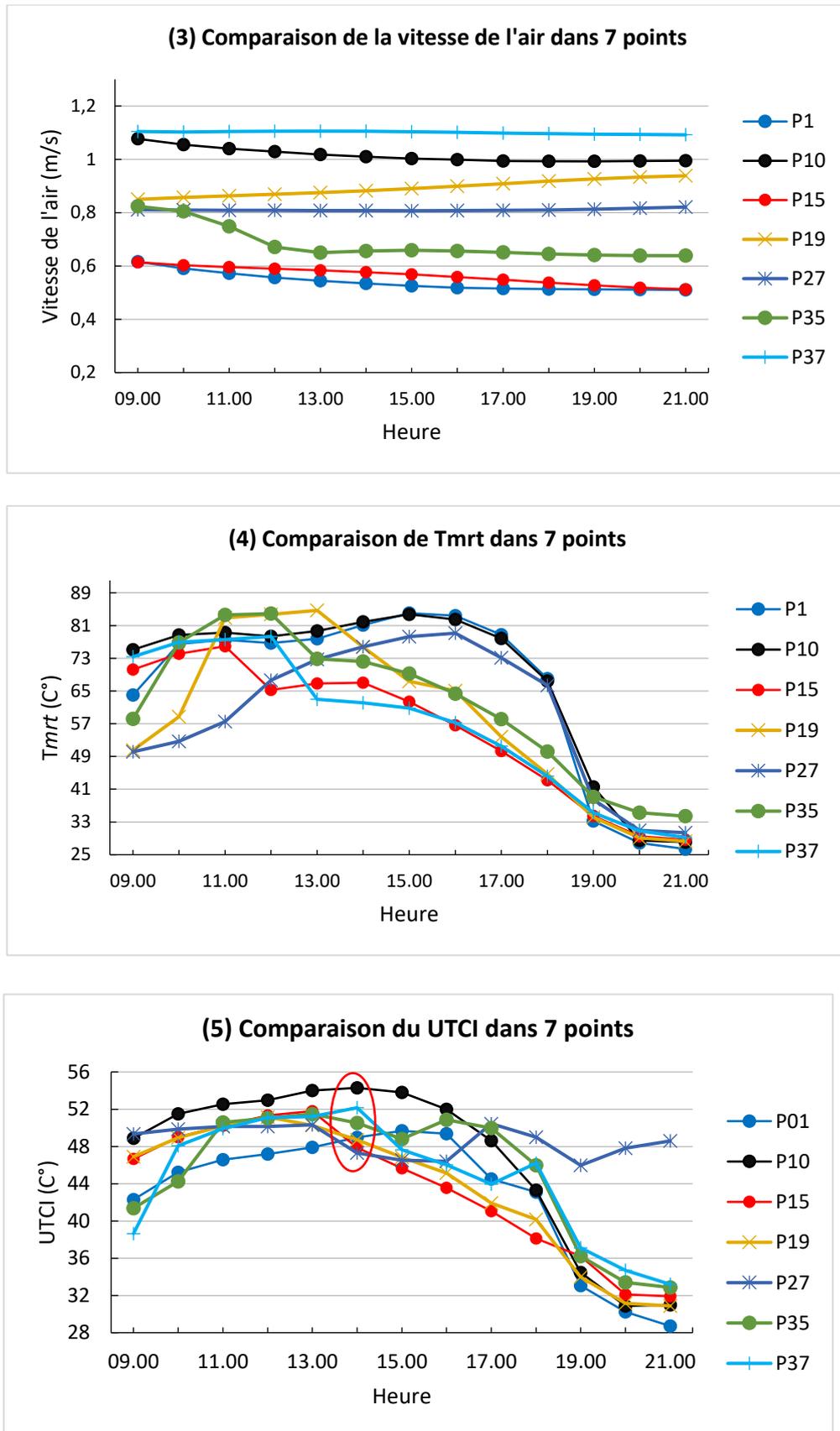


Figure V.13: Comparaison des résultats de simulation des sept endroits stratégiques. (Leonardo-Envi-Met 4)

V.4.3.1 Stratégie végétale

La stratégie végétale dans les deux endroits P1 et P35 a montré de bonnes conditions microclimatiques. Cependant, l'emplacement P1 a entièrement la température de l'air la plus basse et l'humidité relative la plus élevée, ceci est dû, principalement à l'effet d'évapotranspiration induit par l'arbre de *ficus retusa* (conversion de l'eau liquide en vapeur par transpiration). Alors que l'endroit P35 a des valeurs basses de température rayonnante moyenne, notamment en heures chaude, ce qui signifie que la couverture végétale dense au niveau du point P35 a bloqué les rayons solaires. En ayant le niveau supérieur du confort climatique à l'endroit P1, nous pouvons déduire que la température de l'air et l'humidité relative sont les paramètres influents le niveau du confort climatique. Par conséquent, la stratégie végétale la plus efficace au centre-ville de Guelma se trouve au niveau de l'endroit P1. La vitesse de l'air est de faibles valeurs ($V_a = 0,5 \text{ m / s}$) dans les deux endroits P1 et P35, ainsi les arbres ont servi d'obstacle comme l'a démontré (Abaas, 2020).

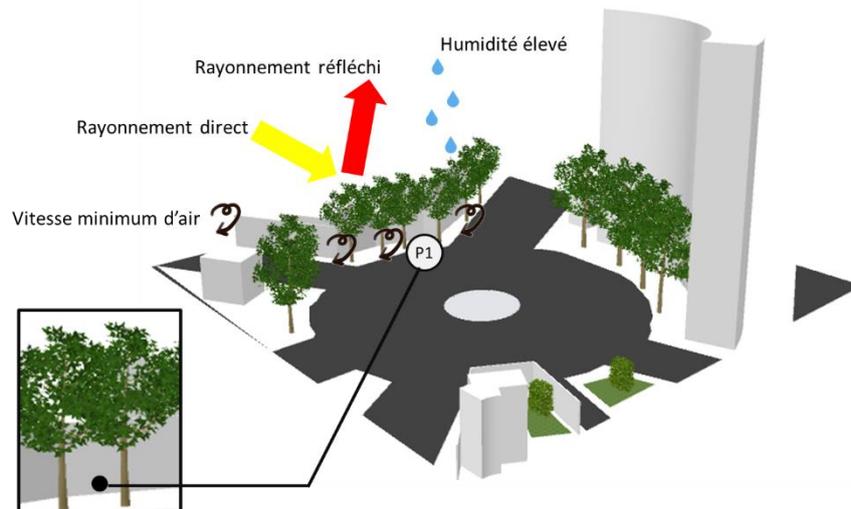


Figure V.14: La stratégie végétale (P1) au niveau du rondpoint Houari Boumediene. (Sweet Home 3D)

V.4.3.2 Stratégie mixte végétation et réflectivité du sol

Au centre-ville de Guelma, se reposer dans l'espace entre bâtiments HLM 2 (P15) ou HLM 1 (P19) constitue une stratégie d'adaptation efficace à l'environnement thermique urbain pendant les jours d'été. L'endroit P15 implique la combinaison entre les arbres et une zone enherbée, tandis que l'endroit P19 implique l'effet combiné des arbres et d'une surface d'eau. Comme montre la (Figure V.13), la tendance générale de la température de l'air est similaire à celles aux deux endroits P15 et P19 avec une différence $\Delta T_a = -0,5^\circ\text{C}$.

La différence journalière d'humidité dépasse 5% entre les deux espaces, notamment pour la période du matin. Cela peut être interprété par la contribution variée du végétal à la modération de l'environnement thermique urbain. En outre, la quantité d'eau rejetée dans l'atmosphère par évapotranspiration est plus importante à l'endroit P15.

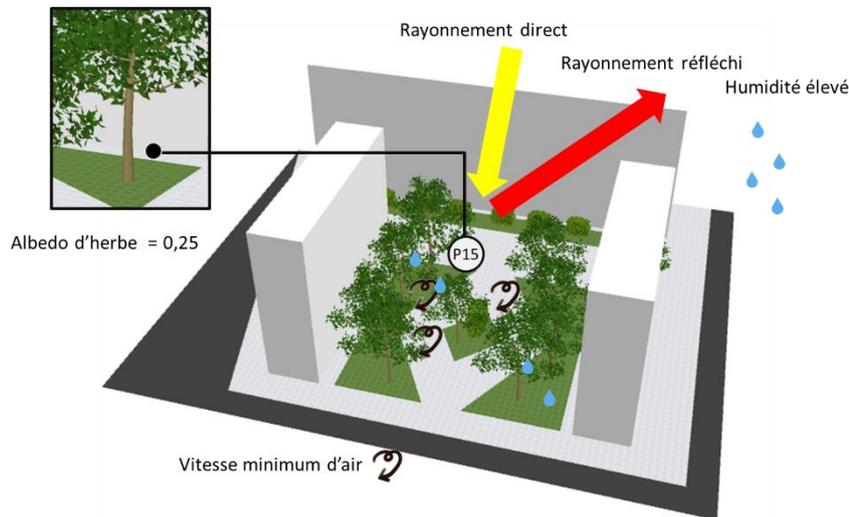


Figure V.15: La stratégie mixte végétation et réflectivité de l'herbe (P15) au niveau de l'espace HLM 2. (*Sweet Home 3D*)

La différence observée dans la tendance de la température moyenne rayonnante de 11 :00 à 17 :00 entre les deux points P15 et P19 est principalement dû à la différence des valeurs d'albédo. En ayant l'albédo le plus élevé (albédo = 0,25), l'herbe a absorbé de manière significative le rayonnement à ondes courtes par rapport à l'eau (albédo = 0,15). Ces résultats concordent avec (*Spectral Reflectance*, n.d.), dont l'auteur a bien approché la réflectance des différentes surfaces de la terre à travers ses recherches doctorales. En ce qui concerne les vitesses du vent, elles sont faibles au niveau de l'endroit P15 ($V_a = 0,5 \text{ m / s}$) à cause des troncs d'arbres qui perturbent l'écoulement des particules d'air. Dans les cas du point P19, la disposition des arbres de part et d'autre à créer une sorte de couloir, ce qui a généré des vitesses d'air plus élevées.

Malgré l'énorme écart de la vitesse d'air observé entre les deux points P15 et P19, l'effet combiné d'évapotranspiration et de la réflectivité de l'herbe a montré les résultats les plus efficaces, en ayant le meilleur niveau du confort climatique à 14 :00.

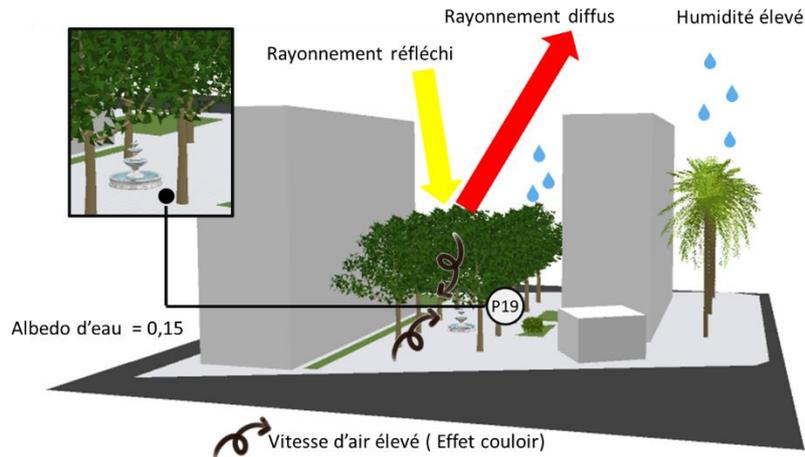


Figure V.16: La stratégie mixte végétation et réflectivité des surfaces d'eau (P19) au niveau de l'espace HLM 1. (*Sweet Home 3D*)

À l'exemple des endroits précédents, le premier point de la rue 1^{er} Novembre P27 suppose une stratégie mixte, arbres et réflectivité du pavé. La tendance générale de la température de l'air dans cet endroit est d'ordre ascendant, atteignant son pic à 14 :00, à l'inverse l'humidité relative est d'ordre descendant, nous pouvons aussi observer l'énorme changement des deux paramètres durant les post-pic heures. Cependant, l'environnement thermique local a connu des températures moyennes et une humidité relative élevée. Cela signifie que l'effet de rafraîchissement induit par les arbres a été maximum dans la période de l'après-midi, ce qui est en accord avec (C. A. Souchsouch, 1993; Huang et al., 2020), parallèlement, la température moyenne rayonnante a connu des valeurs élevées.

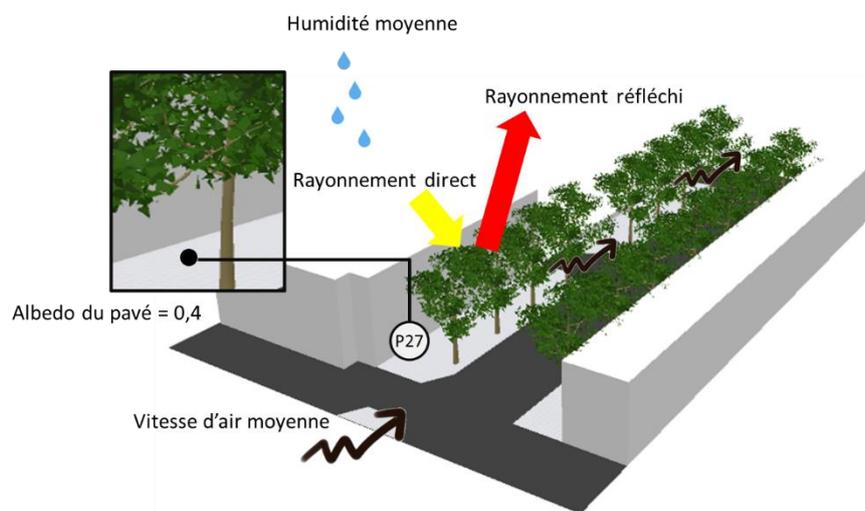


Figure V.17: La stratégie mixte végétation et réflectivité du pavé (P27) au niveau de la rue 1^{er} Novembre. (*Sweet Home 3D*)

V.4.3.3 Stratégie géométrique

L'entrée de la rue El Moudjahidine P37 a été considérée comme une stratégie de géométrie urbaine dans la soirée ; il a été obtenu à cet endroit des valeurs élevées des températures de l'air ($T_a \text{ max} = 42.2^\circ\text{C}$ à 15 :00) avec une humidité relative très basse $HR = 18,2\%$, on a d'ailleurs obtenu à cet endroit les vitesses de l'air les plus élevées. Cela est principalement dû au manque de la végétation. Avec ces conditions, cette stratégie a été votée à 50% acceptable de 9 :00 à 11 :00, la raison possible c'est que l'étroitesse de la rue (forme canyon, $H = 14$ et $W = 7$) et la qualité des ombres portées des constructions projetées sur la rue suffit à en créer un chemin ombragé durant les heures du matin. La tendance de la température moyenne rayonnante est essentiellement similaire à la tendance des stratégies impliquant une végétation dense (P15, P19 et P35), ce qui signifie que l'effet d'ombrage du matin a significativement affecté la T_{mrt} . De plus, l'orientation NO-SE de la rue lui protège du soleil le matin, en fournissant de l'ombre qui a un impact significatif sur le niveau du confort climatique. Ces résultats concordent avec (Ji-Yu Deng, 2019), qui a étudié l'impact des géométries des canyons urbains sur le confort climatique extérieur.

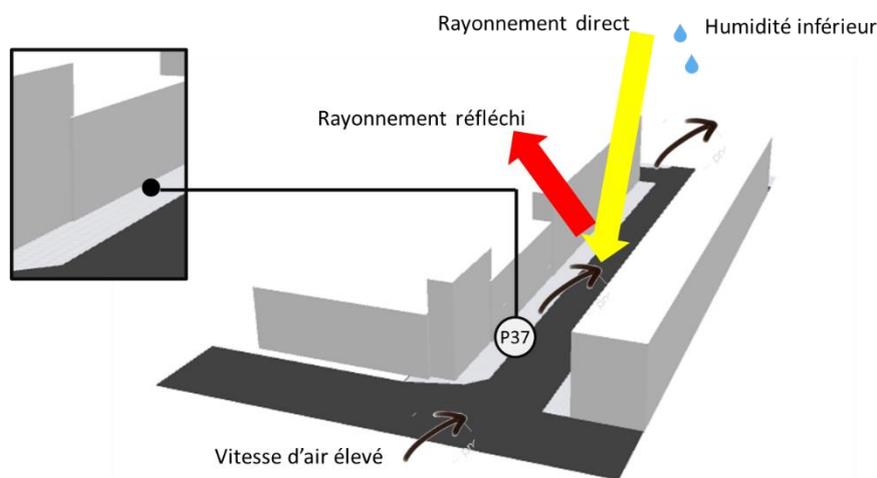


Figure V.18 : La stratégie géométrique (P37) au niveau de la rue El-Moudjahidine. (Sweet Home 3D)

V.4.3.4 Stratégie mixte géométrie et réflectivité du sol

Supposant que le point P10 donnant sur le boulevard Boumaaza Saïd, présente une stratégie urbaine mixte (géométrie et réflectivité du pavé), nous émettons l'hypothèse que les résultats obtenus seront beaucoup plus imputables à ceux des endroits P27 et P37, en particulier pour les post-pic heures (après 13 :00).

Il ressort clairement des graphiques de tendance que les températures simulées les plus élevées ont été obtenues à cet endroit durant l'avant pic période. Par ailleurs, nous avons obtenu des valeurs moyennes d'humidité relative par rapport aux autres stratégies. Cela est dû à la présence de la végétation dans son environnement immédiat, mais aussi aux ombres portées des immeubles de grande hauteur autour. En se référant aux résultats de la rue El Moudjahidine (P37), nous pouvons affirmer que la T_{mrt} a été affecté par l'effet d'ombrage. En tenant compte du fait que le pavé à cet endroit est similaire à celui utilisé dans l'endroit P27, la raison possible de la baisse de T_{mrt} à 16 :00 est la capacité du pavé a absorbé le rayonnement à ondes courtes (albédo élevé = 0.4). Malgré le fait que cette stratégie ait des vitesses de l'air élevées, l'effet de rafraîchissement dans cette stratégie n'est pas suffisant pour la qualifier de stratégie d'adaptation efficace en heures chaudes.

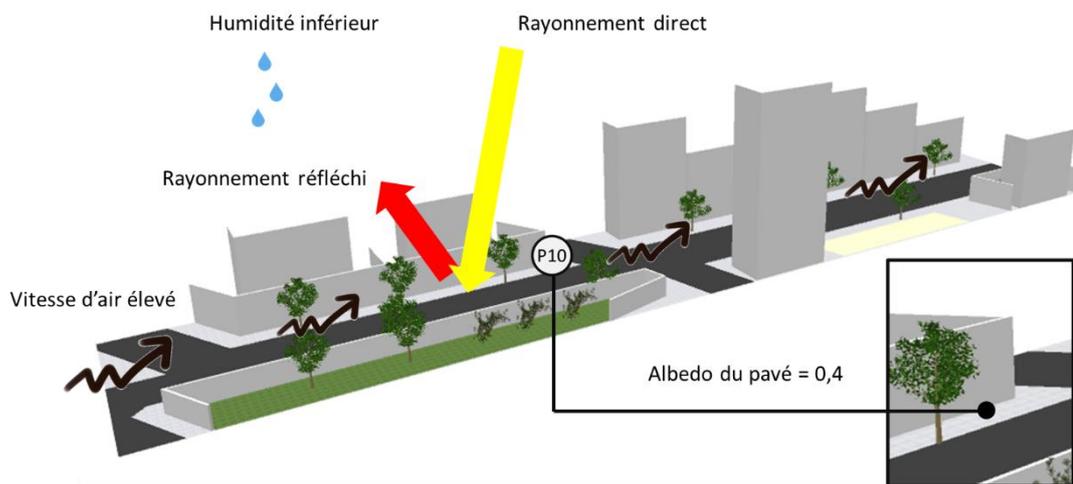


Figure V.19: La stratégie mixte géométrie et réflectivité du pavé (P10) au niveau du Boulevard Boumaaza Saïd. (*Sweet Home 3D*)

V.4.4 Anticipation du confort climatique extérieur en été

Pour une compréhension plus précise du confort climatique qu'offre chacune des stratégies susmentionnées en été, le niveau du confort (UTCI) a été corrélé à l'acceptabilité thermique (AT) dans chaque endroit. Alors que le R^2 représente le coefficient de réconciliation entre les deux paramètres et la pente du linéaire d'acceptabilité thermique représente le changement quotidien de la sensation thermique pour chaque stratégie.

Selon le coefficient R^2 , une réconciliation positive a été observé dans la stratégie végétale (point P1 et P35). Cependant, l'indice Climatique UTCI aux deux endroits est fortement corrélé à l'acceptabilité thermique ($R^2 = 0,24$ et $R^2 = 0,34$). Cela signifie que le niveau du confort climatique fourni par la végétation est suffisant pour que les usagers se sentent satisfaits de l'environnement thermique urbain. La pente de l'acceptabilité thermique linéaire dans cette stratégie est respectivement de $-0,014$ et $-0,019$, indique un léger changement dans la sensation quotidienne. Par conséquent, la stratégie de végétation au centre-ville de Guelma offre des niveaux de confort climatique élevés durant le stress climatique du chaud.

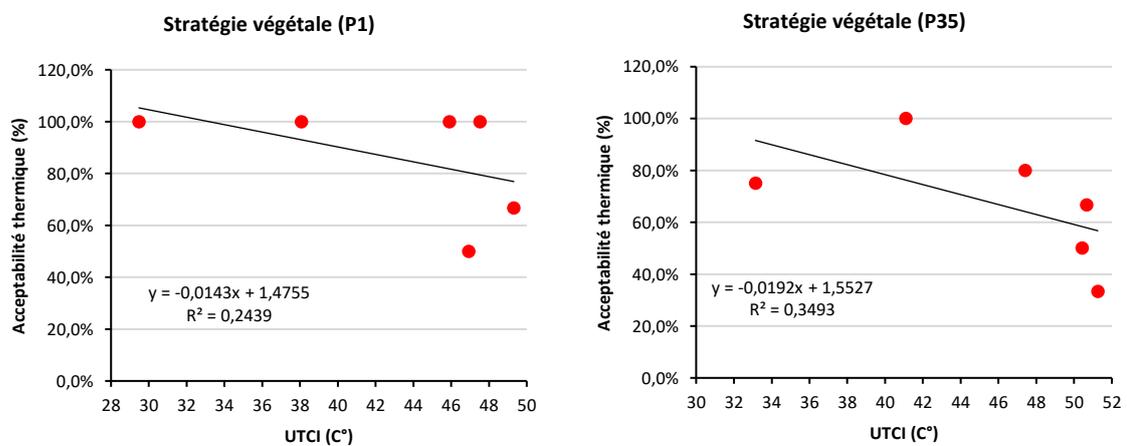


Figure V.20: Corrélation de l'acceptabilité thermique avec l'indice UTCI pour la stratégie végétale dans les endroits P1 et P35. (Auteur 2020)

En extrapolant le coefficient R^2 dans la stratégie mixte "végétation et réflectivité du sol", on observe la forte réconciliation entre l'acceptabilité thermique (AT) de l'environnement dans les trois endroits (P15, P19 et P27) et le niveau du confort climatique. Ces résultats indiquent l'efficacité de combiner de la végétation avec des sols réfléchissants à albédos élevés, pour améliorer l'environnement thermique urbain et pour offrir un certain niveau de confort climatique extérieur, lors des journées ensoleillées d'été.

En dépit d’avoir un haut coefficient de corrélation ($R^2 = 0,47$), l’endroit P27 implique un changement significatif (-0,10) dans la sensation thermique par rapport aux autres endroits (P15 et P19). Ce qui signifie que le niveau du confort climatique journalier fourni par la combinaison de la végétation et la réflectivité du pavé est moindre que celui fourni dans l’endroit P15.

Suite à la comparaison des trois stratégies mixtes, nous pouvons conclure que la combinaison de la réflectivité du pavé claire (Albédo = 0.4) et de l’herbe (Albédo = 0.25) avec la végétation peut améliorer considérablement l’environnement thermique extérieur au centre-ville de Guelma pendant la surchauffe estivale.

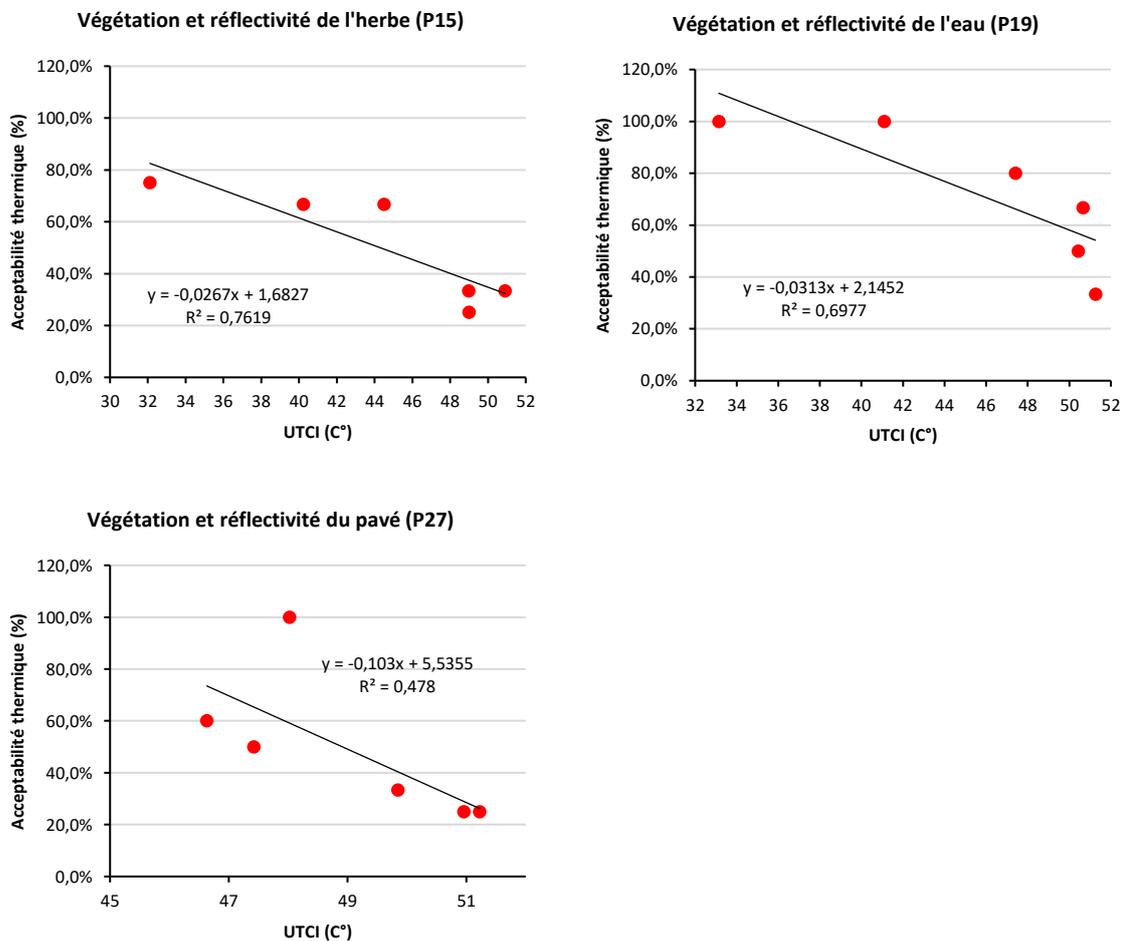


Figure V.21: Corrélation de l’acceptabilité thermique avec l’indice UTCI pour la stratégie mixte végétation et réflectivité du sol dans les endroits P15, P19 et P27. (Auteur 2020)

Malgré le fait que l’environnement thermique urbain dans le point P37 a été majoritairement voté comme inacceptable, une forte corrélation a été observée entre

l'acceptabilité thermique et le niveau du confort climatique ($R^2 = 0,38$). De plus, la pente (-0,028) implique un petit changement dans la sensation thermique pendant la journée.

Compte tenu des valeurs élevées de l'UTCI obtenues, la corrélation existante pourrait être qualifiée de négative. Ce qui signifie le niveau du confort climatique à fournir dans cette stratégie aux usagers se limite à une période limitée pendant les journées chaudes au centre-ville de Guelma.

Autrement dit, la stratégie mixte, géométrie et réflectivité du pavé a montré une corrélation positive entre les deux paramètres corrélés ($R^2 = 0,69$), avec un modeste changement dans la sensation thermique quotidienne. Ainsi, la combinaison entre les deux stratégies ci-dessus est importante pour atteindre le niveau du confort climatique requis pendant la surchauffe estivale.

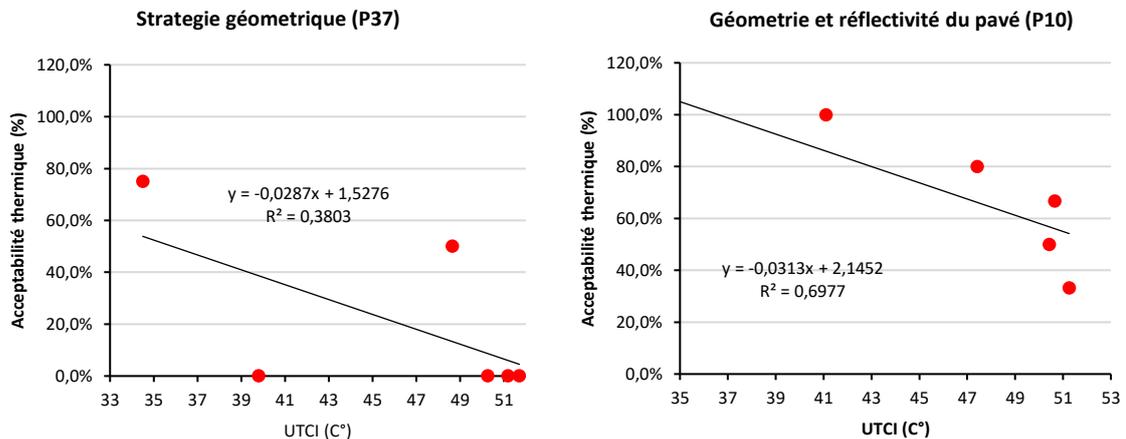


Figure V.22: Corrélation de l'acceptabilité thermique avec l'indice UTCI pour la stratégie géométrique (P37) et dans la stratégie mixte géométrie et réflectivité du pavé (P10). (Auteur 2020)

Une observation frappante a été remarquée aux endroits P1 et P10 respectivement dans la période de 11 :00 à 13 :00 et de 09 :00 à 11 :00. Néanmoins, l'environnement thermique urbain a été voté à 100% comme acceptable, l'indice UTCI était supérieur à 46°C, ce qui correspond à un stress thermique extrême. Prenant en considération le niveau du stress thermique élevé dans toutes les stratégies ($UTCI > 49^{\circ}\text{C}$), les usagers étaient plus susceptibles à voter l'environnement thermique urbain comme inacceptable pendant les heures chaudes, a-lors que l'emplacement P1 a été jugé d'acceptable à 66,7%.

V.5 Conclusion

Ce chapitre a fourni une meilleure compréhension de l'environnement thermique urbain en été à l'échelle des piétons au centre-ville de Guelma, où des mesures microclimatiques ont été menées simultanément avec un questionnaire d'enquête. À l'aide d'une analyse croisée, quarante et un (41) différents endroits ont été évalués subjectivement et objectivement.

Les résultats ont montré une variation significative des conditions thermiques en termes d'espace et de temps, ce qui conduit à une évaluation thermique partielle lors des journées ensoleillées d'été. Les périodes du matin et du soir, respectivement de 09 :00 à 11 :00 et de 19 :00 à 21 :00, l'environnement thermique urbain est qualifié de modéré. Les périodes chaudes de 11 :00 à 17 :00, les conditions thermiques extérieures sont devenues difficiles à supporter. Ainsi, l'environnement thermique urbain est qualifié d'insupportable. La période de 17 :00 à 19 :00, l'environnement thermique urbain tends à fournir le soulagement thermique.

Au cours de la journée, sept (7) endroits ont subi une baisse notable des températures, nous avons émis l'hypothèse que chaque endroit présente une stratégie d'adaptation pour améliorer l'environnement thermique urbain à l'échelle piétonne, à tester par une simulation atmosphérique, utilisant le programme Envi-met. Les résultats indiquent que ces endroits améliorent considérablement l'environnement thermique au centre-ville de Guelma.

- Stratégie de végétation urbaine, au rondpoint Houari Boumedién et dans l'espace ouvert à proximité du théâtre municipal de la ville, les arbres denses de *figus retusa* ont considérablement amélioré l'environnement thermique par effet d'ombrage et par effet d'évapotranspiration. Elle constitue une stratégie d'adaptation efficace lors des journées chaudes, en général et classée deuxième lors des heures chaudes là où le stress thermique est extrême.
- Stratégie mixte végétation et sol réfléchissant, de plus les effets induits par les arbres dans HLM 1, HLM 2 et la rue le 1er novembre, l'albédo élevé des matériaux du sol (pavé clair, herbe et eau profonde) a contribué positivement au rafraîchissement de l'environnement thermique urbain en été. Cette stratégie a montré moins d'efficacité pendant la journée par rapport à la première stratégie mais elle est classée première en termes de réduction du stress thermique.

- Stratégie de géométrie urbaine, le rapport hauteur / largeur (H / W) à l'entrée de la rue El Moudjahidine présente une stratégie d'adaptation significative le matin. Par rapport aux stratégies précédentes, la stratégie de géométrie au centre-ville de Guelma a montré une détérioration du niveau de confort climatique et elle est classée avant-dernière durant les heures de chaleur extrême.
- Stratégie mixte géométrie urbaine et sol réfléchissant, Malgré l'effet des ombres portées des constructions au niveau du boulevard Boumaaza Said, le matin et l'albédo élevé du pavé utilisé, cette stratégie a eu le niveau du confort climatique le plus bas et elle est classée dernière pendant les heures chaudes d'été.

Pour une compréhension plus précise du confort climatique fourni dans chaque stratégie, l'indice UTCI a été corrélé à l'acceptabilité thermique. Les résultats ont montré que la corrélation des paramètres subjectifs et objectifs est significative pour prédire l'efficacité et le niveau du confort des stratégies d'adaptation en été au centre-ville de Guelma.

Des études approfondies devraient être menées pour tester l'efficacité des stratégies d'adaptation en été pour le double objectif ; fournir des niveaux optimaux du confort climatique dans la conception des nouveaux espaces extérieurs, en général et au centre-ville de Guelma en particulier. Cela peut l'être réalisé en appliquant les stratégies étudiées à une grande échelle ou en cherchant de nouvelles stratégies d'adaptation. Ainsi, notre recherche va se concentrer sur la combinaison de deux stratégies ; végétation et plans d'eau pour des niveaux optimaux de confort climatique en été.

Chapitre VI :

À la recherche des parcours de fraicheurs urbains à Guelma

VI. À la recherche des parcours de fraîcheur urbains à Guelma

VI.1. Introduction :

Dans la normale, la réponse aux effets du changement climatique en milieu urbain se fait par voie de mesures et d'actions dites stratégies d'atténuations, parmi entre autres la stratégie de rafraîchissement urbain par verdissement. Ainsi, la recherche des ilots de fraîcheur urbains vient pour remédier au phénomène d'îlot de chaleur urbain. A une échelle fine, le niveau du confort climatique piéton fourni par cette stratégie est déterminé par des diverses contributions du végétale urbain. Cependant, l'action de se protéger du soleil sous ombre d'arbres en été s'insère dans le cadre général d'adaptation aux effets du changement climatique urbain, appelée stratégie d'adaptation par végétation urbaine.

Notre investigation cherche du premier niveau, la création des ilots de fraîcheurs urbains à Guelma, du deuxième niveau, elle vise à envisager des parcours urbains frais en été.

Dans ses dimensions simplifiées, un parcours fait l'objet d'une combinaison de deux variables ; spatiale et temporelle, comporte deux faits ; marcher et rester ou se reposer. Sur le plan physique un parcours est composé de deux types de stations ; station de repos et station de circulation. De là, un parcours urbain fait l'objet d'une logique de se balader dans la ville, il est configuré en se déplaçant dans des stations de marche et en se reposant dans des stations de repos. Par ailleurs, un parcours de fraîcheur urbain est un parcours de ville naturellement frais du fait de régulation microclimatique des éléments naturels (végétation et eau) ouvert au public durant l'été.

Ce dernier chapitre vise à rechercher des parcours de fraîcheur urbains offrant des niveaux optimaux du confort climatique dans le centre-ville de Guelma, ceci implique de rechercher les typologies, les dispositions et les configurations adéquates et les plus appropriés des éléments naturels (eau et végétation) pour le climat semi-aride qui caractérise Guelma.

C'est parce que la position du soleil varie le long de la journée, il est contraint de déterminer des parcours entièrement inconfortables. De même, il ressort de l'étude de l'environnement thermique urbain à Guelma que certaines stations répertoriées comme fraîches à certaines sessions peuvent ne plus l'être à d'autres.

De ce fait, nous retiendrons un ensemble des espaces extérieurs à dominante minéralité et repérés particulièrement comme espaces inconfortables pour aboutir l'investigation, tout en conduisant des séries de simulation atmosphérique.

VI.2 Méthodologie de simulation

VI.2.1 Parcours et choix des stations

L'évaluation de l'environnement thermique urbain à Guelma durant la surchauffe estivale indique que ce dernier est affecté par le phénomène d'îlot de chaleur urbain. En effet, l'écart moyen des températures urbaines relevé dans le centre-ville été de 4.8°, l'écart maximal a atteint 6.7°. L'étude du comportement thermique des espaces extérieurs révèle de deux types d'endroits thermo-physiques ; des endroits là où le niveau du confort climatique est plus ou moins acceptable, sont traités comme stratégies d'adaptation à l'environnement thermique urbain en situations de stress du chaud (Voir chapitre V). Des endroits là où le stress thermique est très élevé, ce sont des points supportés par un parcours du P5 à P34, regroupés en stations et qualifiées d'espaces extérieurs inconfortables.

Tableau VI.1: Stations retenues pour simulation. *Auteur 2019*

Station	Points	Ecart maximal des températures
S2 - Place 19 Mars	De P5 a P7	5.3° C
S2' - Rue El-Nakhlette	//	//
S3 - Boulevard Boumaaza said	De P8 a P12	6° C
S6 - Boulevard Souidani Boudjema	De P21 a P26	6.7° C
S8 - Placette 8 Mai 1945	De P31 a P34	5.2° C

La combinaison de ces stations fait l'objet d'un parcours de chaleur urbain situé au centre-ville de Guelma et composé de cinq (05) stations, dont trois sont des stations de repos et deux sont des stations de marche, avec deux propositions de les parcourir comme montre le schéma (Figure. VI.1)

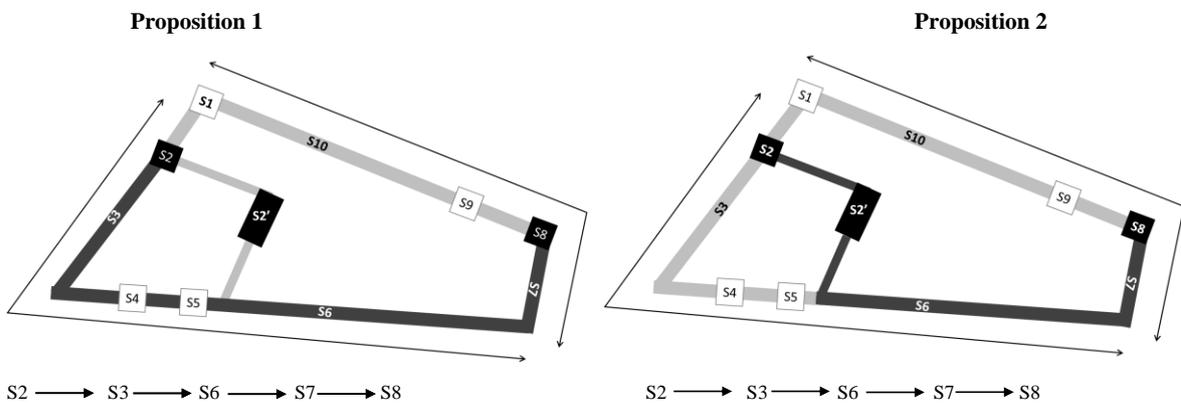


Figure VI.1: Stations retenues pour simulation avec deux propositions de les parcourir. *(Auteur 2019)*

VI.2.2 Conditions de simulation

Dans notre recherche nous avons opté pour le modèle atmosphérique Envi-Met, ce dernier implique des données d'entrée liées à la composition des espaces extérieurs étudiés, notamment le ratio, la disposition végétale et les surfaces d'eau, utilisés pour étudier leur rôle modifiant des paramètres microclimatiques. Le model est validé par des mesures réelles effectuées au centre-ville de Guelma (Voir chapitre IV).

Le progiciel Envi-Met est l'un des principaux outils numériques utilisés dans la conception bioclimatique en milieu urbain, nous l'avons entièrement décrit ainsi que sa mise en fonction et les étapes de simulation dans le processus méthodologique.

A l'exception de la rue El-Nakhlette - station S2' qui a été simulée le 22 et le 24 juillet 2019, la simulation des différentes stations a été réalisée en utilisant des mesures microclimatiques réelles prises le 22 juillet 2019, c'était une journée d'été ensoleillée avec un maximum de stress thermique et une forte exposition au soleil.

VI.2.3 Déroulement de la simulation

Deux séries de simulation atmosphérique ont été menées suivant deux étapes ; définition des caractéristiques physiques de chaque station, puis l'élaboré des scénarios de simulation.

La première série comporte les trois stations de repos ; Place 19 Mars – Station S2, Placette 8 Mai 1945 – Station S8 et Rue EL-Nakhlette – Station S2'. La deuxième série de simulation implique les stations de marche ; Boulevard Boumaaza Said – Station S3 et Boulevard Souidani Boudjema – Station S6.



Figure VI.2: Situation des stations retenues pour simulation. (Auteur 2019)

VI.2.3.1 Les stations de repos

Station S2 : Place 19 Mars

La place 19 Mars se situe dans la zone appelée communément Septième, il s'agit d'un carrefour avec un monument central, principalement composé de bâtiments bas et moyens à l'exception du bâtiment de 7 étages ; l'origine de son appellation. La place est d'une forme trapézoïdale, sa superficie totale est de 832 m² répartis dans l'ordre suivant, 85.4% de surface minérale (pavé), 9.2 % de surface verte (arbres) et 5.4% de surface humide (fontaine).

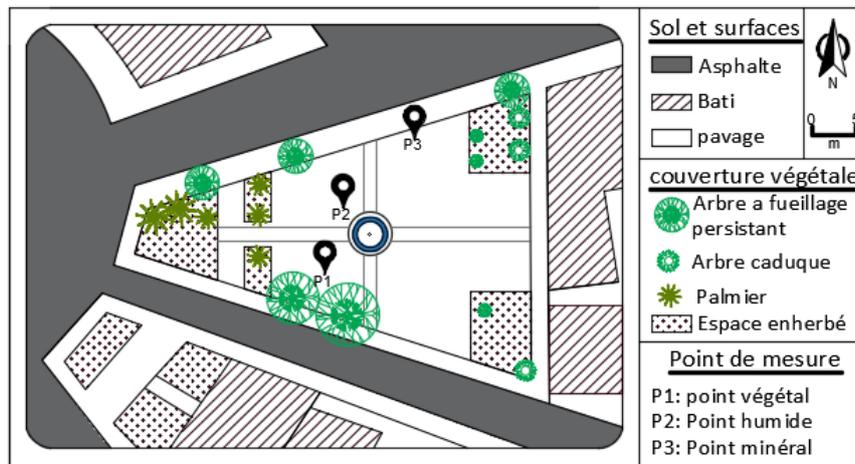


Figure VI.3: Vue en plan de la place 19 Mars – Station S2. (Auteur 2019)

Station S2' : Rue El-Nakhlette

Rue El-Nakhlette constitue l'un des espaces extérieurs les plus fréquentés en saison chaude situé au centre-ville de Guelma. Il s'agit d'un espace d'agrément linéaire, accueillant des activités et des services modestes, principalement composé d'immeubles de faible hauteur et il couvre une surface totale d'environ 2060 m². Le palmier est le seul type de végétation dans cet espace.

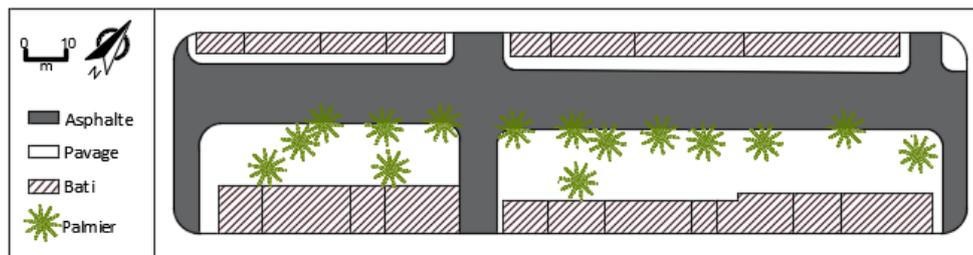


Figure VI.4: Vue en plan de la Rue EL-Nakhlette – Station S2'. (Auteur 2019)

Station S8 : Placette 8 Mai 1945

La placette 8 mai 1945 est un espace extérieur structurant situé au centre-ville de Guelma, construit vers 1962. La placette est principalement composée d'immeubles de faible hauteur et elle couvre une surface totale d'environ 1150 m², dont 5,5% représente la surface bâtie (kiosques), 8% est réservée à un plan d'eau rectangulaire et 13% de la surface restante est occupée par des arbres du palmiers et du ficus.

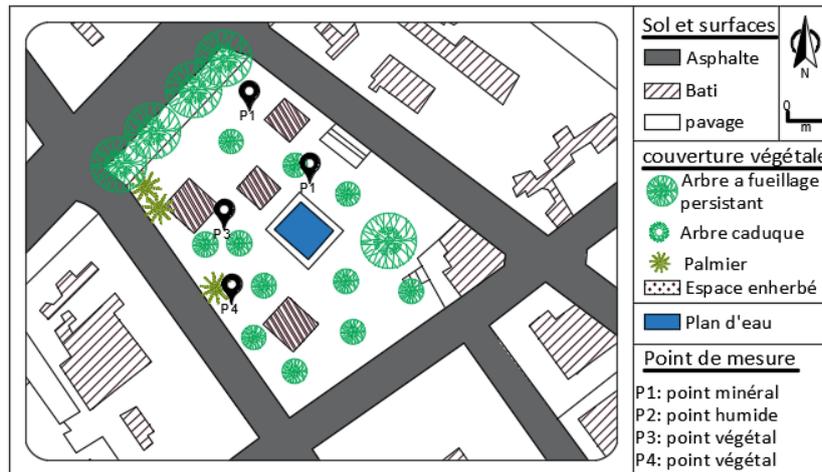


Figure VI.5: Vue en plan de la placette 8 Mai 1945 – Station S8. (Auteur 2019)

VI.2.3.2 Scénarios de simulation

La place 19 Mars et la placette 8 Mai 1945, sont des stations de repos dotées de plans d'eau et de couverture végétale épars et clairsemée avec une dominante minéralité. Huit scénarios des deux stations ont été simulés, avec différents ratios et types de végétation et différentes configurations des plans d'eau, les scénarios sont regroupés en trois catégories :

Mesure du niveau de confort climatique actuel

- **Scénario 1 :** vise à mesurer le niveau du confort climatique actuel lors des journées ensoleillées d'été, ce scénario simule ainsi l'état actuel des stations S2 et S8, y compris la couverture végétale, les bâtiments et les plans d'eau existants.

Impact des éléments naturels sur le confort climatique

- **Scénario 2 :** ce scénario vise à démontrer l'impact de la végétation sur le confort climatique extérieur, donc il simule l'état actuel des stations S2 et S8 en éliminant la couverture végétale.
- **Scénario 3 :** ce scénario vise à mettre en évidence l'influence de l'eau sur le niveau du confort climatique extérieur, il simule ainsi l'état actuel des stations S2 et S8 en éliminant les plans d'eau.

À la recherche des niveaux de confort climatique optimal

- **Scénario 4** : vise à maximiser la zone ombragée dans les deux stations S2 et S8, donc ce scénario simule un nouveau ratio et une nouvelle disposition végétale basée sur le type d'arbres existant (*Frêne commun*, *Ficus benjamina* et *Ficus nitida*).
- **Scénario 5** : vise à tester l'efficacité des arbres *Frêne commun* et *Ficus nitida* pour fournir un certain niveau du confort climatique extérieur, il simule la disposition végétale actuelle en remplaçant les espèces d'arbres par *Populus alba*.
- **Scénario 6** : ce scénario simule un nouveau ratio et une nouvelle disposition végétale qui favorise un maximum de verdure, basée sur trois espèces d'arbres ; *Palmiers de washingtonia*, *Ficus nitida* et *Populus alba*.
- **Scénario 7** : ce scénario simule une nouvelle configuration des plans d'eau, obtenues en ajoutant des plans d'eau linéaires à l'existant, ce scénario vise à minimiser la minéralité dans les deux stations de repos S2 et S8.
- **Scénario 8** : ce scénario implique une nouvelle disposition végétale basée sur un nouveau ratio et un nouveau type d'arbres avec une nouvelle configuration des plans d'eau, ce scénario fait la combinaison des scénarios 6 et 7.

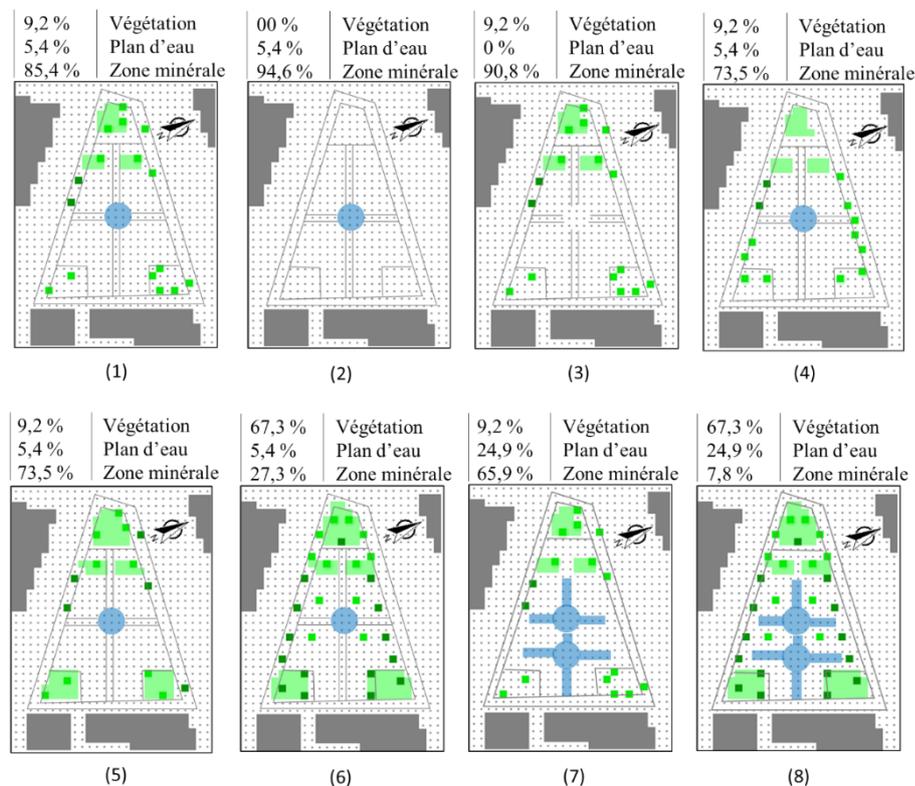


Figure VI.6: Scénarios simulés de la place 19 Mars - station S2, (1) l'état actuel de la station, (2) la station dénudée de la végétation, (3) la station sans plan d'eau, (4) la station en maximisant la zone ombragée, (5) la station avec de nouvelles espèces d'arbres, (6) la station avec plus de végétation, (7) addition des plans d'eau linéaires, (8) proposition optimale. (*Envi-met V4.4.4*)

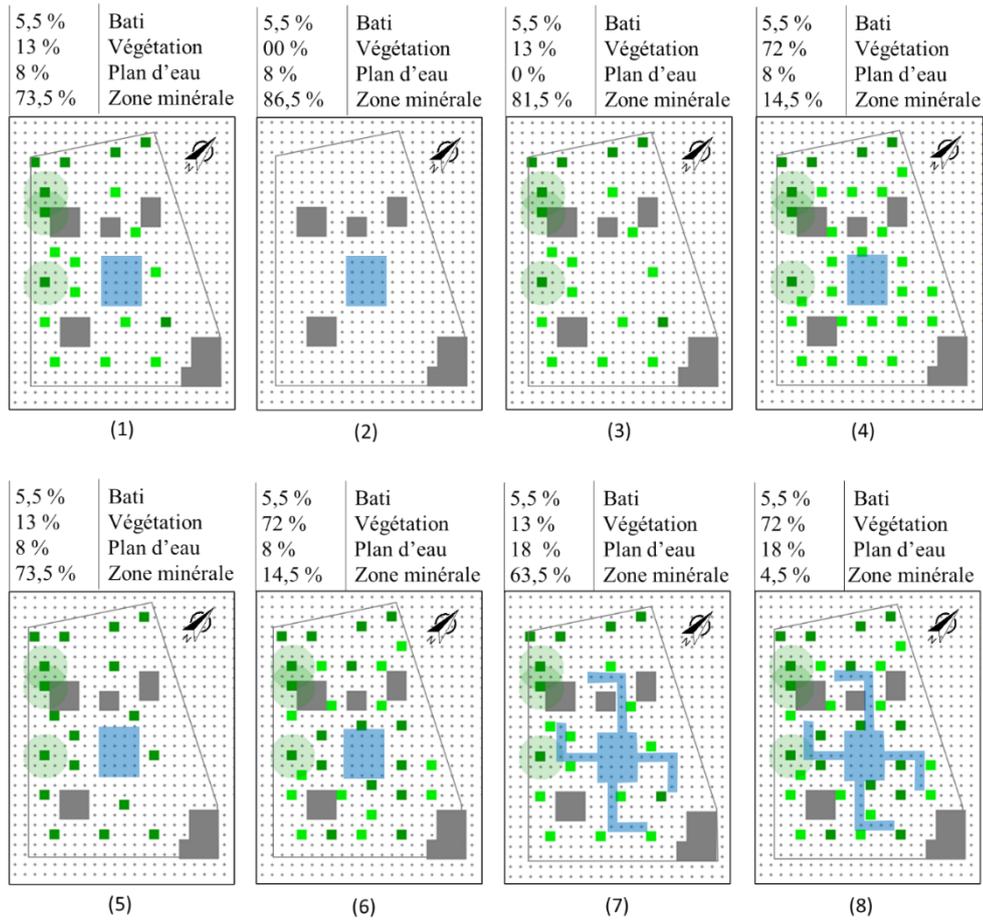
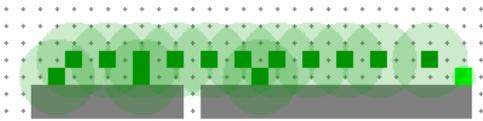
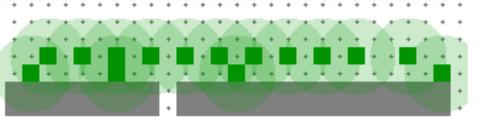
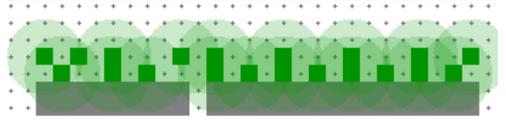


Figure VI.7: Scénarios simulés de la placette 8 mai 1945- station S8, (1) l'état actuel de la station, (2) la station dénudée de la végétation, (3) la station sans plan d'eau, (4) la station en maximisant la zone ombragée, (5) la station avec de nouvelles espèces d'arbres, (6) la station avec plus de végétation, (7) addition des plans d'eau linéaires, (8) proposition optimale. (*Envi-met V4.4.4*)

Tableau VI.2: Cadre détaillé du processus de simulation de la rue El-Nakhlette - station S2'

Specification of the simulation process by Envi-met model	
Ville	Guelma (Long :7°25'33'' Lat 36°27'43'')
Climat	Semi-aride
Date de simulation	22 et 24.07.2019
Temps de la simulation	De 09:00 à 21:00
Dimensions du modèle	x-Grids: 35 / y-Grids: 10 / z-Grids: 10
Grille	dx= 2 / dy= 2dz= 2
Nord	335
Calcul de l'indice PMV et UTCI	Biomet process
Visualisation des résultats	Leonardo
Scénarios simulés	
Scénario 1 : 100% palmiers	Scénario 2 : 0% végétation
 <p>Ce scenario simule l'état actuel de la station S2' y compris la couverture végétale.</p>	 <p>Ce scenario simule la station S2' dénudée de végétation.</p>
Scénario 2 : 100% conifères	Scénario 4 : 40% palmiers et 60% conifères
 <p>Ce scénario simule la station S2' en remplaçant le palmier par du conifères.</p>	 <p>Ce scénario simule une couverture végétale mixte, palmier et conifères.</p>

VI.2.3.3 Les stations de marche

Station S6 : Boulevard Souidani Boudjema

Une station linéaire d'environ 485 m de longueur accueillant du commerce de part et d'autre, à deux voies mécaniques, deux allées piétonnières sur ses bords et un terre-plein central doté d'arbre de ficus. L'allée sud-ouest est entièrement dépourvue de végétation, à l'encontre de l'allée nord-est qui est armée du vieux ficus dense.

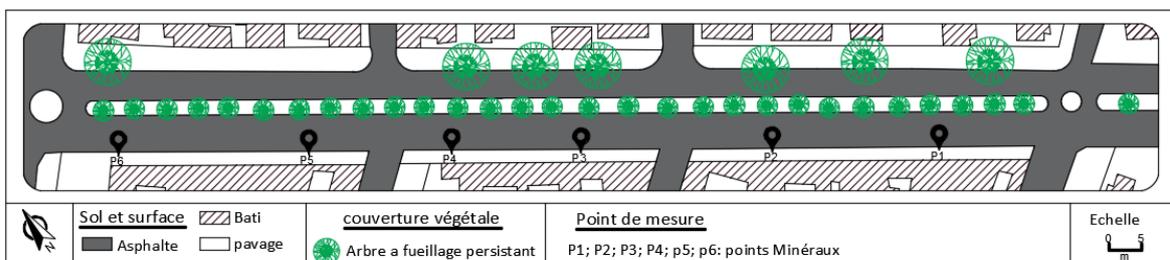


Figure VI.8: Vue en plan du Boulevard Souidani Boudjema – Station S6. Auteur 2019

Station S3 : Boulevard Boumaaza Said

Il s'agit d'un boulevard à une seule voie qui sert la circulation mécanique dans les deux sens d'environ de 220 m de largeur, il est principalement composé de bâtiments de hauteur moyenne. A l'entrée ouest se trouve un bâtiment de sept étages, est l'origine de l'appellation Septième du boulevard. La couverture végétale est peu dense et composée de ficus et du palmier.

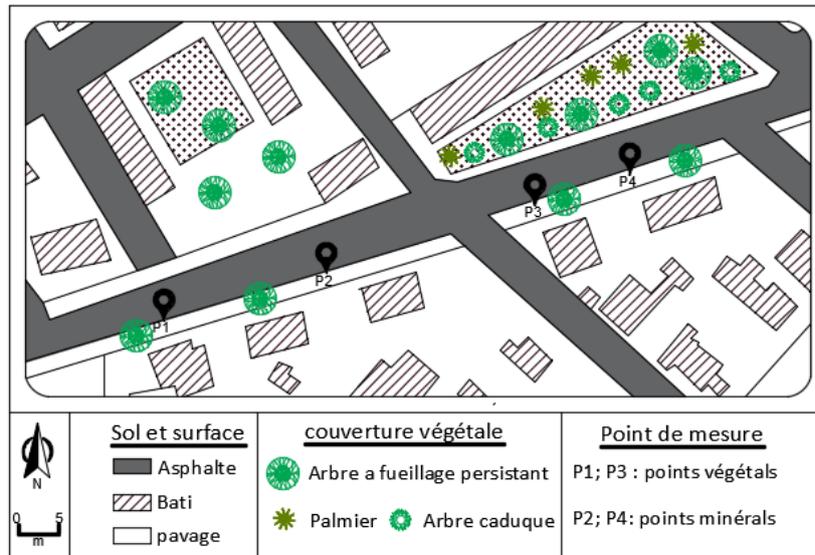


Figure VI.9: Vue en plan du Boulevard Boumaaza Said – Station S3. Auteur 2019

VI.2.3.4 Scénarios de simulation

- **Scénario 1 :** dans le but de mesurer le niveau du confort climatique durant le stress climatique d'été, ce scénario simule l'état actuel des stations de marche S3 et S6.
- **Scénario 2 :** ce scénario vise à démontrer l'impact de la végétation sur le confort climatique extérieur dans les deux stations S3 et S6, alors la simulation s'effectuera en éliminant la couverture végétale.
- **Scénario 3 :** ce scénario simule la disposition végétale actuelle en changeant l'espèce d'arbres *Frêne commun* et *Ficus benjamina* par *Ficus nitida*.
- **Scénario 4 :** ce scénario simule un nouveau ratio végétal, gardant la même disposition d'arbres pour la station S3 et une nouvelle disposition végétale avec le même ratio de l'espèce d'arbre existante *Ficus nitida* pour la station S6.

- **Scénario 5 :** ce scénario simule une nouvelle disposition végétale avec plusieurs espèces d'arbres *Ficus nitida* et *Palmiers de washingtonia* pour la station S6, et un nouveau ratio d'arbres *Fraxinus excelsior* pour la station S3.
- **Scénario 6 :** ce scénario vise à démontrer le rôle des plans d'eau dans l'amélioration des conditions microclimatiques, donc la simulation implique l'ajout des plans d'eau tout au long des deux station S3 et S6.
- **Scénario 7 :** ce dernier scénario combine une nouvelle disposition végétale des différentes espèces d'arbres *Ficus nitida*, *Populus alba* et *Palmiers de washingtonia* avec l'ajout des plans d'eau linéaire tout au long des deux stations S3 et S6.

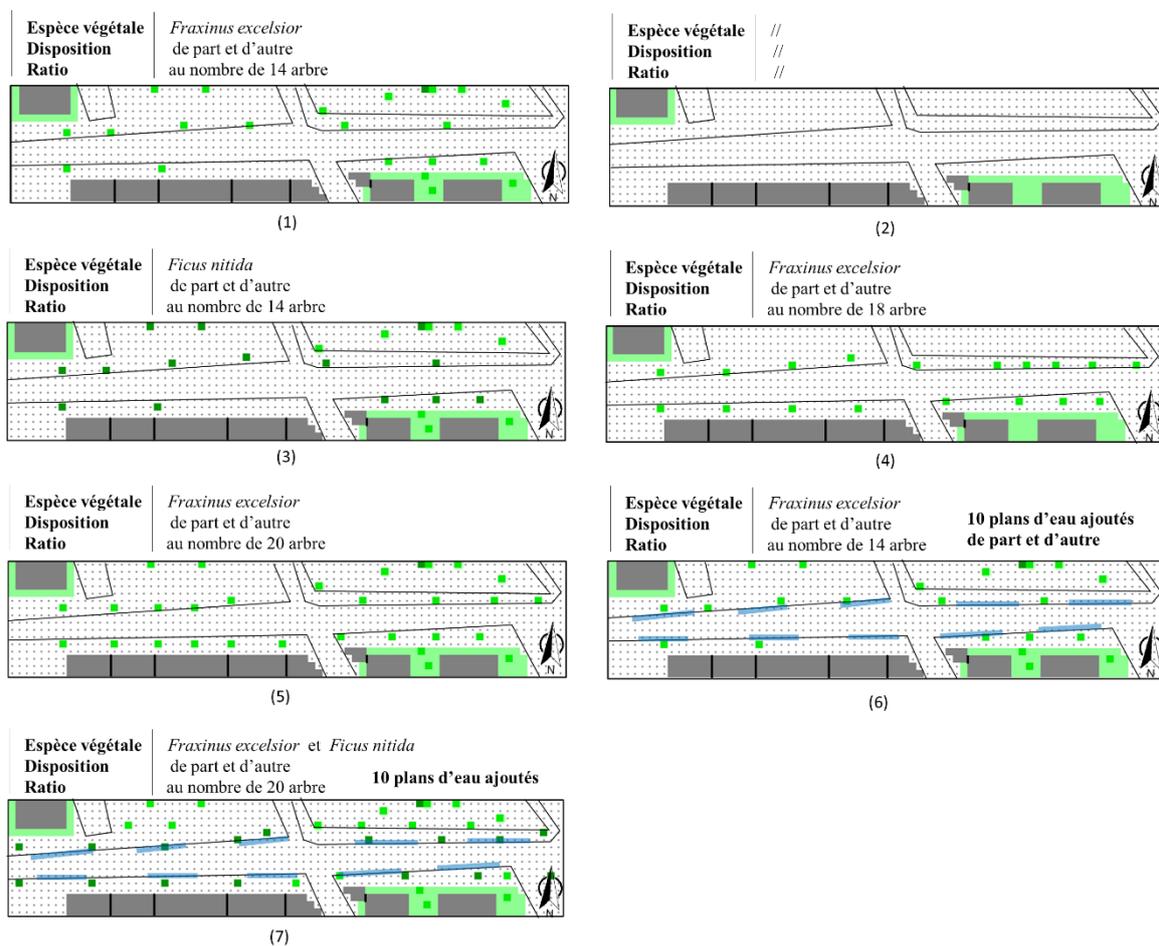


Figure VI.10: Scénarios simulés du Boulevard Boumaaza Said - station S3, (1) l'état actuel, (2) la station dénudée de la végétation, (3) nouvelle espèce d'arbre, (4) nouvelle disposition végétale, (5) nouveau ratio d'arbres, (6) ajout des plans d'eau linéaires, (7) proposition optimale. (*Envi-met V4.4.4*)

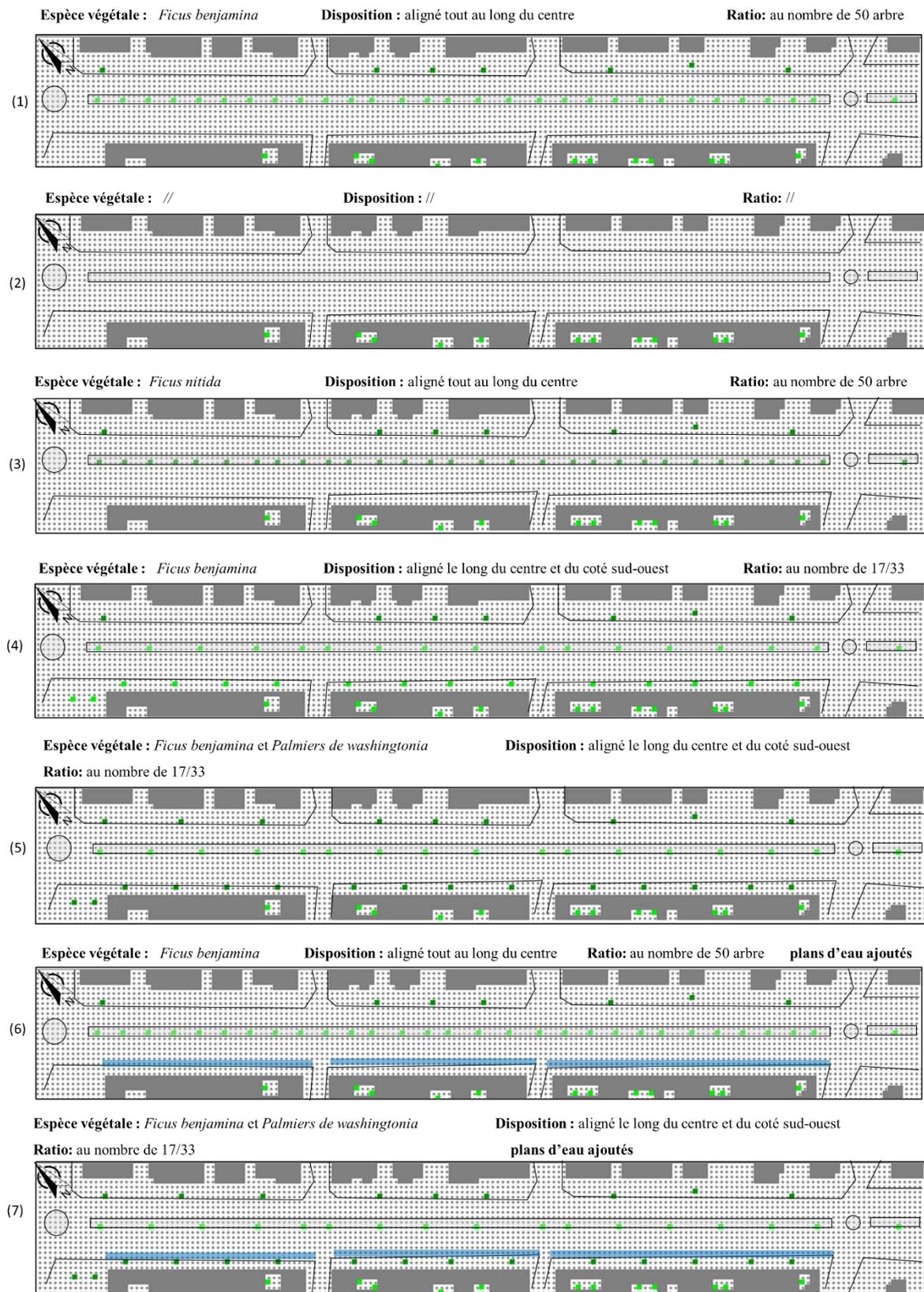


Figure VI.11: Scénarios simulés du Boulevard Souidani Boudjemaa - station S6, (1) l'état actuel, (2) la station dénudée de la végétation, (3) nouvelle espèce d'arbre, (4) nouvelle disposition végétale, (5) nouvelle disposition végétale des nouvelles espèces d'arbres, (6) ajout des plans d'eau linéaires, (7) proposition optimale. (Envi-met V4.4.4)

VI.3 Discussion et interprétation des résultats

VI.3.1 Ilots de fraîcheur

VI.3.1.1 Place 19 Mars – Station S2

Dans une optique de mesurer et d'améliorer les niveaux du confort climatique en extérieur, cette station examine huit scénarios avec différents ratios et types de végétation et différentes configurations des plans d'eau (Voir Figure VI.6). La comparaison des résultats de la simulation figure dans les graphes présentés dans (Figure VI.12).

Il ressort de l'extrapolation générale des cinq graphes que le pic de chaleur est situé entre 13 :00 at 15 :00, pour l'ensemble des scénarios simulés. L'élimination de la couverture végétale dans le scénario 1 a engendré des variations microclimatiques mineures, d'où les différences moyennes des températures sont de $\Delta T_a = 0.3^\circ\text{C}$ et $\Delta T_{mrt} = 1.2^\circ\text{C}$. Cela est dû à l'insuffisance d'arbres pour bloquer le rayonnement à ondes courtes entrant à la place, ainsi la quantité du rayonnement solaire à ondes longues est en dessous de celle requise pour réduire les températures de l'air. L'effet de l'obstruction des vents est aussi infime $\Delta V_a = 0.1\text{m/s}$ avec une différence d'humidité de $\Delta HR = 1.1\%$. En ayant le même niveau du stress thermique, $UTCI \geq 43^\circ\text{C}$ dans les scénarios 1 et 2, nous pouvant confirmer que le ratio végétal actuel (9.2% de la surface totale) est insuffisant pour améliorer le niveau du confort climatique au sein de la place.

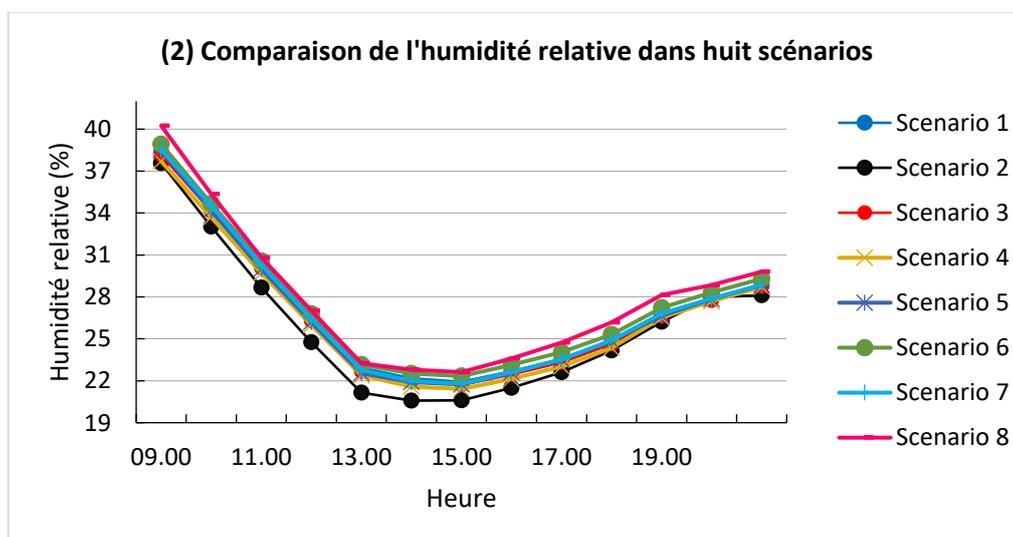
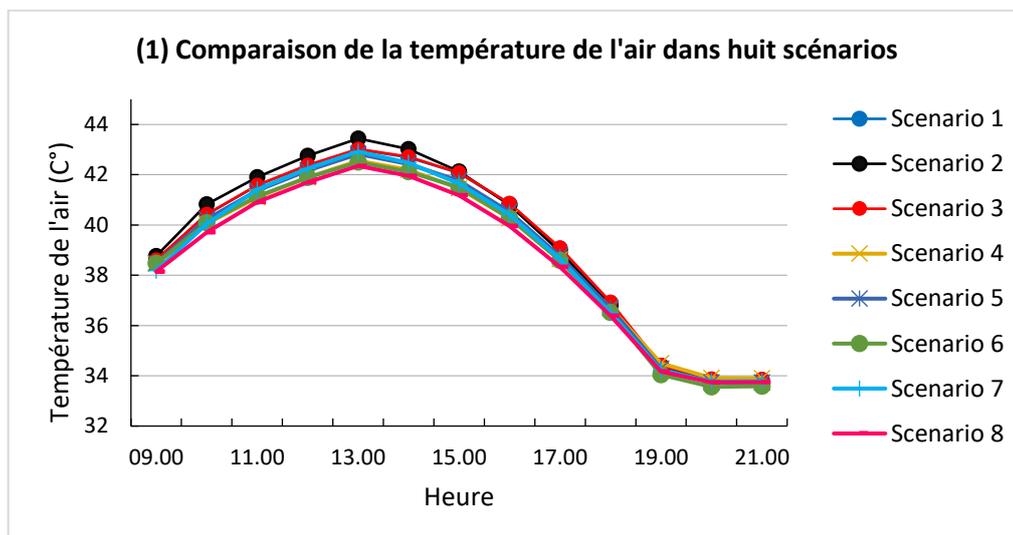
L'élimination de la fontaine dans le scénario 3 indique que l'influence de l'eau sur les variations microclimatique est quasiment imperceptible. Par contre, l'ajout des plans d'eau dans le scénario 7 engendre des régulations microclimatiques considérables. La comparaison des valeurs de T_{mrt} dans les scénarios 3 et 7 avec le scénario 1 indique que l'augmentation des températures de l'air dans la place est beaucoup plus faible dans la présence de l'eau.

Changer le type d'arbres et opter pour une disposition toute nouvelle, respectivement dans les scénarios 4 et 5 confirme l'insuffisance de la végétation pour une régulation microclimatique meilleur. Cependant, les deux scénarios 4 et 5 ont presque porté des variations microclimatiques similaires à celles du scénario 1, ainsi qu'un même niveau du stress thermique.

L'adoption d'une nouvelle espèce d'arbre dans le scénario 5 implique un léger déclin de T_{mrt} et des vitesses d'air moindres par rapport au scénarios 1 et 4 durant les post-pic heures, ce qui améliore le niveau du confort entre 17 :00 et 19 :00.

Le scénario 6 maximise la zone végétalisée, en adoptant trois différentes espèces végétales, soit d'un ratio de 67.3 % de la surface totale de la place. Par conséquent, une régulation tangible des conditions microclimatiques et une amélioration significative des niveaux du confort ont été observées, notamment en heures chaudes. L'interprétation possible c'est que la nouvelle couverture végétale a pu bloquer les radiations solaires à travers l'effet d'ombrage et humidifier l'atmosphère à travers l'effet d'évapotranspiration.

En termes de régulation microclimatique et d'amélioration des niveaux de confort climatiques, les meilleurs résultats sont observés au niveau du dernier scénario qui met en combinaison le ratio et la disposition végétale adoptés dans le scénario 6 avec la nouvelle configuration des plans d'eau, testés dans le scénario7. D'où la période entre 13 :00 et 18 :00 a connu une quantité de rayonnement à ondes longues assez suffisante pour atteindre des niveaux optimaux du confort climatique au sein de la place ($\Delta U_{TCI} = 5.9^{\circ}\text{C}$)



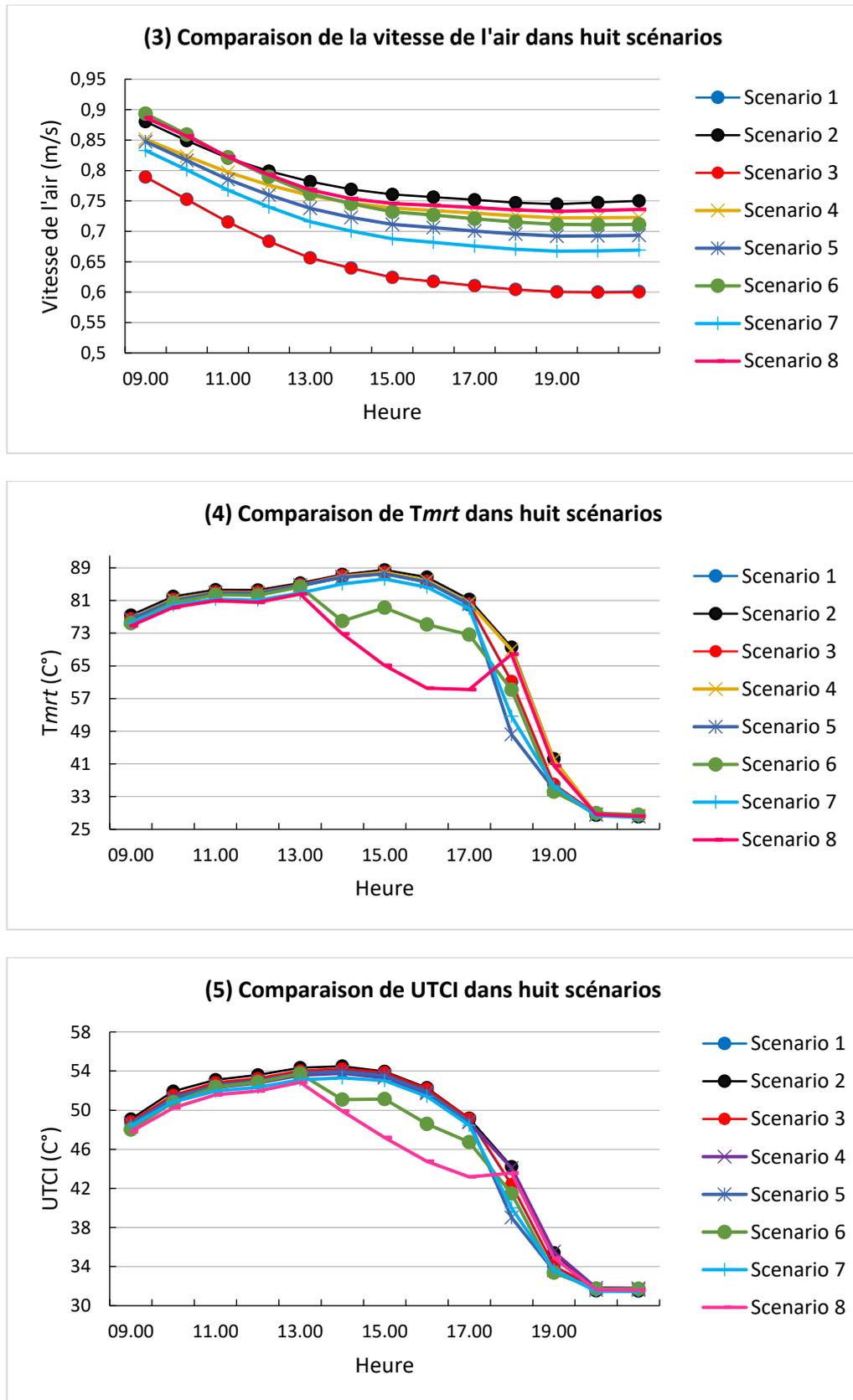


Figure VI.12: Comparaison des résultats de simulation de la station S2. (1) Température de l'air. (2) Humidité relative. (3) Vitesse de l'air. (4) Tmrt. (5) Indice UTCI. (Leonardo-Envi-Met 4)

VI.3.1.2 Rue El-Nakhlette – Station S2'

Pour cette station, l'objectif est d'étudier l'effet de régulation microclimatique des palmiers lors du stress climatique d'été, dont le ratio et le type de végétation sont les deux aspects à examiner (Voir Tableau VI.2). Les résultats de la simulation des quatre différents scénarios sur une période allant de 09 :00 à 21 :00 sont présentés dans (Figure VI.13).

Pour tous les scénarios, la tendance générale de la température de l'air est ascendante de 09 :00 à 14 :00 et descendante de 14 :00 à 20 :00. La tendance de l'humidité relative est d'un ordre inverse, avec 22.7%, 21.9%, 21.5% et 21.1%, respectivement dans le scénario 3, le scénario 4, le scénario 1 et le scénario 2.

Les variations de la température moyenne radiante sont de l'ordre suivant ; la moyenne journalière la plus élevée se trouve dans le scénario 2 qui a simulé la rue dénudée de palmiers avec T_{mrt} moy = 64.8°C. Dans la présence des palmiers la T_{mrt} moyenne est de 56.9°C (scénario 1). Dans le scénario 3 qui a simulé la rue avec 100% d'arbres du conifère T_{mrt} moy = 53.7°C et finalement T_{mrt} moy = 64.8°C dans le scénario 4, avec une baisse remarquable entre 14 :00 et 18 :00.

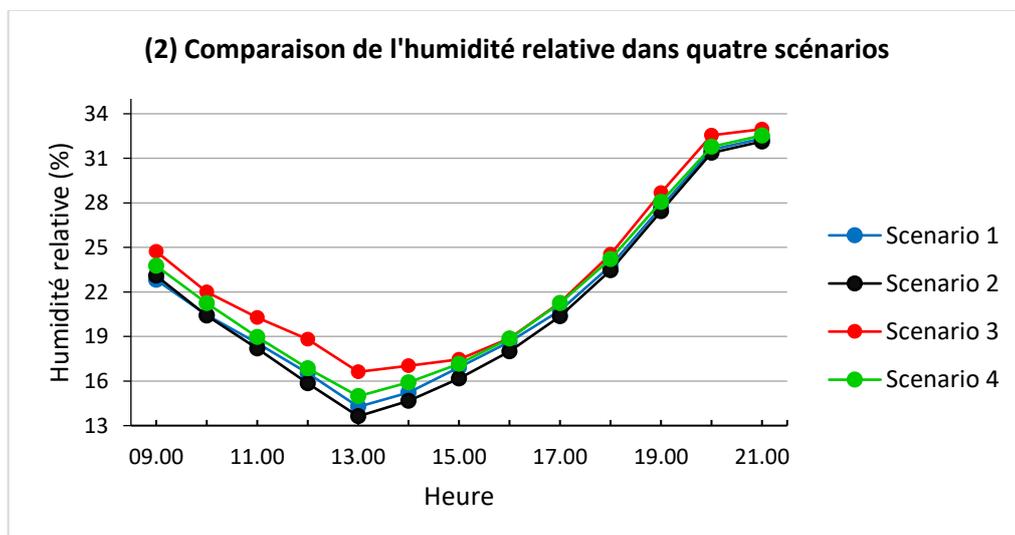
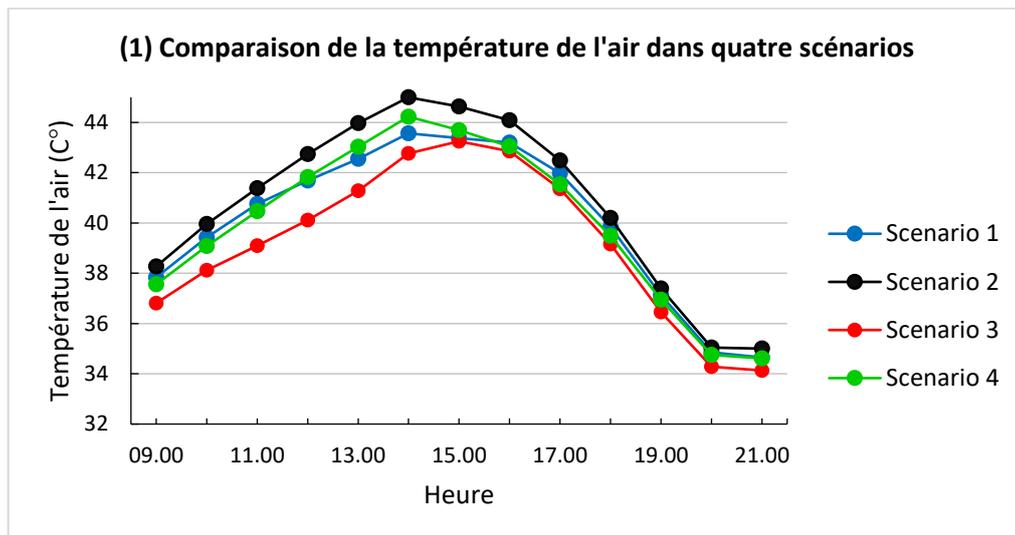
0.8 m/s est la vitesse du vent la plus élevée observée dans le scénario 2 de 0% de végétation, la deuxième valeur élevée de 0,7 m/s se trouve dans le scénario 1 de 100% palmiers, puis 0,6 m/s dans le scénario 4 avec une couverture végétale mixte, enfin 0,3 m/s dans le scénario 3 avec 100% d'arbres à feuillage persistant.

Les variations microclimatiques les plus critiques sont observées dans le scénario 2, où la couverture végétale est complètement enlevée avec T_a moy = 40.7°C et une différence maximale de ΔT_a max = 1.4°C entre 13 :00 et 15 :00. Parallèlement, la différence de T_{mrt} est estimée à ΔT_a max = 11.3°C, ce qui signifie que les palmiers affectent les conditions microclimatiques par effet d'ombrage en bloquant les radiations solaires indésirables (radiations à ondes courtes) pendant le stress thermique du chaud et peuvent améliorer le niveau du confort durant les heures chaudes.

Compte tenu de la classification des palmiers dans le type à feuilles persistantes, le scénario 3 a simulé l'état actuel de la station en remplaçant les palmiers par d'autres arbres à feuilles persistantes (conifères bas). Ce type a montré les meilleures conditions microclimatiques pendant le stress thermique. En conséquence, nous avons obtenu des températures plus basses avec une réduction moyenne de 0.8°C, tandis que l'humidité relative a augmenté de 1,2% et la vitesse du vent a connu des valeurs basses le long de la journée (V_a = 0.3m/s).

A l'exemple des palmiers, les températures basses ont été interprétées par effet d'ombrage, les valeurs élevées de l'humidité peuvent être interprétées par l'effet d'évapotranspiration induit par la biomasse des conifères, c'est-à-dire que le transfert entre les feuilles des arbres a aspergé la vapeur d'eau dans l'atmosphère.

La couverture végétale mixte dans le scénario 4 a été classée deuxième en termes de régulation microclimatique, et première en matière d'améliorations des niveaux du confort climatique en ayant des valeurs basses de T_{mrt} et de UTCI entre 14 :00 et 18 :00, respectivement de 12.1°C et 3.8°C. L'interprétation possible à la réussite de cette combinaison c'est que les palmiers adoptés ont contribué à maximiser la zone ombragée et ont engendré des augmentations considérables du rayonnement à ondes longues et les conifères ont aspergé la vapeur d'eau dans l'atmosphère, ce qui a conduit en somme à des conditions relativement fraîches dedans la station pendant le stress thermique du chaud.



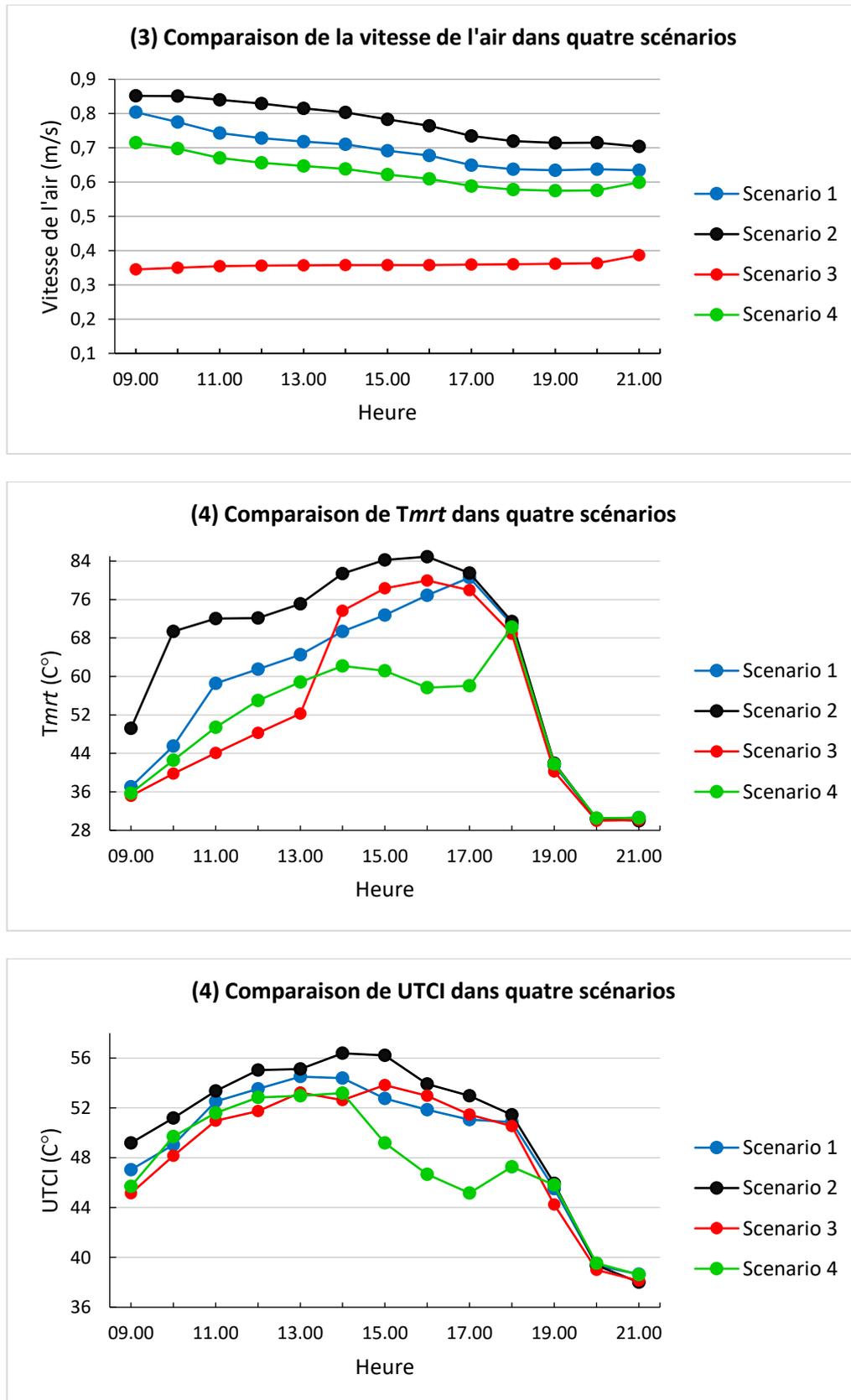


Figure VI.13: Comparaison des résultats de simulation de la station S2'. (1) Température de l'air. (2) Humidité relative. (3) Vitesse de l'air. (4) Tmrt. (5) Indice UTCI. (Leonardo-Envi-Met 4)

VI.3.1.3 Boulevard Boumaaza Said – Station S3

Ce boulevard examine sept scénarios avec différents ratios et types de végétation avec l'introduction des plans d'eau dans les deux derniers scénarios (Voir Figure VI.10). La comparaison des résultats de la simulation est présentée dans (Figure VI.14).

La tendance générale des températures de l'air et de T_{mrt} est d'ordre ascendant du matin à midi, les heures de pic sont situées entre 13 :00 et 15 :00 (T_a max = 44°C et T_{mrt} max = 86.8°C), d'ordre descendant pour les post-pic heures avec une remarquable stabilité durant les heures de soir. A l'ordre inverse, la tendance d'humidité relative est descendante du matin à midi et ascendante du midi au soir avec HR min = 18.6 %. Pour l'ensemble des scénarios simulés, les graphes de T_{mrt} et de l'indice UTCI sont d'une tendance journalière similaire.

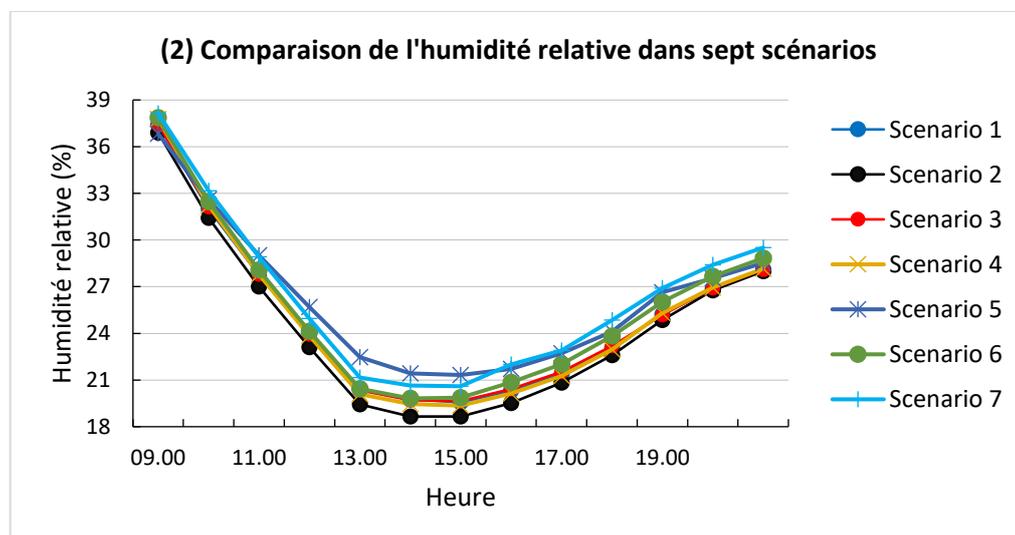
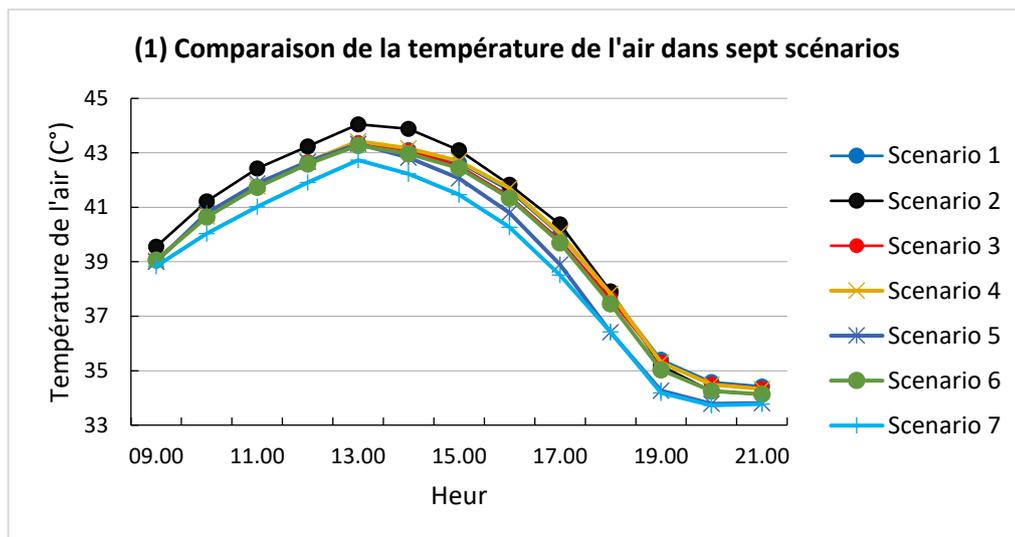
L'élimination de la végétation dans le scénario 2 a engendré des différences journalières significatives des conditions microclimatiques. D'où les différences maximales des températures sont de l'ordre suivant ; ΔT_a max = 0.8°C à 14 :00, $\Delta UTCI$ = 24°C à 17 :00. Tandis que, l'humidité relative a diminué pour atteindre 18.6% à 14 :00, avec des vitesses d'air relativement élevées V_a moy = 1.1m/s. Ceci signifie que la couverture végétale actuelle améliore les conditions climatiques durant le stress thermique du chaud.

Le changement de l'espèce d'arbres dans le scénario 3 a impliqué des variations microclimatiques négligeables, avec une différence légère des vitesses de l'air de 0.1m/s. Les valeurs basses obtenues du T_{mrt} entre 15 :00 et 18 :00 indiquent que les deux espèces d'arbres ont pu bloquer le rayonnement à ondes courtes, ce qui contribue à stabiliser les températures de l'air au sein de la station et à fournir un certain niveau du confort climatique.

Les scénarios 4 et 5 impliquent des ratios de végétation plus élevés que celui de l'état actuel de la station, avec une augmentation respective de 28.5% et 42.8%. Les deux scénarios ont montré une régulation microclimatique améliorée, ainsi le ratio végétal (au nombre de 20 arbres de frêne) dans le scénario 5 a porté des variations plus tangibles des valeurs de températures, ΔT_a moy = 0.5°C. Les valeurs journalières de T_{mrt} indiquent que le rayonnement solaire à ondes courtes a été bloqué par la masse foliaire des arbres, d'où le déclin observé entre 14 :00 et 17 :00 peut être traduit par la quantité élevée du rayonnement solaire à ondes longues, qui est à l'origine responsable de la réduction des températures de l'air dans la station. De telles conditions thermiques sont capables à améliorer les niveaux du confort climatique dans la station, notamment en heures chaudes UTCI = 48.6°C.

Les scénarios 1 et 6 ont presque porté une variation microclimatique similaire de T_{mrt} avec une différence perceptible des températures de l'air journalières ΔT_a moy = 0.3°C et d'humidité relative $\Delta HR = 0.5\%$. Compte tenu des valeurs similaires de T_{mrt} dans les deux scénarios, on peut conclure que l'ajout des plans d'eau dans cette station a une influence infime sur les conditions microclimatiques. Le déclin des T_{mrt} et de UTCI entre 15 :00 et 17 :00 supporte l'idée du blocage des rayonnements solaires indésirables par la masse foliaire d'arbres.

Pour toute la journée, les températures les plus basses sont observé au niveau du scénario 7 qui combine l'ajout des plans d'eau linéaires avec un ration végétal élevé (+42.8%). Par la suite, une combinaison des effets sera obtenue ; effet d'ombrage et effet d'évapotranspiration par les arbres et effet d'évaporation par les surfaces d'eau, ainsi la réduction moyenne des températures de l'air est de 0.9°C avec une augmentation moyenne de l'humidité relative de 1.5 %. Ce qui contribue à améliorer les niveaux du confort au sein du boulevard.



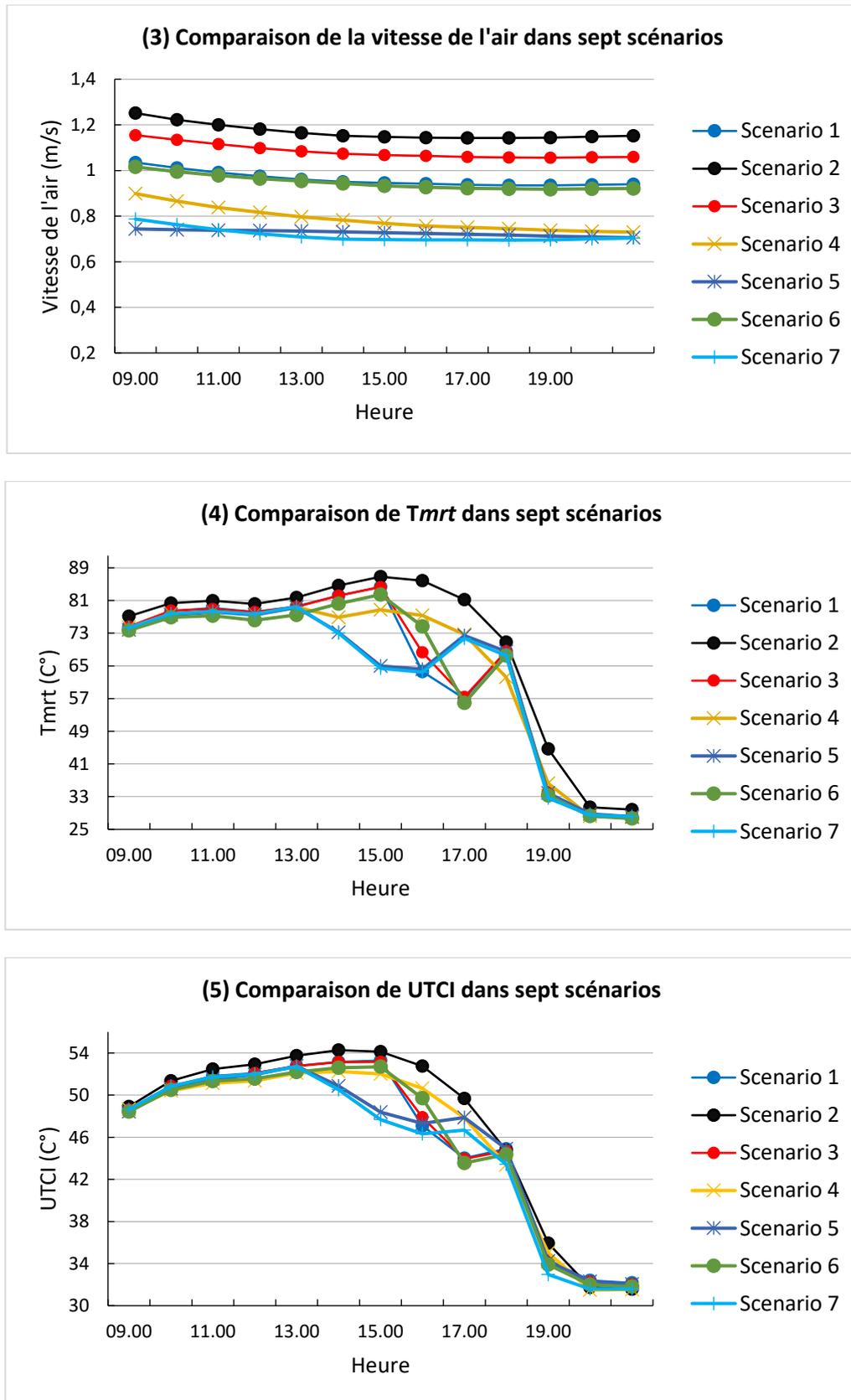


Figure VI.14: Comparaison des résultats de simulation de la station S3. (1) Température de l'air. (2) Humidité relative. (3) Vitesse de l'air. (4) Tmrt. (5) Indice UTCI. (Leonardo-Envi-Met 4)

VI.3.1.4 Boulevard Souidani Boudjemaa– Station S6

Comme expliqué ci-dessus, la station S6 implique la simulation de sept différents scénarios (Voir Figure VI.11), les résultats sont illustrés dans les graphes suivants (Figure VI.15).

Pour l'ensemble des scénarios simulés, la tendance générale des températures de l'air est d'ordre ascendant de 09 :00 à 14 :00 (heure de pic), descendant pour les post-pic heures. La tendance de l'humidité relative est d'ordre inverse, d'où l'heure de pic est fixée à 12 :00. La tendance globale du T_{mrt} est similaire à celle de l'indice UTCI, ce qui conduit à penser que le niveau du confort est influencé initialement par la quantité du rayonnement solaire reçu. Mis à part la vitesse de l'air, les heures de soir, à partir de 20 :00 révèlent d'une certaine stabilité pour l'ensemble des paramètres étudiés y compris l'indice UTCI.

Les résultats d'élimination de la couverture végétale dans le scénario 2 ont montré une influence négative sur les conditions microclimatiques. La température de l'air a augmenté de 0,8°C, avec une augmentation maximale de 1.1°C à 15 :00, de même pour T_{mrt} qui a augmenté de 2.6°C, avec une augmentation maximale de 21°C à 17 :00. Tandis que, l'humidité relative a diminué pour atteindre 17,2% à 12 :00. Les vitesses de l'air les plus élevées ont été obtenues dans ce scénario. Ceci signifie que l'espèce et la disposition végétale actuelles ont considérablement modifié les conditions thermiques au sein du boulevard.

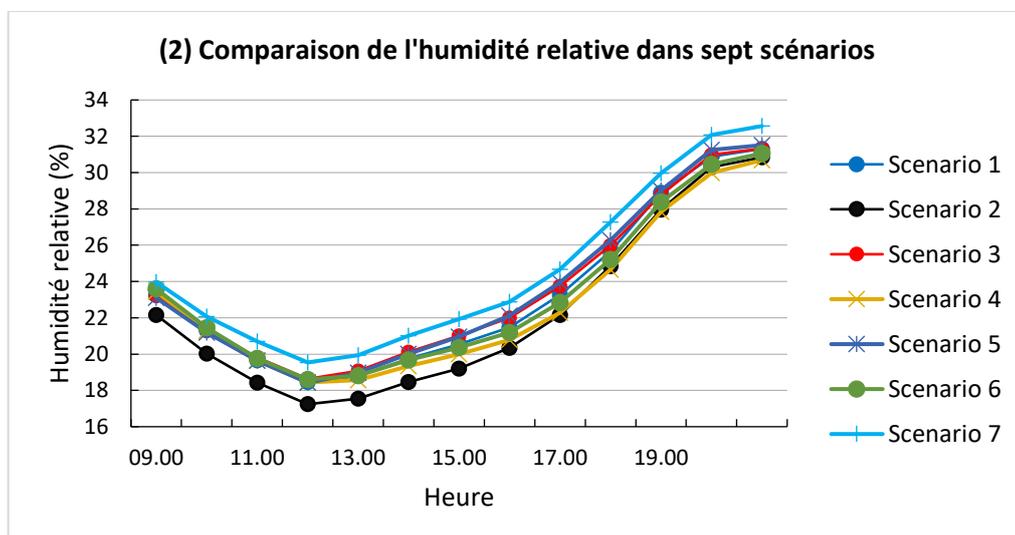
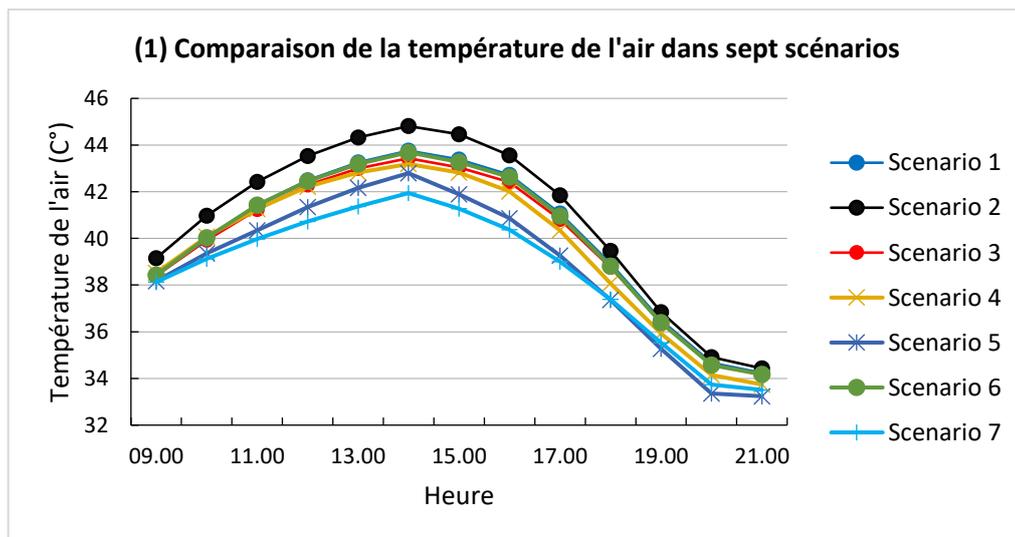
L'ajout des plans d'eau linaires tout au long du boulevard dans le scénario 6 n'est significatif quant aux heures chaudes de 15 :00 à 17 :00. Ainsi, les scénarios 1 et 6 ont presque porté des variations microclimatiques similaires avec une remarquable différence de T_{mrt} , estimée à 6°C durant la période mentionnée. L'interprétation possible de ces résultats c'est que l'eau, de par sa capacité thermique a absorbé le rayonnement à ondes courtes, engendrant avec l'ombrage des arbres une diminution significative du stress thermique exprimée par des valeurs relativement basses de l'indice UTCI.

Le scénario 3 a presque subi une variation des températures de l'air et d'humidité relative similaire à celle du scénario 1, avec une différence légère des vitesses de l'air. Les valeurs basses obtenues du T_{mrt} indiquent que l'espèce d'arbres a pu bloquer le rayonnement à ondes courtes laissant celui à ondes longues en dessous de sa canopée, ce qui contribue à la diminution du stress thermique et l'amélioration du niveau de confort climatique.

Le changement de la disposition des arbres dans le scénario 4 implique des ombres portés positionnés de bout en bout (maximise l'aire ombragée), notamment durant la période de l'après-midi quand le soleil se déplace du sud à l'ouest. Ce qui justifie la réduction tangible

des valeurs journalières des températures de l'air (- 0.4°C à 13 :00 et - 0.8°C à 18 :00). Une telle réduction avec l'augmentation des vitesses de l'air est capable à fournir un niveau de confort climatique meilleur par rapport à celui fourni dans le scénario 1 (état actuel du boulevard) notamment en heures chaudes ($\Delta UTCI = 1.8^\circ\text{C}$ à 15 :00).

Le scénario 5 implique une réduction significative des températures de l'air (ΔT_a moy = - 1.2°C avec ΔT_a max = 1.8°C à 16 :00), avec des valeurs relativement basses de T_{mrt} . Ceci due principalement aux capacités des palmiers à bloquer le rayonnement solaire et à maximiser la zone ombragée, ainsi que son long tronc serve la bonne circulation de l'air au sein du boulevard. L'ajout des plans d'eau au côté sud-ouest du boulevard (scénario 7) fait l'objet d'une combinaison optimale avec une réduction de 1.4°C et 6.9°C respectivement des températures de l'air et de T_{mrt} et une augmentation de 1.2% d'humidité relative. Ces conditions microclimatiques contribuent à leur tour à l'amélioration des niveaux du confort climatique dedans le boulevard durant les journées chaudes d'été ($\Delta UTCI = 5.6^\circ\text{C}$ à 15 :00).



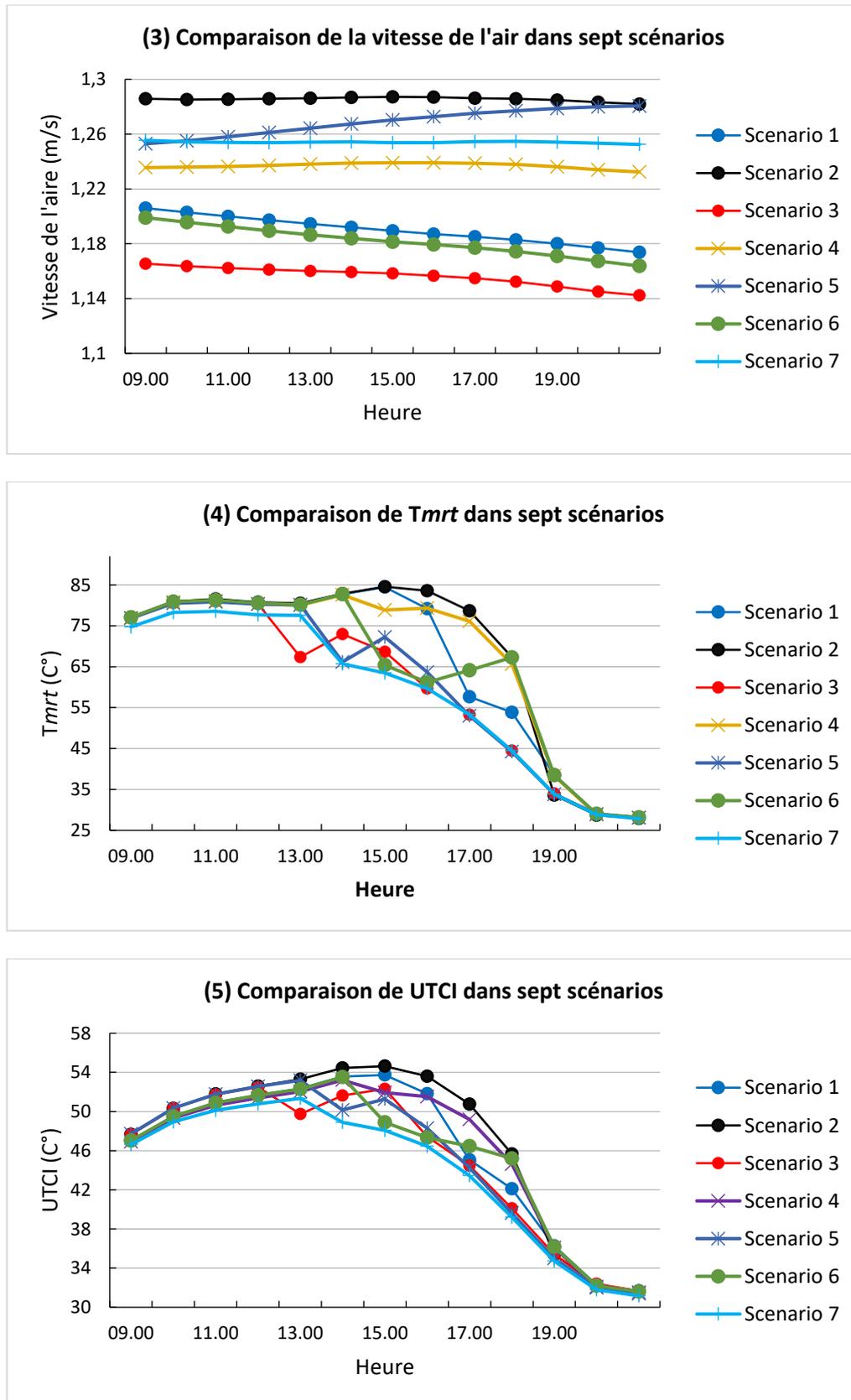


Figure VI.15: Comparaison des résultats de simulation de la station S6. (1) Température de l'air. (2) Humidité relative. (3) Vitesse de l'air. (4) Tmrt. (5) Indice UTCI. (Leonardo-Envi-Met 4)

VI.3.1.5 Placette 8 Mai 1945 – Station S8

Comme au station S2, rechercher de meilleures solutions pour améliorer le confort climatique d'été dans cette station s'est effectué en examinant huit différents scénarios. Les graphes en ce qui suit présentent les principaux résultats de simulation (Figure VI.16).

L'élimination des éléments naturels dans les scénarios 2 et 3 a mis en évidence leur rôle clé dans l'amélioration des conditions thermiques dedans la placette. Cependant, les arbres sont plus significatifs en termes de régulation microclimatique, d'où l'absence d'arbres engendre des augmentations de la température de l'air et de T_{mrt} de $0,7^{\circ}\text{C}$ et $4,5^{\circ}\text{C}$, avec une augmentation maximale, respective de $1,1^{\circ}\text{C}$ à 14 :00 et de $16,7^{\circ}\text{C}$ à 15 :00. A l'ordre inverse, l'humidité relative diminue pour atteindre 18,6% à 13 :00. Malgré que le ratio végétal soit de 13% de la surface totale est faible, le palmier et le ficus ont considérablement modifié les conditions thermiques au sein de la placette. L'élimination du plan d'eau dans le scénario 3 augmente la zone minérale dans la placette, ce qui augmente ainsi la quantité du rayonnement solaire à ondes courtes. En conséquence, nous avons obtenu une augmentation respective de $0,3^{\circ}\text{C}$ et de 2°C des températures de l'air et de T_{mrt} avec $\Delta T_{mrt} = 15,8^{\circ}\text{C}$ à 15 :00, tandis que l'humidité relative diminue de 1%.

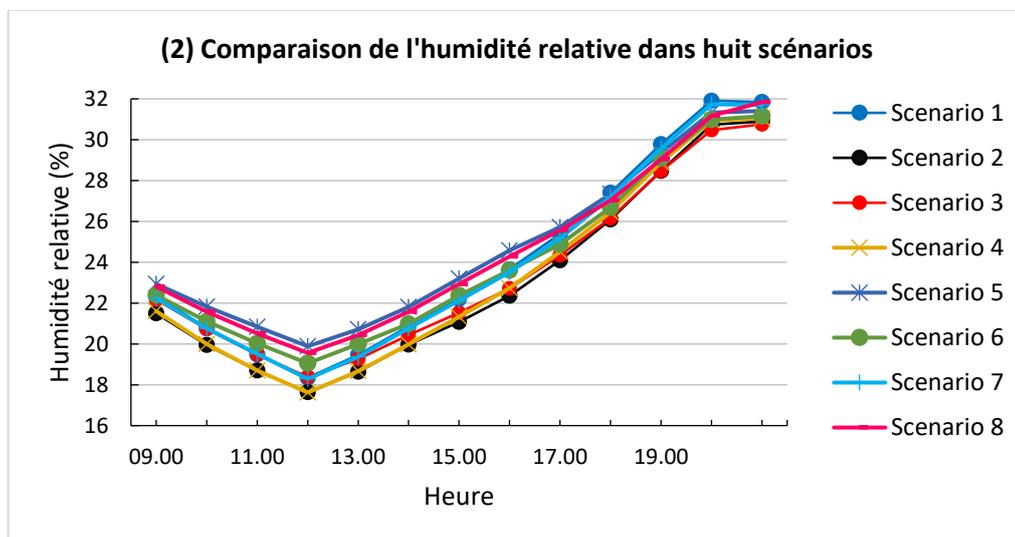
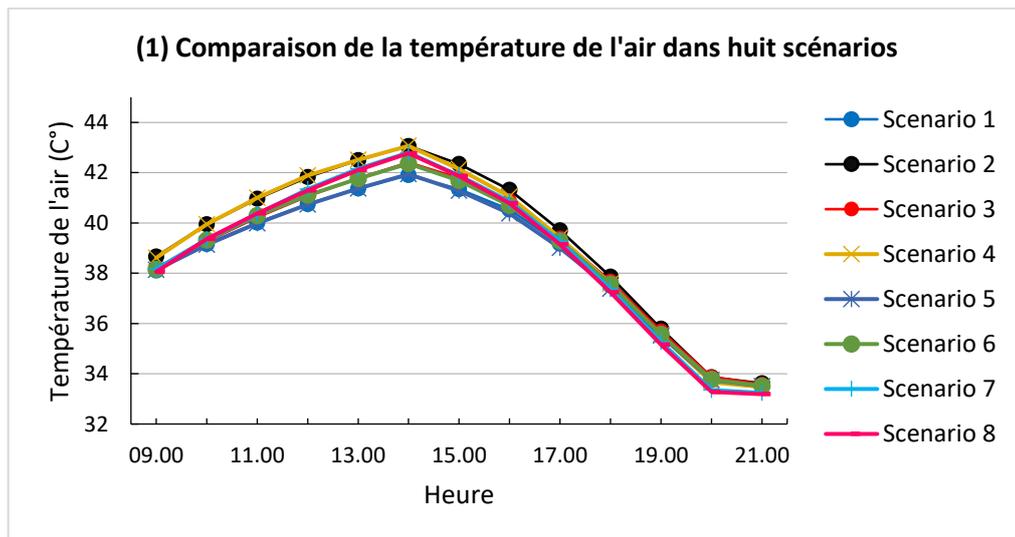
Le scénario 1 et le scénario 5 ont presque la même variation microclimatique avec une légère différence d'humidité relative et de température radiante moyenne, estimées respectivement à 0,2% et 2°C . Le niveau du confort actuel de la station S8 a été mesuré à l'aide de l'indice UTCI qui est de $46,8^{\circ}$ correspondant à un stress thermique extrême. En remplaçant les arbres *Ficus benjamina* par des arbres *Ficus nitida* dans le scénario 5, nous avons obtenu presque le même UTCI, $46,2^{\circ}\text{C}$ qui se situe dans la même catégorie du stress thermique. Cela signifie que le ratio végétal de 13% de la surface totale n'est pas suffisant pour offrir des niveaux de optimaux du confort climatique.

Les scénarios 4, 6 et 7 impliquent de minimiser la surface minérale, les trois ont porté un niveau du confort climatique plus tôt mieux, respectivement UTCI = $44,1^{\circ}\text{C}$, UTCI = $45,5^{\circ}\text{C}$ et UTCI = $45,1^{\circ}$, correspondant à un stress thermique très fort. Cependant, le scénario 6 avec 72% de surface ombragée induite par le palmier et le ficus, présente les meilleures variations microclimatiques ; moyenne $T_a = 38,3^{\circ}\text{C}$, HR = 24%. Alors que le scénario 4 avec le même ratio, 72% de surface ombragée induite par le palmier et le *Ficus nitida* et le scénario 7 avec 18% de plans d'eau, ont le meilleur UTCI quotidien avec un UTCI bas même au heures chaudes (UTCI = $49,9^{\circ}\text{C}$ à 14 : 00). Dans le scénario 4, les arbres sont disposés

d'une sorte à créer des petits couloirs, ce qui favorise le flux d'air à l'intérieur de la placette. À l'opposé du scénario 6, où les arbres étaient tout proches, ce qui justifie les valeurs élevées des vitesses de l'air dans le scénario 4.

Indépendamment de l'effet d'obstruction des vents, une réduction considérable de la température de l'air et du T_{mrt} avec une augmentation de l'humidité relative en été pourrait conduire à une régulation microclimatique positive.

Le scénario 8 implique moins de minéralité, 72% représente la couverture végétale, 18% représente la surface de l'eau et 5,5% représente les kiosques. Ce scénario a les meilleurs niveaux du confort climatique, avec $UTCI$ quotidien = 43,4 °C et $UTCI = 49,1^{\circ}C$ à 14 :00. En outre, il présente une bonne variation microclimatique, en ayant la température de l'air la plus basse et T_{mrt} moyenne, l'humidité relative la plus élevée et une vitesse d'air élevée ($T_{a \text{ min}} = 33,1^{\circ}C$, $T_{mrt \text{ moy}} = 65^{\circ}C$, $HR \text{ max} = 31,8\%$ et $V_a \text{ max} = 0,7 \text{ m/s}$).



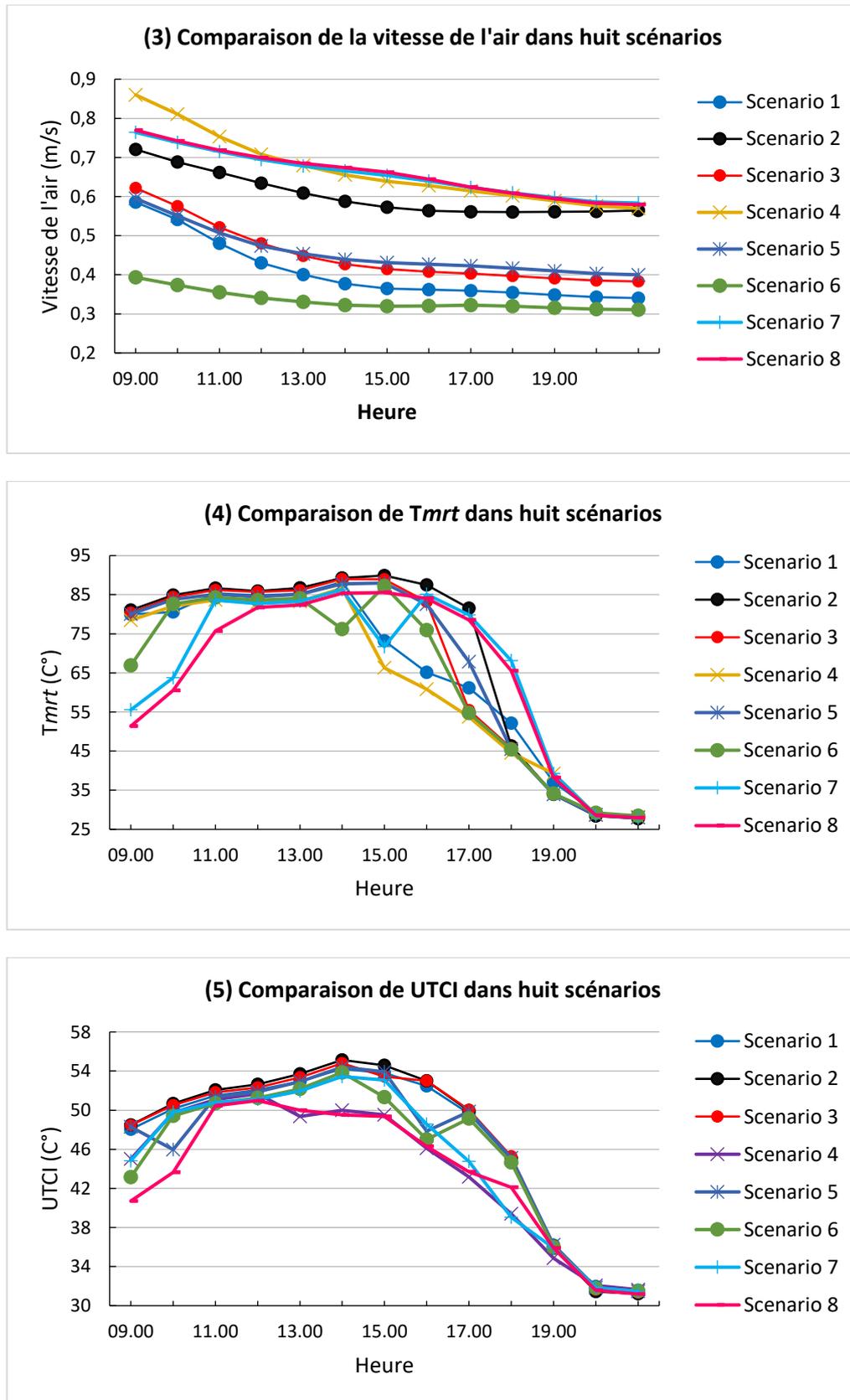


Figure VI.16: Comparaison des résultats de simulation de la station S8. (1) Température de l'air. (2) Humidité relative. (3) Vitesse de l'air. (4) Tmrt. (5) Indice UTCI. (Leonardo-Envi-Met 4)

VI.3.2 Parcours de fraîcheur urbains à Guelma

Les diverses contributions des éléments naturels rendent la création des ilots de fraîcheurs urbains au centre-ville de Guelma possible, par la suite des parcours urbains frais en été peuvent l'être également. Le principe retenu pour identifier les propositions les plus adéquates pour parcourir des cheminements climatiquement confortables est de sélectionner les réductions les plus significatives des niveaux du confort climatique pour chaque phase thermique (Voir Annexe 11).

Pour la phase du matin, deux cheminements sont possibles pour se déplacer de la station S2 à la station S8, auxquels les réductions des niveaux du confort climatique varient entre 0.46°C à 6.9°C. Le premier est le suivant : S2-S2'-S6-S8, tout en adoptant des arbres à feuillage persistant au niveau de la station S2'. Le deuxième favorise la combinaison des éléments naturels dans la quatre stations S2-S3-S6-S8.

Pour la phase chaude, le cheminement le plus frais avec des réductions considérables des niveaux du confort (de 0.94°C à 3.87°C) et des températures de l'air (de 0.46°C à 1.92°C) est celui suivant : S2-S3-S6-S8, dont l'effet de rafraîchissement résulte de la combinaison des arbres avec les plans d'eau au niveau des quatre stations. La disposition des arbres dans le sens des vents dominants dans la station S8 a un effet rafraichissant presque égale à celui obtenue par les deux éléments naturels. L'adoption d'une couverture végétale mixte des palmiers et des arbres persistants au niveau de la station S2' constitue un cheminement climatiquement confortable durant les heures chaude ; S2-S2'-S6-S8.

Durant la phase de soulagement thermique, le soleil est presque à l'Ouest, ce qui signifie que l'effet d'ombrage n'est plus déterminant. Alors, cette phase implique deux cheminements : S2-S3-S6-S8 et S2-S2'-S6-S8, avec des réductions des niveaux du confort climatiques de 1.42°C à 3.45°C, dont l'effet de rafraîchissement résulte grandement par les vitesses d'air élevées dans les différentes stations.

Pour la phase du soir, les cheminements les plus frais à parcourir sont ceux favorisant des vitesses d'air non obstruées ou un courant d'air. Ceci se réalise dans les propositions à faible ratio végétal et très souvent dans l'état actuel des cinq stations.

VI.3.3 Parcours de fraîcheur et niveaux de confort

Il a été déjà relevé que l'environnement thermique urbain au centre-ville de Guelma est affecté par la composition formelle, minérale et végétale de celui-ci. Ainsi, les niveaux du confort climatique à l'échelle piétonne dans chaque phase thermique sont déterminés par la qualité des ombres portées et la haute réflectivité des sols dans les endroits de repos climatique, qualifiés de stratégies d'adaptation (Voir chapitre V). Les résultats de simulation des endroits avec un stress thermique extrême et des niveaux du confort climatiques inférieurs indiquent que ces derniers peuvent être améliorés en adoptant des solutions à base naturelle ; eau et végétation, d'où la qualité des ombres portées des arbres est la déterminante le long des journées chaudes d'été.

Après avoir présenté et interprété les résultats des cinq stations ; S2, S2', S3, S6 et S8, nous discutons en ce qui suit les paramètres et les effets de régulation microclimatique qui sous-tendent l'amélioration des niveaux du confort climatique pendant les quatre phases thermiques que subi le piéton au centre-ville de Guelma, faisant un parcours urbain allant de la station S2 à la station S8 (Voir Figure VI.1).

VI.3.3.1 Niveaux actuels du confort climatique

Pour l'ensemble des stations étudiés, les niveaux du confort climatique le long des quatre phases thermiques d'une journée chaude (22.07.2019) sont présentés dans (Figure VI.17).

La phase thermique du matin porte presque des niveaux du confort similaires dans les cinq stations, le niveau du stress climatique dans la station S2' est relativement moindre par rapport à la station S3. Prenant en compte l'orientation nord des deux stations et la position est du soleil le matin, cela peut être interprété par la grande zone ombragée induite par les ombres portées des palmiers dans la station S2'. Ainsi, pour se déplacer de S2 à S8, il est préférable de prendre le parcours suivant : S2-S2'-S6-S7-S8.

La phase thermique chaude porte des niveaux de stress climatique très élevés qui dépassent 50°C dans les cinq stations, ceci est dû à la dominante minéralité et l'exposition directe aux rayonnements solaires (la position verticale du soleil). Cependant, les deux propositions pour se déplacer de S2 à S8 ; S2-S3-S6-S7-S8 et S2-S2'-S6-S7-S8 représentent des parcours inconfortables pour les usagers en été.

Nous revenons ici sur l'observation qui remis en cause les niveaux du confort durant la période du matin et la sensation thermique des usagers, en ayant des niveaux de stress

thermique convergents avec ceux de la période chaude la phase thermique du matin semble loin d'être une phase modérée.

Comme l'indique sa qualification, la phase de soulagement thermique porte des niveaux de stress thermique moindres dans les cinq stations, avec un déclin moyen de 10°C. Par rapport aux autres stations, le niveau du stress climatique dans la station S2' été plus élevé avec un déclin de 4.7°C.

A l'exemple de la phase précédente, la phase modérée du soir porte des niveaux de confort climatique similaires avec des réductions perceptibles du stress thermique dans les cinq stations avec toujours une réduction moindre dans la station S2'. Ce qui fait que le parcours le plus confortable pendant ces deux phases est le suivant : S2-S3-S6-S7-S8.

En somme, les niveaux du confort climatique durant les quatre phases thermiques dans la station S2' – Rue El-Nakhlette nous a fait penser à la composition minérale et la contribution de la couverture végétale dans la station et son impact sur les niveaux du confort.

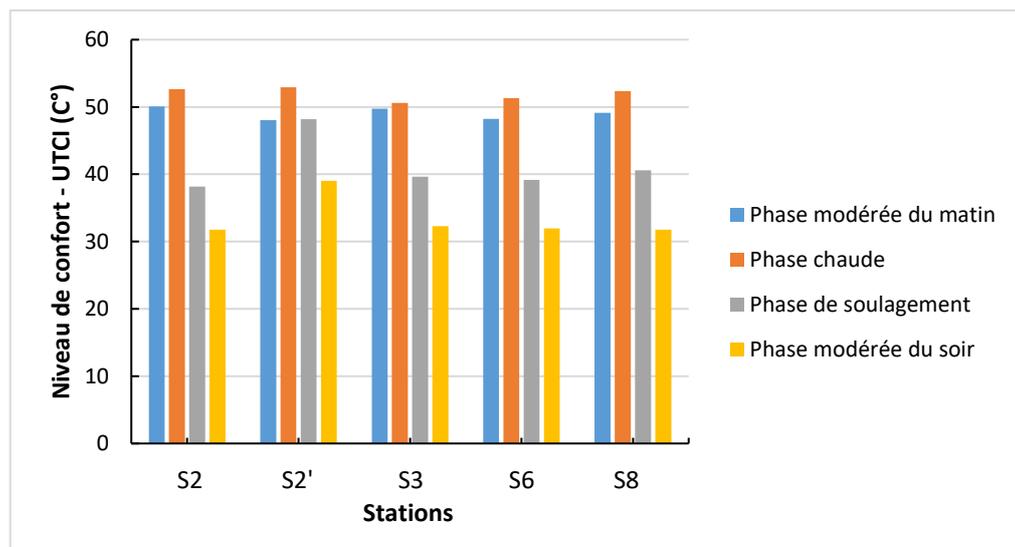


Figure VI.17: Niveaux de confort climatique (Indice UTCI) dans les cinq stations S2, S2', S3, S6 et S8. (Leonardo-Envi-Met 4)

VI.3.3.2 Impact des éléments naturels sur le confort climatique

Afin de mettre en évidence l'impact des éléments naturels ; eau et végétation sur la qualité de l'environnement thermique extérieur pendant les journées chaudes, nous avons simulé l'ensemble des stations S2, S2', S6, S7, S8 dépourvues d'éléments naturels comme expliqué ci-dessus (Voir scénarios de simulation).

Effet d'élimination des arbres dans les espaces extérieurs

Malgré son ratio minime, la présence des arbres contribue à contrôler le rayonnement solaire transmis dans l'ensemble des stations, tout au long la journée. Ce qui abaisse par la suite les températures de l'air, d'où la réduction varie de 0.2° à 1°C pendant la phase chaude (Ph 02), ceci a engendré une légère amélioration des niveaux du confort climatique de -0.3° à -2.2°C. L'amélioration des conditions thermiques dans les espaces extérieurs par végétation a été appréhendée par plusieurs chercheurs dans des divers climats dans le monde, soit par introduction d'arbres aux espaces dénudés de végétation ou par élimination de la couverture végétale (Voir chapitre II), dont les conclusions concordent avec la nôtre, certes que le ratio végétal dans les espaces étudiés ; S2, S2', S3, S6 et S8 est tout moindre.

Tableau VI.3: Réduction de UTCI, des températures de l'air et de *Tmrt* dans la présence des arbres.

Stations et réduction de Ta et de UTCI (C°)		Phases Thermiques				Cartes de UTCI à 14 :00	
		Ph 01	Ph 02	Ph 03	Ph 04	Avec arbres	Sans arbres
S2 - Place 19 Mars	UTCI	0.4	0.3	1.6	0		
	<i>Tmrt</i>	1.1	1	4.9	0		
	Ta	0.3	0.2	0.5	0		
S2' - Rue El-Nakhlette	UTCI	2.1	1.8	0.5	0		
	<i>Tmrt</i>	18	9.6	0.5	0		
	Ta	0.5	1	0.3	0.2		
S3 - Boulevard Boumaaza said	UTCI	0.4	2.2	0.7	0		
	<i>Tmrt</i>	2.2	8.2	6.4	1.6		
	Ta	0.5	0.5	0	0		
S6 - Boulevard Souidani Boudjemaa	UTCI	0.7	1.7	1.3	0		
	<i>Tmrt</i>	0.1	3.7	4.3	0		
	Ta	0.8	1	0.4	0.2		
S8 - Placette 8 Mai 1945	UTCI	0.4	0.6	0	0		
	<i>Tmrt</i>	2.7	9.2	0	0		
	Ta	0.6	0.9	0.2	0		

L'impact de l'eau sur les variations microclimatiques et sur les niveaux du confort a été vérifié en éliminant les plans d'eau dans les stations de repos S2 et S8 et en ajoutant des plans de d'eau linaires tout au long des deux stations de marche S3 et S6 (Tableau VI.4).

Tableau VI.4: Réduction de UTCI, des températures de l'air et de T_{mrt} dans la présence des plans d'eau.

Réduction (C°)		Station 2			Station 8			Station 3			Station 6		
		UTCI	T_{mrt}	Ta	UTCI	T_{mrt}	Ta	UTCI	T_{mrt}	Ta	UTCI	T_{mrt}	Ta
Phases Thermiques	Ph 01	0.1	0.3	0	0.3	2.1	0	0.3	1.2	0	0	0	0
	Ph 02	0.1	0.5	0	0.3	4.5	0.3	0.1	0.1	0.1	1.1	4.4	0
	Ph 03	0	0.3	0	0.1	0	0.1	0.4	0.8	0.3	0	0	0
	Ph 04	0	0.1	0	0	0	0	0.3	0.5	0.3	0	0	0

Effet d'élimination des plans d'eau dans les espaces extérieurs

La présence des plans d'eau a un infime impact sur les conditions thermiques en extérieurs tout au long de la journée. Ainsi, l'élimination des plans d'eau dans les stations de marche S2 et S8 a généré plus de minéralité, ce qui augmente la quantité transmise du rayonnement solaire à ondes courtes. La réduction des T_{mrt} dans les deux stations durant la phase chaude (Ph 02) indique que la superficie des plans d'eau est déterminante en matière d'absorption des radiations solaires dans les espaces extérieurs.

Effet d'ajout des plans d'eau aux espaces extérieurs

L'ajout des plans d'eau aux deux boulevards cas d'étude (Stations S3 et S6) n'a montré l'amélioration microclimatique quant aux heures chaudes. L'interprétation possible de ces résultats les surfaces d'eau, de par leur capacité thermique ont absorbé le rayonnement à ondes courtes, engendrant avec l'ombrage des arbres une diminution significative du stress thermique exprimée par des valeurs relativement basses de l'indice UTCI.

Si l'on revient aux valeurs horaires obtenues dans les différents scénarios qui examinent l'impact de l'eau sur les conditions thermiques, on peut conclure que le rôle de l'eau n'est considérable qu'au heures de chaleur extrême de la journée. Cependant, les masses d'eau peuvent être considérées comme des puits de chaleur dans les espaces extérieurs.

En général, les éléments naturels jouent un rôle important dans l'amélioration des conditions thermiques dans les espaces extérieurs à Guelma. Certes que les arbres sont les plus significatifs en termes de régulation microclimatique, ce qui est déjà confirmé dans les recherches précédentes (Morille & Musy, 2017; Skoufali & Battisti, 2019).

VI.3.3.3 À la recherche des niveaux de confort climatique optimal

L'objectif majeur de notre étude étant de trouver de meilleures solutions pour améliorer les niveaux du confort climatique dans l'ensembles des espaces extérieurs sélectionnés, la discussion de quelques paramètres et qualités relatifs aux éléments naturels mis en études dans les scénarios de simulation est cruciale, tels que le ratio, la disposition végétale, les essences d'arbres, la configuration et la superficie des masses d'eau.

Effet d'augmentation de la couverture végétale a un espace minéral

L'augmentation des ratios d'arbres dans les stations S2, S2', S3 et S8 induit une régulation tangible des conditions microclimatiques et une amélioration significative des niveaux du confort, notamment en heures chaudes. Ainsi, deux qualités déterminantes dans cette amélioration ; la qualité des ombres portées des arbres qui favorise la présence du rayonnement à ondes logues sous la canopée d'arbres et la qualité d'évapotranspiration de la masse foliaire des différentes espèces d'arbres, qui aspergent la vapeur d'eau dans l'atmosphère, ce qui conduit en somme à des conditions relativement fraîches en extérieurs lors des moments de chaleur extrême.

Le confort climatique des usagers est influencé initialement par la température moyenne rayonnante qui représente la moyenne des échanges thermiques par rayonnement. En effet une augmentation de 25% du ratio végétal à améliorer les niveaux du confort climatique dans la station S2', d'où les valeurs de T_{mrt} et de UTCI entre 14 :00 et 18 :00, sont respectivement de 12.1°C et 3.8°C. Ces résultats sont cohérents avec un grand nombre d'études, parmi entre autres (Aminipouri et al., 2019), l'étude a révélé que les arbres ont réduit de 3,3° à 7,1°C pendant les heures chaudes, avec une corrélation positive entre T_{mrt} et la couverture végétale.

Étant donné que T_{mrt} est une température qui permet, à la fois de mesurer les niveaux du confort climatique et de globaliser les échanges thermiques par rayonnement dans l'environnement thermique urbain, la quantité de rayonnement solaire reçu (direct) doit être déterminée pour des mesures plus exactes des niveaux du confort climatique dans les espaces extérieurs.

Une augmentation respective du ratio végétal de 28.5% et 42.8% au niveau du boulevard Boumaaza Saïd (Station S3) a montré des conditions thermiques améliorées. D'où il existe une proportion inverse entre le ratio végétal et la quantité du rayonnement solaire direct, plus la couverture végétale est expansive, plus l'effet du blocage du rayonnement à ondes courtes est significatif. En comparaison avec le ratio végétal actuel, le ratio 3 a diminué la quantité des radiations directes dans le boulevard de 615.5 w/m^2 entre 11 :00 et 16 :00 avec une diminution maximale de 822.05 w/m^2 à 13 :00. Des résultats similaires ont été trouvés à Constantine (BELLARA, 2013), où la quantité des radiations a diminué de 944 w/m^2 à midi dans la présence des arbres.

La quantité du rayonnement solaire réfléchi est aussi en relation proportionnelle à l'inverse avec le ratio végétal dans le boulevard cas d'étude. Toutes fois, plus l'effet du blocage induit par les arbres est immense plus la quantité des radiations à ondes courtes est faible.

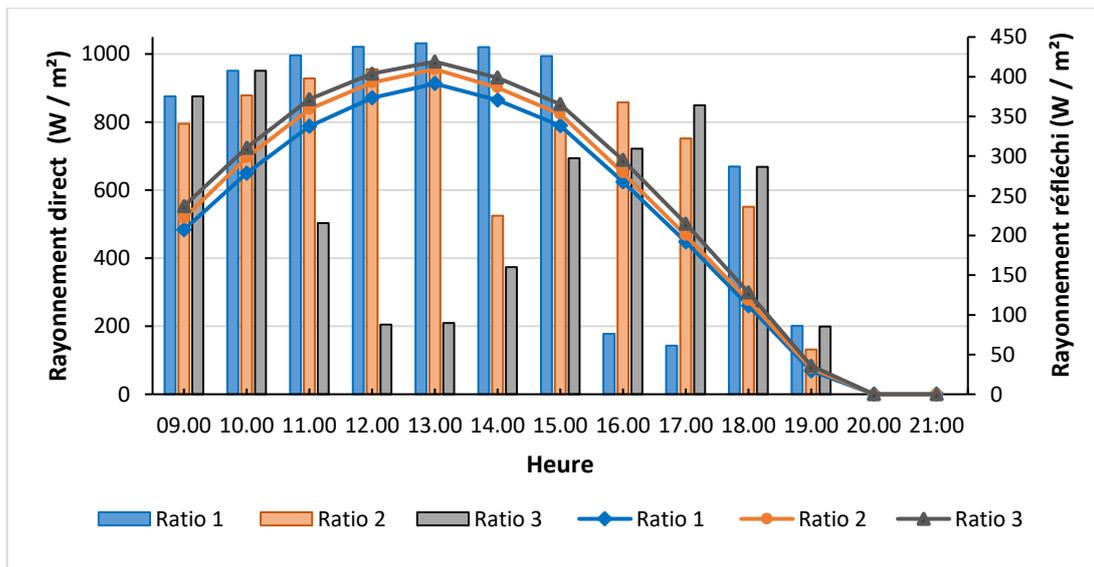


Figure VI.18 : Quantité du rayonnement globale ; directe et réfléchi dans la station S3 avec trois différents ratios ; Ratio 1 : actuel, Ratio 2 : +28.5% et Ratio 3 : +42.8%. (Leonardo-Envi-Met 4)

Effet de régulation microclimatique des différentes espèces d'arbres

Dans le but de vérifier l'adéquation des différentes espèces d'arbres au centre-ville de Guelma au climat semi-aride dans lequel sont implantées, la fonction de régulation microclimatique du *Ficus retusa* ou *nitida*, *Ficus benjamina*, *Frêne commun* et *Palmier de washingtonia* a été testé lors du stress climatique du chaud, tout en gardant le ratio végétal initial dans chaque station.

☞ *Le ficus*

L'espèce *Ficus retusa* héritée de l'époque coloniale, a montré une forte capacité à offrir des niveaux du confort climatiques optimaux au centre-ville de Guelma, d'où la canopée dense et arrondie des arbres de ficus matures aux endroits P1, P27 et P35 leur qualifié de stratégie d'adaptation à l'environnement thermique urbain par effet d'ombrage (Voir chapitre V).

Le *Ficus benjamina* partage les mêmes qualités du *Ficus nitida* avec une taille moyenne et un rayon d'ombrage moindre, a montré aussi des niveaux de confort climatiques optimaux au niveau de l'endroit P19. L'espèce benjamina est implantée tout au long du centre du Boulevard Souidani Boudjemaa-S6 est au niveau de la placette 8 Mai 1945-S8, caractérisé par une canopée droite dense et arrondie, toujours en croissance (Voir Annexe 9).

En remplaçant l'espèce d'arbres *Ficus benjamina* par des arbres *Ficus nitida*, dans les deux stations S6 et S8, une réduction des T_{mrt} a été observée, accompagnée par une augmentation légère d'humidité relative. Il est évident que les deux espèces créent des espaces ombragés tout au long de la journée, certes que la différence du rayonnement à 14 :00 indique que l'espèce *retusa* est la plus significative à contrôler les échanges thermiques durant les heures de chaleur extrême, notamment celui par rayonnement (Voir Tableau VI.5). Ainsi, le rayonnement à ondes courtes a été efficacement bloqué par la masse foliaire dense et persistante du *retusa*, laissant celui à ondes longues en dessous de sa canopée arrondie et large (rayon d'ombre dépasse les 4 m). Ce qui contribue à améliorer les conditions microclimatiques. L'effet minime du *Ficus* sur l'amélioration des niveaux du confort confirme la validité des résultats liées aux ratios végétaux.

De par son aspect lourd et son caractère massif, le *ficus* génère, généralement des vitesses d'air faibles créant un effet d'obstacle dans le milieu urbain. Cet effet dépend de la masse des feuilles, en effet, une différence négligeable a été générée par l'espèce *benjamina*.

☞ *Le frêne commun*

Une espèce persistante à semi-caducue, implantée au niveau de la place 19 Mars et au boulevard Boumaaza Said, qualifié de bon arbre résidentiel pour les environnements à apport d’humidité modéré et équilibré, dont l’intégration des surfaces d’eau est préférable.

L’adoption de l’espèce *Populus alba* dans la station 2 et 3 découle des larges similitudes avec le *frêne commun*, notamment son usage comme arbre d’ombre et son adéquation aux zones résidentielles, spécialement dans la présence de l’eau (Voir Annexe 9).

Le *Populus alba* implique des variations microclimatiques négligeables, avec une différence légère des vitesses de l’air durant les post-pic heures. Les valeurs basses obtenues du *Tmrt* dans les deux stations entre 15 :00 et 18 :00 indiquent que les deux espèces d’arbres sont capables à contrôler les échanges thermiques par rayonnement solaire, avec une mention de contrôle élevé à l’espèce *Fraxinus excelsior*. Ainsi, la quantité du rayonnement réfléchi par ce dernier est plus élevée pendant les heures chaudes avec une réduction considérable du rayonnement diffus, estimé à 17.27w/m² à 14 :00. L’interprétation possible à ces résultats c’est la qualité du feuillage de chaque espèce, d’où la texture fine du feuillage du *Populus a* montré des valeurs inférieures du rayonnement diffus durant les heures de chaleur.

Tableau VI.5: Echanges thermiques par rayonnement des différentes espèces d’arbres à 14 :00.

Echanges Thermique par Rayonnement, Réfléchi et Diffus (w/m ²)				
Silhouette et conopée				
	Espèces	Populus alba	Fraxinus excelsior	Ficus benjamina
Rayonnement réfléchi	394 w/m ²	400,22 w/m ²	405.29 w/m ²	409,05 w/m ²
Rayonnement diffus	99.5 w/m ²	82.23 w/m ²	74.51 w/m ²	71,6 w/m ²

Malgré le fait d'avoir une canopée peu dense par rapport au *figus*, le *frêne* est assez significatif en matière de contrôle du rayonnement solaire en été, ceci est interprété par le nombre considérable des folioles ovales à elliptiques par feuille.

✂ *Le Palmier de washingtonia*

En Algérie, les palmiers sont beaucoup plus indigènes en milieu chaud et aride et c'est l'espèce dominante dans les villes situées au sud du pays. Des études antérieures ont montré que le palmier est le type le plus approprié pour un tel environnement, il peut donc abaisser la température de l'air de 5 ° à 10°C et il est recommandé de maximiser sa superficie dans les nouvelles extensions urbaines (Bencheikh & Rchid, 2012).

Malgré les risques qu'elle présente aux zones résidentielles, l'espèce *washingtonia* est largement implantée au centre-ville de Guelma. Sa fonction de régulation microclimatique a été appréhendée dans la station S2', appelée communément Rue-El-Nakhlette et au niveau du boulevard Souidani Boudjemaa, tout en testant des différentes compositions végétales (Voir Tableau VI.2) et en posant les questionnements suivants :

En tant que arbres persistants, le palmier conviennent-il aux environnements semi-arides ? a-t-il le même effet régulateur que les autres arbres à feuilles persistantes ? peut-il améliorer les conditions microclimatiques en cas du stress climatique d'été ?

Il a été déjà démontré que la grande zone ombragée induite par les palmiers dans la station S2' améliore les conditions microclimatiques et fournis un certain niveau du confort climatique en été, notamment dans les heures du matin entre 9 :00 et 11 :00, avec une longueur respective des ombres portées de 14,1 m et 5.9 m (Voir Annexe 10).

Pour ce qui concerne la station S6, les *Palmiers de washingtonia* a été introduit avec son accent vertical imposant comme élément du paysage tout au long du centre, avec un ratio de 17 palmiers. Par conséquent, une réduction significative des températures de l'air avec des valeurs relativement basses de T_{mrt} ont été obtenues. Ceci due principalement à la capacité des palmiers à bloquer le rayonnement solaire et à contrôler les échanges radiatifs solaires.

À la réponse aux questionnements posés, l'espèce *Palmiers de washingtonia* affecte les conditions microclimatiques par effet d'ombrage pendant le stress thermique et peut améliorer les conditions microclimatiques en abaissant les températures extérieures. Par rapport aux conifères, le rôle des palmiers dans les espaces extérieurs durant le stress climatique du chaud peut être assimilé à un énorme parasol. D'où le rayonnement diffus peut atteindre 77.06 w/m².

En tant que type à feuillage persistant et en réfléchissant moins de rayonnement solaire pendant le stress climatique extrême, nous pouvons conclure que les palmiers ne sont pas le type le plus approprié pour les villes à climat semi-aride.

Tenant compte du ratio des arbres utilisés, le palmier de *washingtonia* pourra être utilisé comme élément naturel d'architecture paysagère en milieu semi-aride, sa fonction de régulation microclimatique est bien plus importante quand il est utilisé avec d'autres types à feuilles persistantes comme les conifères.

Tableau 6: Echanges thermiques par rayonnement d'arbres dans la station S2' à 14 :00.

Echanges Thermique par Rayonnement dans la station S2' (w/m ²)			
Silhouette et conopée			
Composition végétale	Palmiers	Conifères	Palmiers et Conifères
Rayonnement réfléchi	281.41 w/m ²	282 w/m ²	281.76 w/m ²
Rayonnement diffus	77.06 w/m ²	65.85 w/m ²	70.33 w/m ²

Effet de changement de la disposition des arbres

La position du soleil et la direction des vents, sont là les deux facteurs qui influent indirectement les niveaux du confort climatique en extérieur. Toutefois, la position du soleil le long de la journée est déterminante pour la qualité des ombres portées des arbres, bien que l'effet hydrodynamique d'obstacle des arbres dans les espaces extérieurs dépend du soufflé et la direction des vents dominants.

Effet d'obstruction hydrodynamique des arbres

Sentir l'écoulement du vent est important pour apprécier la qualité de fraîcheur dans les espaces extérieurs végétalisés. En considérant toutes les raisons qui obstruent le flux d'air dedans les espaces extérieurs, parmi entre autres la forme massive des arbres, la sensation du courant d'air en été devient presque impossible.

À-partir de ce constat, de nombreuses recherches ont été menées pour rendre possible la sensation du mouvement d'air en milieu urbain durant l'été. Tout en étudiant les caractéristiques physiques de toute sorte d'obstacle, telles que la position, la morphologie et la taille des arbres. De notre part, nous avons mis en étude l'influence de la disposition d'arbres sur l'écoulement du vent, qui vient à l'origine du nord-ouest, dans les trois stations, S2, S6 et S8.

Tableau VI.7: Variations des vitesses de l'air en fonction de la disposition des arbres dans les stations S2, S6 et S8.

		Cartes des vitesses de l'air à 14 :00			
Stations et variations des vitesse de l'air (m/s)		Disposition actuelle		Disposition nouvelle	
S2 - Place 19 Mars	Max	0.8		0.85	
	Moy	0.65		0.75	
	Min	0.6		0.7	
S6 - Boulevard Soudani Boudjema	Max	1.2	Disposition actuelle		
	Moy	1.2			
	Min	1.1			
	Max	1.2	Disposition nouvelle		
	Moy	1.2			
	Min	1.2			
S8 - Placette 8 Mai 1945	Max	0.6		0.85	
	Moy	0.4		0.65	
	Min	0.3		0.55	

Le soufflé nord-ouest du vent a accompli de nombreux obstacles pour y connaître un mouvement d'air aisé et des vitesses relativement rapides au sein de la place 19 Mars, effrénée par la masse bâtie au sud-est. La disposition des arbres aux limites de la station constitue un enclos aux particules d'air. Ainsi, les vitesses d'air sont rapides qu'au centre de la place et l'effet d'obstruction est assez élevé du côté sud-est au côté nord à 14 :00.

La disposition des arbres d'alignement le long du Boulevard Souidani Boudjema constitue un écran au vent dominant venant du nord-ouest qui sert de brise-vent en hiver. En outre, les effets de ces brise-vent sur l'écoulement d'air en été augmenteront à mesure que les arbres mûriront. Le fait de déplacer un tiers (1/3) des arbres d'alignement au côté sud-est du boulevard génère à la fois des vitesses d'air élevées le long du centre et des vitesses moindres au niveau de l'allée droite du boulevard. Il est à noter que l'effet d'obstruction des arbres plantés en première position par rapport aux bâtiments d'une taille égale ou supérieure est négligeable.

Le soufflé nord-ouest du vent dominant est obstrué par la morphologie massive des arbres matures de *ficus* implantés au niveau du trottoir qui borde la placette 8 Mai 1945 du côté nord-ouest. Sa topographie imposante a permis la pénétration des particules d'air avec des vitesses moyennes, générées par la disposition dispersée des arbres. Cependant, prévoir une disposition d'arbres dans le même sens que celui des vents dominants, de sorte à créer des petits couloirs orientés nord-ouest, favorise le flux d'air à l'intérieur de la placette.

∞ Qualité des ombres portées des arbres

Il a été déjà démontré que la qualité des ombres portées des arbres est déterminante pour le confort climatique des usagers à l'échelle piétonne en été. Comme la position du soleil varie le long de la journée, des dispositions d'arbres utiles les heures de matin peuvent ne plus l'être les heures de soir et vice versa.

C'est parce que la taille des arbres est importante dans le calcul des ombres portées, l'impact de la disposition des arbres en été a été appréhendée en testant la disposition actuelle et une autre disposition avec deux types d'arbres à différentes tailles (Voir Annexe 10) dans la station S6.

Les arbres d'alignement implantés tout au long du centre du boulevard Souidania Boudjema sont d'une taille moyenne de 8 à 9 m, créent le matin des ombres portées de 4 à 9.4 m, de 2.4 à 3.6 entre 12 :00 et 14 :00 et des ombres de 5.6 à 23.1 m l'après-midi, tout projeté sur

la voie gauche du boulevard. L'allée droite du boulevard est entièrement dépourvue d'arbres, ce qui lui expose directement avec la voie droite aux soleil ardent et chaud de 10 :00 à 14 :00. Le déplacement d'un tiers des arbres d'alignement au côté sud-ouest de la station fait l'objet d'une disposition nouvelle, impliquant des ombres portées positionnées de bout en bout. Ceci contribue à créer des cheminements ombragés le long du boulevard, notamment durant la période de l'après-midi quand le soleil se déplace du sud à l'ouest, dont la longueur des ombres dépend de la taille des arbres.

Tableau VI.8: Qualité des ombres portées en fonction de la disposition des arbres dans les stations S6.

	Heure : 10 :00	Heure : 13 :00	Heure : 16 :00
	Élévation du soleil : 52.27 °	Élévation du soleil : 73.14 °	Élévation du soleil : 43.01 °
Disposition actuelle	<p>Taille d'arbres : 8 m Longeur d'ombre : 6.1 m</p>	<p>Taille d'arbres : 8 m Longeur d'ombre : 2.4 m</p>	<p>Taille d'arbres : 8 m Longeur d'ombre : 8.5 m</p>
Disposition Nouvelle I	<p>Taille d'arbres : 8 m Longeur d'ombre : 6.1 m</p>	<p>Taille d'arbres : 8 m Longeur d'ombre : 2.4 m</p>	<p>Taille d'arbres : 8 m Longeur d'ombre : 8.5 m</p>
Disposition Nouvelle II	<p>Taille d'arbres : 8 -12 m Longeur d'ombre : 6.1-9.2 m</p>	<p>Taille d'arbres : 8-12 m Longeur d'ombre : 2.4-3.6 m</p>	<p>Taille d'arbres : 8-12 m Longeur d'ombre : 8.5-12.8 m</p>

Effet d'augmentation des surfaces d'eau dans les espaces extérieurs

L'élimination des plans d'eau dans les deux stations S2 et S8 révèle que la superficie des masses d'eau est le paramètre déterminant en matière d'absorption des radiations solaires dans les espaces extérieurs. Cependant, une quantité supérieure du rayonnement réfléchi est attendue en augmentant la superficie des deux plans d'eau dans les deux stations.

En effet, l'augmentation de la superficie des masses d'eau a montré une réflexion supérieure des radiations solaires avec une réduction moyenne journalière de 30.85 à 46 w/m² et une réduction maximale de 43.2 à 68.52 w/m² à 13 :00.

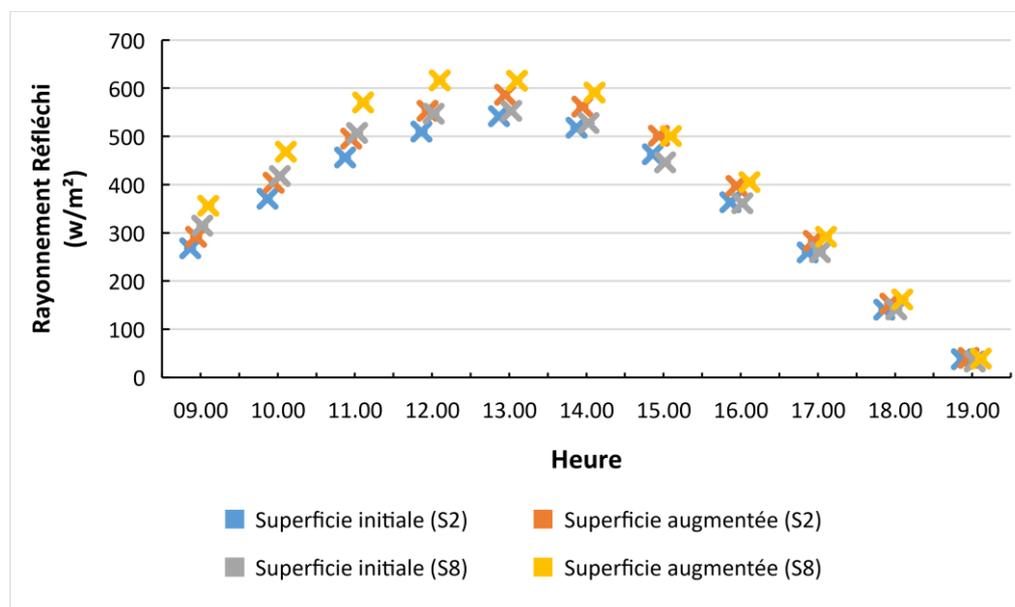


Figure VI.19 : Quantité du rayonnement réfléchi dans les stations S2 et S8.

Effet combiné des plans d'eau avec la végétation

Pour l'ensemble des stations mis en étude, l'eau et la végétation ont montré un rôle clé dans l'amélioration des niveaux du confort climatique en été, à travers un ensemble de paramètres et des qualités déterminantes en matière de régulation des conditions microclimatiques.

Les arbres urbains interceptent le rayonnement solaire par leur masse foliaire et fournissent de l'ombre, elles refroidissent également l'environnement ambiant par effet d'évapotranspiration.

Les plans d'eau modifient les conditions microclimatiques dans l'ensemble des stations à travers deux effets. L'eau en tant que surface réfléchissante, dont l'albédo est de 0.15 (Voir Tableau V.5) a montré une réflexion considérable du rayonnement solaire reçu. L'effet d'évaporation a apporté des améliorations infimes en termes de régulation microclimatique.

La combinaison des deux éléments consiste non seulement à tirer parti des effets les plus influents (effet d'ombrage et effet de surface réfléchissante), mais aussi à renforcer les effets les moins influents sur les niveaux du confort climatique (effet d'évaporation).

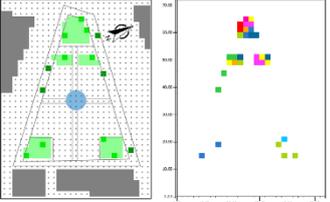
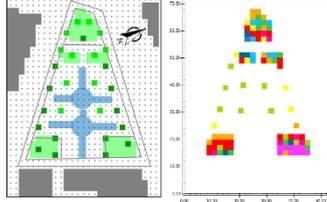
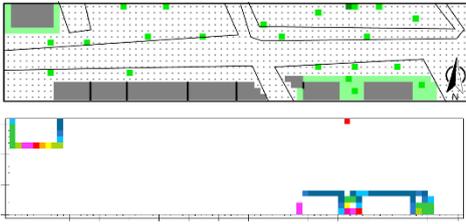
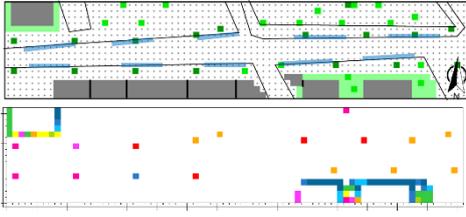
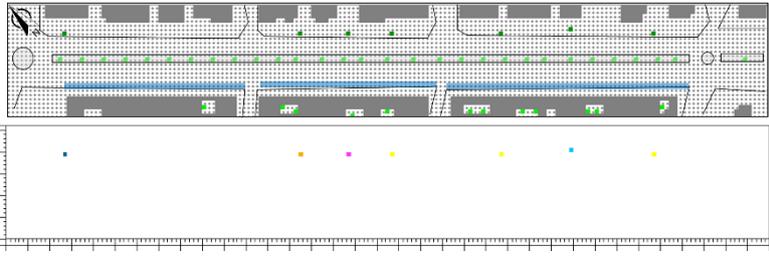
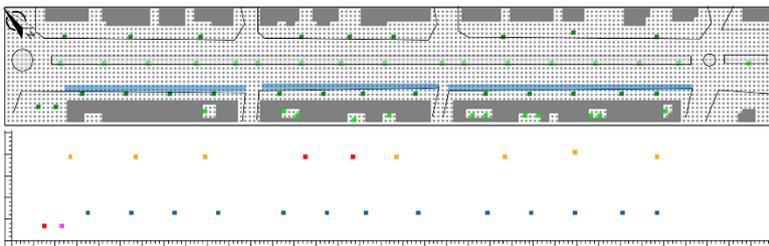
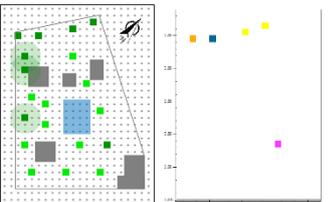
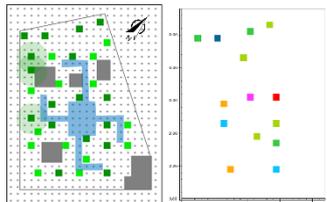
En termes de régulation microclimatique et d'amélioration des niveaux du confort climatiques, les meilleurs résultats sont obtenus au niveau de la proposition optimale qui combine l'eau avec les arbres. Toutefois, cette proposition implique plusieurs essences d'arbres qualifiées d'appropriées au climat semi-aride, disposées dans le sens des vents dominants avec un ratio assez suffisant pour bloquer le rayonnement à ondes courtes, le tout mis en combinaison avec de larges masses d'eau avec une haute réflexion des radiations solaires. Par ailleurs, des niveaux optimaux du confort climatique ont été atteints dans l'ensemble des stations.

- Une réduction considérable du stress climatique ($\Delta\text{UTCI} = 5.9^{\circ}\text{C}$) durant la phase chaude au niveau de la place 19 Mars.
- Une réduction moyenne des températures de l'air de 0.9°C avec une augmentation moyenne de l'humidité relative de 1.5 % au niveau du boulevard Boumaaza Saïd.
- Une réduction respective de 1.4°C et 6.9°C des températures de l'air et de T_{mrt} et une augmentation de 1.2% d'humidité relative au niveau du Boulevard Souidani Boudjemaâ.
- Des niveaux de confort climatique améliorés au niveau de la placette 8 Mai 1945, avec $\text{UTCI}_{\text{quotidien}} = 43,4^{\circ}\text{C}$ et $\text{UTCI} = 49,1^{\circ}\text{C}$ à 14h00.

Il ressort des valeurs élevées de l'humidité relative que l'atmosphère génère un flux hygrothermique important, généralement en raison de l'effet d'évaporation des masses d'eau. L'interprétation possible c'est que les résultats d'évaporation d'eau sont plus perceptibles dans la présence de l'ombre, ce qui permet à l'atmosphère ambiante d'absorber la chaleur latente et de réduire considérablement les températures de l'air. En effet, l'état hygrothermique de l'air humide dans les quatre stations révèle que l'augmentation des valeurs de l'humidité relative est toujours accompagnée par un flux de vapeur d'eau important (Tableau VI.9), en d'autres mots le flux de vapeur n'est existant quand la source d'humidité est toute ombragée.

Et justement, c'est le cas avec les arbres de ficus matures quand ils sont à l'ombre des bâtiments, à l'instar des arbres implantés au côté nord-est du boulevard Souidani Boudjema.

Tableau VI.9: Hygro-thermie de l'air humide dans les stations S2, S3, S6 et S8 à 14 :00.

		Flux de vapeur d'eau à 14 :00				
Stations et Hygro-thermie		Etat actuel		Proposition optimale		
S2 - Place 19 Mars	HR (%)	21.1			22.7	
	HS (%)	11				11.1
	Vapeur (g/kg*m/s)	0				0.020
S3 - Boulevard Boumaaza Saïd	HR (%)	19.7				
	HS (%)	10.5				
	Vapeur (g/kg*m/s)	0.011				
	HR (%)	20.6				
	HS (%)	10.7				
	Vapeur (g/kg*m/s)	0.017				
S6 - Boulevard Souidani Boudjema	HR (%)	19.7				
	HS (%)	11.04				
	Vapeur (g/kg*m/s)	0				
	HR (%)	21				
	HS (%)	11.17				
	Vapeur (g/kg*m/s)	0.012				
S8 - Placette 8 Mai 1945	HR (%)	20.8			21.5	
	HS (%)	10.4				10.5
	Vapeur (g/kg*m/s)	0				0.020

VI.4 Conclusion

Le rafraîchissement urbain par éléments naturels est la stratégie adoptée pour remédier au phénomène d'îlot de chaleur urbain. En effet, l'amélioration des niveaux du confort climatique au centre-ville de Guelma nous conduisent à émettre un certain nombre de conclusions pour atteindre des niveaux du confort optimaux durant la surchauffe estivale.

Effet rafraichissant des arbres

Les arbres urbains au centre-ville de Guelma peuvent améliorer les niveaux du confort climatique en été par effet d'ombrage. Ce dernier est régi par un ensemble de paramètres liée aux caractéristiques physiques des arbres et leur implantation dans les espaces extérieurs.

L'espèce d'arbres est le premier paramètre influent la qualité d'ombre, de par sa canopée arrondie et sa masse foliaire dense, le *figus* est l'espèce la plus significative à intercepter le rayonnement solaire et à fournir de l'ombre tout au long de la journée.

Le ratio végétal contribue à maximiser la zone ombragée, d'où il existe une relation proportionnelle à l'inverse entre la quantité du rayonnement solaire réfléchi le ratio végétal dans l'ensemble *figus* des stations.

La disposition des arbres est un paramètre déterminant dans la création des cheminements ombragés, basés sur la qualité des ombres portées des arbres à savoir leur taille.

La disposition des arbres est également déterminante pour le flux d'air dedans les espaces extérieurs, d'où il est conseillé que les arbres ne soient pas implantés contre le soufflé nord-ouest du vent.

Les arbres peuvent aussi refroidir l'environnement ambiant au centre-ville de Guelma par effet d'évapotranspiration, ceci dépend du premier niveau du feuillage d'arbres, sa masse et sa texture. En effet, l'humidité relative la plus élevée a été relevée, grandement dans les arbres à feuillage lisse, tels que le *figus* et le *frêne*.

Effet rafraichissant des plans d'eau

Les plans d'eau peuvent modifier les conditions microclimatiques à travers deux effets. Le premier concerne le rayonnement solaire, l'eau en tant que surface réfléchissante, dont l'albédo a permet à l'atmosphère ambiante d'absorber la chaleur latente et de réduire considérablement la température de l'air ambiant lors de la chaleur extrême.

L'effet d'évaporation, celui deuxième a montré une amélioration infime en termes de régulation microclimatique.

Effet rafraîchissant des arbres en combinaison avec les plans d'eau

Il est possible d'améliorer les niveaux du confort climatique durant la surchauffe estivale au centre-ville de Guelma, par le biais d'un processus de régulation microclimatique naturel et à travers quatre effets, induits par les éléments naturels ; effet d'ombrage et effet d'évapotranspiration des arbres, effet réfléchissant et effet d'évaporation des plans d'eau. Ces derniers ont permis à l'atmosphère ambiante d'absorber la chaleur latente et de réduire considérablement le stress thermique et climatique dedans les espaces extérieurs à Guelma. Ainsi, La combinaison de plusieurs essences d'arbres, d'un un ratio assez suffisant, qualifiées d'appropriées au climat semi-aride, disposées dans le sens du soufflé du vent avec de larges masses d'eau contribue à la création des ilots et des parcours de fraîcheurs au centre-ville de Guelma avec des niveaux optimaux du confort climatique en été.

Conclusion Générale

1. Conclusions

L'objectif principal de ce travail de thèse est d'évaluer les niveaux du confort climatique dans les espaces extérieurs à l'échelle piétonne au centre-ville de Guelma, mais aussi de rechercher des niveaux optimaux de ce dernier en se basant sur les éléments naturels, lors de la surchauffe estivale. En effet, notre recherche a discuté d'une façon particulière les diverses contributions des éléments naturels dans l'amélioration des niveaux du confort climatique d'un parcours urbain situé au centre-ville de Guelma.

Evaluer le niveau du confort climatique en extérieur est une tâche complexe qui nécessite une compréhension approfondie de l'interaction entre l'utilisateur et les propriétés thermiques de l'environnement urbain qui lui sont associées à une échelle spatiale fine, celle du piéton. Cependant, la sensation thermique et l'appréciation des paramètres microclimatiques fournies par les usagers dans un endroit à un moment donné est le fruit d'une telle interaction.

La synthèse bibliographique présentée dans ce travail, nous a permis non seulement de se positionner par rapport au champ des recherches y affèrent, mais aussi de construire un modèle d'analyse approprié pour répondre à ses objectifs. D'où, L'investigation a été effectuée en été le long d'un parcours urbain composé de quarante-et-un différent endroit et exploré par les usagers de la ville. Organisé en trois étapes ; compréhension de l'environnement thermique urbain, évaluation et amélioration des niveaux du confort climatique extérieurs.

L'analyse et la compréhension de l'environnement thermique urbain à son tour a impliqué trois principales étapes.

Premièrement, quantifier l'intensité du phénomène d'ilot de chaleur urbain atmosphérique de basse couche en période diurne. Ceci a été réalisé en calculant les différences positives entre les températures d'air mesurées dans la canopée urbaine et celles des campagnes environnantes de l'agglomération de Guelma, pendant trois journées d'été chaudes et ensoleillées, de 09 :00 à 20 :00. L'écart journalier maximal a atteint 4.8° le troisième jour avec une différence positive de 6.4° à midi. Pour les trois jours les différences positives les plus élevées ont été observées de 10 :00 à 14 :00, ce qui signifie que le phénomène d'ICU est d'une forte intensité à cette période au centre-ville de Guelma.

Deuxièmement, évaluer point par point la sensation thermique (ST) dans l'espace et dans le temps, ceci consiste à étudier l'interaction entre l'environnement physique et les paramètres du microclimat urbain, tout en ajoutant une troisième dimension qui est la sensation thermique des usagers dans chaque endroit. Pour ce faire nous avons mis en croisement les trois paramètres microclimatiques mesurés ; température de l'air, humidité relative et vitesse de l'air avec les sensations thermiques y affèrent pour l'ensemble des points soutenus par le parcours piéton prédéfinie. Par conséquent, une évaluation thermique partielle lors des journées ensoleillées d'été a été dégagé. Périodes du matin et du soir, respectivement de 09 :00 à 11 :00 et de 19 :00 à 21 :00, l'environnement thermique urbain peut être qualifié de modéré. Période chaude de 11 :00 à 17 :00, les conditions thermiques extérieures sont difficiles à supporter, ainsi l'environnement thermique urbain peut être qualifié d'insupportable. Période transitoire de 17 :00 à 19 :00 considérée comme une période de transit de la sensation chaude à la sensation modérée ; cependant, l'environnement thermique urbain tends à fournir le soulagement thermique.

La troisième étape consiste à identifier les stratégies d'adaptation à l'environnement thermique urbain et à évaluer le niveau du confort dans chaque stratégie. La sélection des points-abris les plus importants au centre-ville de Guelma a été basée sur la sensation thermique des conditions atmosphériques (ST) et l'acceptabilité thermique (AT), dont chacun des sept endroit-abri sélectionnés a supposé une analyse primaire et s'est attendu à un certain degré d'efficacité thermique en heures chaudes, examinée par une simulation atmosphérique à l'aide du modèle atmosphérique Envi-met.

Toutefois, l'efficacité de chaque stratégie d'adaptation a été examinée en analysant les paramètres microclimatiques suivants ; température de l'air, humidité relative, vitesse du vent et température radiante moyenne, en se référant aux mécanismes potentiels qui sous-tendent la relation entre la composition de l'environnement thermique et la régulation microclimatique. L'indice UTCI a été utilisé pour évaluer le niveau du confort climatique offert dans chaque stratégie, mais aussi pour déterminer la stratégie la plus efficace pendant les heures de canicule. Quatre stratégies d'adaptation montrant une amélioration considérable de l'environnement thermique au centre-ville de Guelma, ont été définie :

- Stratégie de végétation urbaine, au point médian de Houari Boumedién et dans l'espace ouvert à proximité du théâtre municipal de la ville, les arbres denses amélioré considérablement l'environnement thermique par effet d'ombrage et par effet d'évapotranspiration. Elle constitue une stratégie d'adaptation efficace lors des

jours chaudes et classée deuxième durant les heures chaudes, là où le stress thermique est extrême.

- Stratégie mixte végétation et sol réfléchissant, de plus les effets induits par les arbres dans HLM 1, HLM 2 et la rue du 1er novembre, l'albédo élevé des matériaux du sol (pavé clair, herbe et eau profonde) contribue positivement à la modération de l'environnement thermique urbain en été. Par rapport à la première stratégie, cette stratégie est moins efficace pendant la journée, mais elle est classée première en termes de réduction du stress thermique.
- Stratégie de géométrie urbaine, le rapport hauteur / largeur (H / W) à l'entrée de la rue El Moudjahidine présente une stratégie d'adaptation significative durant la période du matin. Par rapport aux stratégies précédentes, la stratégie de géométrie au centre-ville de Guelma montre une détérioration du niveau du confort climatique et elle est classée avant-dernière durant les heures de chaleur extrême.
- Stratégie mixte géométrie urbaine et sol réfléchissant, Malgré l'effet des ombres portées des constructions au niveau du boulevard Boumaaza Said, le matin et l'albédo élevé du pavé utilisé, cette stratégie a eu le niveau de confort climatique le plus bas et elle est classée dernière pendant les heures chaudes d'été.

La corrélation entre l'acceptabilité thermique, comme paramètre subjectif et l'indice UTCI, comme paramètre objectif est significative pour prédire l'efficacité et le niveau de confort dans les stratégies d'adaptation en été au centre-ville de Guelma.

Dans une perspective de recherche des îlots et des parcours de fraîcheur urbains au centre-ville de Guelma, l'amélioration des niveaux du confort climatique d'été a impliqué de rechercher les typologies, les dispositions et les configurations adéquates et les plus appropriés des éléments naturels ; eau et végétation dans un ensemble des espaces extérieurs repérés particulièrement comme espaces inconfortables en été.

L'ombrage des arbres au centre-ville de Guelma est l'effet déterminant dans l'améliorer des niveaux du confort climatique en été. Il est régi par un ensemble de paramètres liées aux caractéristiques physiques des arbres et leur implantation dans les espaces extérieurs. L'espèce d'arbres est le premier paramètre influent la qualité d'ombre, le ratio végétal contribue à maximiser la zone ombragée, la disposition des arbres est un paramètre déterminant dans la création des cheminements ombragés et aussi pour le flux d'air dans les espaces extérieurs. L'évapotranspiration des arbres est l'effet le moins modifiant des

niveaux du confort, mais il a pu aussi refroidir l'environnement ambiant au centre-ville de Guelma.

Les plans d'eau peuvent modifier les conditions microclimatiques dans les espaces extérieurs au centre-ville de Guelma à travers deux effets. Le premier concerne le rayonnement solaire, l'eau en tant que surface réfléchissante absorbe la chaleur latente et réduit considérablement la température de l'air ambiant lors de la chaleur extrême. L'effet d'évaporation est infime en termes de régulation microclimatique.

Les éléments naturels jouent un rôle important dans l'amélioration des conditions thermiques dans les espaces extérieurs à Guelma avec des réductions maximales des températures de l'air de 0.3° et 1° C induites, respectivement par les plans d'eau et les arbres urbains. Certes que les arbres sont les plus significatifs en termes de régulation microclimatique, ce qui concorde largement avec les recherches précédente (Aminipouri et al., 2019; Lai et al., 2019; Morille & Musy, 2017; Skoufali & Battisti, 2019).

L'amélioration des niveaux du confort climatique durant la surchauffe estivale au centre-ville de Guelma est possible à travers :

- ✓ Effet rafraichissant des arbres avec des réductions des températures de l'air égales ou inférieures à 1.1°C
- ✓ Effet rafraichissant des plans d'eau avec des réductions des températures de l'air égales ou inférieures à 0.3°C
- ✓ Effet rafraichissant des arbres en combinaison avec les plans d'eau avec des réductions des températures de l'air qui touchent à 1.9°C

Le processus de régulation microclimatique naturel s'est effectué à travers quatre effets induits par les éléments naturels ; effet d'ombrage et effet d'évapotranspiration des arbres, effet réfléchissant des masses d'eau et effet d'évaporation. Ce dernier n'est dans ses états meilleur quand le plan d'eau est sous arbres, notamment pendant les heures de canicule.

En somme, ces effets permettent à l'atmosphère ambiante d'absorber la chaleur latente et améliorent considérablement les niveaux du confort climatique au centre-ville de Guelma. Ainsi, La combinaison de plusieurs essences, d'arbres d'un ratio suffisant, qualifiées d'appropriées au climat semi-aride, disposées dans le sens du soufflé du vent avec de larges masses d'eau contribue à la création des îlots et des parcours de fraîcheurs au centre-ville de Guelma avec des niveaux optimaux du confort climatique en été.

2. Limites de la recherche et difficultés rencontrées

Comme tout travail de recherche, le présent s'est heurté à plusieurs difficultés, il s'est arrivé aussi à diverses limites, nous n'avons pas alors la prétention d'avoir présenté des résultats sans faille.

- La mise en vente exclusive des données climatiques par l'office national de la météorologie aux personnes titulaires d'un registre du commerce. Pour y remédier nous avons fait recours à l'application en ligne *Climate Toolbox*.
- L'indisponibilité des instruments de mesures au niveau des laboratoires de recherches de l'institution de rattachement, notamment l'anémomètre. Pour remédier à cette situation nous avons emprunté un instrument multifonction du laboratoire LACOMOFA, par conséquent, nous avons manqué de prendre des mesures lors des journées de canicules de juin 2019 où le stress thermique était maximale.
- L'indisponibilité du progiciel choisi pour effectuer la simulation, ce qui a entraîné un retard de 9 mois. Une version d'étude (Student License) a été par conséquent fournie par le laboratoire Uni-lab, propriétaire du progiciel.
- Le manquement de certaines catégories d'utilisateurs à répondre aux questions lors de la conduite de l'enquête pilote.
- La dégradation et la dénaturation des plans d'eau. Ainsi, une période préparatoire de nettoyage et d'embellissement juste avant la campagne de mesure a été organisée en coordination avec les services prenant en charge l'APC¹.
- Le facteur vue de Ciel (SVF), peut renforcer les résultats obtenus dans les différentes stratégies d'adaptation au centre-ville de Guelma.
- Une limite méthodologique porte sur la difficulté de l'observation chiffrée comme outil d'investigation. D'où, il a été hyper-contraint de s'asseoir pendant deux heures dans un espace public urbain et de compter le nombre de ses visiteurs.

3. Perspectives et recherches futures

Notre recherche s'est articulée autour de deux volets, l'évaluation des niveaux de confort climatique en extérieur à Guelma et la recherche des niveaux optimaux de ce dernier en été. Les deux constituent une finalité d'un processus d'investigation de sorte que les résultats du

¹ Monsieur Boulakhyout Kamel, chargé de la propreté, l'hygiène et la voirie municipale de la commune de Guelma.

premier mènent à la conduite du dernier. Les deux volets ouvrent des perspectives de recherches futures.

L'évaluation des niveaux du confort climatique étant résultante s'est appuyée sur l'étude de l'environnement thermique urbain par un croisement bi-variable ; mesures in-situ /Vs. / sensation thermique, cela été suffisant pour la poursuite de notre investigation. Pour une meilleure compréhension de l'environnement thermique urbain, la première perspective suggère un croisement multi-variable ; mesures in-situ /Vs. / préférences thermiques.

De notre part, nous avons mis en corrélation l'acceptabilité thermique avec la sensation thermique des trois paramètres ; température de l'air, humidité relative et vitesse de l'air, la corrélation, au-delà des apports qualitatifs qu'elle a permis, peut nous faire échapper des rails de notre recherche.

La recherche des niveaux optimaux du confort climatique en été s'est basée sur la stratégie mixte ; végétation et plans d'eau tout en simulant des différentes configurations des éléments naturels dans les espaces extérieurs. Alors que d'autres stratégies ont montré de bons résultats pour fournir le confort requis en situations de surchauffe estivale. A ce stade-là, il serait utile de chercher des niveaux de confort optimaux par le biais d'autres stratégies :

- La combinaison des arbres avec les espaces enherbés.
- La combinaison des arbres avec des sols à albédo élevé.
- La combinaison de la géométrie urbaine avec des sols à albédo élevé

Dans notre recherche, l'indice thermique de climat UTCI a été utilisé pour évaluer le niveau du confort climatique. La première piste de recherche est liée l'utilisation d'autres indices, tels que le PET et le PMV, notamment pour l'anticipation du niveau de confort climatique dans les stratégies d'adaptation à l'environnement thermique urbain. La deuxième piste est liée à la catégorisation de l'UTCI, l'indice a été supérieur à 46 ° lors des sessions du matin, ce qui correspond à un stress thermique extrême. Néanmoins, l'environnement urbain thermique a été voté à 100% comme acceptable. Cela nous a conduit à réfléchir à une catégorisation plus appropriée de l'indice UTCI pour le climat semi-aride qui caractérise la ville de Guelma.

Bibliographie

Bibliographie

Ouvrages

CLAIRE, D., & MICHEL, D. (1982). *Méthode illustrée de création architecturale.* (Moniteur (ed.)).

Givoni, B. (1982). *Man, climate and architecture.* (London : Applied Science Publishers (Ed.); 2è ed).

Liébard, A., & Herde, A. De. (2006). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques, Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable.* (Moniteur (ed.); Observ'er).

Olgay, V. (1963). *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism.* (New and expanded edition). Princeton University Press.

Thèses de doctorat et mémoires de magister

Ayyad, Y. (2020). *Outdoor thermal comfort and airflow in relation to urban form in Amman , Jordan : A residential setting analysis* (Thèse de Doctorat). Université de Liverpool, Royaume Uni.

BADACHE, H. (2014). *L'espace public entre conception et usage : Cas des jardins publics de Biskra* (Mémoire de Magister). Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie.

BELLARA, S. L. (2013). *Impact de la végétation sur la qualité des ambiances thermiques et visuelles dans les espaces publics urbains* (Thèse de Doctorat). Université Constantine 3, Algérie.

BENZERARI, S. (2013). *L'évolution des quartiers anciens « Quels enjeux urbains » Cas d'étude : La cite – Bon accueil-Guelma* (Mémoire de Magister). Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie.

Benzerzour, M. (2004). *Transformations urbaines et variations du microclimat : application au centre ancien de Nantes et proposition d ' un indicateur " morpho-climatique "* (Thèse de Doctorat). Université de Nantes, France.

Colombert, M. (2008). *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville Morgane Colombert* (Thèse de Doctorat). Université Paris-Est, France.

- DE MUNCK, C. (2014).** *Modelisation De La Vegetation Urbaine Et Strategies D'Adaptation Pour L'Amelioration Du Confort Climatique Et De La Demande Energetique En Ville* (Thèse de Doctorat). Université de Toulouse, France.
- Hanafi, A. (2018).** *Le végétal urbain générateur de confort thermique dans les villes sahariennes contemporaines. «Cas des places publiques de la ville de Biskra / Algérie»* (Thèse de Doctorat). Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie.
- Lebras, J. (2017).** *Le microclimat urbain à haute résolution : mesures et modélisation* (Thèse de Doctorat). Université de Toulouse, France.
- Leconte, F. (2014).** *Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy* (Thèse de Doctorat). Université de Lorraine - France. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01141361/>
- Ridha, S. (2017).** Urban heat Island mitigation strategies in an arid climate. In outdoor thermal comfort reachable. (Thèse de Doctorat). INSA de Toulouse, France.
- Skelhorn, C. (2013).** *A fine scale assessment of urban greenspace impacts on microclimate and building energy in Manchester* (Thèse de Doctorat). Université de Manchester, Royaume-Uni.

Chapitres

- Dandotiya, B. (2019).** *Health Effects of Air Pollution Dans Urban Environment*. (Issue September, pp. 96–115) <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7387-6.ch006>
- Gonzalez, Richard R, Advanced, G., & Associates, B. (2019).** *Mechanisms of heat exchange: biophysics and physiology A . P H A R O G A G G E Human Heat Balance Equation Independent Variables Affecting the Thermal Environment Ambient temper...* (Issue October).
- Ichinose, T. (2008).** *Urban thermal environment and its mitigation through urban planning process* (Issue February).
- Lee, V., Zermoglio, F., & Ebi, K. L. (2019).** *Heat Waves and Human Health Emerging Evidence and Experience To Inform Risk Management in a Warming World* (Issue February). <https://www.climatelinks.org/projects/atlas>
- Erell, E. (2012).** Urban Microclimate. Dans *Urban Microclimate*. <https://doi.org/10.4324/9781849775397>

Reichle, D. E. (2020). Anthropogenic alterations to the global carbon cycle and climate change. Dans *The Global Carbon Cycle and Climate Change* (pp. 209–251). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-820244-9.00011-1>

Ren, G. Y. (2015). Urbanization as a major driver of urban climate change. Dans *Advances in Climate Change Research* (Vol. 6, Issue 1, pp. 1–6). <https://doi.org/10.1016/j.accre.2015.08.003>

Articles scientifiques

Abaas, Z. R. (2020). Impact of development on Baghdad's urban microclimate and human thermal comfort. *Alexandria Engineering Journal*, 59(1), 275–290. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.12.040>

Abdel-Aziz, D. M., Shboul, A. Al, & Al-Kurdi, N. Y. (2015). Effects of Tree Shading on Building's Energy Consumption -The Case of Residential Buildings in a Mediterranean Climate. *American Journal of Environmental Engineering*, 5(5), 131–140. <https://doi.org/10.5923/j.ajee.20150505.01>

Al-hafiz, B., Musy, M., & Hasan, T. (2017). A Study on the Impact of Changes in the Materials Reflection Coefficient for Achieving Sustainable Urban Design. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 562–570. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.126>

Albdour, M. S., & Baranyai, B. (2019). An overview of microclimate tools for predicting the thermal comfort, meteorological parameters and design strategies in outdoor spaces. *Pollack Periodica*, 14(2), 109–118. <https://doi.org/10.1556/606.2019.14.2.10>

Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2007). Thermal comfort in an east-west oriented street canyon in Freiburg (Germany) under hot summer conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 87(1–4), 223–237. <https://doi.org/10.1007/s00704-005-0194-4>

Ali-Toudert, F, Djenane, M., Bensalem, R., & Mayer, H. (2005). Outdoor thermal comfort in the old desert city of Beni-Isguen, Algeria. *Climate Research*, 28(3), 243–256. <https://doi.org/10.3354/cr028243>

Aminipouri, M., Knudby, A. J., Krayenhoff, E. S., Zickfeld, K., & Middel, A. (2019). Modelling the impact of increased street tree cover on mean radiant temperature across Vancouver's local climate zones. *Urban Forestry and Urban Greening*, 39(February), 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.01.016>

- Andris, A., & Steven, S. (1995).** THERMAL COMFORT. Dans *Passive and Low Energy Architecture International DESIGN TOOLS AND TECHNIQUES* (Issue January 2007). <https://doi.org/10.1243/PIME>
- Angeles, H. B. L., Cambridge, J. C., & Montreal, M. C. (2011).** The challenges for governance Coordinating Lead Author : Lead Authors : In *Cities And Climate Change - First Assessment Report of the Urban Climate Change Research Network* (pp. 249–269).
- Aram, F., Higuera García, E., Solgi, E., & Mansournia, S. (2019).** Urban green space cooling effect in cities. *Heliyon*, 5(4), e01339. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01339>
- Asimakopoulos, V. D. (2013).** Urban pollution. Dans *Energy and Climate in the Urban Built Environment* (pp. 137–144). <https://doi.org/10.4324/9781315073774>
- Ayad, A., Fahmy, M., & Kamel, W. (2020).** Urban Green and Blue Infrastructure Simulation in a Changing Climate from Microclimate to Energy Consumption: A Case Study in Alexandria, Egypt. *Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA*, 16(September), 3499–3507. <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.210676>
- Baghaeipoor, G., & Nasrollahi, N. (2019).** The effect of sky view factor on air temperature in high-rise urban residential environments. *Journal of Daylighting*, 6(2), 42–51. <https://doi.org/10.15627/jd.2019.6>
- Barlow, J. F. (2014).** Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Climate*, 10(P2), 216–240. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.03.011>
- Bencheikh, H., & Rchid, A. (2012).** The effects of green spaces (palme trees) on the microclimate in arides zones, case study: Ghardaia , Algeria. *Energy Procedia*, 18, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.013>
- Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., & Tinz, B. (2012).** Comparison of UTCI to selected thermal indices. *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 515–535. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0453-2>
- Buyadi, S. N. A., Mohd, W. M. N. W., & Misni, A. (2013).** Green Spaces Growth Impact on the Urban Microclimate. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 105, 547–557. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.058>

- Buyadi, S. N. A., Mohd, W. M. N. W., & Misni, A. (2015).** Vegetation's Role on Modifying Microclimate of Urban Resident. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 202(May 2018), 400–407. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.08.244>
- C. A. Souchsouch, C. (1993).** The effect of trees on summertime below canopy urban climates: a case study Bloomington, Indiana. *Journal of Arboriculture*, 19(5), 303–312.
- Chatzidimitriou, A., & Yannas, S. (2015).** Microclimate development in open urban spaces: The influence of form and materials. *Energy and Buildings*, 108, 156–174. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.08.048>
- Chatzinikolaou, E., Chalkias, C., & Dimopoulou, E. (2018).** Urban microclimate improvement using ENVI-MET climate model. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 42(4), 69–76. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-69-2018>
- Chen, X. L., Zhao, H. M., Li, P. X., & Yin, Z. Y. (2006).** Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104(2), 133–146. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.016>
- Cheung, P. K., & Jim, C. Y. (2019).** Improved assessment of outdoor thermal comfort: 1-hour acceptable temperature range. *Building and Environment*, 151(November 2018), 303–317. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.01.057>
- Cho, H. S., & Choi, M. J. (2014).** Effects of compact Urban development on air pollution: Empirical evidence from Korea. *Sustainability (Switzerland)*, 6(9), 5968–5982. <https://doi.org/10.3390/su6095968>
- Cleugh, H. (1995).** Urban climates. Dans *World Survey of Climatology* (Vol. 16, Issue C, pp. 477–514). [https://doi.org/10.1016/S0168-6321\(06\)80036-2](https://doi.org/10.1016/S0168-6321(06)80036-2)
- Cocci Grifoni, R., Pierantozzi, M., Tascini, S., & Passerini, G. (2011).** Assessing the representativeness of thermal comfort in outdoor spaces. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 155(May), 835–846. <https://doi.org/10.2495/SC120702>

- Colunga, M. L., Cambrón-Sandoval, V. H., Suzán-Azpiri, H., Guevara-Escobar, A., & Luna-Soria, H. (2015).** The role of urban vegetation in temperature and heat island effects in Querétaro city, Mexico. *Atmosfera*, 28(3), 205–218. <https://doi.org/10.20937/ATM.2015.28.03.05>
- Coutts, A. M., White, E. C., Tapper, N. J., Beringer, J., & Livesley, S. J. (2016).** Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(1–2), 55–68. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1409-y>
- D E V S, K. K., Wan, M. P., Zhou, M., Long, Y., & Ng, B. F. (2019).** Impact of solar reflectance of wall and road on outdoor thermal comfort - experimental study in a street canyon setup. *MATEC Web of Conferences*, 282 (2019), 02010. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928202010>
- Deb, C., & Alur, R. (2010).** The significance of Physiological Equivalent Temperature (PET) in outdoor thermal comfort studies. *International Journal of Engineering Science and Technology*, 2(7), 2825–2828.
- Di Napoli, C., Pappenberger, F., & Cloke, H. L. (2018).** Assessing heat-related health risk in Europe via the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 62(7), 1155–1165. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1518-2>
- Djukic, A., Vukmirovic, M., & Stankovic, S. (2016).** Principles of climate sensitive urban design analysis in identification of suitable urban design proposals. Case study: Central zone of Leskovac competition. *Energy and Buildings*, 115, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.03.057>
- Eames, M., Dixon, T., May, T., & Hunt, M. (2013).** City futures: Exploring urban retrofit and sustainable transitions. *Building Research and Information*, 41(5), 504–516. <https://doi.org/10.1080/09613218.2013.805063>
- Elmira Othman, N., Ahmad Zaki, S., Huda Ahmad, N., & Razak, A. (2019).** In-situ Measurement of Pedestrian Outdoor Thermal Comfort in Universities Campus of Malaysia. *KnE Social Sciences*, August. <https://doi.org/10.18502/kss.v3i21.4998>
- Elnabawi, M. H., & Hamza, N. (2019).** Behavioural Perspectives of Outdoor Thermal Comfort in Urban Areas: A Critical Review. *Atmosphere*, 11(1), 51. <https://doi.org/10.3390/atmos11010051>

- Elnabawi, M. H., Hamza, N., & Dudek, S. (2013).** Urban morphology impact on microclimate of the Fatimid city, Cairo, Egypt. *International Conference on "Changing Cities": Spatial, Morphological, Formal & Socio-Economic Dimensions - Skiathos Island, Greece (June 18 to 21, 2013), June 2013.*
- Elwy, I., Ibrahim, Y., Fahmy, M., & Mahdy, M. (2018).** Outdoor microclimatic validation for hybrid simulation workflow in hot arid climates against ENVI-met and field measurements. *Energy Procedia*, 153(October), 29–34. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.009>
- Fahmy, M., & Sharples, S. (2008).** Passive design for urban thermal comfort: A comparison between different urban forms in Cairo, Egypt. *PLEA 2008 - Towards Zero Energy Building: 25th PLEA International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Conference Proceedings, 2008-Janua (October 2008).*
- Gonzalez, R. R., Nishi, Y., & Gagge, A. P. (1974).** Experimental evaluation of standard effective temperature a new biometeorological index of man's thermal discomfort. *International Journal of Biometeorology*, 18(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/BF01450660>
- Hameed, H. M. (2017).** Estimating the effect of urban growth on annual runoff volume using GIS in the Erbil Sub-Basin of the Kurdistan Region of Iraq. *Hydrology*, 4(1). <https://doi.org/10.3390/hydrology4010012>
- Hammadi, T. (2017).** the Role of Urban Landscape Design in Enhancing People'S Outdoor Places and Spaces. *International Journal of Advanced Research*, 5(9), 1084–1099. <https://doi.org/10.21474/ijar01/5427>
- Hoppe, P. (1999).** The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, 43(2), 71–75.
- Hou, P., Jiang, W., Cao, G., & Luo, A. (2009).** Effect of urban thermal characteristics on wetlands based on remote sensing and GIS. *Joint Urban Remote Sensing Event*. <https://doi.org/10.1109/URS.2009.5137701>
- Huang, Q., Meng, X., Yang, X., Jin, L., Liu, X., & Hu, W. (2016).** The Ecological City: Considering Outdoor Thermal Environment. *Energy Procedia*, 104, 177–182. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.12.031>

- Huang, Z., Wu, C., Teng, M., & Lin, Y. (2020).** Impacts of tree canopy cover on microclimate and human thermal comfort in a shallow street canyon in Wuhan, China. *Atmosphere*, *11*(6). <https://doi.org/10.3390/atmos11060588>
- Hyatt, O. M., Lemke, B., & Kjellstrom, T. (2010).** Regional maps of occupational heat exposure: past, present, and potential future. *Global Health Action*, *3*(1), 5715. <https://doi.org/10.3402/gha.v3i0.5715>
- Ignatius, M., Wong, N. H., & Jusuf, S. K. (2015).** Urban microclimate analysis with consideration of local ambient temperature, external heat gain, urban ventilation, and outdoor thermal comfort in the tropics. *Sustainable Cities and Society*, *19*(January 2018), 121–135. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2015.07.016>
- Jacobs, C., Klok, L., Bruse, M., Cortesão, J., Lenzholzer, S., & Kluck, J. (2020).** Are urban water bodies really cooling? *Urban Climate*, *32*(February), 100607. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100607>
- Jamei, E., & Rajagopalan, P. (2015).** Urban growth and pedestrian thermal comfort. *Living and Learning: Research for a Better Built Environment*, *49th International Conference of the Architectural Science Association*, 907–918. <http://anzasca.net/category/conference-papers/2015-conference-papers>
- Jendritzky, G., & Dear, R. De. (2009).** “Adaptation and thermal environment.” (Issue December 2015). <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8921-3>
- Jendritzky, G., & Tinz, B. (2009).** The thermal environment of the human being on the global scale. *Global Health Action*, *2*(1), 1–12. <https://doi.org/10.3402/gha.v2i0.2005>
- Ji-Yu Deng, N. H. W. (2019).** Impact of urban canyon geometries on outdoor thermal comfort in central business districts. *Sustainable Cities and Society*, *13*(61), 98–99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101966>
- Jin, H., Liu, S., & Kang, J. (2017).** The Thermal Comfort of Urban Pedestrian Street in the Severe Cold Area of Northeast China. *Energy Procedia*, *134*, 741–748. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.571>
- Kakon, A. N., Mishima, N., & Kojima, S. (2009).** Simulation of the urban thermal comfort in a high density tropical city: Analysis of the proposed urban construction rules for Dhaka, Bangladesh. *Building Simulation*, *2*(4), 291–305.

<https://doi.org/10.1007/s12273-009-9321-y>

- Krayenhoff, E. S., & Voogt, J. A. (2010).** Impacts of urban albedo increase on local air temperature at daily-annual time scales: Model results and synthesis of previous work. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49(8), 1634–1648. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2356.1>
- Lai, D., Liu, W., Gan, T., Liu, K., & Chen, Q. (2019).** A review of mitigating strategies to improve the thermal environment and thermal comfort in urban outdoor spaces. *Science of the Total Environment*, 661, 337–353. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.062>
- Lai, D., Zhou, C., Huang, J., Jiang, Y., Long, Z., & Chen, Q. (2014).** Outdoor space quality: A field study in an urban residential community in central China. *Energy and Buildings*, 68(PART B), 713–720. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.02.051>
- Laschewski, G., & Jendritzky, G. (2002).** Effects of the thermal environment on human health: An investigation of. *Climate Research*, 21(1), 91–103. <https://doi.org/10.3354/cr021091>
- Lau, K. K. L., Lindberg, F., Rayner, D., & Thorsson, S. (2015).** The effect of urban geometry on mean radiant temperature under future climate change: a study of three European cities. *International Journal of Biometeorology*, 59(7), 799–814. <https://doi.org/10.1007/s00484-014-0898-1>
- Lee, Y. Y., Md Din, M. F., Ponraj, M., Noor, Z. Z., Iwao, K., & Chelliapan, S. (2017).** Overview of Urban Heat Island (UHI) phenomenon towards human thermal comfort. *Environmental Engineering and Management Journal*, 16(9), 2097–2112. <https://doi.org/10.30638/eemj.2017.217>
- Lin, P., Gou, Z., Lau, S. S. Y., & Qin, H. (2017).** The impact of urban design descriptors on outdoor thermal environment: A literature review. *Energies*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/en10122151>
- Liu, S., Wang, Z., Schiavon, S., He, Y., Luo, M., Zhang, H., & Arens, E. (2020).** Predicted percentage dissatisfied with vertical temperature gradient. *Energy and Buildings*, 220. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110085>

- Mahdavinejad, M., Khademi, M., & Sadeghnejad, G. (2013).** Enhancement of Outdoor Thermal Comfort through Adoption of Environmental Design Strategies. *Energy and Environmental Engineering*, 1(2), 81–89. <https://doi.org/10.13189/eee.2013.010207>
- Mahmoud M. Abdelrahman et al. (2016).** *The Role of CFD Simulation Software in Improving Residential Buildings ' Efficiency : Case Study on Youth Housing in New Damietta. 1*, 1–21.
- Matallah, M. E., Alkama, D., Ahriz, A., & Attia, S. (2020).** Assessment of the outdoor thermal comfort in oases settlements. *Atmosphere*, 11(2). <https://doi.org/10.3390/atmos11020185>
- Matzarakis, A, & Mayer, H. (2000).** *Atmospheric Conditions and Human Thermal Comfort in Urban Areas. November*, 155–166.
- Matzarakis, Andreas. (2012).** Linking urban micro scale models - The models RayMan and SkyHelios. *Proceedings of ICUC8 – 8 h International Conference on Urban Climates, May*, 10–13.
- Matzarakis, Andreas, Muthers, S., & Rutz, F. (2014).** Application and comparison of UTCI and pet in temperate climate conditions. *Finisterra*, 49(98), 21–31. <https://doi.org/10.18055/Finis6453>
- Mills, G. (1997).** An urban canopy-layer climate model. *Theoretical and Applied Climatology*, 57(3–4), 229–244. <https://doi.org/10.1007/BF00863615>
- Morille, B., & Musy, M. (2017).** Comparison of the Impact of Three Climate Adaptation Strategies on Summer Thermal Comfort – Cases Study in Lyon, France. *Procedia Environmental Sciences*, 38, 619–626. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2017.03.141>
- Nash, N., Whitmarsh, L., Capstick, S., Gouveia, V., de Carvalho Rodrigues Araújo, R., dos Santos, M., Palakatsela, R., Liu, Y., Harder, M. K., & Wang, X. (2019).** Local climate change cultures: climate-relevant discursive practices in three emerging economies. *Climatic Change*. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02477-8>
- Neto, A. F. (2016).** Dissemination & Transfer of knowledge Thermal Comfort Assessment. *Electricity Consumption Analysis & Energy Efficiency*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29416.67849>

- Nouri, A. S., Costa, J. P., Santamouris, M., & Matzarakis, A. (2018).** Approaches to outdoor thermal comfort thresholds through public space design: A review. *Atmosphere*, 9(3). <https://doi.org/10.3390/atmos9030108>
- Nuruzzaman, M. (2015).** Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review. *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 3(2), 67. <https://doi.org/10.11648/j.ijema.20150302.15>
- Ojaghlou, M., & Khakzand, M. (2017).** Cooling Effect of Shaded Open Spaces on Long-term Outdoor Comfort by Evaluation of UTCI Index in two Universities of Tehran. *Space Ontology International Journal*, 6(2), 9–26. http://soij.qiau.ac.ir/article_532866_8b55b78c53dfef3b06c373e0fd720d76.pdf
- Oke, T. R. (1976).** The distinction between canopy and boundary-layer urban heat Islands. *Atmosphere*, 14(4), 268–277. <https://doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422>
- Oke, T. R. (1988).** Street design and urban canopy layer climate. *Energy and Buildings*, 11(1–3), 103–113. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(88\)90026-6](https://doi.org/10.1016/0378-7788(88)90026-6)
- Önder, S., & Akay, A. (2014).** The Roles of Plants on Mitigating the Urban Heat Islands' Negative Effects. *International Journal of Agriculture and Economic Development*, 2(2), 18–32.
- Ozkeresteci, I., Crewe, K., Brazel, A. J., & Bruse, M. (2003).** Use and evaluation of the ENVI-met model for environmental design and planning. An Experiment on Lienar Parks. *Proceedings of the 21st International Cartographic Conference, August*, 10–16.
- Pantavou, K., Lykoudis, S., Nikolopoulou, M., & Tsiros, I. X. (2018).** Thermal sensation and climate: a comparison of UTCI and PET thresholds in different climates. *International Journal of Biometeorology*, 62(9), 1695–1708. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1569-4>
- Park, S., Tuller, S. E., & Jo, M. (2014).** Application of Universal Thermal Climate Index (UTCI) for microclimatic analysis in urban thermal environments. *Landscape and Urban Planning*, 125(December), 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.02.014>

- Peng, L. L. H., & Jim, C. Y. (2013).** Green-roof effects on neighborhood microclimate and human thermal sensation. *Energies*, 6(2), 598–618. <https://doi.org/10.3390/en6020598>
- Priyadarsini, R., & Wong, N. H. (2005).** Parametric studies on urban geometry, air flow and temperature. *International Journal on Architectural Science*, 6(3), 114–132.
- Ridha, S., Ginestet, S., & Lorente, S. (2018).** Effect of the Shadings Pattern and Greenery Strategies on the Outdoor Thermal Comfort. *International Journal of Engineering and Technology*, 10(2), 108–114. <https://doi.org/10.7763/ijet.2018.v10.1043>
- Robinson, D., Haldi, F., Kämpf, J., Leroux, P., Perez, D., Rasheed, A., & Wilke, U. (2009).** Citysim: Comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning. *IBPSA 2009 - International Building Performance Simulation Association 2009*, 1083–1090.
- Santamouris, M. (2013).** Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island - A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224–240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Schiavon, S., Hoyt, T., & Piccioli, A. (2014).** Web application for thermal comfort visualization and calculation according to ASHRAE Standard 55. *Building Simulation*, 7(4), 321–334. <https://doi.org/10.1007/s12273-013-0162-3>
- Schwarz, N., Schlink, U., Franck, U., & Großmann, K. (2012).** Relationship of land surface and air temperatures and its implications for quantifying urban heat island indicators - An application for the city of Leipzig (Germany). *Ecological Indicators*, 18, 693–704. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.01.001>
- Sen, S., Roesler, J., Ruddell, B., & Middel, A. (2019).** Cool pavement strategies for Urban Heat Island mitigation in Suburban Phoenix, Arizona. *Sustainability (Switzerland)*, 11(16), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su11164452>
- Sharmin, T., Steemers, K., & Humphreys, M. (2019).** Outdoor thermal comfort and summer PET range: A field study in tropical city Dhaka. *Energy and Buildings*, 198, 149–159. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.064>
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., & Erell, E. (2011).** The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment. *International Journal of Climatology*, 31(10), 1498–1506. <https://doi.org/10.1002/joc.2177>

- Shooshtarian, S. (2019).** Theoretical dimension of outdoor thermal comfort research. *Sustainable Cities and Society*, 47(February), 101495. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101495>
- Shooshtarian, S., Rajagopalan, P., & Sagoo, A. (2018).** A comprehensive review of thermal adaptive strategies in outdoor spaces. *Sustainable Cities and Society*, 41(June), 647–665. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.06.005>
- Skoufali, I., & Battisti, A. (2019).** Microclimate of Urban Canopy Layer and Outdoor Thermal Comfort: A Case Study in Pavlou Mela, Thessaloniki. *Urban Science*, 3(3), 84. <https://doi.org/10.3390/urbansci3030084>
- Sobstyl, J. M., Emig, T., Qomi, M. J. A., Ulm, F. J., & Pellenq, R. J. M. (2018).** Role of City Texture in Urban Heat Islands at Nighttime. *Physical Review Letters*, 120(10). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.108701>
- Soltani, A., & Sharifi, E. (2019).** Understanding and analysing the urban heat island (UHI) effect in micro-scale. *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development*, 10(2), 14–28. <https://doi.org/10.4018/IJSESD.2019040102>
- Staiger, H., Laschewski, G., & Matzarakis, A. (2019).** Selection of appropriate thermal indices for applications in human biometeorological studies. *Atmosphere*, 10(1), 1–15. <https://doi.org/10.3390/atmos10010018>
- Tahir, H. M. M., & Yousif, T. A. (2013).** Modeling the Effect of Urban Trees on Relative Humidity in Khartoum State. *Journal of Forest Products and Industries*, 2(5), 20–24.
- Taleghani, M. (2018a).** Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(March), 2011–2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.010>
- Taleghani, M. (2018b).** The impact of increasing urban surface albedo on outdoor summer thermal comfort within a university campus. *Urban Climate*, 24 (October 2017), 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.03.001>
- Talhi, A., Barlet, A., Bruneau, D., & Aichour, B. (2020).** Towards a prediction of outdoor human thermal comfort adapted for designers of urban spaces: examining UTCI and APCI in the context of Algiers (Algeria). *International Journal of Biometeorology*, 64(4), 651–662. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01854-3>

- Tan, P. Y., Wong, N. H., Tan, C. L., Jusuf, S. K., Chang, M. F., & Chiam, Z. Q. (2018).** A method to partition the relative effects of evaporative cooling and shading on air temperature within vegetation canopy. *Journal of Urban Ecology*, 4 (1), 1–11. <https://doi.org/10.1093/jue/juy012>
- Tartarini, F., Schiavon, S., Cheung, T., & Hoyt, T. (2020).** CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations. *SoftwareX*, 12, 100563. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100563>
- Tesselaar, M., Botzen, W. J. W., & Aerts, J. C. J. H. (2020).** Impacts of climate change and remote natural catastrophes on EU flood insurance markets: An analysis of soft and hard reinsurance markets for flood coverage. *Atmosphere*, 11 (2). <https://doi.org/10.3390/atmos11020146>
- Toparlar, Y., Blocken, B., Maiheu, B., & van Heijst, G. J. F. (2017).** A review on the CFD analysis of urban microclimate. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80 (May), 1613–1640. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.248>
- Tsitoura, M., Michailidou, M., & Tsoutsos, T. (2017).** A bioclimatic outdoor design tool in urban open space design. *Energy and Buildings*, 153(August), 368–381. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.07.079>
- Udara, P. (2016).** Air pollution in urban areas and health effects. *Jurnal Antarabangsa Alam Dan Tamadun Melayu (Iman)*, 4 (SI)(2), 25–33.
- Versus, S., & Scale, L. (1981).** The Assessment of the Urban Atmosphere. *International Geophysics*, 28(C), 17–22. [https://doi.org/10.1016/S0074-6142\(08\)60184-9](https://doi.org/10.1016/S0074-6142(08)60184-9)
- Wang, Y., Bakker, F., de Groot, R., Wortche, H., & Leemans, R. (2015).** Effects of urban trees on local outdoor microclimate: synthesizing field measurements by numerical modelling. *Urban Ecosystems*, 18(4), 1305–1331. <https://doi.org/10.1007/s11252-015-0447-7>
- Wang, Y., Bakker, F., de Groot, R., Wörtche, H., & Leemans, R. (2015).** Effects of urban green infrastructure (UGI) on local outdoor microclimate during the growing season. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(12), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4943-2>

- Wimalarathne, K. L. L., & Perera, N. G. R. (2019).** *Mapping “Wind Comfort” in Public Urban Spaces of Galle Fort, Sri Lanka.* April.
- Wong, N. H., & Peck, T. T. (2005).** the Impact of Vegetation on the Environmental Conditions of Housing Estates in Singapore. *International Journal on Architectural Science*, 6(1), 31–37.
- Yang, W., Lin, Y., & Li, C. Q. (2018).** Effects of Landscape Design on Urban Microclimate and Thermal Comfort in Tropical Climate. *Advances in Meteorology*, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/2809649>
- Zare, S., Hasheminejad, N., Shirvan, H. E., Hemmatjo, R., Sarebanzadeh, K., & Ahmadi, S. (2018).** Comparing Universal Thermal Climate Index (UTCI) with selected thermal indices. *Weather and Climate Extremes*, 19(March), 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.01.004>
- Zeng, Z., Zhou, X., & Li, L. (2017).** The Impact of Water on Microclimate in Lingnan Area. *Procedia Engineering*, 205, 2034–2040. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.082>
- Zhang, S., & Lin, Z. (2020).** Standard effective temperature based adaptive-rational thermal comfort model. *Applied Energy*, 264(December 2019), 114723. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114723>
- Zhao, X. L., Zhao, D. Q., Zhou, Y., & Lv, J. J. (2017).** The Microclimate Effect of Urban Park Fitness Trail in Spring - A Case Study of Harbin Zhao Lin Park. *Energy Procedia*, 134, 266–275. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.616>
- Zheng, Y., Ren, C., Xu, Y., Wang, R., Ho, J., Lau, K., & Ng, E. (2018).** GIS-based mapping of Local Climate Zone in the high-density city of Hong Kong. *Urban Climate*, 419–448. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.05.008>

Rapports techniques

- Barrau, E., Barthel, P.-A., Clerc, V., Hermeline, B., Huybrechts, E., Landon, A., & Viguie, V. (2014).** *Territoires urbains durables et adaptation aux changements climatiques: revue bibliographique.* http://www.gret.org/wp-content/uploads/rapportFFEM_revue_biblio_territoires_urbains_durables_VF1.pdf
- McEvoy, D. (2007).** Climate change and cities. In *Built Environment* (Vol. 33, Issue 1). <https://doi.org/10.2148/benv.33.1.5>

Sukma, A., & Angel, J. (2020). Tool comparison for urban microclimate modelling. *Technical Report: Vol. D1.2.4.1*. <https://doi.org/10.3929/ethz-b-000407999>

W. M. O. (1983). *Annual Report of the World Meteorological Organization 1982*. WMO.

Sites web

Blog de guelma city - Skyrock.com. Visité le 14 Décembre 2020, sur <https://guelmacity.skyrock.com/>

CBE Thermal Comfort Tool for ASHRAE-55. Visité le 26 Novembre 2020, sur <https://comfort.cbe.berkeley.edu/>

Climat semi-aride — Wikipédia. Visité le 14 Décembre 2020, sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_semi-aride

Confort thermique : généralité - Energie Plus. Visité le 17 Novembre 2020, sur <https://energieplus-lesite.be/theories/confort11/le-confort-thermique-d1/>

Définitions : albédo - Dictionnaire de français Larousse. (n.d.). Visité le 22 juillet 2021, sur <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/albedo/2045>

Définitions : biométéorologie - Dictionnaire de français Larousse. (n.d.). Visité le 22 juillet 2021, sur [https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/biométéorologie/9446](https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/biometeorologie/9446)

Définitions : climat - Dictionnaire de français Larousse. (n.d.). Visité le 22 juillet 2021, sur <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/climat/16534>

Définitions : climatologie - Dictionnaire de français Larousse. (n.d.). Visité le 22 juillet 2021, sur <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/climatologie/16542>

ENVI-met - Decode urban nature with ENVI-met software. Visité le 18 Aout 2020, sur <https://www.envi-met.com/>

Famille Poaceae : description et genres. Visité le 14 Décembre 2020, sur <https://www.aquaportail.com/taxonomie-famille-151-poaceae.html>

Fonction et place des arbres et arbustes dans les zones arides. (n.d.). Visité le 14 Décembre 2020, sur <http://www.fao.org/3/t0122f/t0122f05.htm>

Four Approaches to Reducing the Urban Heat Island Effect - Urban Land Magazine. (n.d.). Visité le 23 Novembre, sur <https://urbanland.uli.org/sustainability/four-approaches-to-reducing-the-urban-heat-island-effect/>

Guelma ☺ Calama | Facebook. Visité le 14 Décembre 2020, sur <https://www.facebook.com/www.calama.dz>

Gand, U. de. (n.d.). *Dry lands and desertification*. National Science Foundation. Visité le 13 Janvier, sur <http://www.eolss.net/Sample-Chapters/C12/E1-05-06.pdf>

- Histoire - Guelma.** Visité le 14 Novembre 2020, sur http://www.guelma.org/francais/index2.php?rub=ville&srub=histoire_guelma&got_o=histoire_guelma
- Indices d'aridité — Wikipédia.** Visité le 14 Décembre 2020, sur https://fr.wikipedia.org/wiki/Indices_d%27aridité
- Ladybug & Honeybee | Parametric Monkey.** Visité le 28 Novembre 2020, sur <https://parametricmonkey.com/2016/03/13/ladybug-honeybee/>
- Le barrage de Bouhamdane (Guelma) rempli à 100 % - Algerie360.** Visité le 14 Décembre 2020, sur <https://www.algerie360.com/le-barrage-de-bouhamdane-guelma-rempli-a-100/>
- Les environnements arides.** Visité le 13 Janvier 2021, sur [http://www.fao.org/3/t0122f/t0122f03.htm#2.causes de l'aridité](http://www.fao.org/3/t0122f/t0122f03.htm#2.causes%20de%20l%27aridité)
- Les forêts de Guelma, une échappatoire pour les familles face à la chaleur.** Visité le 14 Décembre 2020, sur <http://www.aps.dz/societe/108652-les-forets-de-guelma-une-echappatoire-pour-les-familles-face-a-la-chaleur-et-l-epidemie>
- METEODYN | Numerical wind engineering – Software and consultancy.** Visité le 28 Novembre 2020, sur <https://meteodyn.com/>
- Microclimate - Glossary of Meteorology.** Visité le 18 Aout 2020, sur <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Microclimate>
- Mitigation and Adaptation | Solutions – Climate Change.** Visité le 18 Aout 2020, sur <https://climate.nasa.gov/solutions/adaptation-mitigation/>
- Near Ground Wind Speeds.** Visité le 20 Novembre 2020, sur https://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/ed403_01.htm
- UN | UN DESA | United Nations Department of Economic and Social Affairs.** Visité le 30 Juillet 2020, sur <https://www.un.org/development/desa/en/news/population/2018-revision-of-world-urbanization-prospects.html>
- Spectral Reflectance.** Visité le 18 Aout 2020, sur http://gsp.humboldt.edu/OLM/Courses/GSP_216_Online/lesson2-1/reflectance.html
- Standard Effective Temperature (SET) and Thermal Comfort | 2016-01-18 | Building Enclosure.** Visité le 14 Novembre 2020, sur <https://www.buildingenclosureonline.com/blogs/14-the-be-blog/post/85635-standard-effective-temperature-set-and-thermal-comfort>
- Station météorologique — Wikipédia.** Visité le 17 Novembre 2020, sur

https://fr.wikipedia.org/wiki/Station_météorologique

Summer in the City: Seeking Relief from Urban Heat Islands - Bay Area Monitor. (n.d.).

Visité le 23 Novembre, sur <https://bayareamonitor.org/article/summer-in-the-city-seeking-relief-from-urban-heat-islands/>

The Urban Forest and Ecosystem Services: Impacts on Urban Water, Heat, and Pollution

Cycles at the Tree, Street, and City Scale. | *Semantic Scholar.* (n.d.). Visité le 22

juillet 2021, sur <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Urban-Forest-and-Ecosystem-Services>

Ventusky - cartes de prévision météo. Visité le 18 Aout 2020, sur

<https://www.ventusky.com/>

What is ASHRAE 55? Basics of Thermal Comfort | SimScale Blog. Visité le 30 Juillet

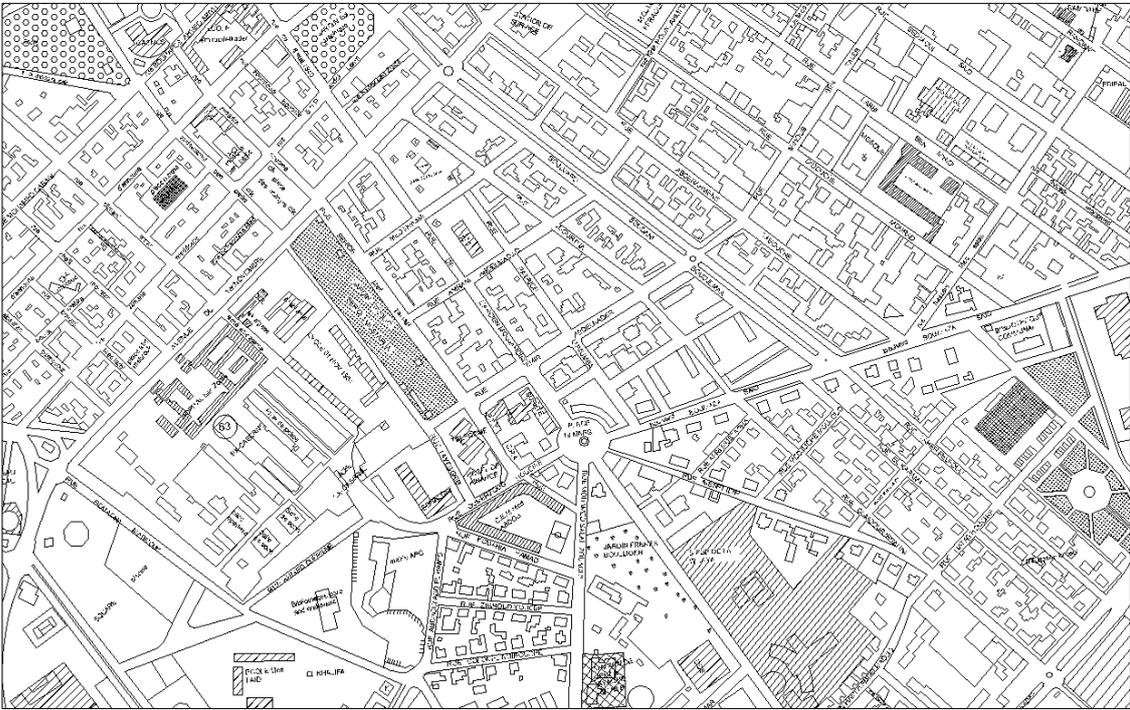
2020, sur <https://www.simscale.com/blog/2019/08/what-is-ashrae-55-thermal-comfort/>

Wind Microclimate Study: Use ANSYS CFD for Pedestrian Comfort Study. Visité le 28

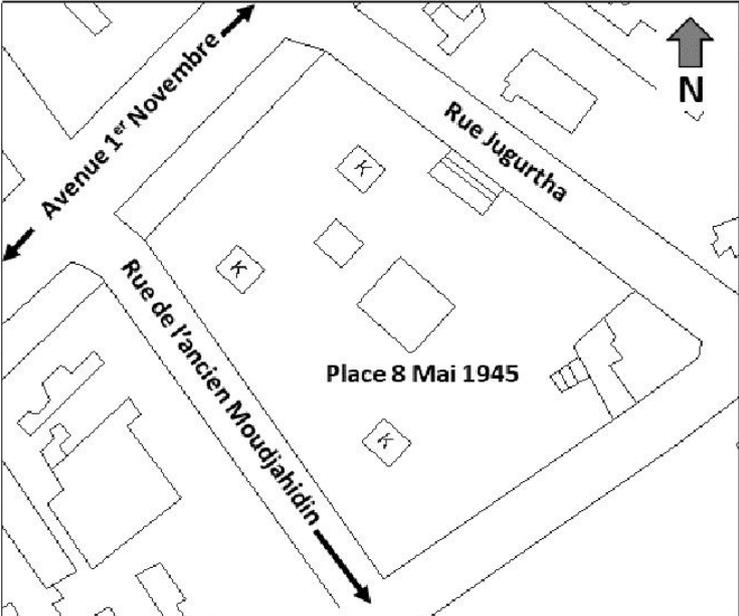
Aout 2020, sur <https://wildeanalysis.co.uk/wind-microclimate-study-pedestrian-comfort/>

Annexes

Annexe 01 : Questionnaire de l'enquête pilote

<p>République Algérienne Démocratique et Populaire. Université 8 Mai 1945 -Guelma- Faculté des sciences et technologie Département d'Architecture</p>	<p>SAYAD Bouthaina Laboratoire Génie civil et hydraulique 2èm Année PG Bouthaina41@hotmail.com / N° 0660410054</p>
<p>Enquête Pilote 2018 N° <input style="width: 30px;" type="text"/></p>	
<p style="text-align: center;">Questionnaire</p> <p>Identification :</p> <p>Genre : Féminin <input type="checkbox"/> Masculin <input type="checkbox"/> Age :</p> <p>Fonction :</p> <p>D'origine :</p> <p>Cette rue Ce quartier Cette ville Cette willaya Autres willaya</p> <p>Usage et fréquentation des espaces extérieurs :</p> <p>Endroit :</p> <p>Date : heure :</p> <p>Q1 : En ce moment, passez-vous juste par ici, où êtes-vous venu pour une raison précise ?</p> <p style="text-align: center;">A. Je passe par ici B. Je suis venu pour une raison</p> <p>Si la réponse est (B), pour quelle raison ?</p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>Q2 : Que diriez-vous des espaces extérieurs à Guelma, sont-ils confortables ?</p> <p>.....</p> <p>.....</p>	<p style="text-align: center;">A reporter sur la Carte</p> <p>Délimitation du centre-ville :</p> <p>Sur la carte ci-dessous !</p> <ul style="list-style-type: none"> - Délimitez l'aire de plus haute influence (centre-ville). - Tracez depuis ce point (position actuelle) votre chemin de navigation. - Classez les espaces extérieurs dont les noms figurent en verso de la page, selon leurs importances. <ul style="list-style-type: none"> a. De 01 à 10 pour les places et les placettes b. De 11 à 08 pour les rues/routes/boulevards <p>Q2 : Vous vous rendez fréquemment dans l'un ou plusieurs espaces parmi ces espaces ?</p> <p>Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/></p> <p>Si la réponse est oui !</p> <ul style="list-style-type: none"> - Dessinez sur la carte votre chemin pour le rejoindre. <p>Dans ce champ !</p> <p>Dessinez votre chemin pour se rendre au centre-ville et puis pour se rendre à votre espace de détente (repos)</p> <div style="border: 1px solid black; height: 100px; width: 100%; margin-top: 10px;"></div>
	
<p>Septembre /Octobre /Novembre 2018</p>	

Annexe 02 : Fiche d'observation

<u>Observation : Intensité d'usage</u>				
<u>Date :</u>				
<u>Station :</u>	Sayad Bouthaina			
E-mail : bouthaina41@hotmail.com / N° Téléphone : 0660410054				
<u>Climat du jour !</u>				
				
Paramètres				
Période	Flux transitoire	N° de visiteurs	Nombre total	Observation
07h-09h				
09h-11h				
11h-13h				
13h-15h				
15h-17h				
17h-19h				
19h-21h				
<u>Remarques :</u>				

Annexe 03 : Questionnaire

République Algérienne Démocratique et Populaire.
 Université 08 Mai 1945 -Guelma-
 Faculté des sciences et de la technologie
 Département d'Architecture

SAYAD Bouthaina
 Laboratoire Génie civil et hydraulique
 2^{em} Année PG
 Boutheina41@hotmail.com / N° 0660410054

Questionnaire***Le confort climatique dans les espaces extérieurs à Guelma***

Endroit : Heure :

Identification de l'interviewé :

Sexe : Féminin Masculin Age : / /

Degré de proximité : A qlqs mètres Loin Très loin

Usage et fréquentation de l'espace public :

- Pourquoi vous choisissez cette Place /placette ?

La situation L'animation Le degré de confort Autre

- Pourquoi Faire ?

Détente Rencontre Je passe par ici Autre

- A quelle fréquence, vous visitez cette Place /placette ?

Tous les jours Plusieurs fois par semaine Le weekend Rare

- Combien de temps vous passez à cette Place /placette ?

Qlqs minutes Environ une heure Plus d'une heure Autre

1. Evaluation de la sensation thermique en extérieure :

Critères synthétiques	Critères détaillés et évaluation					
Confort thermique	Q1 : Comment vous évaluez le confort thermique/climatique dans cet endroit ?					
	Niveau d'évaluation	Inconfortable	Un peu inconfortable	Neutre	Un peut confortable	Confortable
		<input type="checkbox"/>				
Acceptabilité thermique	Q1 : Le présent environnement thermique, est-il acceptable ou inacceptable ?					
	Niveau d'évaluation	Acceptable		Inacceptable	Neutre	
		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	

	Q2 : Si la réponse est inacceptable, pourquoi ? Q3 : citez des causes ?			
Préférences thermiques	Q1 : Pour de conditions meilleures (environnement thermique), vous suggérez !			
	Niveau d'évaluation	Plus de fraîcheur	Aucun changement	Plus de chaleur
	Q2 : Proposition/ attentes/ aspirations !			

2. Evaluation des paramètres microclimatiques influant la sensation thermique en extérieure :

Paramètres	Evaluation				
Température	Q1 : Comment vous évaluez le confort thermique/climatique dans cet endroit ?				
	Très chaud	Chaud	Un peu chaud	Neutre	Un peu cool (frais)
	Q2 : citez des causes ! Q3 : essayez de décrire ce que vous sentez vis-à-vis la température dans cette position !				
Humidité	Q1 : Le présent environnement thermique, est-il acceptable ou inacceptable ?				
	Humide	Un peu humide	Neutre	Un peu sec	Sec
	Q2 : citez des causes ! Q3 : essayez de décrire ce que vous sentez vis-à-vis la température dans cette position !				
Effet du vent	Q1 : Pour de conditions meilleures (environnement thermique), vous suggérez !				
	Doux	Un peu doux	Neutre	Un peu stagnant	Stagnant
	Q2 : citez des causes ! Q3 : essayez de décrire ce que vous sentez vis-à-vis la température dans cette position !				

Question Clôture : Proposez des solutions !

Annexe 4 : Données de sortie du questionnaire /SPSS/

GET/TABLES=Session BY Genre Degré_de_proximité Choix_d_espace Raison_de_visite
Fréquentation Durée Confort_climatique Acceptability_thermique Préférences_thermique
Sensation_de_la_température Sensation_d_humidité Sensation_du_vent

Remarques

Sortie obtenue		13-NOV-2020 11:40:41
Commentaires		
Entrée	Données	E:\1. Thèse\4. Partie experimentale\1. resultat de l'investigation\4. Questionnaire\1. Tout.sav
	Jeu de données actif	Jeu_de_données1
	Filtre	<sans>
	Pondération	<sans>
	Fichier scindé	<sans>
	N de lignes dans le fichier de travail	581
Gestion des valeurs manquantes	Définition de la valeur manquante	Les valeurs manquantes définies par l'utilisateur sont traitées comme étant manquantes.
	Observations utilisées	Les statistiques de chaque tableau sont basés sur toutes les observations avec données valides des plages spécifiées pour toutes les variables dans chaque tableau.
Syntaxe		<p>CROSSTABS</p> <p>/TABLES=Session BY Genre Degré_de_proximité Choix_d_espace Raison_de_visite Fréquentation Durée</p> <p>Confort_climatique Acceptability_thermique Préférences_thermique Sensation_de_la_température</p> <p>Sensation_d_humidité Sensation_du_vent</p> <p>/FORMAT=AVALUE TABLES</p> <p>/CELLS=COUNT</p> <p>/COUNT ROUND CELL.</p>
Ressources	Temps de processeur	00:00:00,03
	Temps écoulé	00:00:00,03
	Dimensions demandées	2
	Cellules disponibles	524245

[Jeu_de_données1] E:\1. Thèse\4. Partie experimentale\1. resultat de l'investigation\4. Questionnaire\1. Tout.sav

Tableau croisé Point * Session

Effectif	Session						Total
	09:00-11:00	11:00-13:00	13:00-15:00	15:00-17:00	17:00-19:00	19:00-21:00	
Point p1	5	2	1	2	2	2	14
p2	3	3	1	2	2	3	14
p3	3	3	2	1	1	2	12
p4	2	2	1	1	2	2	10
p5	5	3	4	3	4	3	22
p6	4	3	1	1	3	3	15
p7	2	2	3	1	2	2	12
p8	5	4	1	2	2	1	15
p9	3	2	1	2	2	2	12
p10	4	2	2	1	1	1	11
p11	4	3	1	2	2	2	14
p12	4	2	1	1	1	3	12
p13	2	2	2	2	1	3	12
p14	2	1	1	2	2	2	10
p15	3	3	3	2	3	3	17
p16	5	4	2	4	4	3	22
p17	3	3	1	1	3	2	13
p18	5	4	4	4	3	4	24
p19	5	5	3	3	4	3	23
p20	5	2	1	2	2	4	16
p21	3	2	1	1	1	2	10
p22	1	3	2	1	1	2	10
p23	3	2	1	2	2	3	13
p24	3	1	1	2	1	2	10
p25	3	3	2	1	2	2	13
p26	4	2	2	2	2	3	15
p27	3	3	1	2	1	2	12
p28	4	2	3	2	3	3	17
p29	5	4	2	3	2	2	18
p30	4	3	1	2	2	2	14

p31	5	2	1	1	3	4	16
p32	4	4	1	2	2	3	16
p33	3	2	1	2	2	3	13
p34	2	3	1	1	2	2	11
p35	5	5	4	3	2	3	22
p36	3	3	1	2	2	3	14
p37	4	2	1	2	2	2	13
p38	3	2	1	1	2	2	11
p39	2	1	1	1	1	2	8
p40	3	3	1	1	4	3	15
p41	2	2	1	1	2	2	10
Total	143	109	66	74	87	102	581

Récapitulatif de traitement des observations

	Observations					
	Valide		Manquant		Total	
	N	Pourcentage	N	Pourcentage	N	
Session * Genre	581	100,0%	0	0,0%	581	
Session * Degré_de_proximité	581	100,0%	0	0,0%	581	
Session * Choix_d_espace	581	100,0%	0	0,0%	581	
Session * Raison_de_visite	581	100,0%	0	0,0%	581	
Session * Fréquentation	581	100,0%	0	0,0%	581	
Session * Durée	581	100,0%	0	0,0%	581	
Session * Confort_climatique	581	100,0%	0	0,0%	581	
Session * Acceptability_thermique	581	100,0%	0	0,0%	581	
Session * Préférences_thermique	581	100,0%	0	0,0%	581	
Session * Sensation_de_la_température	581	100,0%	0	0,0%	581	
Session * Sensation_d_humidité	581	100,0%	0	0,0%	581	
Session * Sensation_du_vent	581	100,0%	0	0,0%	581	

Récapitulatif de traitement des observations

	Observations
	Total
	Pourcentage
Session * Genre	100,0%
Session * Degré_de_proximité	100,0%
Session * Choix_d_espace	100,0%
Session * Raison_de_visite	100,0%
Session * Fréquentation	100,0%
Session * Durée	100,0%
Session * Confort_climatique	100,0%
Session * Acceptability_thermique	100,0%
Session * Préférences_thermique	100,0%
Session * Sensation_de_la_température	100,0%
Session * Sensation_d_humidité	100,0%
Session * Sensation_du_vent	100,0%

Tableau croisé Session * Genre

Effectif	Genre		Total
	Male	Femelle	
Session 09:00-11:00	91	52	143
11:00-13:00	62	47	109
13:00-15:00	37	29	66
15:00-17:00	38	36	74
17:00-19:00	36	51	87
19:00-21:00	47	55	102
Total	311	270	581

Tableau croisé Session * Choix_d_espace

Effectif		Choix_d_espace				Total
		la situation	le degré de confort	l'animation	autre	
Session	09:00-11:00	67	40	21	15	143
	11:00-13:00	55	16	16	22	109
	13:00-15:00	38	20	3	5	66
	15:00-17:00	36	21	8	9	74
	17:00-19:00	34	42	5	6	87
	19:00-21:00	43	54	2	3	102
Total		273	193	55	60	581

Tableau croisé Session * Degré_de_proximité

Effectif		Degré_de_proximité			Total
		a quelques mètres	loin	tres loin	
Session	09:00-11:00	31	72	40	143
	11:00-13:00	19	57	33	109
	13:00-15:00	16	31	19	66
	15:00-17:00	10	44	20	74
	17:00-19:00	12	56	19	87
	19:00-21:00	32	53	17	102
Total		120	313	148	581

Tableau croisé Session * Raison_de_visite

Effectif		Raison_de_visite				Total
		détente	rencontre	je passe par ici	autre	
Session	09:00-11:00	41	35	38	29	143
	11:00-13:00	27	32	31	19	109
	13:00-15:00	15	17	23	11	66
	15:00-17:00	19	17	23	15	74
	17:00-19:00	9	15	40	23	87
	19:00-21:00	3	31	50	18	102
Total		114	147	205	115	581

Tableau croisé Session * Fréquentation

Effectif		Fréquentation				Total
		chaque jour	plusieurs fois par semaine	le weekend	rare	
Session	09:00-11:00	41	61	24	17	143
	11:00-13:00	36	53	7	13	109
	13:00-15:00	14	19	21	12	66
	15:00-17:00	14	26	14	20	74
	17:00-19:00	28	40	12	7	87
	19:00-21:00	70	9	18	5	102
Total		203	208	96	74	581

Tableau croisé Session * Durée

Effectif		Durée				Total
		quelques minutes	environ une heure	plus d'une heure	autre	
Session	09:00-11:00	40	51	51	1	143
	11:00-13:00	39	45	25	0	109
	13:00-15:00	40	18	8	0	66
	15:00-17:00	32	18	24	0	74
	17:00-19:00	35	35	17	0	87
	19:00-21:00	22	32	48	0	102
Total		208	199	173	1	581

Tableau croisé Session * Confort_climatique

Effectif		Confort_climatique					
		tres incomfortable	un peu incomfortable	incomfortable	neutre	un peu confortable	
Session	09:00-11:00	0	1	31	58	53	
	11:00-13:00	25	27	19	21	17	
	13:00-15:00	40	23	3	0	0	
	15:00-17:00	15	56	3	0	0	
	17:00-19:00	0	35	37	14	1	
	19:00-21:00	0	0	0	45	57	
Total		80	142	93	138	128	

Tableau croisé Session * Confort_climatique

Effectif		Total
Session	09:00-11:00	143
	11:00-13:00	109
	13:00-15:00	66
	15:00-17:00	74
	17:00-19:00	87
	19:00-21:00	102
Total		581

Tableau croisé Session * Acceptability_thermique

Effectif		Acceptability_thermique			Total
		acceptable	neutre	inacceptable	
Session	09:00-11:00	74	50	19	143
	11:00-13:00	20	28	61	109
	13:00-15:00	1	1	64	66
	15:00-17:00	0	6	68	74
	17:00-19:00	33	43	11	87
	19:00-21:00	96	6	0	102
Total		224	134	223	581

Tableau croisé Session * Préférences_thermique

Effectif		Préférences_thermique		Total
		plus de fraîcheur	Aucun changement	
Session	09:00-11:00	42	101	143
	11:00-13:00	83	26	109
	13:00-15:00	66	0	66
	15:00-17:00	67	7	74
	17:00-19:00	40	47	87
	19:00-21:00	6	96	102
Total		304	277	581

Tableau croisé Session * Sensation_de_la_température

Effectif	Sensation_de_la_température					
	tres chaud	chaud	un peu chaud	neutre	un peu frai	
Session 09:00-11:00	0	0	39	60	44	
11:00-13:00	11	37	37	13	11	
13:00-15:00	37	26	3	0	0	
15:00-17:00	11	63	0	0	0	
17:00-19:00	0	10	59	18	0	
19:00-21:00	0	2	4	77	19	
Total	59	138	142	168	74	

Tableau croisé Session * Sensation_de_la_température

Effectif	Total
Session 09:00-11:00	143
11:00-13:00	109
13:00-15:00	66
15:00-17:00	74
17:00-19:00	87
19:00-21:00	102
Total	581

Tableau croisé Session * Sensation_d_humidité

Effectif	Sensation_d_humidité					Total
	humide	un peu humide	neutre	un peu sec	sec	
Session 09:00-11:00	1	57	67	18	0	143
11:00-13:00	0	35	26	33	15	109
13:00-15:00	0	3	5	22	36	66
15:00-17:00	0	5	20	44	5	74
17:00-19:00	5	49	32	1	0	87
19:00-21:00	6	89	5	2	0	102
Total	12	238	155	120	56	581

Tableau croisé Session * Sensation_du_vent

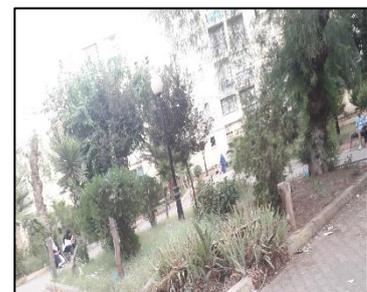
Effectif	Sensation_du_vent						
	0	tres stagnant	stagnant	un peu stagnant	neutre		
Session 09:00-11:00	0	0	0	24	73		
11:00-13:00	0	2	29	30	21		
13:00-15:00	1	27	31	5	2		
15:00-17:00	0	2	28	9	13		
17:00-19:00	0	0	5	45	27		
19:00-21:00	0	0	0	54	21		
Total	1	31	93	167	157		

Annexe 05 : Photographies prises durant l'investigation In-situ

Enquête pilote /Septembre -Novembre 2018/



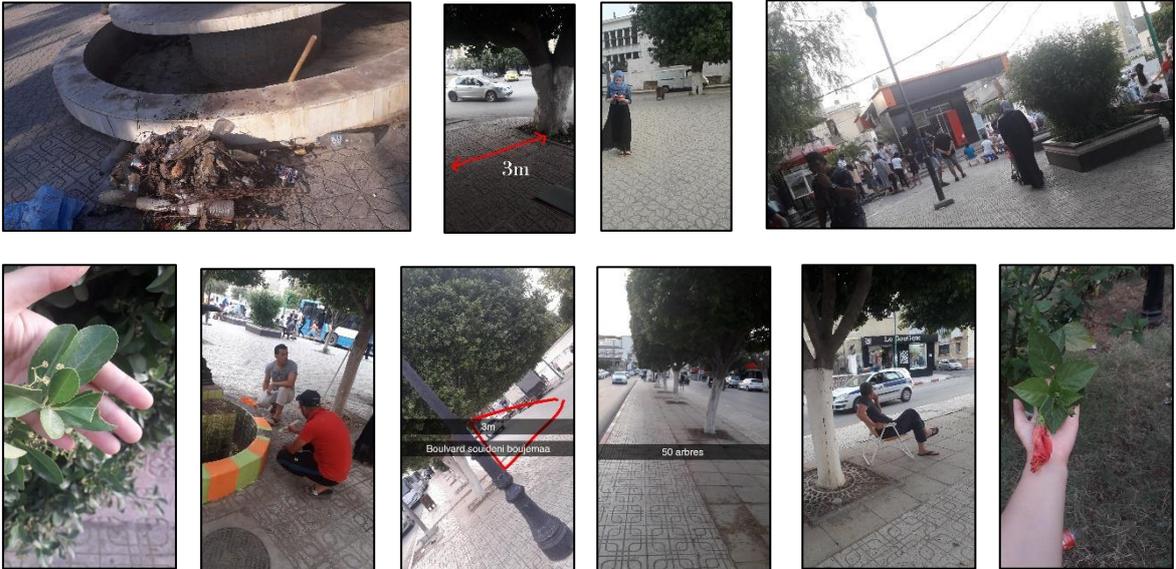
Observation in-situ /Septembre -Novembre 2018/



Observation in-situ /Avril 2019/



Période préparatoire /Juillet 2019/



Compagne de mesure et questionnaire d'été

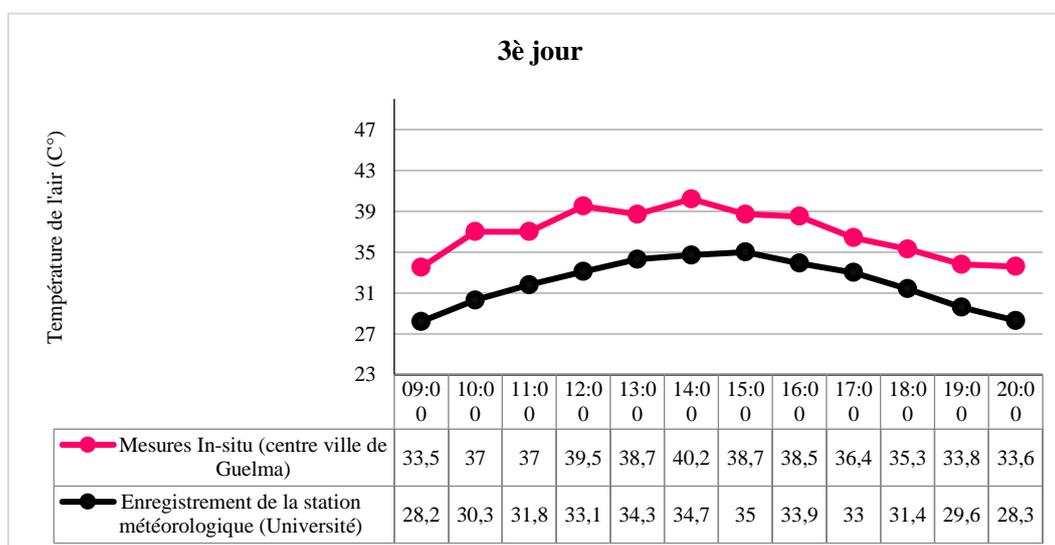
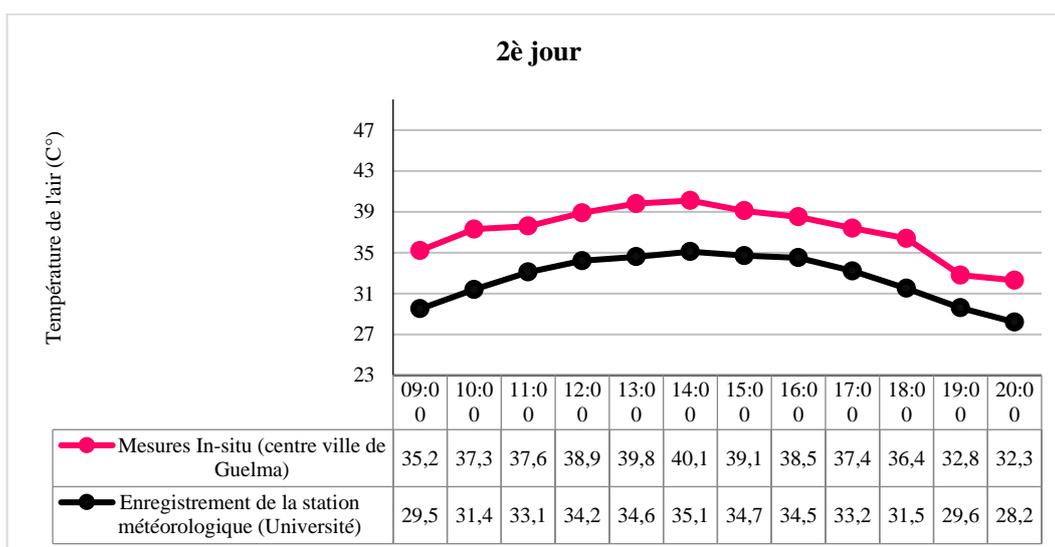
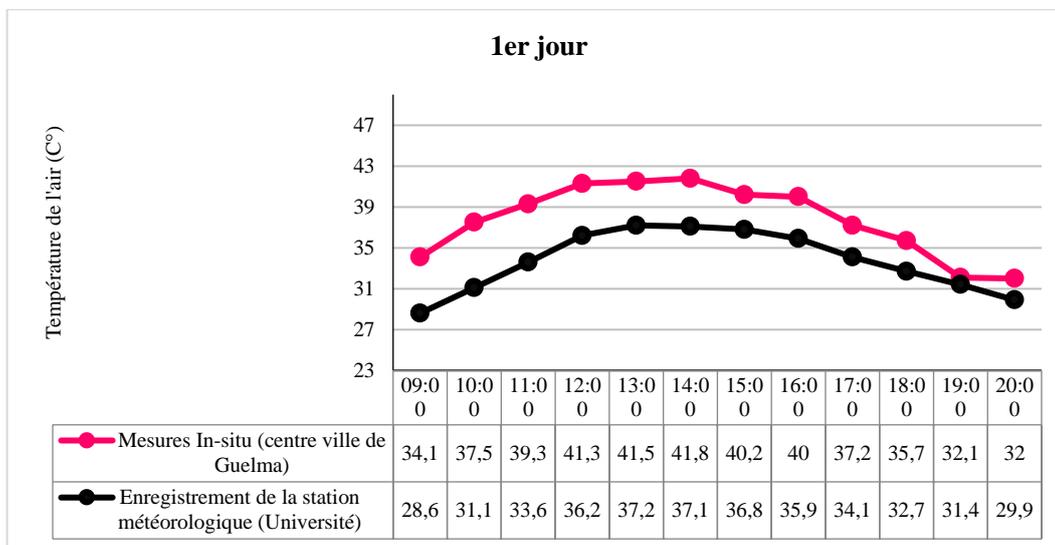


Pour voir plus consultez le lien :

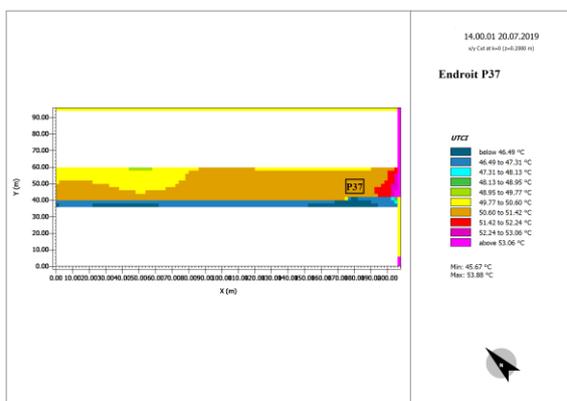
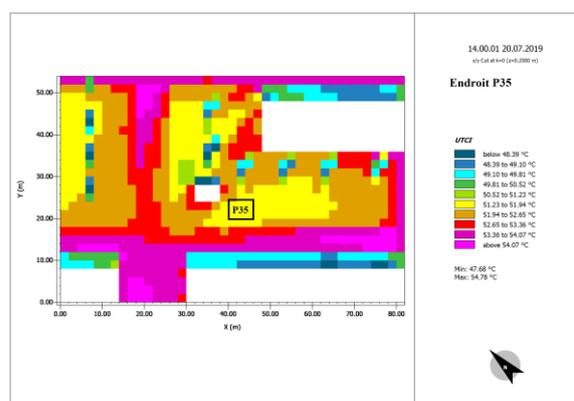
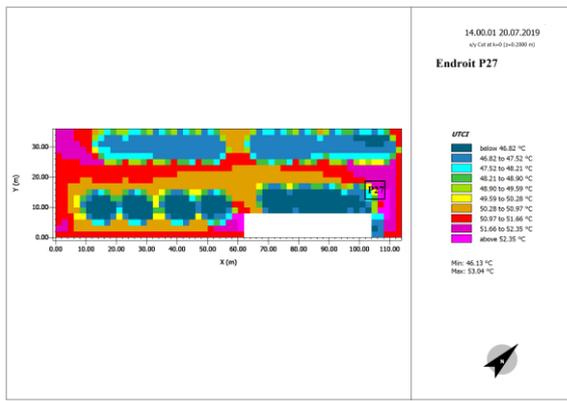
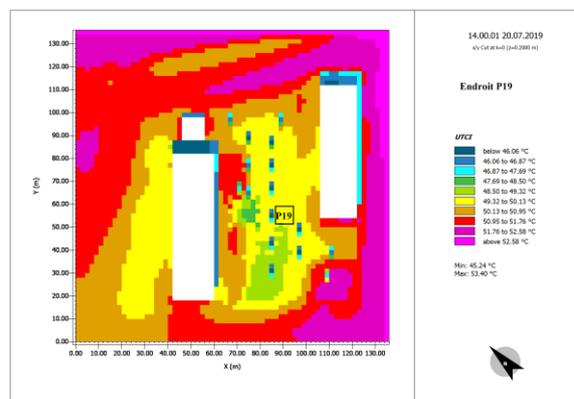
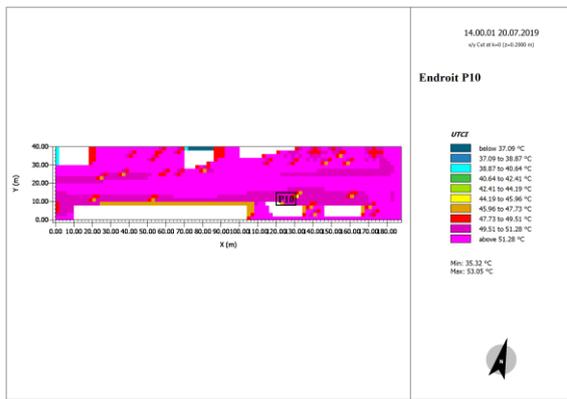
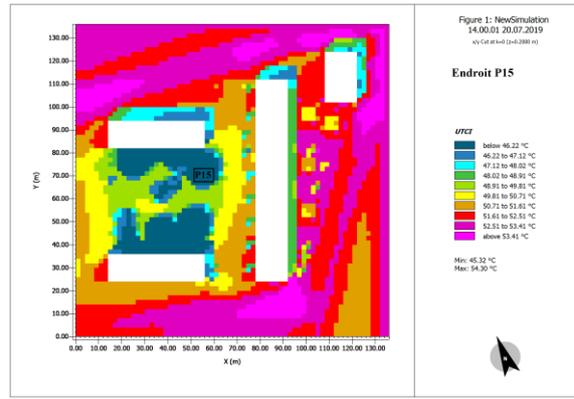
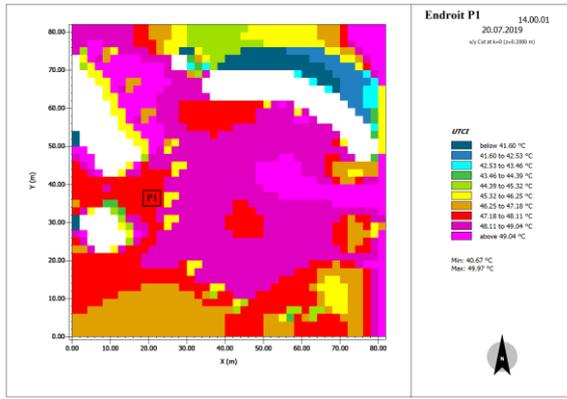
Annexe 06 : Nomenclature des arbres et des arbres d'alignement en Algérie

10	JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 10	15 Safar 1430 11 février 2009
ANNEXE		
Nomenclature des arbres urbains et des arbres d'alignement		
1. - LES ARBRES		
NOMBRE	NOM VERNACULAIRE	NOM SCIENTIFIQUE
1	Aulne glutineux	<i>Alnus glutinosa</i>
2	Catalpa	<i>Catalpa bignonioides</i>
3	Caroubier	<i>Ceratonia siliqua</i>
4	Cyprès toujours vert	<i>Cupressus sempervirens</i>
5	Cyprès de l'Arizona	<i>Cupressus arizonica</i>
6	Cyprès d'Italie	<i>Cupressus italica</i>
7	Eucalyptus	<i>Eucalyptus ficifolia</i>
8	Frêne	<i>Fraxinus excelsior</i>
9	Févier d'Amérique	<i>Gleditsia triacanthos</i>
10	Grevillier	<i>Grevillia robusta</i>
11	Magnolia à grandes fleurs	<i>Magnolia grandiflora</i>
12	Melia	<i>Melia azedarach</i>
13	Mûrier blanc	<i>Morus alba</i>
14	Platane d'occident	<i>Platanus occidentalis</i>
15	Peuplier blanc	<i>Populus alba</i>
16	Peuplier noir	<i>Populus nigra</i>
17	Pin pignon ou parasol	<i>Pinus pinea</i>
18	Robinier faux-acacia	<i>Robinia pseudo-acacia</i>
19	Saule blanc	<i>Salix alba</i>
20	Jacaranda à feuilles de Mimosa	<i>Jacaranda mimosifolia</i>
21	Tamaris de France	<i>Tamarix gallica</i>
22	Cyprès chauve	<i>Taxodium distichum</i>
23	Tipa	<i>Tipa tipuana</i>
24	Palmier phœnix	<i>Phoenix canariensis</i>
25	Palmier washingtonia	<i>Washingtonia filifera</i>
26	Palmier cocotier	<i>Cocos nucifera</i>
27	Micocoulier	<i>Celtis australis</i>
2. - LES ARBUSTES		
NOMBRE	NOM VERNACULAIRE	NOM SCIENTIFIQUE
1	Acacia de Constantinople	<i>Albizzia julibrissin</i>
2	Dragonnier	<i>Dracaena draco</i>
3	Sophora du Japon	<i>Sophora japonica</i>
4	Baniane de Malaisie	<i>Ficus retusa</i>
5	Cytise faux ébénier	<i>Laburnum anagyroides</i>
6	Lilas des Indes	<i>Lagerstroemia indica</i>
7	Laurier rose	<i>Nerium oleander</i>
8	Prunier	<i>Prunus pissardii</i>
9	Arbre de Judée	<i>Cercis siliquastrum</i>
10	Faux-poivrier	<i>Schinus molle</i>
11	Troène du Japon	<i>Ligustrum japonica</i>
12	Olivier de Bohème	<i>Eleagnus angustifolia</i>

Annexe 07 : Ecart des températures urbaines



Annexe 08 : Cartes de l'indice du confort UTCI dans sept endroits stratégiques à 14 :00



Annexe 09 : Essences et caractéristiques d'arbres utilisés dans la simulation

Source : <https://www.public.asu.edu/~camartin/plants/lpdataatree.htm>

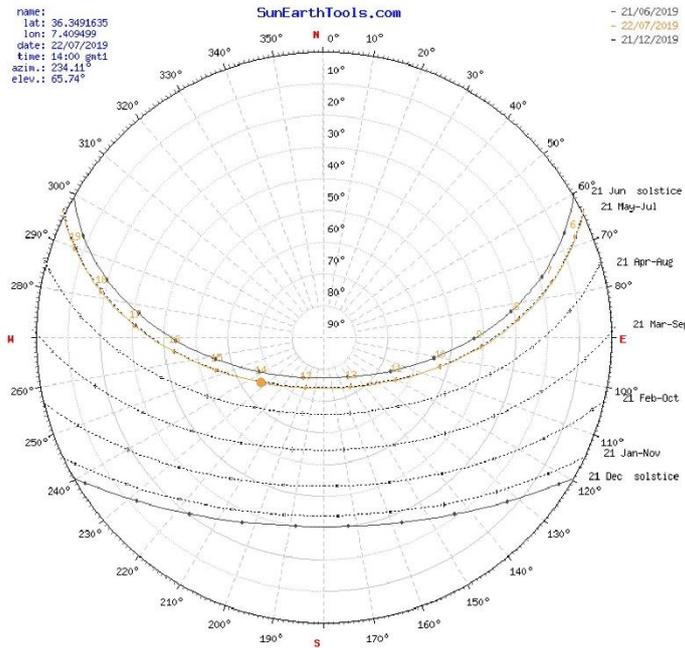
Espèces	Caractéristique
<p>Ficus Retusa</p>  <p>Nom botanique : Ficus microcarpa (anciennement F.retusa, F. nitida et F. microcarpa nitida) Nom commun : Figue de laurier indien Famille : Moracées Origine : Inde, Malaisie</p>	<p>Utilisation dans l'architecture paysagère : arbre d'ombrage dense, arbre de rue uniquement dans les sites avec de larges médianes, de grandes cours et des centres commerciaux intérieurs, de grands conteneurs.</p> <p>Forme et caractère : Arbre potentiellement massif avec une canopée dense et arrondie, s'étalant avec l'âge, d'aspect lourd, puissant, formel.</p> <p>Croissance : arbre à feuillage persistant, modéré et s'étendant jusqu'à 50 à 80 pieds. Largeur généralement supérieure à la hauteur, en particulier pour les arbres matures.</p> <p>Feuillage et texture : Feuilles ovales lustrées, glabres, effilées à pointe acuminée, feuilles très persistantes, tronc et branches à écorce fine, lisse et blanc grisâtre avec des lenticelles sur de petites branches, producteur de latex ; texture moyenne.</p> <p>Température : Généralement rustique à l'extérieur dans la plage de températures de -4° C à 46° C.</p> <p>Couleur saisonnière : Aucune, juste une grosse masse de VERT !</p> <p>Lumière : Du plein soleil à la pleine ombre, évitez les expositions réfléchissantes à l'ouest car les troncs d'arbres sont sujets aux brûlures dues au soleil.</p> <p>Taille : Élevez la base de la canopée progressivement à mesure que l'arbre mûrit. Les arbres propagés à partir de boutures doivent être rigoureusement jalonnés et taillés pour être dressés en standard.</p> <p>Propagation : facilement par bouture végétative ou stratification aérienne.</p>
<p>Ficus Benjamina</p>  <p>Nom botanique : Ficus benjamina Nom commun : Figue pleureuse, banyan chinois pleureur, laurier de Java Famille : Moracées Origine : Inde, Malaisie</p>	<p>Utilisation dans l'architecture paysagère : Arbre d'ombrage à feuilles persistantes de taille moyenne éloquent, grandes voies d'entrée hautes, accents de bâtiment est et nord, atriiums, cours et centres commerciaux intérieurs, grands conteneurs, topiaires.</p> <p>Forme et caractère : droit dense et arrondi à s'étaler avec l'âge, aspect raffiné, formel, propre, résistant au stress, bien élevé.</p> <p>Croissance : arbre vivace à feuilles persistantes à bois tendre, modéré et s'étendant de 30 à 50 pieds avec une propagation presque égale.</p> <p>Feuillage et texture : Feuilles ovales glabres lustrées, vert clair, effilées à l'extrémité acuminée, en forme de bateau si acclimaté au soleil, tronc lisse et gris brunâtre, lenticelles sur de petites branches, producteur de latex blanc laiteux, racines aériennes ; texture moyenne.</p> <p>Couleur saisonnière : Verte</p> <p>Température : Rustique jusqu'à -1 ° C Le feuillage et les jeunes branches peuvent être gelés pendant les hivers frais à Phoenix. Récupère rapidement.</p> <p>Lumière : plein soleil à pleine ombre</p> <p>Taille : Soulever et élever la base de la canopée uniquement si nécessaire. La figue pleureuse doit être rigoureusement entraînée lorsqu'elle est jeune si le désir est de l'entraîner à devenir un standard. Utile comme grand topiaire.</p> <p>Propagation : Coupe de bois semi-dur, les meilleurs mai et juin.</p>
<p>Fraxinus ou frêne</p>  <p>Nom botanique : Fraxinus formosana, griffithii, excelsior Nom commun : Frêne Griffith, frêne à feuilles persistantes, frêne de l'Himalaya. Famille : Oleaceae</p>	<p>Utilisation dans l'architecture paysagère : Arbre d'ombrage à feuilles persistantes tempéré doux, relativement petit comme le frêne Raywood par rapport aux autres frênes. Un bon arbre résidentiel spécimen pour les environnements mésiques. Aussi un bon arbre à gazon pour les endroits ouverts et ensoleillés.</p> <p>Forme et caractère : Caduque à semi-caduque selon le froid hivernal, couvert vertical à arrondi et oblong, serré, formel, propre.</p> <p>Croissance : Modérément debout jusqu'à 45 pieds de hauteur avec une largeur de 25 pieds.</p> <p>Feuillage et texture : Plus petites que les feuilles de frêne typiques, glabres et vert brillant, composées pennées, principalement 5 à 11 folioles ovales à elliptiques par feuille, tronc principalement lisse et gris clair ; texture moyennement fine.</p> <p>Couleur saisonnière : Fleurs blanches au printemps.</p> <p>Température : tolérante</p> <p>Lumière : principalement en plein soleil, évitez les expositions occidentales très réfléchissantes.</p>

<p>Origine : Asie centrale et orientale, Europe centrale</p>	<p>Taille : Élever la base de la canopée (rehaussement de la cime) de façon TRÈS prudente pour éviter les brûlures du tronc ; ne couronne pas mince. Les jeunes arbres peuvent avoir besoin de jalonnement. Propagation : Coupe en automne le mieux.</p>
<p>Populus alba</p>  <p>Nom botanique : Populus fremontii Nom commun : Fremont, occidental, occidental, peuplier d'Arizona, Alamo, peuplier de Meseta. Famille : Salicacées Origine : États-Unis.</p>	<p>Utilisation dans l'architecture paysagère : arrière-plan, écran rapide, couleur d'automne, arbre d'ombrage mésique, couleur d'automne, restauration riveraine. Forme et caractère : Arbre caduc, fort, massif, dressé, reposant. Croissance : Rapide, debout surtout quand il est jeune à plus étalé avec l'âge. Peut atteindre 110 pieds de hauteur. L'écorce est lisse sur le tronc, les brindilles et les branches des jeunes arbres, mais l'écorce du tronc devient profondément sillonnée à maturité. Feuillage et Texture : Feuillage fin et vert clair, triangulaire, cordiforme à deltoïde, 2 à 4 pouces de long, bords dentelés, pétioles minces créant un miroitement au moindre vent ; texture moyenne. Couleur saisonnière : Couleur foliaire jaune vif à jaune doré à l'automne, parfois supprimée dans le désert inférieur par les températures chaudes de l'automne et du début de l'hiver. Température : Tolérante à la chaleur du phénix, surtout s'il y a un peu d'eau autour. Lumière : soleil Taille : Facilement manipulé et taillé de n'importe quelle façon. Taillez selon l'usage. Souvent et traditionnellement, cet arbre est étêté chaque année. Propagation : facile à couper</p>
<p>Palmier de washingtonia</p>  <p>Nom botanique: Robusta H. filifera var. Famille : Arecaceae</p>	<p>Utilisation dans l'architecture paysagère : promenades, paysages de rue, accent vertical imposant. Pas le meilleur palmier pour les zones résidentielles. Forme et caractère : palmier à feuilles persistantes, debout, effet vertical puissant, oasis Croissance : Tronc unique jusqu'à 100 pieds, circonférence élancée. Feuillage et texture : Grandes frondes composées palmées brillantes et brillantes en forme d'éventail, extrémités des pennes de frondes matures tombantes de manière caractéristique, texture grossière Température : Rustique jusqu'à -7 ° C Lumière : plein soleil Taille : Taillez les vieilles frondes et les panicules de fleurs sur une base annuelle au début de l'été immédiatement après la floraison. Ne pas trop tailler ! Au lieu de cela, élaguez seulement assez de frondes pour qu'il reste au moins 1/3 de la canopée lorsque le travail est terminé. Propagation : Facile par graines, très enclin à se naturaliser dans les paysages de l'Arizona et du sud de la Californie.</p>

Annexe 10 : Ensoleillement et ombre le 22.07.2019

Source : https://www.sunearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php?lang=fr#top

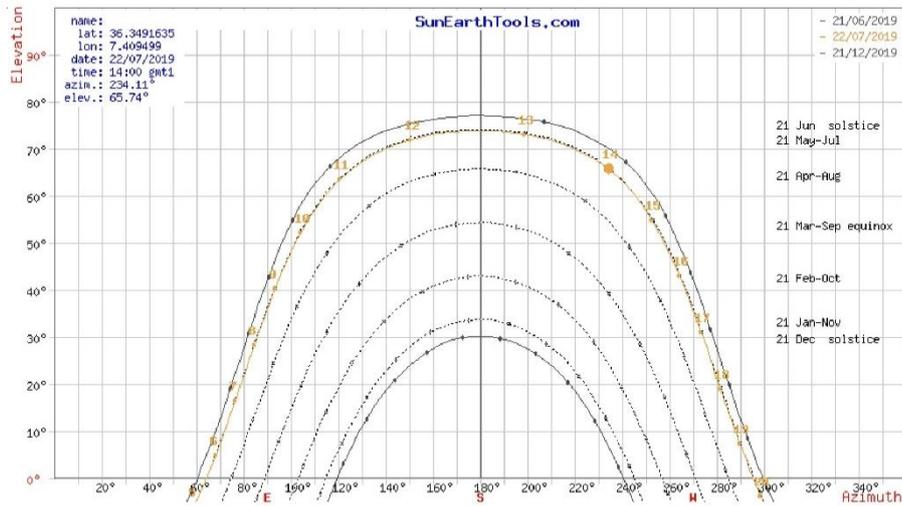
1. Graphique polaire



2. Position du soleil

Date:	22/07/2019 GMT1	
coordonnées:	36.3491635, 7.409499	
localisation:	36.34916350, 7.40949900	
heure	Elevation	Azimut
05:28:56	-0.833°	63.76°
6:00:00	4.88°	68.28°
7:00:00	16.38°	76.52°
8:00:00	28.26°	84.64°
9:00:00	40.35°	93.43°
10:00:00	52.27°	104.32°
11:00:00	63.44°	120.63°
12:00:00	72.02°	150.88°
13:00:00	73.14°	199.03°
14:00:00	65.74°	234.11°
15:00:00	54.9°	252.57°
16:00:00	43.07°	264.28°
17:00:00	31°	273.38°
18:00:00	19.02°	281.56°
19:00:00	7.39°	289.71°
19:44:21	-0.833°	296.09°

3. Graphique cartésien



4. Longueur de l'ombre des arbres

$$L = h / \tan(\alpha)$$

D'où : h - hauteur de l'objet α - angle entre le soleil et l'horizon

/	Heure	09 :00	10 :00	11 :00	12 :00	13 :00	14 :00	15 :00	16 :00	17 :00	18 :00
Taille d'arbre (m)	8	9.4	6.1	4	2.6	2.4	3.6	5.6	8.5	13.2	23.1
	10	11.7	7.7	4.9	3.2	3	4.5	7	10.6	16.6	28.8
	12	14.1	9.2	5.9	3.9	3.6	5.4	8.4	12.8	19.9	34.6

Annexe 11 : Réduction de UTCI et des températures de l'air dans les différents scénarios au niveau des cinq stations S2, S2', S3, S6 et S8.

Réductions de UTCI (C°)

Phase thermique modérée du matin

Scénarios		S 1	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8
Stations	S2	0	/	0,24	0,17	0,66	0,46	1,06
	S2'	0	1,39	0,34	/	/	/	/
	S3	0	0,01	0,22	0,23	0,2	0,29	/
	S6	0	0	0,12	0	0	0,46	/
	S8	0	/	1,73	1,98	2,83	1,8	6,9

Phase thermique chaude

Scénarios		S 1	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8
Stations	S2	0	/	0,33	0,17	1,72	0,7	3,87
	S2'	0	0,53	2,7	/	/	/	/
	S3	0	0	0	0,5	0,08	0,94	/
	S6	0	1,32	0	1,09	1,15	2,22	/
	S8	0	/	3,67	0,64	1,59	1,84	3,76

Phase de soulagement thermique

Scénarios		S 1	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8
Stations	S2	0	/	0	1,8	0,75	1,35	0
	S2'	0	0,79	1,63	/	/	/	/
	S3	0	0,13	0,41	0,05	0,48	1,42	/
	S6	0	1,42	0	1,87	0	2,22	/
	S8	0	/	3,45	0	0,2	3,12	1,59

Phase thermique modérée du soir

Scénarios		S 1	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8
Stations	S2	0	/	0	1,8	0,75	1,35	0
	S2'	0	0,43	0	/	/	/	/
	S3	0	0,12	0,77	0,1	0,38	0,69	/
	S6	0	0	0,1	0,16	0,07	0,49	/
	S8	0	/	0	0,1	0,1	0,1	0,37

Réductions des Températures (C°)

Phase thermique modérée du matin

Scénarios		S 1	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8
Stations	S2	0	/	0,26	0,15	0,23	0,4	0,59
	S2'	0	1,16	0,31	/	/	/	/
	S3	0	0,01	0,01	0	0,01	0,43	/
	S6	0	0,05	0	0,4	0	0,59	/
	S8	0	/	0,65	0	0,1	0,1	0,08

Phase thermique chaude

Scénarios		S 1	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8
Stations	S2	0	/	0,5	0,25	0,51	0,26	0,74
	S2'	0	0,9	0	/	/	/	/
	S3	0	0,06	0	0,37	0,15	0,99	/
	S6	0	0,27	0,49	1,35	0,07	1,92	/
	S8	0	/	0,85	0,05	0,2	0	0,46

Phase de soulagement thermique

Scénarios		S 1	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8
Stations	S2	0	/	0,04	0,25	0,32	0,27	0,37
	S2'	0	0,68	0,26	/	/	/	/
	S3	0	0,1	0,04	1,26	0,36	1,3	/
	S6	0	0,11	0,71	1,39	0,1	1,25	/
	S8	0	/	0	0,1	0,0,2	0,36	

Phase thermique modérée du soir

Scénarios		S 1	S 3	S 4	S 5	S 6	S 7	S 8
Stations	S2	0	/	0	0,1	0,2	0,06	0,09
	S2'	0	0,54	0,07	/	/	/	/
	S3	0	0,06	0,09	0,7	0,31	0,75	/
	S6	0	0,06	0,5	1,15	0,07	0,82	/
	S8	0	/	0,08	0,01	0	0,3	0,41